



---

# FFI-RAPPORT

---

19/01695

## Anvendelser av SAR-bilder fra satellitter over land

Reidar L. Lillestøl  
Knut Eldhuset  
Tonje N. A. Hannevik  
Atle Knapskog  
Richard B. Olsen  
Kjell O. Viken



# Anvendelser av SAR-bilder fra satellitter over land

Reidar L. Lillestøl  
Knut Eldhuset  
Tonje N. A. Hannevik  
Atle Knapskog  
Richard B. Olsen  
Kjell O. Viken

---

---

## **Emneord**

Syntetisk apertur-radar (SAR)

Satellitter

Overvåkingssatellitter

Polarimetri

Interferometri

Endringsdeteksjon

## **FFI-rapport**

19/01695

## **Prosjektnummer**

1441

## **Engelsk tittel**

Applications of SAR images from satellites over land

## **Elektronisk ISBN**

978-82-464-3231-1

## **Godkjenner**

Richard B. Olsen, *forskningsleder*

Trygve Sparr, *forsknings sjef*

*Dokumentet er elektronisk godkjent og har derfor ikke håndskreven signatur.*

## **Opphavsrett**

© Forsvarets forskningsinstitutt (FFI). Publikasjonen kan siteres fritt med kildehenvisning.

---

---

## Sammendrag

Denne rapporten gir en bred oversikt over mulighetene for bruk av SAR-bilder (bilder fra syntetisk apertur-radar) over land. Fordi kvaliteten på og tilgangen til radarbilder blir bedre, og fagfeltet går videre, kan SAR-bilder brukes på stadig flere måter over land. Polarimetri kan brukes til å se forskjellen på ulike spredningstyper som bygninger eller vegetasjon. Interferometri kan brukes til mange typer høydemåling, for eksempel topografi, estimering av høyden til objekter og høydeendringer på millimeternivå.

Rapporten beskriver flere typer endringsdeteksjon, som kan brukes til å se forflytning av kjøretøy og andre objekter, og til å se om veier og transportruter har vært i bruk. Endringsdeteksjon kan også brukes til overvåking av jordbruksarealer og til å se endringer i terrenget. Rapporten gir først en generell innføring i SAR og beskriver deretter nåværende og framtidige SAR-satellitter.

---

---

## Summary

This report surveys the possibilities for using SAR (Synthetic Aperture Radar) over land areas. As the quality and accessibility of SAR images get better and better, a wide range of methods are available. Polarimetry can be used to see the difference between scatterers like buildings and vegetation. Interferometry can be used for many types of height measurements, for example topography, estimating the height of objects and detecting height changes on a millimeter scale.

This report describes several types of change detection, which can be used to see displacements of vehicles/ships and other objects. Change detection can also be used to see whether roads and agricultural areas have been in use as well as terrain changes. The report gives an introduction to SAR theory, as well as descriptions of many existing and future SAR satellites.

---

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	3
<b>Summary</b>	4
<b>1 Innledning</b>	9
<b>2 Generelt om SAR</b>	10
2.1 Radarrefleksjon	10
2.2 SAR-satellitter	13
2.3 Speckle	15
2.3.1 Konstruktiv og destruktiv interferens	16
2.3.2 Multitemporalt gjennomsnitt	16
2.4 Slant-range forvrengning	18
2.5 Måldeteksjon	18
2.6 Kardinaleffekt	19
2.7 Tolkning av SAR-bilder og fremkommelighet	20
2.7.1 Veier og menneskeskapte objekter	20
2.7.2 Snø- og is-forhold	21
2.7.3 Skogområder	22
2.7.4 Hva som kan sees med ulik oppløsning	22
2.8 Dekning fra SAR-satellitter	26
2.8.1 Satellittbaners påvirkning på dekning	26
2.8.2 Dekning over bestemte områder	27
<b>3 Sivile SAR-satellitter i bane i dag</b>	30
3.1 RADARSAT-2	32
3.2 Sentinel-1	33
3.3 COSMO-SkyMed	34
3.4 TerraSAR-X og TanDEM-X	35
3.5 PAZ	36
3.6 ALOS-2	36
3.7 ASNARO-2	36
<b>4 Polarisering</b>	37
4.1 Dual-polarisering	38
4.2 Fullpolarimetri	39
4.3 Kompakt polarimetri	40
<b>5 Polarimetriske dekomposisjoner</b>	41
5.1 Koherente dekomposisjoner	41
5.1.1 Pauli-dekomposisjon	41

---

---

5.1.2	Krogager-dekomposisjon	42
5.2	Modellbaserte dekomposisjoner	44
5.2.1	Freeman-Durden	44
5.2.2	Yamaguchi	44
5.3	Sammenlikning av polarimetrisk dekomposisjoner	47
5.3.1	Tradisjonelle dekomposisjoner	47
5.3.2	Kompakt polarimetri	47
<b>6</b>	<b>Interferometrisk og stereo-SAR</b>	<b>54</b>
6.1	Generelt om interferometri	54
6.1.1	Opptaksgeometri for stereo-SAR og InSAR	54
6.1.2	Viktige interferometriske uttrykk	55
6.1.3	Stereo-interferometrisk SAR (StInSAR)	57
6.2	Topografi	57
6.2.1	Enkel estimering av topografi fra stereo-SAR	57
6.2.2	Topografi fra StInSAR	58
6.3	Estimering av høyden til objekter	63
6.3.1	Enkel høydeestimering fra radarskygge	63
6.3.2	Høydeestimering basert på DEM	63
6.3.3	Høydeestimering kun basert på stereo-par	65
6.4	Studie av skogområder rundt Åraksbø	66
6.4.1	Diskusjon rundt koherensbilder	66
6.4.2	Bruk av generert DEM	70
6.5	Ytterligere interferometriske anvendelser	72
6.5.1	Polarimetrisk interferometri (PolInSAR)	72
6.5.2	Måling av brebevegelser	72
6.5.3	Nedsyningsanalyse	72
<b>7</b>	<b>Inkoherent endringsdeteksjon</b>	<b>74</b>
7.1	Visuell sammenlikning av bilder	74
7.2	Fargebilder fra koregistrerte bilder	75
7.3	Divisjon av koregistrerte bilder	80
7.4	Endringsdeteksjon basert på bilder fra ulike sensorer	81
<b>8</b>	<b>Koherent endringsdeteksjon</b>	<b>84</b>
8.1	Koherensbilder for ulike tidspunkter	84
8.2	Sammenlikning av flere koherensbilder	87
8.2.1	Flyplassen midt i bildet	92
8.2.2	Elvene Nitelva og Leira	92
8.2.3	Dyrket mark	92
8.2.4	Skog	92
8.2.5	Bebygde områder	93
8.2.6	Jernbanelinje og veier	93
8.2.7	Endringsbilder	93
8.3	CovAmCoh-metoden	95
<b>9</b>	<b>Deteksjon av skip i havn</b>	<b>97</b>



---

---

9.1	Deteksjon basert på faste havneplasser	97
9.2	Bruk av koherent endringsdeteksjon	100
9.3	Klassifikasjon av skip i havn	100
<b>10</b>	<b>Ground Moving Target Indication</b>	<b>103</b>
10.1	Introduksjon til GMTI	103
10.2	GMTI-metoder med én mottakerkanal	104
10.3	GMTI-metoder med to eller flere mottakerkanaler	105
10.4	GMTI-metoder med flere samarbeidende satellitter	107
<b>11</b>	<b>Framtidige satellitter</b>	<b>109</b>
11.1	Nye systemer fra de man får data fra i dag	109
11.1.1	RADARSAT Constellation	109
11.1.2	COSMO-SkyMed Second Generation	110
11.1.3	Etterfølgere av TerraSAR-X og TanDEM-X	111
11.1.4	Sentinel-1C/1D og etterfølgende systemer	113
11.1.5	Tandem-L	113
11.1.6	Biomass	114
11.1.7	SARah	115
11.2	Systemer fra andre land	115
11.2.1	NovaSAR-S	116
11.2.2	SAOCOM	117
11.2.3	ALOS-4	118
11.2.4	NISAR	119
11.3	Kommersielle konstellasjoner under utvikling	119
11.4	Diskusjon om utviklingstrekk	121
<b>12</b>	<b>Praktiske aspekter</b>	<b>123</b>
12.1	Åpent tilgjengelige satellittdata	123
12.2	Aktuelle programmer	124
12.2.1	Programvare benyttet i denne rapporten	125
12.3	Kurs	125
<b>13</b>	<b>Konklusjon og anbefalinger</b>	<b>126</b>
	<b>Referanser</b>	<b>127</b>
	<b>Vedlegg</b>	
<b>A</b>	<b>Forkortelser</b>	<b>133</b>



---

---

# 1 Innledning

Syntetisk apertur-radar (SAR) har vært et fagfelt med et økende antall anvendelser siden den første SAR-satellitten Seasat ble skutt opp i 1978. Radarbilder kan både brukes til å detektere mål mot bakgrunn, skille mellom ulike typer av tilbakespredere, se høydeforskjeller, oppdage endringer med mer.

Forsvaret har benyttet SAR-bilder operativt siden 1998, først fra den kanadiske RADARSAT-1-satellitten og senere fra blant annet RADARSAT-2. Bruken har primært vært knyttet til deteksjon av skip i norske havområder, og det har vist seg å være en effektiv metode. Det finnes også en rekke anvendelser av SAR over land, og mange av disse metodene kan også kan være nyttige for Forsvaret. Denne rapporten beskriver derfor mulighetene for landanvendelser av SAR.

Kapittel 2 tar for seg generell SAR-teori, og hva som kan være mulig å se i bilder med ulik oppløsning. Kapittel 3 gir en oversikt over aktuelle satellitter i dag. Kapittel 4 omhandler polarisering, som er en viktig elektromagnetisk egenskap ved SAR-bølger. Dette blir videre utnyttet i kapittel 5, som tar for seg noen polarimetriske dekomposisjoner. Kapittel 6 beskriver hvordan radarekkoenes faseinformasjon kan utnyttes i SAR-interferometri, for eksempel for å produsere høydekart. Kapittel 7 og 8 beskriver endringsdeteksjon i SAR-bilder. Inkoherent endringsdeteksjon er metoder som kun benytter bildenes amplitudeinformasjon, mens koherent endringsdeteksjon går lenger og bruker også fasen til radarekkoene. Kapittel 9 tar for seg bruken av SAR-bilder til å detektere skip i havn, og også klassifisering av skipene. Kapittel 10 omhandler Ground Moving Target Indication (GMTI), som er deteksjon av objekter i bevegelse på overflaten. Kapittel 11 gir en oversikt over framtidige relevante satellitter. Til slutt diskuteres praktiske aspekter i kapittel 12, og kapitlet omhandler åpent tilgjengelige data, aktuell programvare og noen tilgjengelige kurs på fagfeltet.

---

---

## 2 Generelt om SAR

### 2.1 Radarrefleksjon

En radar er et aktivt instrument, som sender ut og mottar elektromagnetiske bølger. Prinsippet er vist i Figur 2.1. Radaren sender ut pulser i mikrobølgeområdet, og de vanligste frekvensbåndene er L-bånd (24 cm bølgelengde), C-bånd (6 cm bølgelengde) og X-bånd (3 cm bølgelengde). Radarinstrumentet mottar tilbakespredt signal/ekko fra det som radarpulsen treffer. Opptak kan gjøres uavhengig av skydekke og lysforhold, og dette regnes ofte som den største fordelene med å bruke radarbilder i forhold til vanlige optiske bilder. Radar kan se gjennom skyer, brukes i dårlig vær og om natten. Regnvær kan imidlertid ha en effekt ved kortere bølgelengder enn 4 cm, altså i noen tilfeller for X-bånd.

Radarbilder består av mange små piksler. Hver piksel inneholder en estimering over hvor mye radaren reflekterer i akkurat det området. Mørke områder i bildet betyr at lite av radarenergien er reflektert tilbake mot radaren, mens lyse piksler betyr at mye av energien er reflektert tilbake. Tilbakespredningen fra et mål ved en gitt bølgelengde avhenger av overflatens geometriske struktur, elektriske egenskaper, ruhet og fuktighetsinnhold. I tillegg har polariseringen til radarpulsene og innfallsvinkelen noe å si for tilbakespredningen. Innfallsvinkelen,  $\theta$ , er vinkelen mellom retningen fra satellitten mot jorden (nadir) og fra satellitten ned til et punkt i sporbredde. Vinkelen er indikert på Figur 2.1.

Jo ruere en overflate er, jo mer av radarenergien reflekteres tilbake mot radaren. Områder med vegetasjon er moderat ujevne, og områdene vil sees som grå eller lysegrå i radarbildene. Overflater som heller mot radaren vil ha sterkere tilbakespredning enn helninger som heller vekk fra radaren. En jevn overflate med vann vil oppføre seg som en flat overflate og reflektere innkommende radarpulser bort. Bygninger fremtrer gjerne veldig lyse eller lysegrå avhengig av hvordan de står i forhold til radaren.

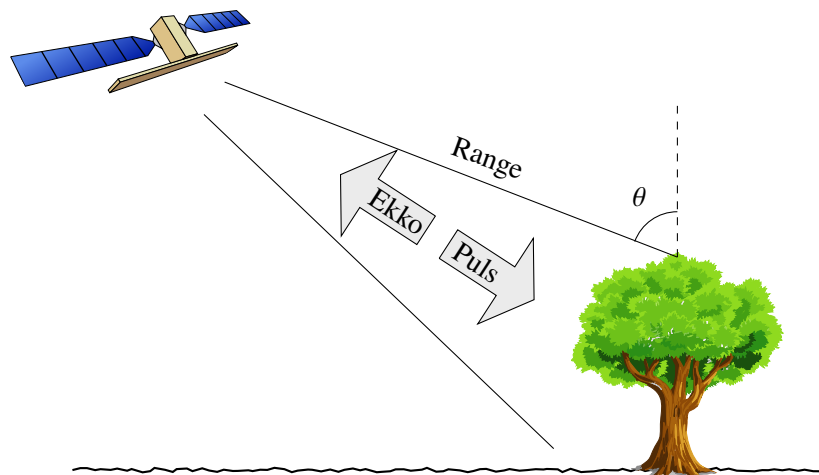
*Spekulær refleksjon* er vist til venstre i Figur 2.2, og dette har vi når en radarbølge blir reflektert fra en helt glatt flate. En perfekt glatt flate vil fungere som et speil og ikke gi noe refleksjon tilbake mot radaren, bortsett fra tilfellet der den innkommende bølgen står normalt på overflaten. En radarbølge som blir sendt mot en ru overflate vil gi refleksjon i alle retninger, kalt *diffus refleksjon*. En svært ru overflate gir sterk refleksjon tilbake mot radaren.

*Hjørnerefleksjon* gir lyse områder i radarbildet. Én eller flere overflater kombineres slik at en større del av radarenergien reflekteres tilbake mot radaren, som vist midt i Figur 2.2. Mest refleksjon oppnås for materialer som har høy elektrisk ledningsevne, for eksempel skip, broer og bygninger.

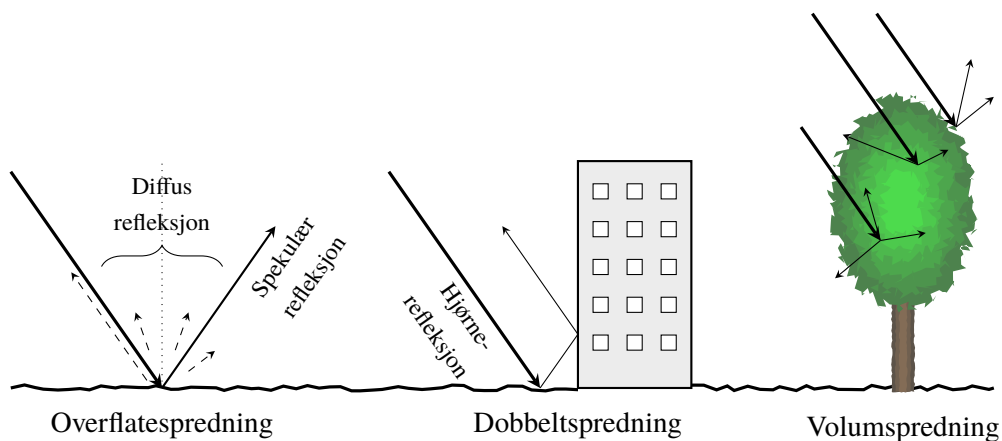
En overflate som er ru for én radarstråle, kan være spekulær for en annen. Betingelsen for om en overflate oppfører seg som en glatt flate er gitt av det såkalte Rayleigh-kriteriet:

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta}, \quad (2.1)$$

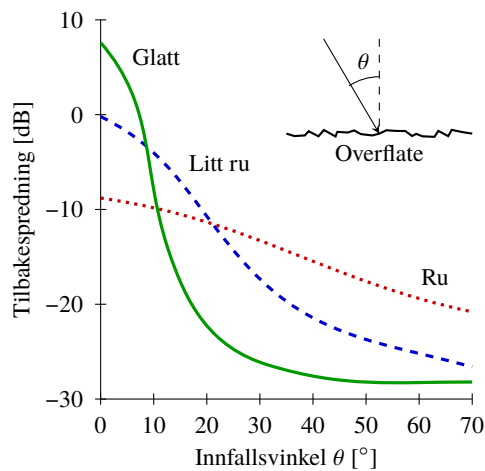
der  $h$  er høyden på overflatevariasjonene,  $\lambda$  er radarens bølgelengde og  $\theta$  er innfallsvinkelen. Som et eksempel opererer RADARSAT-2 i C-båndet med en bølgelengde på 5,5 cm, og innfallsvinkelen



Figur 2.1 Radar-konseptet vist fra en satellitt som sender pulser og mottar ekko fra bakken. Varierende innfallsvinkel  $\theta$  gir ulik tilbakespredning til satellitten.



Figur 2.2 Ulike typer spredning av radarsignaler. De tre typene overflatespredning, dobbeltspredning og volumspredning er ofte brukt for modellering.



Figur 2.3 Tilbakespredning som funksjon av innfallsvinkel for varierende flater. En ru flate vil ha mer jevn tilbakespredning i forhold til en glatt flate, som er veldig avhengig av innfallsvinkel.

varierer mellom  $10^\circ$  og  $60^\circ$ . En flate vil da framstå som ru hvis overflatevariasjonene er mer enn 0,7–1,4 cm.

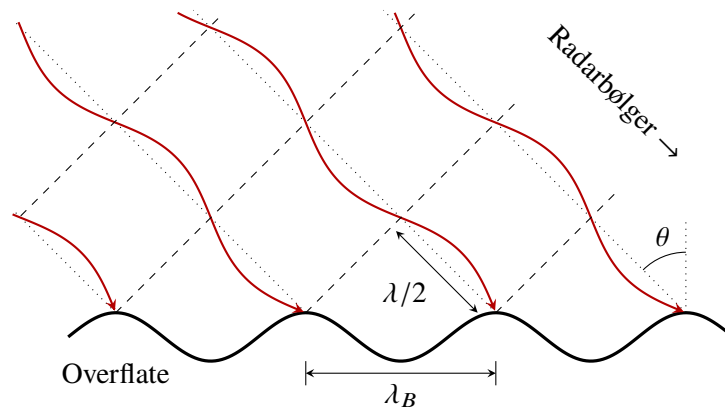
*Volumspredning* forekommer når radarenergien trenger gjennom den øvre overflaten til et volum, for eksempel i bladverket til et tre som vist til høyre i Figur 2.2. Det forekommer da spredning av energien innenfor volumet eller mediet, og vanligvis skjer det mange refleksjoner innenfor volumet. Dette kan både føre til at et bilde blir lysere eller mørkere (avhengig av hvor mye som reflekteres tilbake til radaren).

På grunn av de ulike spredningstypene kan det oppstå lyse og mørke områder i bilder. Et hus gir hjørnerefleksjoner som kan føre til lyse flekker, trær gir volumspredning som kan føre til at bildet blir enten lyst eller mørkt, mens en helt jevn overflate gir mørke områder i bildet. Styrken på det tilbakespredte signalet avtar når SAR-en ser mer og mer skrått utover, altså med økende innfallsvinkel  $\theta$ . Signalet vil da avta mest for jevne overflater. Figur 2.3 viser tilbakespredning som funksjon av innfallsvinkel for overflater med varierende ruhet.

Høy fuktighet på jordoverflata gir liten gjennomtrengning av radarstrålen, mens tørr overflate gir større gjennomtrengning. Fuktighet har betydning for tolkingen av SAR-tilbakespredning fra for eksempel jorder gjennom sesongen, og det samme gjelder også overflater med snø og isbreer. Fuktigheten vil variere med temperatur, for eksempel frossen jord og snø i flere minusgrader.

Periodiske strukturer på bakken kan framstå svært lyse dersom lengden mellom bølgetoppene er omtrent lik bølgelengden til den innkommende radarbølgen. Da oppstår det såkalt *Bragg-spredning* ved en gitt innfallsvinkel. Bragg-spredning kan blant annet skje over pløyde jorder, bølgeblikkplater, garasjetak og havoverflaten. Dette gir en kraftigere refleksjon enn vanlig, fordi det oppstår en forsterket tilbakespredning/resonans fra de reflekterte signalene som adderes i fase. Prinsippet er vist i Figur 2.4, og Bragg-bølgelengden  $\lambda_B$  der fenomenet inntreffer er gitt ved:

$$\lambda_B = \frac{n\lambda}{2 \sin \theta}. \quad (2.2)$$



Figur 2.4 Bragg-spredning fra en overflate med mønster.

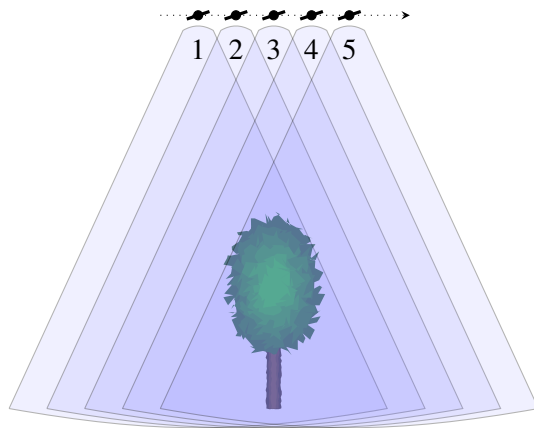
Her er  $n$  et heltall og  $\lambda$  radarens bølgelengde. For å gi et eksempel vil RADARSAT-2, som opererer i C-båndet med en bølgelengde på 5,5 cm og gjør et opptak med innfallsvinkel på  $25^\circ$ , oppleve forsterket refleksjon for mønstre med avstand på 6,5 cm i forhold til radaropptaket. Dette kan for eksempel være blikkplater på tak.

## 2.2 SAR-satellitter

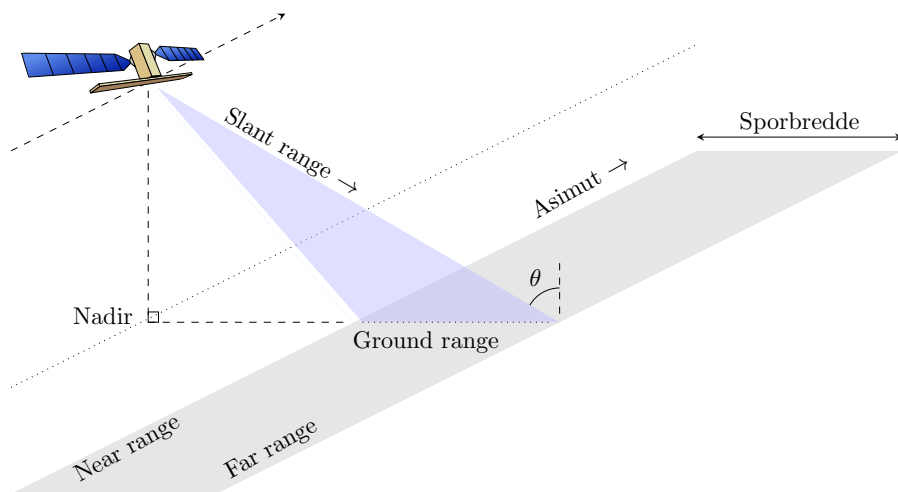
Ved hjelp av syntetisk apertur-radar-teknikken kan man få god oppløsning i to dimensjoner. Ved å sende ut en kort radarpuls, får man god oppløsning i retningen satellitten ser, kalt *range* (altså vekk fra satellittbanen). Ved å evaluere små Doppler-skift, får man god oppløsning i flyretningen, kalt *asimut* (altså langs satellittbanen). Dette gjøres ved å syntetisere en lang antenne (apertur) ved å samle inn radarekko over flere sekunder langs flybanen. Figur 2.5 viser SAR-prinsippet der et mål belyses med flere radarpulser fra flyet/satellitten. De tilbakespredte pulsene fra hvert ekko registreres, og lengden på den syntetiserte antenne er avstanden mellom punktene der målet går inn og ut av radarstrålen [1]. Dette gjør at man blir sittende med mye mer data fra samme opptaksområde, og har mulighet til å oppnå en god oppløsning også i flyretningen. Figur 2.6 viser SAR-geometrien med sporbredde («swath width»), innfallsvinkel («incidence angle») og flyretning.

Radarsensorene «ser» på skrå ut til siden av satellitten ned mot jordoverflaten, med radarbølgelengder som går uhindret gjennom atmosfæren. Dette gir mulighet for avbildning som i stor grad er uavhengig av lys- og værforhold. Bølgelengder på SAR-satellittene velges ut ifra hva som er prioritetsområdene til satellittene. For eksempel går gjennomtrengning som en funksjon av SAR-frekvensen/-bølgelengden, der lengre bølgelengder trenger lenger ned i vegetasjon og tørr jordoverflate eller snø. Figur 2.7 illustrerer dette prinsippet, og L-bånd tilsvarende rundt 24 cm bølgelengde, C-bånd rundt 6 cm og X-bånd rundt 3 cm. L-bånd kan være nyttig over land, og har vært brukt på Seasat og ALOS-satellittene. C-bånd har vært mye brukt blant annet på satellittene ERS-1, ERS-2, RADARSAT-1, RADARSAT-2, ENVISAT, Sentinel-1A og Sentinel-1B. X-bånd har vært brukt på TerraSAR-X, TanDEM-X og COSMO-SkyMed-satellittene.

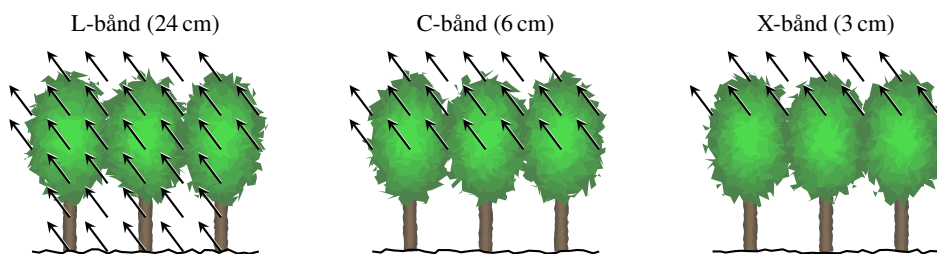
Radarsatellitter går typisk i en lav jordbane (500–800 km høyde), som oftest tilnærmet fra pol til pol, og i et baneplan som maksimaliserer belysning på solcellepanelene for strømproduksjon. Omløpstiden er 95–100 minutter, og satellitthastigheten er på rundt 7 km/s.



Figur 2.5 SAR-prinsippet der scenen blir belyst mange ganger.



Figur 2.6 Geometri for SAR-opptak som viser viktige uttrykk.



Figur 2.7 Gjennomtrengningen er avhengig av bølgelengden til SAR-instrumentet.



---

---

Sivile SAR-systemer produserer data med en romlig oppløsning på alt fra 50 cm til 100 m. Militære systemer kan gi enda bedre oppløsning. Valg av oppløsning er forbundet med en avveining mellom arealdekning og detaljer man kan se i bildene. Stor arealdekning fører til lavere oppløsning, både på grunn av begrensninger i SAR-teknologien og på grunn av begrensning i nedlasting av store datamengder fra satellitt til bakken.

Tradisjonelle radarsatellitter har vært store (over 2 tonn), krever mye strøm og genererer mye varme. Dette betyr at SAR-instrumentet har en begrenset operasjonstid per omløp for å få tid til å lade batterier og dumpe varme. Baneplanet er som oftest orientert slik at satellitten konstant befinner seg i overgangen mellom natt og dag (skygge og sol) med nesten permanent belysning på solpanelene. SAR-antennen er typisk et panel med elementer som støtter elektronisk styring og bruk av to eller flere polarisasjoner. Størrelsen varierer med radarfrekvensen.

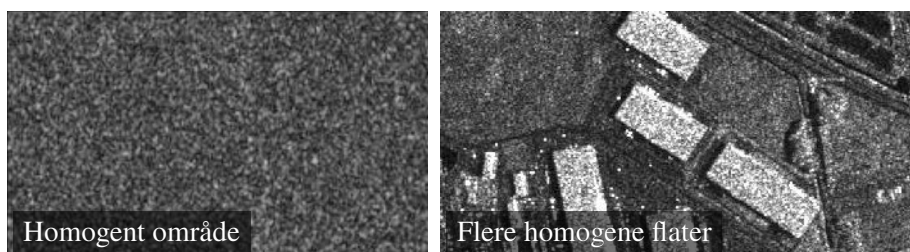
Romlig oppløsning i bildene er avhengig av en rekke parametere. De mest grunnleggende er pulsbåndbredde og Doppler-spekteret for mottatt signal. Sistnevnte er forbundet med radarens pulsrepetisjonsfrekvens (PRF).

## 2.3 Speckle

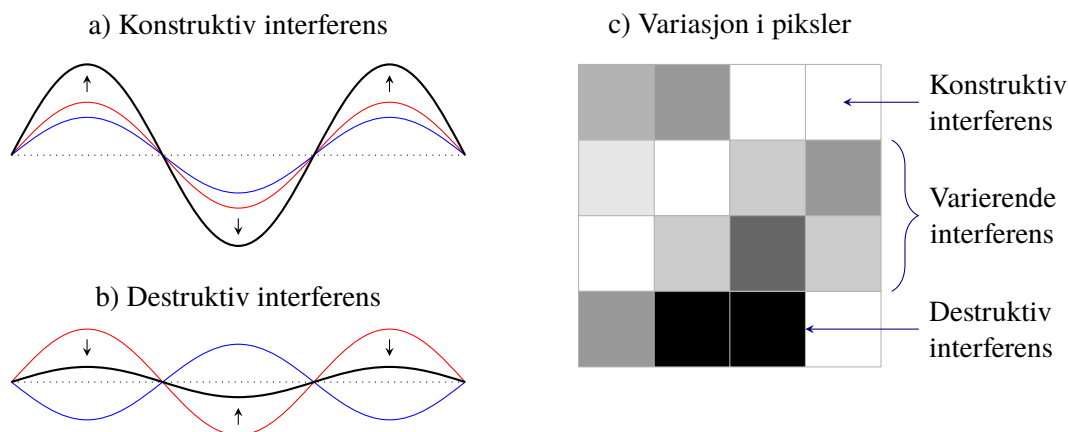
Speckle, eller kornstøy som det også kalles, er naturlig støy som forringer bildekvaliteten. Termisk støy skyldes temperatur og systemegenskaper, og fører til et blandet signal, mens speckle er et resultat av en måling av et komplekst signal. Speckle er derfor støyliknende og ikke støy i ordets vanlige betydning. Termisk støy er additiv, mens speckle er multiplikativ støy. Dette gjør at sterkere retursignaler også vil gi mer speckle-støy. Termisk støy kan derimot reduseres ved å øke radareffekten eller eventuelt å redusere systemtemperaturen.

Speckle sees som varierende lyse og mørke prikker i et homogent område der man egentlig ikke ville ha forventet variasjoner i gråtoner (slik som rullebanen på en flyplass). Figur 2.8 viser et homogent område med mye speckle til venstre og flere homogene flater med støy til høyre. Effekten oppstår ikke bare i SAR-bilder, men i alle produkter fra *koherente* bildesystemer. Dette vil si systemer som tar hensyn til både amplituden og fasen til det tilbakespredte signalet.

Ved deteksjon av mål mot en bakgrunn kan man få problemet med at en lys piksel enten kan være et punktmål eller bare speckle. I denne anvendelsen får man derfor en statistisk usikkerhet. Hvor lys en piksel er avhenger av egenskapene til reflektorene i oppløsningscellen og fasesammenhengene mellom retursignalene fra reflektorene.



Figur 2.8 Venstre: Speckle over et homogent område i Nederland. Høyre: Speckle over flere homogene flater ved Indianapolis, USA. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© Høyre: Rådata levert fra ESA/UK-PAF.)



Figur 2.9 a) Konstruktiv interferens der bølgene adderes i fase. b) Destruktiv interferens som på grunn av motfase kansellerer signalene. c) Et eksempel på retursignalene fra et homogent mål.

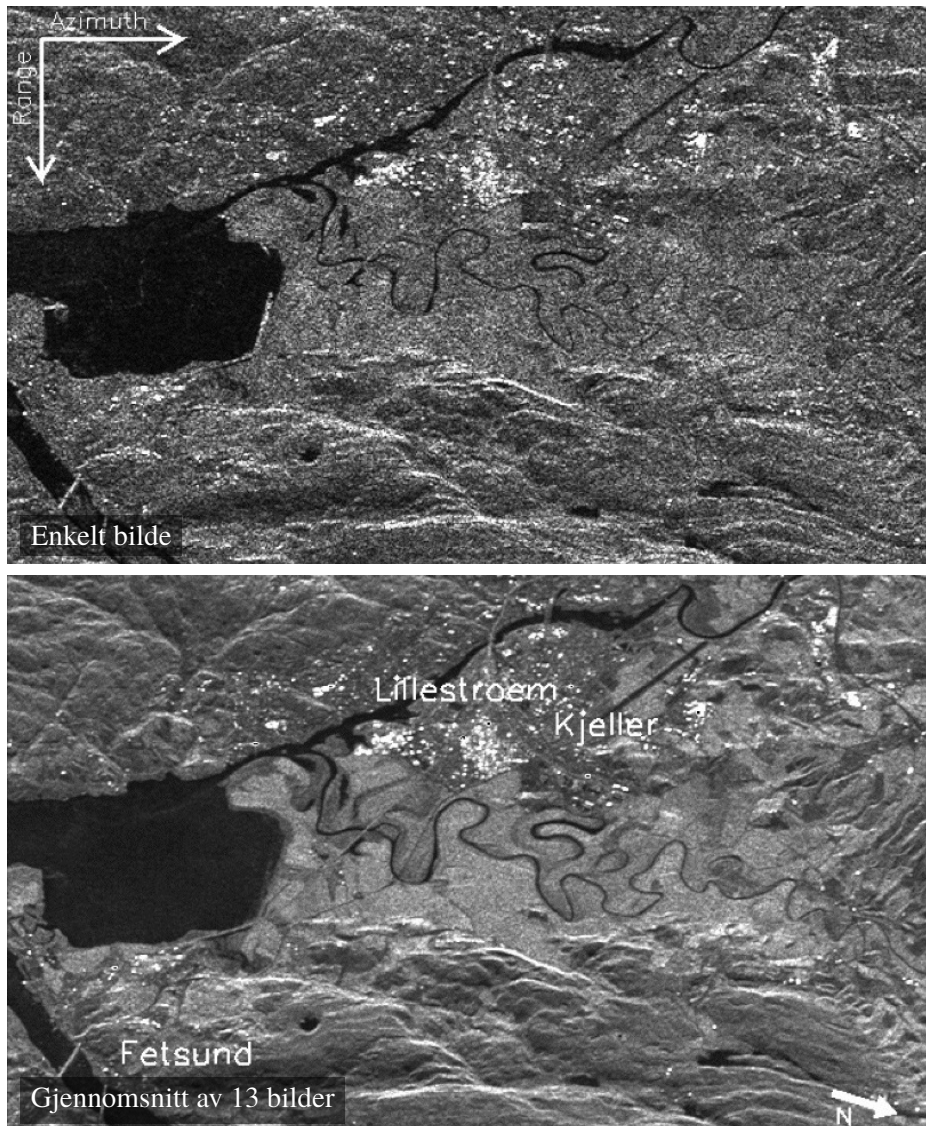
### 2.3.1 Konstruktiv og destruktiv interferens

Innenfor en oppløsningscelle på bakken er det ikke bare én reflektor, men mange små. Dette gjør at ekkoet som når satellitten i løpet av SAR-ens integrasjonstid er en sum av ekkoene fra mange punkter som ikke kan skilles fra hverandre. De forskjellige reflektorene kan være hjørner, steiner, greiner og annet. Resultatet for hver enkelt piksel i bildet blir derfor en sum av komplekse tall (med amplitude og fase). Speckle oppstår på grunn av interferens av retursignalene, og dette gir bildet et kornete utseende som vist i Figur 2.9. Faseforskjellen mellom reflektorer i samme oppløsningscelle kan tilsvare flere hundre bølgelengder for en type radar som brukes på enkelte satellitter. Dette gjør at tilbakespredningen for en bestemt piksel kan bli en stor sum av parallelle elektromagnetiske bidrag, eller den kan bli omtrent null hvis bidragene fra de enkelte spredene kansellerer hverandre. Over et større areal vil pikslene ha en statistisk fordeling som er eksponentielt fordelt når pikslene er normalisert i forhold til energien til tilbakespredningen.

### 2.3.2 Multitemporalt gjennomsnitt

Siden det kan være mye støy i SAR-bilder, er det mulig å bruke en metode som kalles *multitemporalt gjennomsnitt*, og dette kan redusere speckle-støyen i bildene ved at man midler over mange bilder. Multitemporalt gjennomsnitt er fordelaktig hvis det ikke er forandring i tilbakespredningen fra bilde til bilde. Figur 2.10 viser midling av 13 SAR-bilder over Lillestrøm (såkalt "multitemporal averaging"). På grunn av støyreduksjonen ser man at mange flere detaljer trer frem etter midlingen.

Det er også mulig å utføre multitemporal endringsdeteksjon. Ved hjelp av denne teknikken er det mulig å studere hvordan tilbakespredningsprofilen endrer seg over tid (for eksempel gjennom en hel vekstsesong), og man kan studere hvordan tilbakespredningen fra gitte klasser varierer over tid innenfor en sesong eller over kortere eller lengre tid. Dette kan gi ytterligere informasjon for bedre å kunne skille mellom visse overflatetyper i en klassifiseringsprosess.

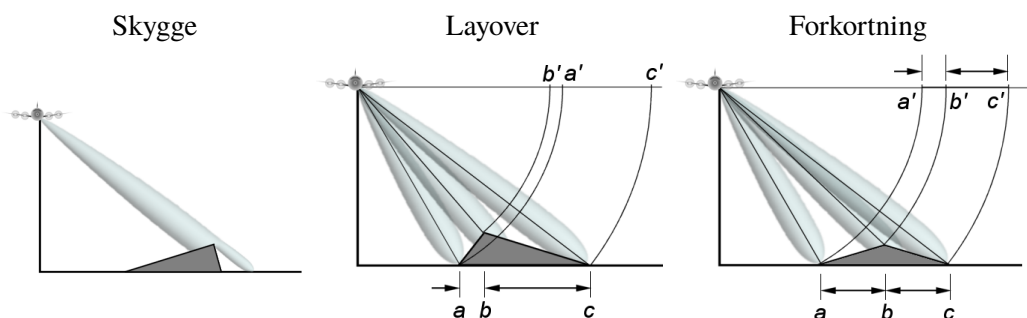


Figur 2.10 Midling av 13 SAR-bilder tatt over Lillestrøm med satellitten ERS-1 i 1991. Pikselstørrelsen er rundt 20 m. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© SAR amplitudebilder levert av ESA, videre prosessering FFI)

## 2.4 Slant-range forvrengning

Radarer måler avstanden til et mål i slant-range istedenfor den riktige avstanden langs bakken, som illustrert i Figur 2.6. Dette resulterer i en varierende bildeskala når man går fra *nær-range* (nærmest radaren) til *far-range* (lengst unna). I tillegg kan det oppstå flere effekter i SAR-bilder som er illustrert i Figur 2.11:

- *Skygge-effekten* er vist til venstre i figuren, og det vil si at mål som ligger i skyggen av et fjell ikke kommer med på radar-bildet. Skygge-effekten øker med økende innfallsvinkel akkurat slik som skyggene blir lengre på kvelden når sola går ned.
- *Layover-effekten* er vist i midten av figuren, og dette forekommer når radarstrålen når toppen av for eksempel et høyt fjell (*b*) før den når bunnen av fjellet/basen (*a*). Retursignalet fra toppen av fjellet vil da bli mottatt av radaren før retursignalet fra bunnen når fram. Som et resultat av dette blir toppen av fjellet lagt over mot radaren fra dens sanne posisjon på bakken, og ligger over bunnen av fjellet.
- *Foreshortening* er vist til høyre i figuren, og dette skjer når radarstrålen rekker bunnen av fjellet som har helning mot radaren før den når toppen av fjellet. Fordi radaren måler avstand i slant-range, vil helningen fra punkt *a* til punkt *b* framstå som kortere, og lengden av helningen vil bli fremstilt feil i radarbildeplanet.



Figur 2.11 Tre effekter som forekommer på grunn av radarens skrå innfallsvinkel, som er skygge, layover og foreshortening. (Kilde: [www.radartutorial.eu](http://www.radartutorial.eu))

## 2.5 Måldeteksjon

For å detektere et mål må man kunne kjenne igjen punktmål fra en radarbakgrunn. Menneskeskapt objekter kan i noen tilfeller sees som lyse punktmål foran en mørkere bakgrunn i radarbildene. Kontrasten (*Target to Clutter Ratio, TCR*) kan defineres som forholdet mellom et måls normaliserte radartverrsnitt og den gjennomsnittlige radarrefleksjonen fra den omkringliggende bakgrunnen. Dersom refleksjonen fra bakgrunnen er svak, for eksempel ved stor innfallsvinkel, kan bakgrunnsignalet være dominert av termisk støy i radarinstrumentet. TCR angir dermed relativ betydning av det signalet fra målet i forhold til bakgrunnen (bakgrunnsstøyen) i målingen.

Sannsynligheten for å detektere et mål avhenger av bakgrunnen, innfallsvinkelen, samt størrelse, orientering og eventuell bevegelse til målet. Ved ru bakgrunns-overflate øker refleksjonen fra

---

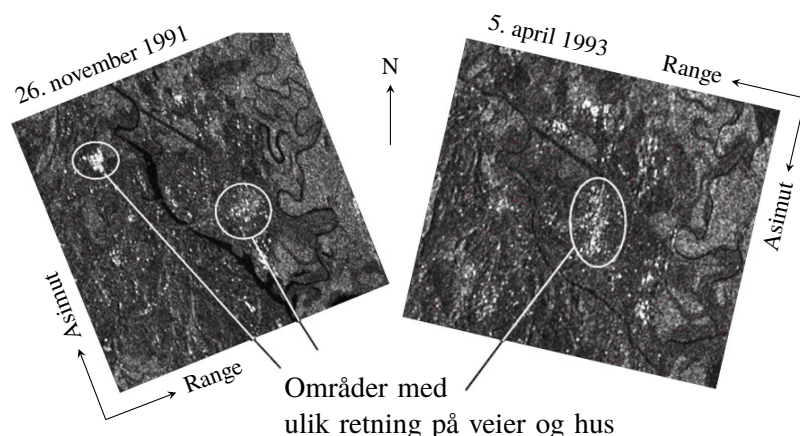
---

bakgrunnen som vist i Figur 2.3, og sjansen for å detektere målet minker. Refleksjon fra overflaten minker med økende innfallsvinkel, mens refleksjon fra et menneskeskapt mål ikke varierer så mye med innfallsvinkelen. Vi får derfor som oftest høyere TCR ved økende innfallsvinkel, med tilsvarende høyere sannsynlighet for å detektere et mål. Radartverrsnittet til et mål avhenger av målets orientering, byggematerialer, tredimensjonale struktur, koherens og multirefleksjon (også fra bakgrunns-overflaten).

I måldeteksjon er oppgaven til en algoritme å finne én enkelt eller en gruppe piksler som har annerledes karakteristikk enn bakgrunnen. Geofysiske prosesser, speckle og støy har innvirkning på piksel-statistikken i SAR-bilder. De geofysiske prosessene varierer mye innenfor et enkelt bilde slik at tilbakespredningen fra bakgrunnen kan ha forskjellige verdier fra piksel til piksel.

## 2.6 Kardinaleffekt

Noen objekter kan medføre kardinaleffekt, som er en høyst retningsbestemt effekt hvor sterk tilbakespredning bare skjer innenfor visse observasjonsvinkler. Dette kan for eksempel være bygninger med en bestemt himmelretning eller jorder med periodiske strukturer. Figur 2.12 viser et eksempel med kardinaleffekt over Lillestrøm for to SAR-bilder tatt med forskjellige innfallsvinkler. Det ene bildet er tatt *ascending* (det vil si når satellitten beveger seg nordover) og det andre er tatt *descending* (når satellitten beveger seg sørover). Tre områder i bildene skiller seg ut der det er en bestemt retning på husene og gatene. Kardinaleffekten medfører svært forskjellig tilbakespredning fra de samme områdene i SAR-bildene.



Figur 2.12 Kardinaleffekten vist over Lillestrøm med pikselstørrelse på rundt 20 m. Sterk refleksjon kommer fra ulike deler av byen på grunn av orienteringen til gatene og dermed også husene. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© SAR amplitudebilder levert av ESA, videre prosessering FFI)

---

---

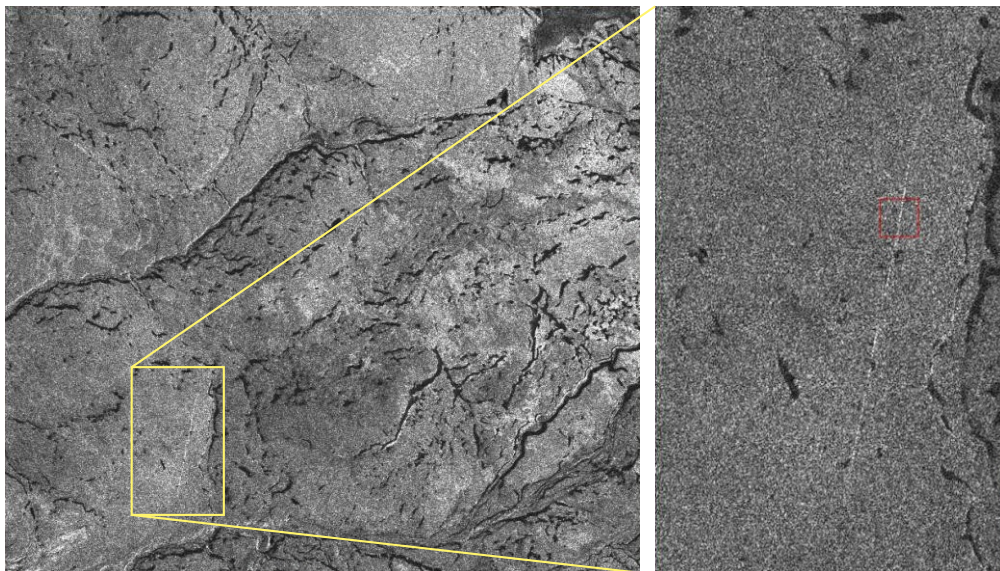
## 2.7 Tolkning av SAR-bilder og fremkommelighet

### 2.7.1 Veier og menneskeskapte objekter

Veier fremstår ofte som mørke linjer i SAR-bilder, siden radarekkoet spres vekk fra satellitten på samme måte som for stille vannflater. I noen tilfeller kan grøftekanter gi en sterk tilbakespredning til satellitten, som gir lyse linjer ved siden av de mørke. Det er imidlertid nødvendig at bildets oppløsning er tilstrekkelig liten i forhold til veiens bredde, noe som ofte betyr rundt én meters oppløsning for mindre skogsveier.

Dersom veien går over en bro kan det ofte være sterke reflektorer som metallkonstruksjoner. Broene vil fremstå tydelige når satellitten flyr i broens lengderetning, siden dette kan gi sterke dobbel- og trippel-reflekser med vannet under. Med tilstrekkelig oppløsning kan det da være mulig å estimere brotype, spenn og liknende.

Menneskelagde objekter som gjerder og kraftmaster har ofte sterkt reflekterende overflater, som kan gi varierende grad av tilbakespredning. Hvor synlige slike objekter er i SAR-bilder avhenger av en rekke faktorer, og som et eksempel gir en stor innfallsvinkel en sterkere kontrast mot bakgrunnen [2]. Tynne objekter som gjerdestolper vil best detekteres med en bølgelengde som tilsvarer tykkelsen, slik som X-bånd. Slike objekter er også avhengig av en tilstrekkelig bildeoppløsning på én eller noen få meter for å bli sett. Et eksempel på synlighet av gjerder er vist i Figur 2.13.



Figur 2.13 Reingjerder i et TerraSAR-X-bilde med 2 m oppløsning er synlige, men kun i lengderetningen til satellitten. Signalet kan her være reflektert fra gjerdestolpene. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (TerraSAR-X data: © raw data DLR, 2010, provided by INFOTERRA 2010).

---

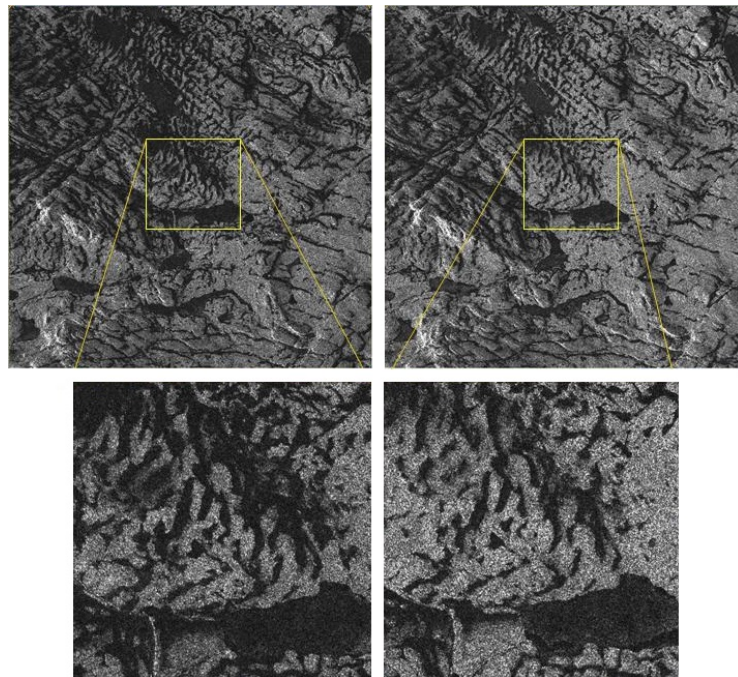
---

## 2.7.2 Snø- og is-forhold

Snø og is kan gi ulik tilbakespredning avhengig av alder og fuktighet. Våt snø vises gjerne som sorte flekker i bildet der det er lite tilbakespredning til satellitten. Et eksempel på våt snø er vist i Figur 2.14. Hvis man undersøker fremkommelighet i terrenget, kan det ofte antas at snøen smelter sist fra groper i terrenget. Snødybde kan imidlertid være vanskelig å estimere fra SAR-bilder.

Fremkommelighet i fjellområder med snø vil være hindret ved snøskredfare, både fordi det er farlig å oppholde seg i området med skredvarsel og fordi store snømasser kan være flyttet etter eventuelle skred. Det arbeides med deteksjon av skred både i SAR og i optiske bilder, og Norsk Regnesentral har blant annet demonstrert automatisk skred-deteksjon basert på endringsdeteksjon fra SAR-bilder [3].

Islagte vann kan i noen tilfeller skilles fra åpen vannflate. Ved stor innfallsvinkel vises ofte åpne vann som mørke flater siden radarekkoet reflekteres vekk, eller mørk grå ved små krusninger. Lyse grå flater eller større strukturer kan tyde på is på vannflaten, blant annet fordi det oppstår økt volumspredning fra dette laget. Istykkelse kan imidlertid være vanskelig å estimere direkte, og kan være nødvendig å estimere på bakken. Estimering av snø- og is-forhold kan med hell foretas ved ulike radarfrekvenser. Dette kan også foretas ved grovere oppløsning enn det som kreves for deteksjon av veier og små menneskeskapt strukturer. Bildet i Figur 2.14 er tatt med en oppløsning på 3 m, men tidligere resultater har også gitt en god oversikt med kun 25 m oppløsning [2].



Figur 2.14 Et område nordøst for Kvænangsbotn i Finnmark med mørke flekker som antyder våt snø. RADARSAT-2 Ultrafine mode i HH-polarisering. De to bildene er tatt 2. og 6. juni 2010, og viser noe forskjell i mengden våt snø. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (RADARSAT-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010.)

---

---

### 2.7.3 Skogområder

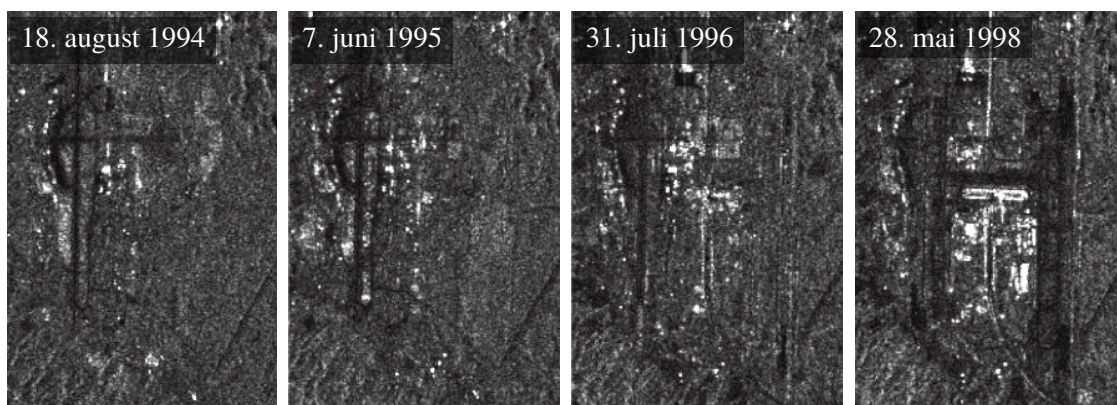
Som nevnt i kapittel 2.2 vil SAR medføre ulik gjennomtrenging av materialer avhengig av signalets bølgelengde. Som et eksempel vil L-bånd-signaler med 24 cm bølgelengde trenge gjennom mye av vegetasjonen, mens en X-bånd SAR-sensor vil få volumspredning i de øverste lagene i vegetasjonen. Dette prinsippet kan brukes til å estimere biomasse, skoghøyde og dermed også framkommelighet. En digital høydemodell kan brukes sammen med høydemodellen generert fra en X-bånd SAR, og forskjellen mellom de to kan modelleres som biomasse over bakken. Denne teknikken er diskutert i kapittel 6.4, og har også blitt brukt til å estimere biomasse i skogområder i Tanzania[4].

På begynnelsen av 2020-tallet er det planlagt å skyte opp to satellitter kalt Tandem-L, som er nærmere beskrevet i kapittel 11.1.5. Disse satellittene vil operere i L-bånd, som penetrerer vegetasjon i større grad enn C- og X-bånd-satellitter. Tandem-L skal være bra til å beregne trehøyde, biomasse og liknende, og skal blant annet kunne lage en tomografi (3D-representasjon) av skogområder ved å skanne skogen fra flere vinkler.

### 2.7.4 Hva som kan sees med ulik oppløsning

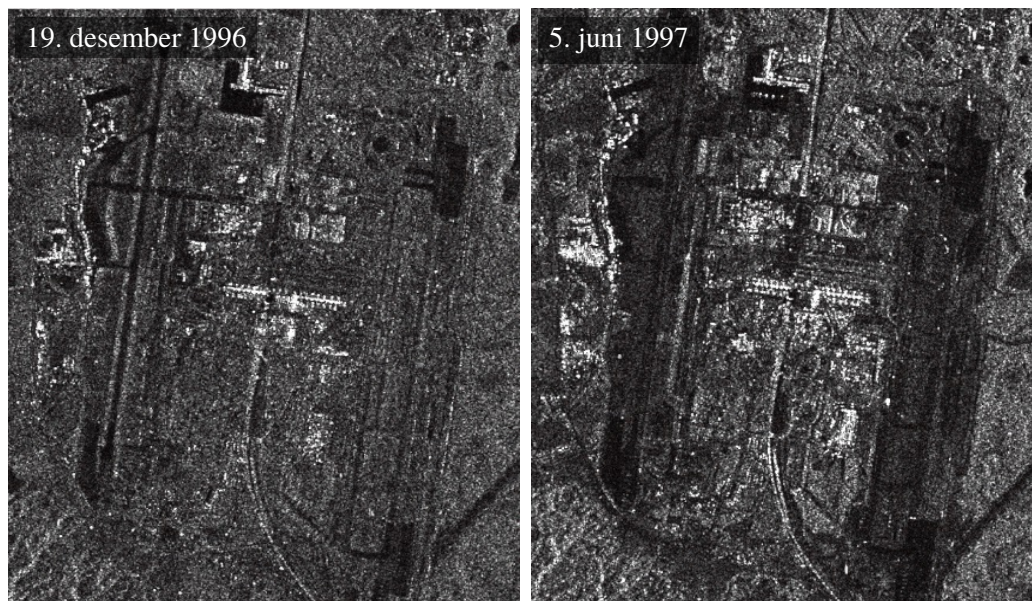
Oppløsningen i en SAR-modus har mye å si for hva som er synlig i bildene, og dette delkapitlet vil gi eksempler med ulik oppløsning. Det blir også vist noen sammenlikninger med optiske bilder. For synligheten av spesifikke objekter i bilder refereres det også til en tidligere FFI-rapport [5], som gir en detaljert beskrivelse av bilder fra Rena leir tatt med RADARSAT-2 og COSMO-SkyMed. Det må bemerkes at oppløsning og pikselstørrelse i bilder ikke vil være helt like, for eksempel blir oppløsningen redusert ved midling over flere bilder.

Figur 2.15 viser utbyggingen av ny flyplass på Gardermoen i SAR-bilder fra den tidligere ERS-satellitten med grov oppløsning på 25 m. De fire bildene ble tatt i løpet av flere år fra 1994 til 1998. Flere bilder fra RADARSAT-1 (forløperen til dagens operasjonelle satellitt) fra utbyggingen av Gardermoen er vist i Figur 2.16. Moden som ble brukt ga 9 m oppløsning, og man ser mange flere detaljer enn i bildene fra ERS.



Figur 2.15 ERS-bilder med 25 m oppløsning viser utbyggingen av ny flyplass på Gardermoen. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© SAR rådata levert av ESA, prosessering utført på FFI)



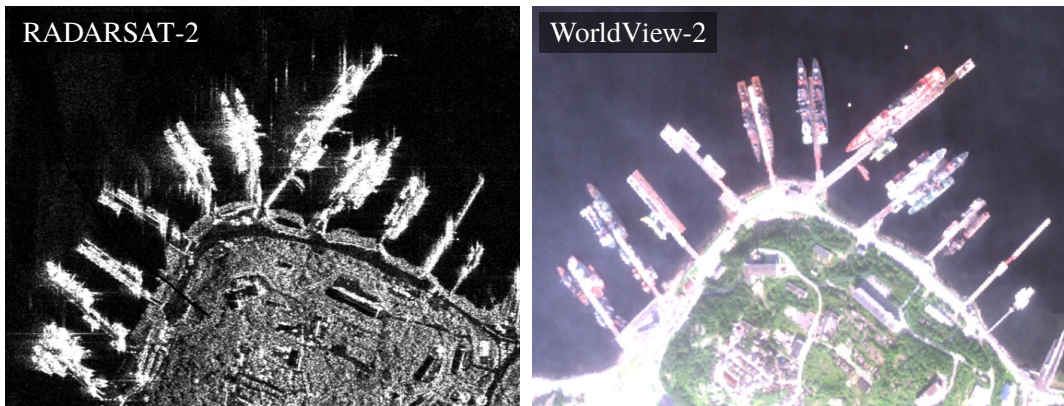


Figur 2.16 RADARSAT-bilder med 9 m oppløsning viser utbyggingen av ny flyplass på Gardermoen. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© SAR-bilder levert av RSI)

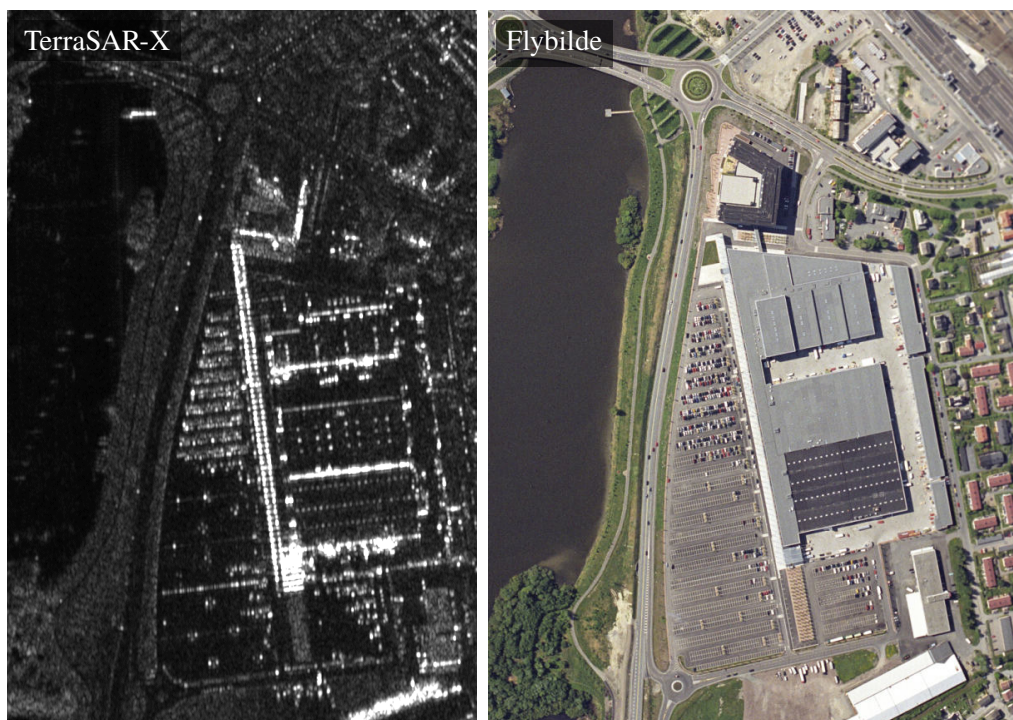
Figur 2.17 viser en sammenlikning mellom et RADARSAT-2 Spotlight-bilde og et optisk bilde fra WorldView-2 over havna i Severomorsk. Begge er tatt i løpet av to dager med 1 m oppløsning. Det går an å se mange detaljer i SAR-bildet. En kan se hvor det ligger skip og hvor det ikke ligger skip, og det er til en viss grad mulig å antyde hvilken type skip som er avbildet.

Figur 2.18 viser et annet eksempel på sammenlikning av et SAR-bilde med 1 m oppløsning og et optisk bilde over Norges Varemesse i Lillestrøm. Det er mulig å se detaljer om hvor biler er parkert og en kan se detaljer på taket.

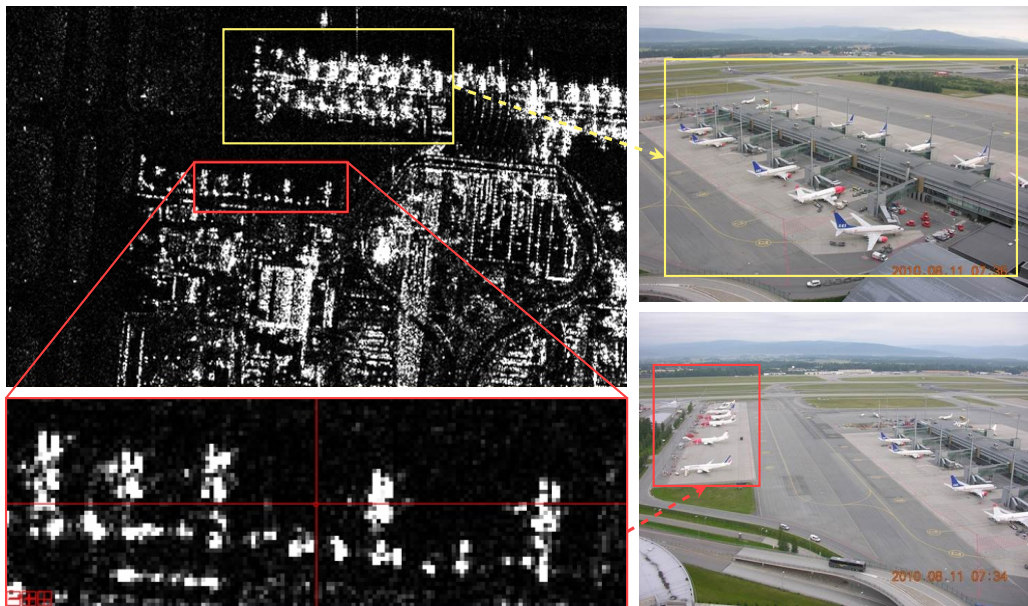
Figur 2.19 viser et utsnitt av et RADARSAT-2 UltraFine-bilde over Gardermoen. Det ble tatt samtidige optiske bilder fra flytårnet, og disse er vist til høyre i figuren. Figuren viser at det er mulig å se fra SAR-bildet om det står fly parkert ved hver av gatene. Figur 2.20 viser utsnitt av to RADARSAT-2-bilder i moden UltraFine med 3 m oppløsning i HH-polarisering fra 24. mai og 11. juli 2010. Det er mulig å følge med på hvor det står biler parkert og hvilke områder som er i bruk og ikke er i bruk.



Figur 2.17 Venstre: Bilde fra RADARSAT-2 over Severomorsk 23. august 2015 tatt med Spotlight-modus med rundt 1,5 m oppløsning. Høyre: Tilsvarende optisk bilde fra WorldView-2 fra 25. august 2015 med rundt 1 m oppløsning.



Figur 2.18 Venstre: Norges Varemesse i Lillestrøm sett med TerraSAR-X Spotlight-modus med 1 m oppløsning. Høyre: Flybilde over det samme området. (© SAR-bilde levert av DLR, flybilde fra [www.norgeibilder.no](http://www.norgeibilder.no))



Figur 2.19 Venstre: RADARSAT-2 UltraFine-bilde med 3 m oppløsning over Gardermoen, fra 11. august 2010. Høyre: Optiske bilder tatt fra flytårnet. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.



Figur 2.20 RADARSAT-2 UltraFine-bilder med 3 m oppløsning over parkeringsplasser på Gardermoen fra sommeren 2010. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.

## 2.8 Dekning fra SAR-satellitter

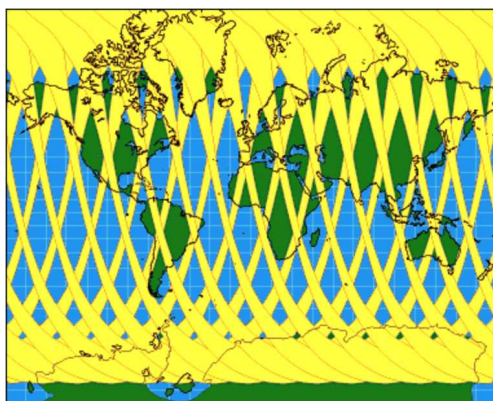
### 2.8.1 Satellittbaners påvirkning på dekning

Jordobservasjonssatellitter som SAR går ofte i solsynkrone satellittbaner. Disse banene er karakterisert ved å være nesten polare, med en helningsvinkel på rundt  $98^\circ$  (en rent polar bane ville ha vært  $90^\circ$  og gått rett over polene). Helningsvinkelen på rundt  $98^\circ$  gjør at satellittene får en såkalt *presesjon* på rundt  $1^\circ$  om dagen i forhold til solen. Dette gjør at de preseserer en full runde på et år og dermed opprettholder samme forhold til solen hele tiden.

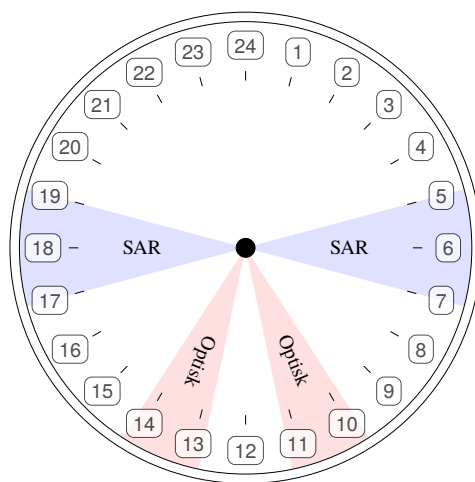
Solsynkrone baner for SAR blir ofte valgt med satellitthøyde på 550–800 km over bakken som et kompromiss mellom mulig bildekvalitet og atmosfæreforhold. Dette medfører en omløpstid rundt jorden på rundt 100 minutter og dermed rundt 14 omløp i døgnet. Jorden roterer samtidig, så satellittene vil dekke nærliggende områder ved hver passering. Dersom satellittene har kontinuerlig opptak, vil de ofte være i stand til å dekke hele jorden i løpet av noen dager.

Siden de solsynkrone banene er nesten polare, vil mange av passene dekke de samme områdene rundt polene. Rundt ekvator er det imidlertid lenger mellom hver passering. Dermed kan man forvente hyppigere dekning i nordområdene enn lenger sør. Som et eksempel er det i Figur 2.21 vist opptaksmulighetene for en av opptaksmodusene på RADARSAT-2.

Siden de solsynkrone banene følger en solsyklus, vil de dekke samme område på omtrent samme tid av døgnet hver gang, som illustrert i Figur 2.22. SAR-satellitter går ofte i såkalte «dawn/dusk»-baner, og besøker da områder ved daggry og ved skumring (for eksempel kl. 06 og kl. 18). Hovedårsaken til valg av dawn/dusk er at SAR-satellittene krever mye strøm, og i denne banen vil satellittenes solceller ha kontinuerlig tilgang til solen. Siden det ikke forekommer opptak på andre tider av døgnet vil man ikke få en hyppig oppdatering, og det kan være en utfordring å benytte bildene til rent operativt bruk.



Figur 2.21 Ett døgns opptaksmulighet med RADARSAT-2 sin ScanSAR-mode med 500 km sporbredde.



Figur 2.22 Typiske opptakstider for SAR-satellitter og optiske satellitter med manglende dekning store deler av døgnet.

---

---

## 2.8.2 Dekning over bestemte områder

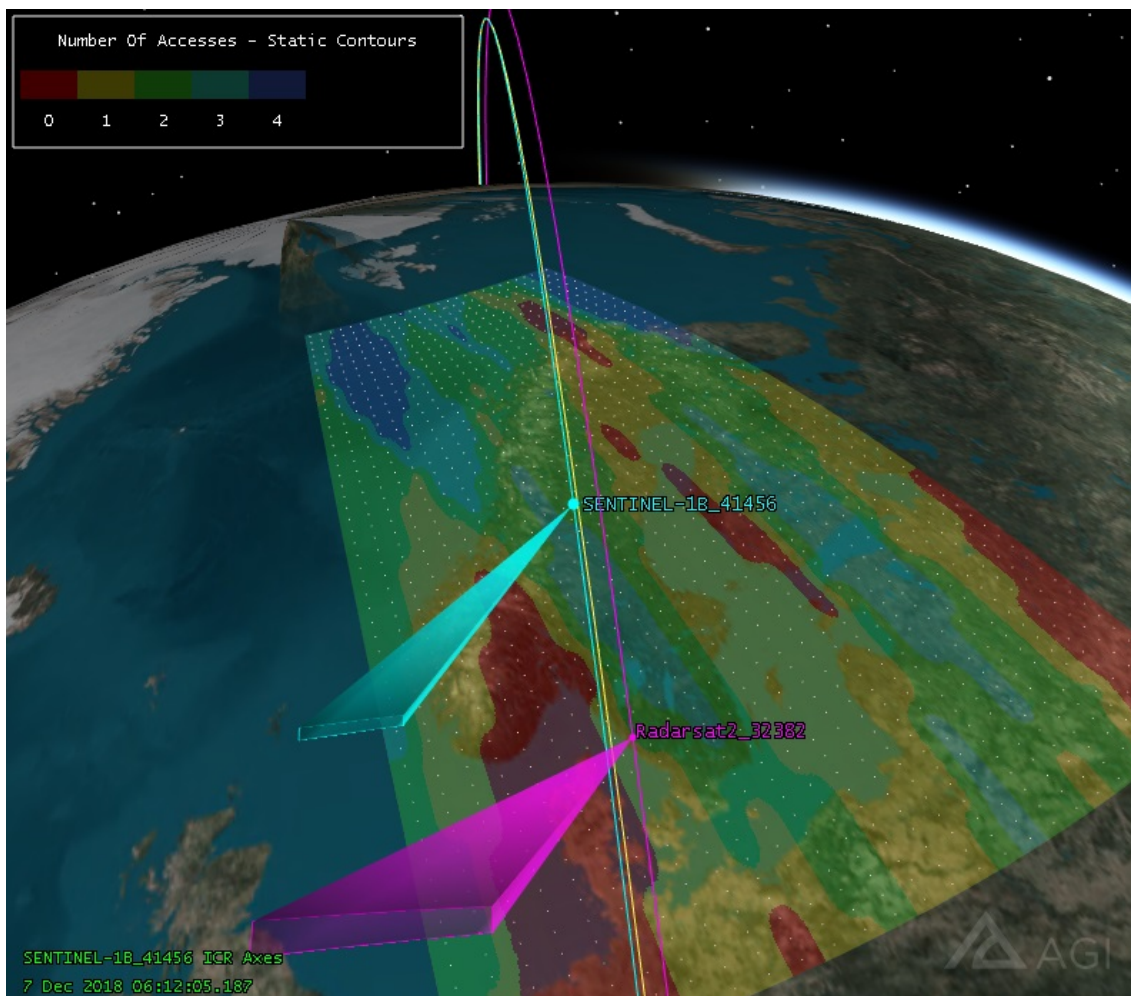
For å estimere dekningsmuligheter med et utvalg satellitter ble det utført simuleringer over skandinaviske områder med verktøyet Systems Toolkit (STK). De tre mest tilgjengelige SAR-satellittene for Norge ble brukt i analysen. Disse satellittene er Sentinel-1A, Sentinel-1B og RADARSAT-2. De to første har åpent tilgjengelige data på nettet, og Norge har en god avtale for tilgang til data fra RADARSAT-2.

I analysen ble det valgt at satellittene gjorde kontinuerlig opptak med noen av de mest brukte modusene. For Sentinel-satellittene ble det valgt moden «Interferometric Wide» og for RADARSAT-2 ble det valgt moden «ScanSAR Wide». I virkeligheten blir det også brukt andre moduser, og satellittene vil også ha nedetid der de ikke er i bruk, men analysen her er ment som en indikasjon på opptaksmulighetene.

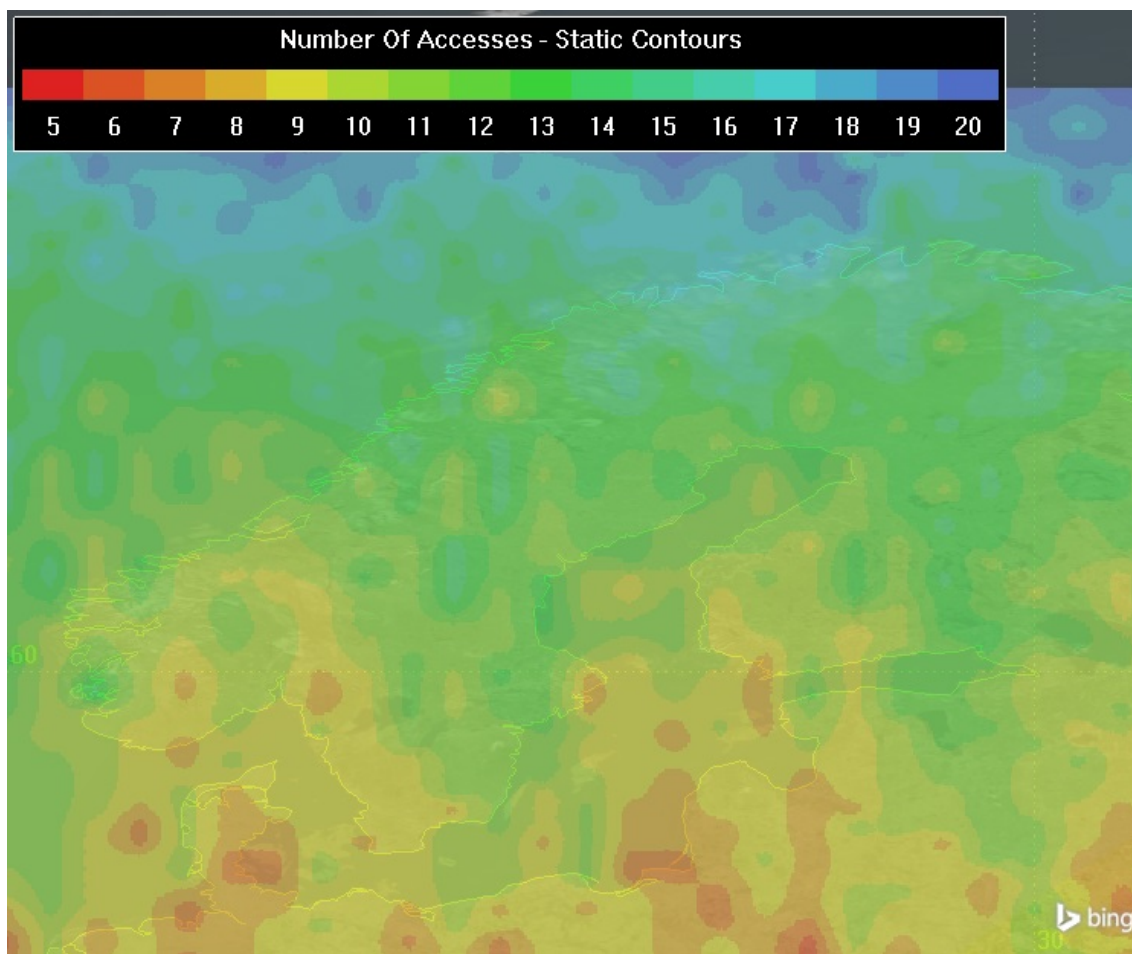
I Figur 2.23 er det vist mulig dekning for ett tilfeldig døgn med de valgte modusene. Fotavtrykket til Sentinel-1B og RADARSAT-2 er indikert med henholdsvis turkis og magenta. Rutenettet viser at det forekommer alt fra null til fire pass over ulike deler av Skandinavia dette døgnet. Områdene med fire mulige pass ligger som forventet i nord, mens det er et signifikant område over Østlandet som ikke er dekket. Dette viser at man ikke kan forvente daglig dekning fra et slikt begrenset antall satellitter, men sannsynligheten øker dersom man tar med andre satellitter i tillegg.

For å se dekning over lengre tid, der tilfeldighetene fra en enkelt dag ikke spiller inn, er det i Figur 2.24 vist den totale dekningsen av de samme satellittene over en uke. Som forventet er det igjen best dekning i nordområdene med opptil 20 pass på en uke. Enkelte områder i Sør-Norge har vesentlig lavere dekning, med rundt ett pass om dagen i gjennomsnitt.

Ved endringsdeteksjon er det ofte ønskelig å bruke data fra samme satellittkonstellasjon med samme opptaksgeometri (satellittbane og innfallsvinkel). Det har også blitt demonstrert endringsdeteksjon fra ulike satellitter, men dette krever mer omfattende prosessering inkludert varierende resampling over bildet. I første omgang refereres det derfor til gjensnitt-tiden beskrevet for ulike satellittkonstellasjoner i kapittel 3. Som eksempler kan man få åpne satellittdata med seks dagers gjensnitt-tid fra Sentinel-1, eller høyoppløselige data fra COSMO-SkyMed med fire pass distribuert over 16 døgn.



Figur 2.23 Dekning av Skandinavia på en tilfeldig dag fra de tre mest tilgjengelige SAR-satellittene i dag (Sentinel-1A, Sentinel-1B og RADARSAT-2). På denne dagen var det ingen dekning over Østlandet, men det var flere satellittpass over andre områder.



Figur 2.24 Mulig dekning over Skandinavia for en uke fra SAR-satellittene Sentinel-1A, Sentinel-1B og RADARSAT-2. Som forventet er det hyppig dekning i nordområdene, mens deler av Sør-Norge bare ser rundt ett satellittpass om dagen

### 3 Sivile SAR-satellitter i bane i dag

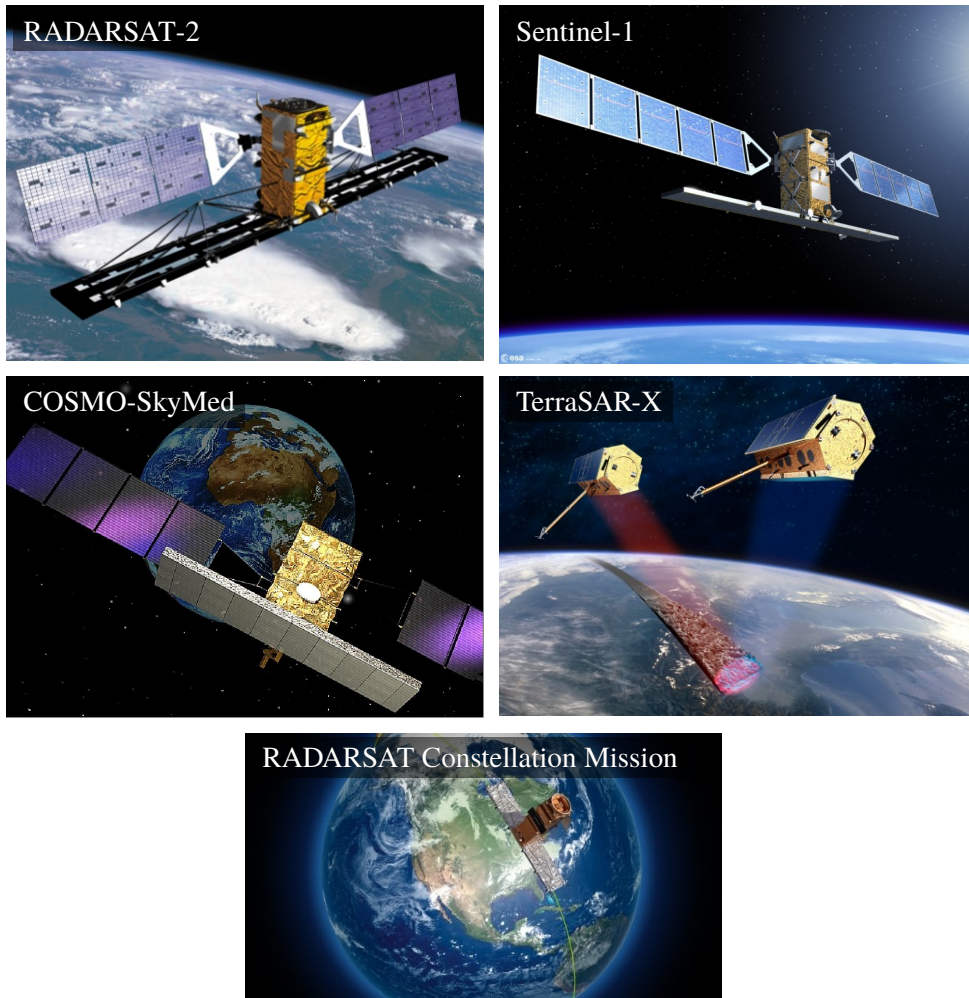
Det er flere sivile SAR-satellitter i bane i dag. Tabell 3.1 viser oversikten over de viktigste sivile SAR-satellittene i bane i dag, når de ble skutt opp, oppløsning, dekningsområde, frekvens og polarisering. En illustrasjon av hver type av disse satellittene er vist i Figur 3.1, og de fire første vil bli beskrevet i kapittel 3.1 til 3.4. Deretter gis en kort beskrivelse av satellittene PAZ, ALOS-2 og ASNARO-2. RADARSAT Constellation Mission ble skutt opp under rapportens ferdigstilling og er derfor nærmere beskrevet senere i kapittel 11.1.1.

Norge har en avtale med kanadiske MDA om innkjøp av SAR-bilder fra RADARSAT-2, mens det kan være en utfordring å få bilder fra RADARSAT Constellation Mission. Sentinel-1A- og -1B-bilder kan lastes ned gratis som nevnt i kapittel 12.1. COSMO-SkyMed-, TerraSAR-X- og TanDEM-X-bilder er forholdsvis dyre å bestille.

Satellitt	Skutt opp	Oppløsning	Dekning range × asimut	Frekvens	Polarisering
RADARSAT-2	14. des 07	1–100 m	18 × 8 km 500 × 500 km	C-bånd 5,405 GHz	Enkel (HH, VV, HV eller VH) Dobbel (HH+HV, VV+VH, HH+VV) Full (HH+VV+HV+VH)
Sentinel-1A Sentinel-1B	3. apr 14 25. apr 16	5–93 m	80–400 km	C-bånd 5,405 GHz	Enkel (HH, VV) Dobbel (HH+HV, VV+VH)
COSMO-SkyMed 1 COSMO-SkyMed 2 COSMO-SkyMed 3 COSMO-SkyMed 4	8. jun 07 9. des 07 25. okt 08 6. nov 10	1–100 m	10–200 km	X-bånd 9,6 GHz	Enkel (HH, VV, HV eller VH) Dobbel (HH+HV, VV+VH, HH+VV)
TerraSAR-X TanDEM-X	15. jun 07 21. jun 10	1–40 m	30–260 km	X-bånd 9,65 GHz	Enkel (HH, VV, HV eller VH) Dobbel (HH+HV, VV+VH, HH+VV) Full (HH+VV+HV+VH)
RADARSAT Constellation Mission (3)	12. jun 19	1–100 m	20–500 km	C-bånd 5,405 GHz	Enkel (HH, VV, HV eller VH) Dobbel (HH+HV, VV+HV, HH+VV) Full (HH+VV+HV+VH) Kompakt (se kap. 4.3)

Tabell 3.1 Kommersiell SAR-satellitter i bane i dag med relevante parametre.

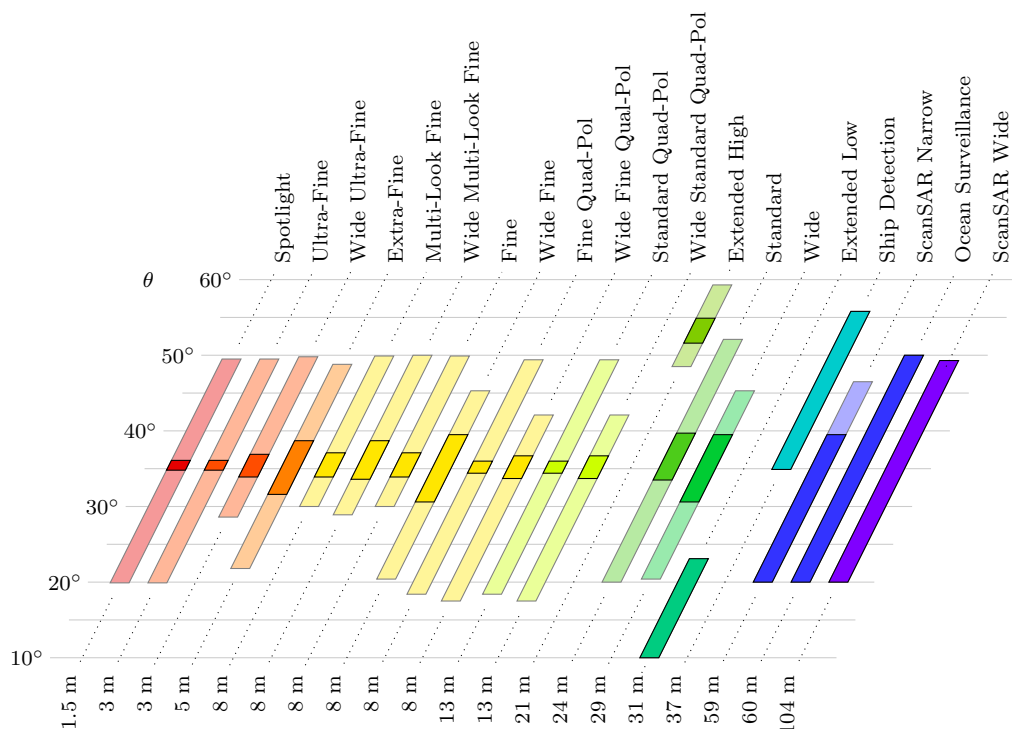




Figur 3.1 Illustrasjoner av kommersielle SAR-satellitter i bane i dag. (Kilder: CSA, ESA, e-Geos og DLR)

### 3.1 RADARSAT-2

RADARSAT-2 er en kanadisk jordobservasjonsatellitt som ble skutt opp 14. desember 2007, og er vist øverst til venstre i Figur 3.1. Den har en gjennomsnittstid på 24 dager, noe som betyr at den hver 24. dag kan avbilde nøyaktig samme område med samme innfallsvinkel. Oppløsningen varierer mellom 1 m og 100 m og sporbredden mellom 18 km og 500 km, avhengig av valg av modus. Det er mulig å få bilder enten med én polarisering, dual-polarisering (to bilder av samme område) eller full-polarisering (fire bilder av samme område i polarisasjonene HH, VV, HV og VH, nærmere forklart i kapittel 4). RADARSAT-2 går i en solsynkron polar bane med en høyde på 798 km. Satellitten har et SAR-instrument som opererer i C-bånd med frekvens på 5,4 GHz og bølgelengde 5,6 cm. Satellitten brukes daglig av norske myndigheter for å overvåke skipstrafikken, oljesøl og sjøis i nordområdene. I tillegg blir det bestilt noen bilder over land med noe høyere oppløsning etter behov. RADARSAT-2 tilbyr bilder med oppløsning på 3 m, mange avbildningsmoduser og muligheten til å ta bilder både mot venstre og høyre. RADARSAT-2 sin SAR-sensoren er svært fleksibel. Det er mulig å omprogrammere sensoren for å etterkomme ønsker om oppløsning og sporbredde. Figur 3.2 viser oversikt over alle modusene som RADARSAT-2 tilbyr. Det går an å bestille bilder etter ønsker og behov inntil tre dager før opptak. Mer informasjon om RADARSAT-2 finnes i [6].



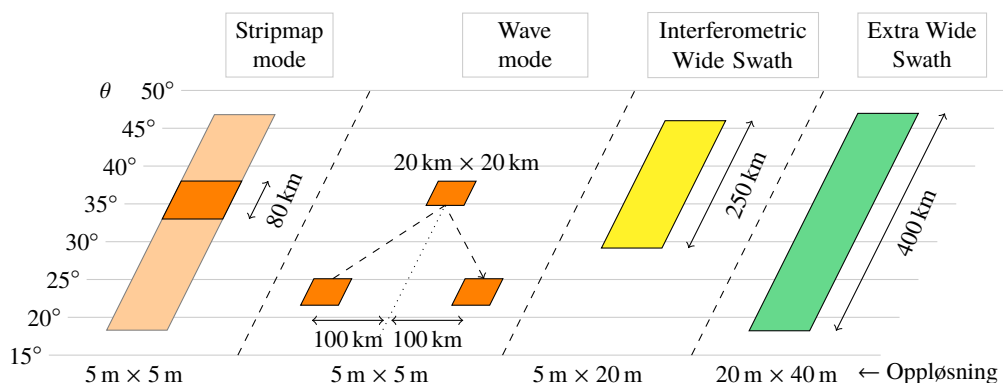
Figur 3.2 Illustrasjon av moduser i RADARSAT-2 som indikerer tilgjengelig innfallsvinkel, sporbredde og oppløsning. Merk at oppløsning og sporbredde varierer med innfallsvinkelen. Tallene for oppløsning er her en kombinasjon av oppløsning i range og asimut, for de fleste modusene basert på en radarstråle på rundt  $\theta = 35^\circ$ .

## 3.2 Sentinel-1

Sentinel-1-satellittene er to SAR-satellitter som opererer i C-bånd (5,4 GHz og 5,5 cm), kalles Sentinel-1A og -1B og er vist øverst til høyre i Figur 3.1. Satellittene er etterfølgerne til ESAs ENVISAT SAR-satellitt og ERS-satellittene. Sentinel-1A og -1B ble skutt opp henholdsvis 3. april 2014 og 25. april 2016. Satellittene går i en polar og solsynchron bane med en høyde på 693 km. Gjensnittstiden er 6 dager ved ekvator når to satellitter er i bane. Oppløsningen varierer mellom 5 m og 93 m og sporbredden mellom 80 km og 400 km, avhengig av valg av modus. Det er mulig å få bilder enten med én polarisering eller med dual-polarisering (to bilder av samme område). Det er planlagt to nye satellitter, Sentinel-1C og -1D, som skal skytes opp i 2021 og 2023, og disse vil i tillegg til SAR være utstyrt med AIS-mottakere for overvåking av skipstrafikk.

Sentinel-1-satellittene er en del EUs Copernicus-program, og gir data langt inn i neste tiår for miljøovervåking og sikkerhetsapplikasjoner. Satellittene har blitt utviklet av EU og ESA (European Space Agency) i samarbeid. Data fra Sentinel-satellittene er tilgjengelig under en fri og åpen data-policy. Til forskjell fra tidligere forskningsorienterte jordobservasjons-satellitter fra ESA, skal Sentinel-satellittene være operative, og skal således møte krav til tilgjengelighet og arealdekning. Satellittene skal også være tilgjengelige i et langtidsperspektiv, og skal fornyes over tid. Operasjonen av satellittene gjennomføres i henhold til en High Level Operations Plan (HLOP), som oppdateres med ca. 6 måneders mellomrom. Det vil si at det ikke går an for brukeren å bestille bilder etter ønsker og behov. SAR-instrumentet på Sentinel-1A og -B har to polarisasjons-kanaler, blant annet for å kunne gjøre best mulig avbildning av skip, oljesøl, sjøis og isfjell. Se Figur 3.3 for en oversikt over modene på Sentinel-1-satellittene.

Dataene kan også brukes til å måle vind og bølger på havoverflaten. Instrumentet er også designet for å gjøre presise målinger av endringer på land i forbindelse med jordskjelv, ras, isbreer og menneskelig aktivitet. Til det siste hører observasjon av infrastruktur, og nedsynking av overflaten som for eksempel som et resultat av utvinning av olje, gass og vann og tunnelboring.

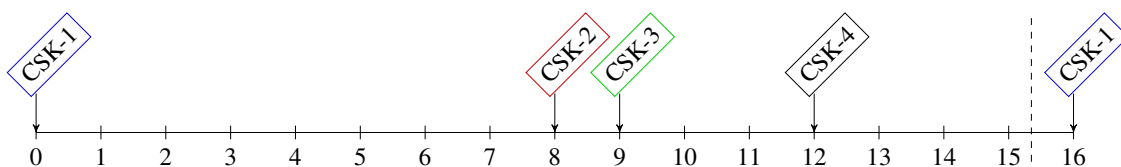


Figur 3.3 Illustrasjon av Sentinel-1-moduser som indikerer tilgjengelig innfallsvinkel, sporbredder og oppløsning. De mest brukte modusene er de to til høyre i figuren.

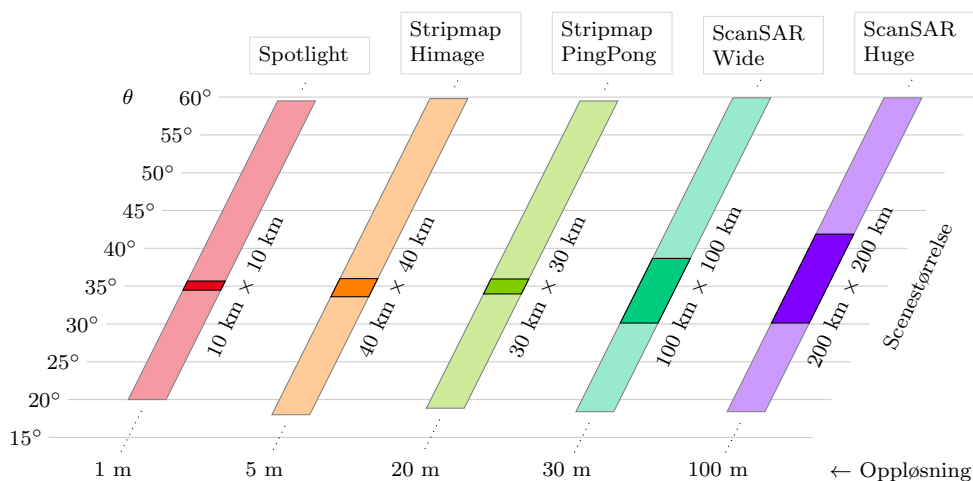
### 3.3 COSMO-SkyMed

Den italienske COSMO-SkyMed-konstellasjonen består av fire SAR-satellitter som ble skutt opp 8. juni 2007, 9. desember 2007, 25. oktober 2008 og 6. november 2010. Figur 3.1 viser en av de fire satellittene nederst til venstre. Hele konstellasjonen har tilsammen en *repeat cycle* på 16 dager, men hver av satellittene ankommer innenfor dette intervallet slik at gjenvisittiden blir vesentlig kortere på noen dager. For opptak med samme geometri varierer tiden mellom hver satellitt fra én til åtte dager, avhengig av hvor man er i syklusen som vist i Figur 3.4. Hvis man er på dag 7–8 over et område i syklusen, kan man dermed være heldig og få bilder med én dags mellomrom. Det er imidlertid lenger ventetid hvis man er på dag 13 eller dag 1.

Oppløsningen varierer mellom 1 m og 100 m og sporbredden mellom 10 km og 200 km avhengig av valg av mode. Det er mulig å få bilder enten med én polarisering eller dual-polarisering (to bilder av samme område). COSMO-SkyMed-satellittene går i en solsynkron polar bane med en høyde på 619,6 km. Satellittene har et SAR-instrument som opererer i X-bånd med frekvens 9,64 GHz og bølgelengde 3,1 cm. Figur 3.5 viser oversikt over alle modene som COSMO-SkyMed-satellittene tilbyr.



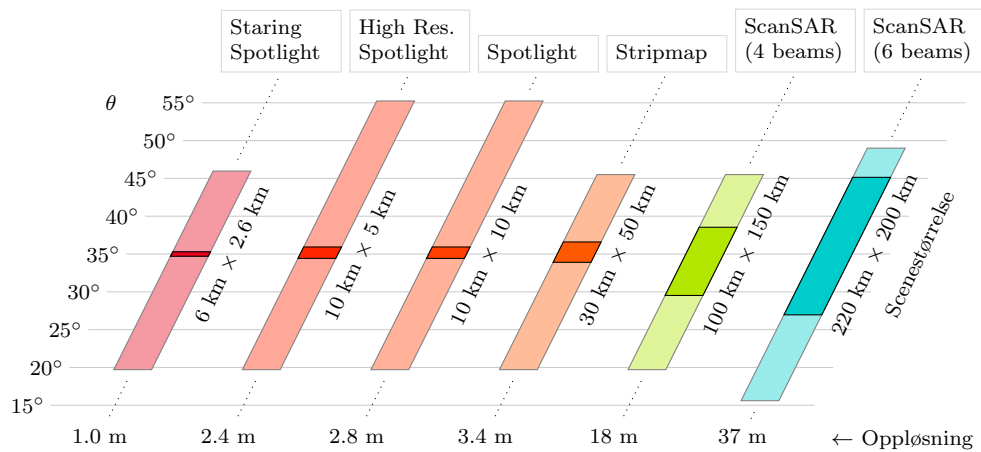
Figur 3.4 Gjenvisitt-tid i dager for COSMO-SkyMed-satellittene. Hele konstellasjonen har en gjenvisitt-tid på 16 dager, og de fire satellittene har ulike intervaller mellom seg.



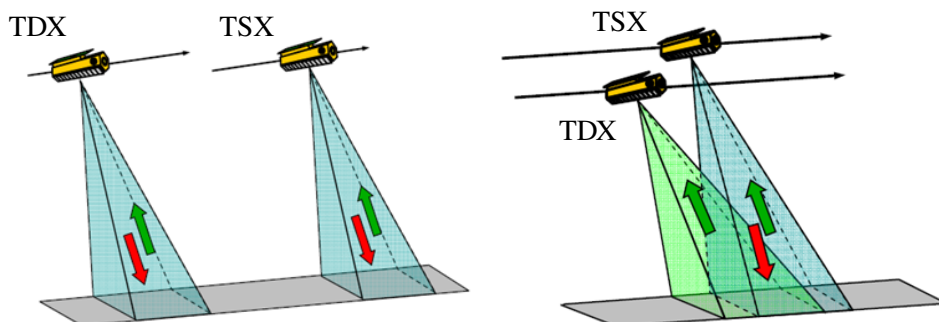
Figur 3.5 Aktuelle moduser for COSMO-SkyMed-satellittene som indikerer tilgjengelig innfallsvinkel, scenestørrelse og oppløsning. Spesifisert oppløsning er en kombinasjon av oppløsning i range og asimut, kan variere med innfallsvinkel, og er her oppgitt for rundt 35°. En mer detaljert beskrivelse kan finnes i produktspesifikasjonen.

### 3.4 TerraSAR-X og TanDEM-X

De tyske satellittene TerraSAR-X og TanDEM-X ble skutt opp henholdsvis 15. juni 2007 og 21. juni 2010. Figur 3.1 viser de to satellittene i formasjon nederst til høyre. Gjensnitt-tiden er 11 dager. Oppløsningen varierer mellom 1 m og 40 m og sporbredden mellom 30 km og 260 km avhengig av valg av mode. Det er mulig å få bilder enten med én polarisering, dual-polarisering (to bilder av samme område) eller full-polarisering (fire bilder av samme område). Satellittene går i en solsynchron polar bane med en høyde på 514 km. Satellittene har et SAR-instrument som opererer i X-bånd med frekvens på 9,65 GHz og bølgelengde 3,1 cm. Figur 3.6 viser oversikt over modene som TerraSAR-X og TanDEM-X tilbyr.



Figur 3.6 Aktuelle moduser for TerraSAR-X og TanDEM-X, som indikerer tilgjengelig innfallsvinkel, scenestørrelse og oppløsning. Oppgitt oppløsning er en kombinasjon av oppløsning i range og asimut, kan variere med innfallsvinkelen, og er her indikert for rundt 35°. Flere effekter vil kunne påvirke, og detaljert beskrivelse kan finnes i produktguiden.



Figur 3.7 Monostatisk og bistatisk modus for TerraSAR-X- og TanDEM-X-satellittene, som gir noe ulike optak. (Kilde: DLR)

---

---

TerraSAR-X og TanDEM-X flyr i tett formasjon med avstander mellom 300–500 m, og begge satellittene kan sende og motta signaler med mulighet for fullpolarimetri. Dette gjør det mulig å lage svært nøyaktige *cross-track* og *along-track* interferogrammer (beskrevet i henholdsvis kap. 6 og 10.3). I Figur 3.7 er det vist hvordan radarpulsene sendes og mottas for de to satellittene i monostatisk og bistatisk modus. Avstanden mellom satellittene i monostatisk modus er typisk 75 km og i bistatisk modus noen få hundre meter.

### 3.5 PAZ

PAZ er en satellitt som er anskaffet av Spania og skutt opp i februar 2018. Den er i stor grad en kopi av den tyske satellitten TanDEM-X, men med AIS-mottaker i tillegg [7]. Satellitten går i samme bane som TerraSAR-X og TanDEM-X, og de tre satellittene danner en felles konstellasjon. Dette innebærer en stor forbedring av avbildningshyppigheten.

Mulighetene for koherent endringsdeteksjon er avhengig av intervallet for eksakt repetisjon av banen sett fra et punkt på jorda. Dette intervallet er 11 dager for hver av satellittene. Hvordan repetisjonsintervallene blir med flere satellitter i banen kommer an på hvordan satellittene spres ut. Én mulighet er at TSX og TDX fortsatt vil være plassert i kort avstand fra hverandre, mens PAZ blir plassert med en fase på  $98^\circ$  fra de andre. Dette gir repetisjonsintervaller på 4 og 7 dager for konstellasjonen[8]. Det er også mulig at de tre satellittene spres ut i banen med ca.  $120^\circ$  separasjon, så konstellasjonen får et mer regelmessig avbildningsintervall.

### 3.6 ALOS-2

ALOS-2 er en japansk satellitt som ble skutt opp i 2014. Den er utstyrt med en L-bånd SAR-sensor og har i tillegg AIS-mottaker. Satellitten veier 2120 kg og har en SAR-antenne på  $9,9 \text{ m} \times 2,9 \text{ m}$ . En rekke SAR-moduser er tilgjengelige, inkludert en spotlight-modus som gir ca.  $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  oppløsning innenfor et område på  $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$  og en ScanSAR-modus med 350 km sporbredde og 100 m oppløsning [9]. SAR-data fra ALOS-2 er kommersielt tilgjengelige, men betingelsene for bruk er strenge. Blant annet kan de bare benyttes til fredelige formål[10].

### 3.7 ASNARO-2

ASNARO-2 er en japansk satellitt som ble skutt opp i januar 2018. Satellitten veier 570 kg og har en X-bånd SAR-sensor med reflektorantenne [11]. Sensoren har en oppløsning på 1 m eller bedre i spotlight-modus. Den har også stripmap- og ScanSAR-moduser med relativt beskjedne spesifikasjoner. Japan EO Satellite Service (JEOSS) har annonsert at data fra satellitten vil bli kommersielt tilgjengelige[12]. Betingelsene for bruk er ikke kjent, men det er grunn til å anta at bruk til Forsvarets formål i praksis vil være vanskelig.

---

---

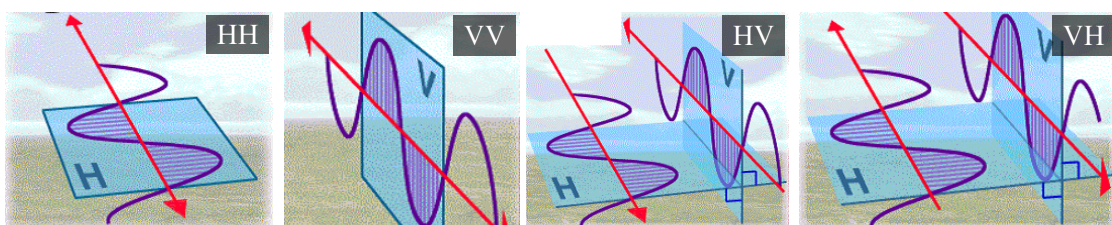
## 4 Polarisering

Elektromagnetiske bølger er transversale, der det elektriske og magnetiske feltet varierer på tvers av retningen til signalet. Polarisasjon beskriver hvordan det elektriske feltet varierer over tid. Det finnes ulike polariseringer: Lineær horisontal (H), lineær vertikal (V), lineær krysspolarisert (HV, VH), sirkulær og elliptisk. En bølge der vibrasjonene alltid er i samme retning kalles lineær polarisering. Ved horisontal polarisering (H) står det elektriske feltet til den utsendte bølgen fra satellitten omtrent normalt på innfallsplanet. Ved vertikal polarisering (V) er det elektriske feltet parallelt med innfallsplanet. Figur 4.1 viser horisontal og vertikal polarisering.

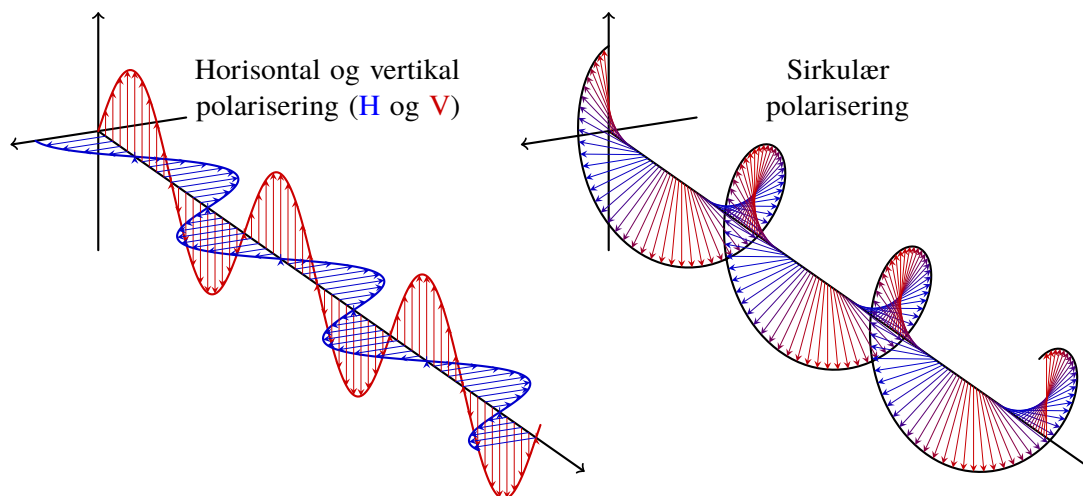
Radarbilder fra satellitter med lineær polarisering kan være både i HH-, VV-, HV- og/eller VH-polarisering. VV-polarisering betyr at radaren både sender og mottar vertikalpolarisert stråling, mens HH-polarisering betyr at radaren både sender og mottar horisontalpolarisert stråling. Begge kalles *kopolariserte* kanaler. VH-polarisering betyr at radaren sender ut vertikalpolarisert stråling, mens den mottar horisontalpolarisert stråling. For HV-polarisering er situasjonen motsatt, som vist i Figur 4.1. De to sistnevnte kalles krysspolariserte kanaler, og viser omtrent samme informasjon.

Polarisering er svært viktig når en jobber med SAR-bilder. Forskjellige materialer og overflater har ulike spredningsegenskaper i hver av polariseringene og polariseringskombinasjonene som er tilgjengelige. Faktorer som påvirker hvordan radarsignalene reflekteres tilbake til satellitten inkluderer overflaten som avbildes, orienteringen til målet i forhold til SAR-instrumentet, samt om målet er i bevegelse eller ikke. Avhengig av overflaten som avbildes kan antall refleksjoner fra overflaten være både lik (dobbel) og ulik (singel eller trippel), og i tillegg kan det oppstå refleksjoner fra målets hjørner, kanter, kabler og liknende. Jo flere polariseringer som er tilgjengelige, desto mer informasjon er det mulig å få ut av SAR-opptaket. Det vil da være lettere å detektere mål og å diskriminere mellom ulike målklasser.

De tidligste SAR-satellittene tilbød bare opptak med én enkelt polarisering. For eksempel tilbød den europeiske ERS-1-satellitten bilder med VV-polarisering, mens RADARSAT tilbød bilder med HH-polarisering. De nyeste SAR-satellittene har alle radarinstrumenter som kan lage ett, to eller fire bilder av samme område med forskjellige polariseringer. Både Sentinel-1A og -1B, TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed-satellittene og RADARSAT-2 kan veksle mellom polariseringene på antennen. I tillegg til bilder med *kopolarisering* (HH og VV) er det mulighet for å lage bilder som bruker *krysspolarisering*, enten kryss-H polarisering (HH/HV) eller kryss-V polarisering (VV/VH). Ett bilde blir tatt med lik polarisering i utsendt og mottatt stråle, mens det andre bildet har ulik polarisering for utsendt og mottatt stråle. RADARSAT-2 tilbyr også *fullpolarimetrisk*



Figur 4.1 Utsendt og mottatt kopolarisering HH og VV, samt krysspolarisering HV og VH.  
(© European Space Agency, ESA)



Figur 4.2 Horisontal og vertikal polarisering vist i samme akse, samt sirkulær polarisering.

data operasjonelt (HH, VV, HV og VH samtidig), noe som gir mange flere muligheter ved bruk av SAR-bilder.

Ved å fase de vertikale og horisontale lineær-polariserte signalene, er det også mulig å syntetisere utsendte sirkulærpolariserte data, som illustrert i Figur 4.2. Ved deretter å motta dataene med H- og V-polariserte kanaler, får man polarimetrisk data kalt kompakt polarimetri. Den indiske satellitten RISAT hadde denne funksjonaliteten tidligere, og den japanske satellitten ALOS-2 har det i dag. Kompakt polarimetri vil også være tilgjengelig på de tre satellittene planlagt i den kanadiske RADARSAT Constellation Mission, som er nærmere beskrevet i kapittel 11.1.1.

## 4.1 Dual-polarisering

Ulike radarsatellitter kan som nevnt levere både dual- og full-polariserte data, og informasjonen som er tilgjengelig fra disse modusene er vesentlig bedre enn bilder fra de tidligere satellittene som bare hadde enkel polarisering. De senere årene har det blitt forsket mye på hvilke(n) polariseringskanal(er) som er best å bruke, og hvordan de forskjellige polariseringskanalene best kan kombineres. Dual-polariserte scener har to SAR-bilder fra samme område med ulik polarisering. Dataene kan da være av følgende typer:

- HH/VV der ett bilde tas ved å sende ut og motta med horisontal polarisering, mens det andre bildet tas ved å sende ut og motta med vertikal polarisering.
- HH/HV der ett bilde tas ved å sende ut og motta med horisontal polarisering, mens det andre bildet tas ved å sende ut med horisontal polarisering og motta med vertikal polarisering.
- VV/VH der ett bilde tas ved å sende ut og motta med vertikal polarisering, mens det andre bildet tas ved å sende ut med vertikal polarisering og motta med horisontal polarisering.

Informasjonen i dual-polariserte datasett er ikke like fullstendige som i fullpolariserte data, så det er ikke mulig å gjøre en fullstendig dekomposisjon til forskjellige spredningstyper over det avbildende



---

---

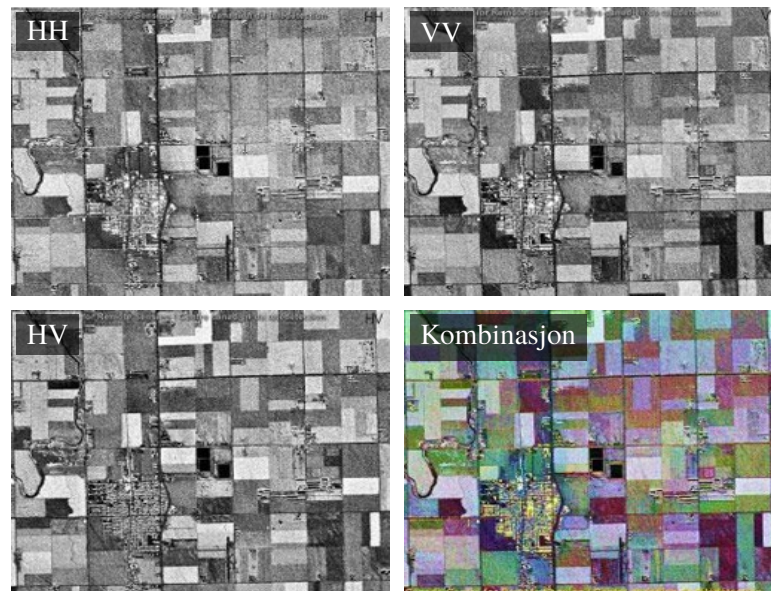
området. Fordelen med dual-polariserte data er derimot at de er bedre for operativ bruk, fordi satellittene er i stand til å dekke et større område. Dette medfører igjen en økt temporal dekning.

Ved bruk av kopolarisering (VV og HH) øker *Target-to-Clutter Ratio* (TCR) med økende innfallsvinkel hvis bakgrunnen er noenlunde jevn, og dermed øker muligheten for måldeteksjon. TCR minker hvis tilbakespredningen fra bakgrunnen øker. Radarrefleksen fra en jevn bakgrunn minker med økende innfallsvinkel, mens refleksen fra et menneskeskapt mål varierer relativt lite med innfallsvinkelen.

## 4.2 Fullpolarimetri

Ved bruk av fullpolarimetri tas det fire bilder over samme område: HH, VV, HV og VH. Det er dermed mulig å bruke alle fire polariseringskanalene til å avbilde et mål, en overflate og omgivelsene. Polariseringskanalene har forskjellige egenskaper, og kan brukes til detaljerte beskrivelser av de tilbakespredte signalene, samt gi bedre informasjon om de fysiske egenskapene til harde mål og bakgrunn. Fullpolarimetri gjør det også mulig å kombinere informasjon fra de forskjellige kanalene i en polarimetrisk analyse, som gir mer komplett informasjon om strukturen og formen til de ulike tilbakespredende overflatene. Det kan da være lettere å skille mellom vegetasjon, bygninger, kjøretøy og annet.

Et såkalt lineær fremstilling av fullpolarimetrisk data er vist i Figur 4.3, der tre av polariseringskomponentene er kombinert i et RGB-bilde. Her er HH vist i rødt, VV i grønt og HV i blått. Mer kompliserte fremstillinger er beskrevet i kapittel 5.



Figur 4.3 Kombinasjon av HH, VV og HV til et RGB-bilde for å få fram ulike vegetasjonstyper. Nederst til høyre er HH vist i rødt, VV i grønt og HV i blått. (© Canada Centre for Remote Sensing, CCRS).

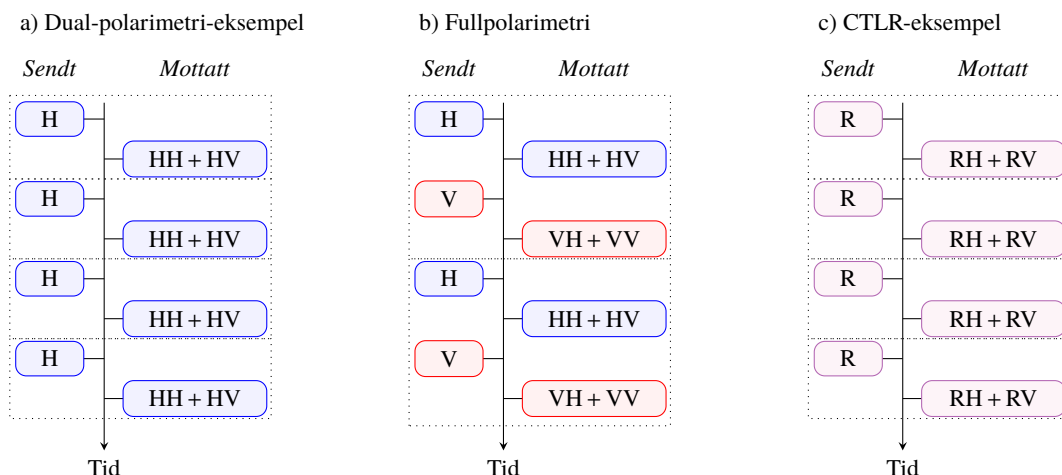
### 4.3 Kompakt polarimetri

Bilder tatt med høy oppløsning og/eller fullpolarisering dekker vanligvis bare små områder. Siden 2011 har RADARSAT-2-satellitten vært oppdatert med nye moduser som dekker større områder enn tidligere samtidig som de gir høy oppløsning og fullpolarimetrisk data. Likevel dekker disse modusene langt mindre områder enn de mye brukte ScanSAR-modusene.

Dette problemet kan løses ved å bruke såkalt kompakt polarimetri, som ser ut til å bli mer vanlig de neste årene. Funksjonaliteten finnes allerede på den indiske RISAT, og vil også være en del av RADARSAT Constellation Mission beskrevet i kapittel 11.1.1. Det finnes tre måter for å implementere kompakt polarimetri:

- «Dual Circular Polarimetry», der én sirkulær polarisering (enten R eller L, altså høyre eller venstre) sendes ut, og begge sirkulære polariseringene mottas (både R og L).
- «Circular Transmit – Linear Receive», der én sirkulær polarisering (enten R eller L) sendes ut, og begge lineære polariseringene mottas (H og V). Denne metoden er tenkt brukt i RADARSAT Constellation Mission.
- $\pi/4$ -modus, der superposisjonen av horisontal og vertikal polarisasjon sendes ut (og dermed får  $45^\circ$  vinkel), og både horisontal og vertikal polarisering mottas (H og V).

Fordelen med kompakt polarimetri i forhold til fullpolarimetri er at man sender ut samme type signal hver gang, i stedet for å sende annenhver horisontal og vertikal polarisering (fullpolarimetri sender først horisontal polarisering, lytter, sender vertikal polarisering og lytter). Dette prinsippet er illustrert i Figur 4.4, som viser at lyttetiden blir halvert i forhold til fullpolarimetri. Man vil ikke oppnå like mye informasjon som ved fullpolarimetri, men likevel mer enn enkel- og dual-polarisering. Det må også bemerkes at det tilbakespredte signalet ikke avhenger av målets orientering, slik det gjør med enkel-, dual- og fullpolarimetri.



Figur 4.4 Sammenlikning av sende- og lytte-tid for én mulighet av dual-polarimetri, fullpolarimetri og én mulighet av CTRLR. Kompakt polarimetri trenger halve lyttetiden sammenliknet med fullpolarimetri siden samme signal sendes ut hver gang.

---

---

## 5 Polarimetriske dekomposisjoner

I en polarimetrisk dekomposisjon bruker man de tilbakespredte signalene fra en fullpolarimetrisk måling, og representerer dem med en annen *basis* som forsøker å beskrive ulike former for tilbakespredning. Det kan da være mulig å skille for eksempel volumspredning fra overflatespredning.

Ved å bruke tre individuelle komponenter kan man lage fargebilder med fargekanalene rød, grønn og blå (RGB). De tre fargene velges gjerne til å være representative for øyets oppfatning av verden, slik at blå representerer overflatespredning (som blant annet fremkommer fra veier og asfalt), grønn representerer volumspredning (som ofte forekommer i vegetasjon) og rød representerer *dobbeltspredning* (som ofte forekommer fra vertikale strukturer som bygninger og andre menneskeskapt objekter). Styrken på hver av fargene avhenger av de ulike spredningskomponentene.

Polarimetriske dekomposisjoner inndeles vanligvis i *koherente* og *inkoherente* dekomposisjoner. Koherente dekomposisjoner bruker spredningsmatrisen med de fire elementene HH, HV, VH og VV direkte, og noen utvalgte metoder er beskrevet i kapittel 5.1. Inkoherente dekomposisjoner bruker i stedet mer kompliserte  $3 \times 3$ -matriser, noe som gjør metodene mer kompliserte. En klasse av inkoherente dekomposisjoner kalles *modellbaserte*, og noen av disse er nærmere beskrevet i kapittel 5.2. Mer detaljerte beskrivelser og flere metoder er beskrevet i blant annet [13–17].

### 5.1 Koherente dekomposisjoner

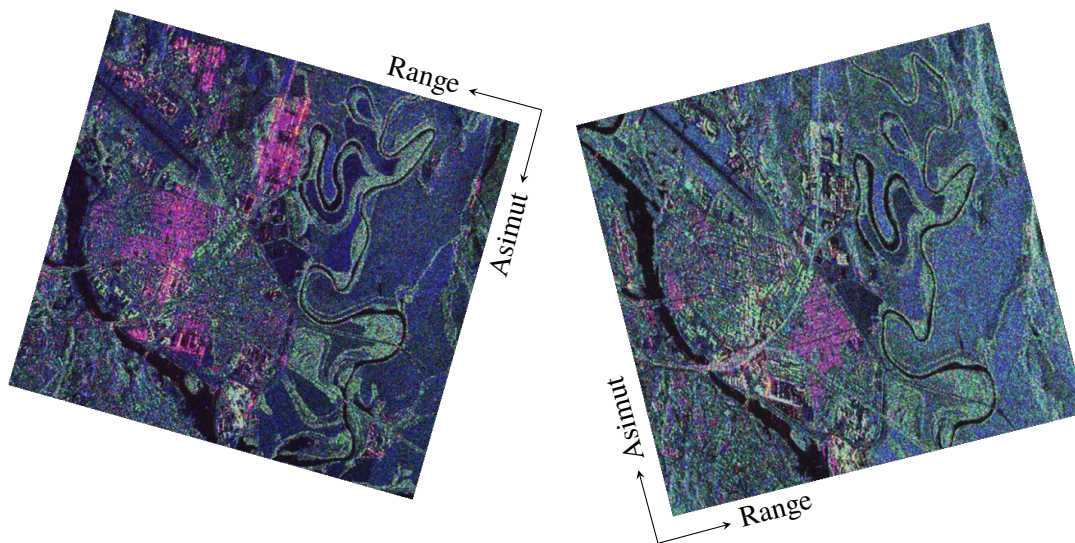
De koherente dekomposisjonene er ofte de enkleste siden de bruker de fire polarimetriske komponentene HH, HV, VH og VV direkte. Metodene antar at hver oppløsningscelle består av en sum av tilbakespredere, samt at spredningsmatrisen for hver piksel representerer ett enkelt mål.

En ulempe med disse modellene er imidlertid at de ikke tar hensyn til *speckle*-støy, som gjerne forekommer i *Single Look Complex*-data (SLC). For å redusere dette problemet kan det derfor være nødvendig å bruke et speckle-filter, og regne ut et gjennomsnitt av dataene. Koherente dekomposisjonsmetoder er imidlertid mer anvendbare der ett enkelt mål er forventet i oppløsningscellen.

Dette delkapittelet presenterer to koherente dekomposisjonsmetoder: Pauli-dekomposisjon og Krogager-dekomposisjon.

#### 5.1.1 Pauli-dekomposisjon

En av de enkleste og mest brukte dekomposisjonene er Pauli-dekomposisjon, som antar at spredningsmatrisen kan beskrives som en sum av tre fysiske spredningsmekanismer. De tre spredningsmekanismene er overflatespredning, dobbeltspredning og volumspredning (representert ved ren krysspolarisering), som beskrevet i kapittel 2.1. Når man ser bort fra den matematiske skaleringen kan de tre komponentene beskrives:



Figur 5.1 RADARSAT-2 Fine Quad-mode over Lillestrøm. Både *descending pass* (venstre) 7. desember 2009 og *ascending pass* (høyre) 11. desember 2009 er vist. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.

- Overflate:  $|HH + VV|$ . Representeres gjerne i blått.
- Dobbeltspredning:  $|HH - VV|$ . Representeres gjerne i rødt.
- Krysspolarisering:  $|HV + VH|$ . Representeres gjerne i grønt.

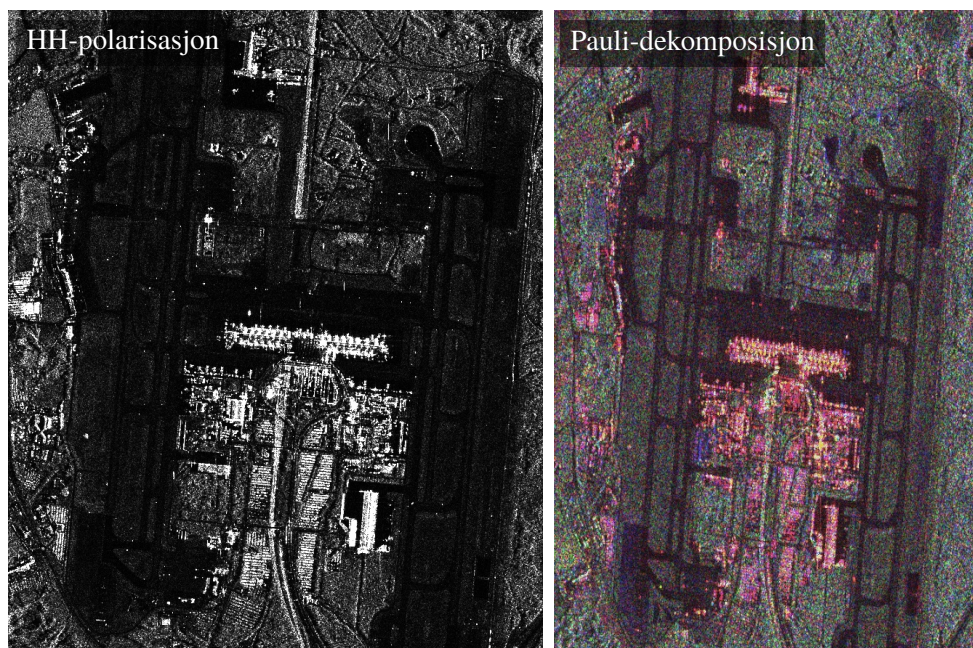
For RGB-bilder er det mulig å skalere fargekanalene ytterligere for å gjøre det lettere å visualisere de ulike mekanismene. Et bildeeksempel med Pauli-dekomposisjon er vist Figur 5.1, som viser *descending pass* (når satellitten beveger seg sørover) og *ascending pass* (når satellitten beveger seg nordover) over Lillestrøm. I dette eksempelet er fargekanalene skalert med faktorer på henholdsvis 0,7, 0,7 og 3.

De ulike spredningsmekanismene kan i noen tilfeller kombineres videre for å få frem ulike egenskaper. Et eksempel fra skipsdeteksjon er når man ønsker å fremstille et mål fra en jevn bakgrunn, så har det vist seg hensiktsmessig å multiplisere dobbeltpredning og krysspolarisering [15], altså  $(HH - VV) \times HV$ .

Figur 5.2 viser først et RADARSAT-2-bilde over Gardermoen i HH-polarisasjon. Til høyre i figuren er en Pauli-dekomposisjon vist som et fargebilde. Rødt er dobbeltpredning, grønt er krysspolarisering og blått er overflatespredning. Det er mye dobbeltpredning (rødt) fra menneskeskapte objekter slik som flyplassbygningen, hangarer og liknende. Volumspredning har mye krysspolarisering i seg, og dette ses fra trærne og vegetasjonen rundt flyplassen. Mørke blå/svarte felter viser overflatespredning fra for eksempel rullebaner og veier.

### 5.1.2 Krogager-dekomposisjon

Krogager foreslo en dekomposisjon med tre andre typer spredning, som er en kule, diplan og heliks. For å komme frem til resultatet brukes en *sirkulær* basis i stedet for den lineære fra



Figur 5.2 Venstre: RADARSAT-2 UltraFine-bilde i HH-polarisasjon over Gardermoen den 11. august 2010. Høyre: Pauli-dekomposisjon. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010)

Pauli-dekomposisjon, med elementene høyre-rotasjon (R) og venstre-rotasjon (L). Komponentene i den sirkulære basisen regnes først ut slik (der  $j$  er den komplekse enheten):

- $RR = j \times HV + \frac{1}{2}(HH - VV)$ .
- $LL = j \times HV - \frac{1}{2}(HH - VV)$ .
- $RL = \frac{j}{2}(HH + VV)$ .

De tre komponentene kan deretter regnes ut og representeres i et RGB-bilde på følgende måte:

- Blå viser kulekomponent:  $k_s = |RL|$
- Rød viser diplan-komponent:  $k_d = \min(|RR|, |LL|)$
- Grønn viser heliks-komponent:  $k_h = \text{abs}(|RR| - |LL|)$

der  $\min()$  representerer minste verdi og  $\text{abs}()$  representerer absoluttverdi.

Fordelen med Krogager-dekomposisjonen er at rene likespredere (som dobbeltspredning) alltid bare viser seg i én komponent (så lenge det ikke er flere spredere i samme oppløsningscelle). Heliks-komponenten gir et mål på hvor «ren» diplan-komponenten er. Dette kan være av betydning for bevegelseskompensasjon i høyoppløselig SAR-/ISAR-avbildning. Krogager-dekomposisjon gir gode resultater, og siden den kun har tre parametre kan den også vise seg å være nyttig i automatiske algoritmer der hastighet er av betydning.

Krogager-dekomposisjonen har vist seg å være den beste av de koherente polarimetrisk dekomposisjonene til å skille mellom menneskelagde og naturlige objekter [18]. Den har imidlertid problemer med å skille ulike typer av menneskelagde objekter.

---

---

## 5.2 Modellbaserte dekomposisjoner

Modellbaserte dekomposisjoner er en type inkoherente dekomposisjoner som enten bruker *kovariansmatrisen* eller *koherensmatrisen*, og dermed er mer kompliserte enn de koherente dekomposisjonene. Disse matrisene består av  $3 \times 3$  elementer som er satt sammen av ulike kombinasjoner av HH, HV, VH og VV.

Vi vil her beskrive to utvalgte dekomposisjoner, som er Freeman-Durden-dekomposisjon med tre komponenter og Yamaguchi-dekomposisjon med fire komponenter.

### 5.2.1 Freeman-Durden

Freeman-Durden-dekomposisjon består av tre komponenter, som tilsvarende Pauli-dekomposisjon er volumspredning, dobbeltspredning og overflatespredning. Volumspredning (for eksempel fra trekroner) er modellert som en samling små dipoler med tilfeldig retning. Dobbeltspredning modelleres som en hjørnereflektor (diplan), mens overflatespredning modelleres som Bragg-refleksjon. Modellen ender opp med fire likninger og fem ukjente, som gjør at noen antakelser må gjøres.

Freeman-Durden er brukbar over skogområder, fordi man lett kan skille mellom områder med og uten skog [13]. Ved en eventuell flom er det også mulig å skille mellom oversvømte og ikke-oversvømte områder i skogen.

### 5.2.2 Yamaguchi

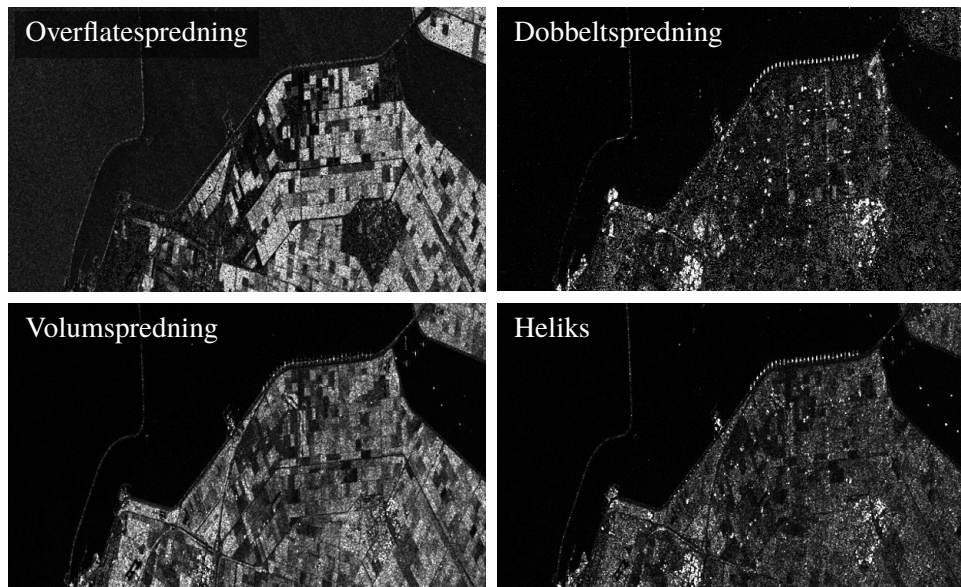
Yamaguchi-dekomposisjon består av fire komponenter, som er volumspredning, dobbeltspredning, overflatespredning og heliks. Overflatespredning og dobbeltspredning modelleres likt som i Freeman-Durden [19]. Volumspredning har en litt annen form der vertikale strukturer i for eksempel skogområder blir mer fremtredende. I [19] er det vist at volumspredningskomponenten er en funksjon av både HV, HH og VV, men det er nok HV-komponenten som bidrar mest. Helikskomponenten er ment å gi en god beskrivelse av menneskelagde objekter med skarpe kanter og hjørner. Denne gjør også at det er lettere å skille ut menneskeskapte strukturer, der hovedspredningssenteret står i en skrå retning i forhold til radarstrålen [20], som ellers kan mistolkes som vegetasjon.

Dekomposisjonen kan enten utføres direkte, eller man kan bruke rotasjon av koherensmatrisen først [20]. Varianten med rotasjon er enkel og effektiv, og gjør det mulig å skille mellom spredningsobjekter som ellers kan være vanskelig å separere slik som orienterte boligblokker (dobbeltspredning) og vegetasjon (volumspredning) [20]. Dette er mulig siden metoden minimerer den kryss-polariserte HV-komponenten, og orienterte boligblokker kommer bedre fram. Volumspredningen fra områder med bebyggelse kommer bedre fram uten rotasjonen.

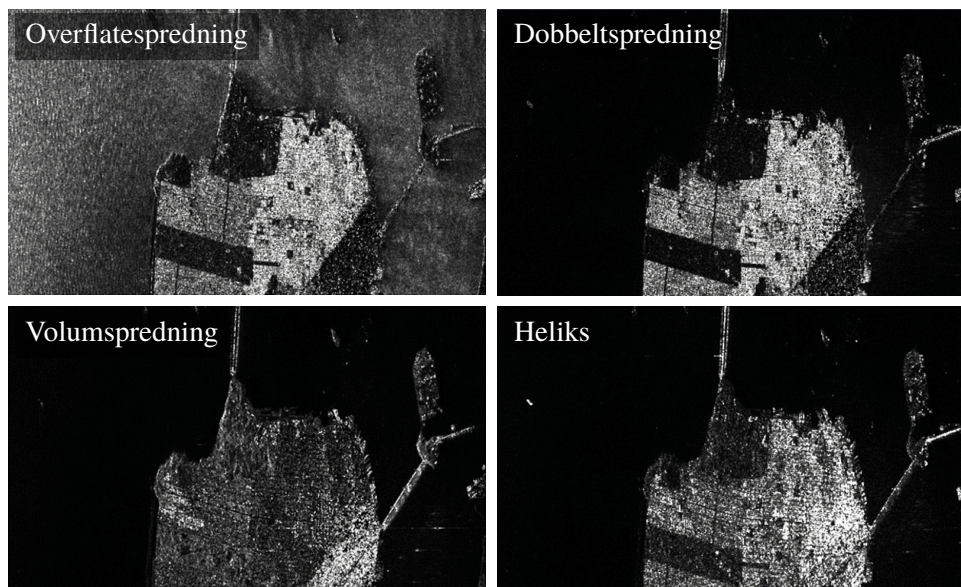
Noen eksempler med Yamaguchi-dekomposisjon er vist i Figur 5.3– 5.6). Figur 5.3 viser de fire komponentene heliks, volum, dobbeltspredning og overflatespredning hver for seg over Flevoland i Nederland. Figur 5.4 viser tilsvarende over San Fransisco, USA. Figur 5.5 viser en sammenlikning

---

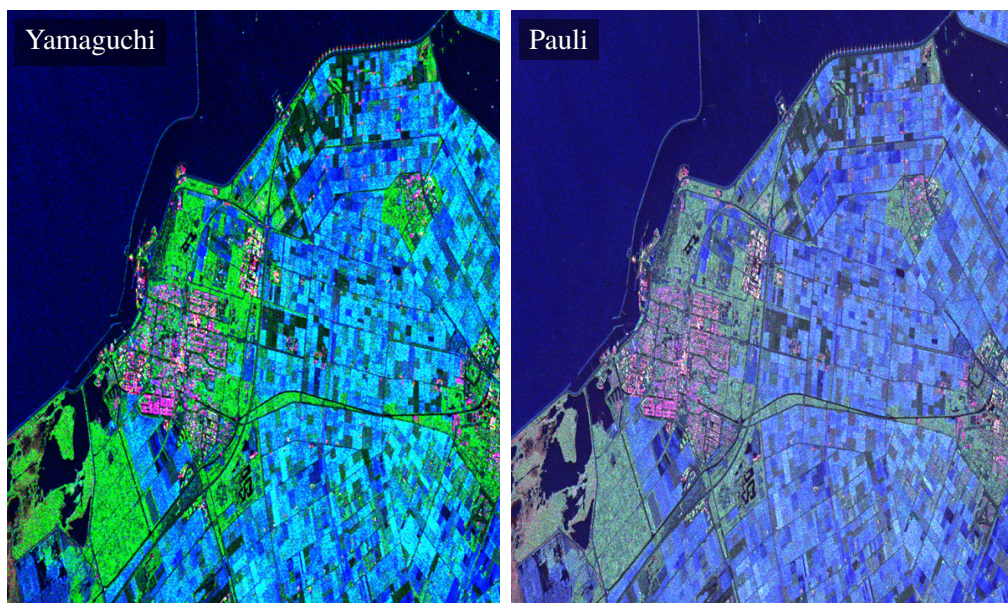
mellom Yamaguchi- og Pauli-dekomposisjon. Figur 5.6 viser en sammenlikning av Yamaguchi-dekomposisjon med og uten rotasjon. Den røde fargen i RGB-bildene viser dobbeltspredning (bygninger, menneskeskapte objekter osv.), grønt viser volumspredning (høyere vegetasjon osv.) og blå viser overflatespredning (åpne områder, sumper, vann og liknende).



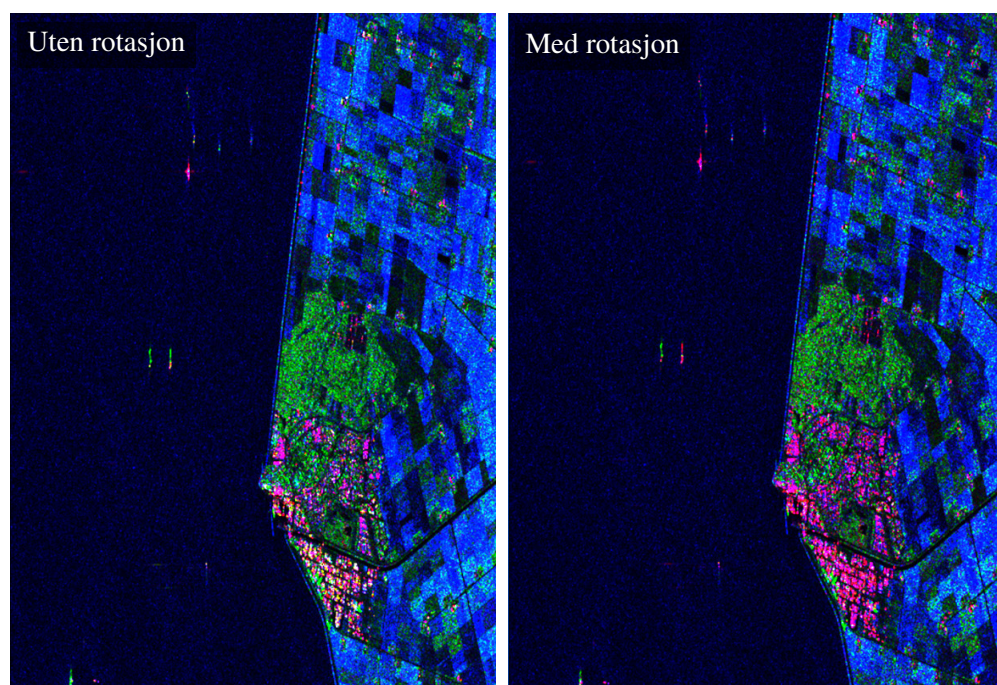
Figur 5.3 De fire komponentene i Yamaguchi-dekomposisjon over Flevoland i Nederland. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)



Figur 5.4 De fire komponentene i Yamaguchi-dekomposisjon over San Francisco, USA. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)



Figur 5.5 Sammenlikning av Yamaguchi- og Pauli-dekomposisjon over Flevoland, Nederland. Rød: Dobbeltspredning, Blå: Overflatespredning, Grønn: Volumspredning for Yamaguchi og krysspolarisering for Pauli. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)



Figur 5.6 Sammenlikning av Yamaguchi-dekomposisjon med og uten rotasjon over Flevoland, Nederland. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)



---

---

## 5.3 Sammenlikning av polarimetriske dekomposisjoner

### 5.3.1 Tradisjonelle dekomposisjoner

Dette delkapitlet sammenlikner eksempler med noen av de polarimetriske dekomposisjonene beskrevet tidligere i kapitlet. Første del av Figur 5.7 viser HH-, VV- og VH-komponentene fra et fullpolarimetrisk RADARSAT-2-bilde tatt i og rundt Oslofjorden 7. februar 2010. Disse komponentene er deretter kombinert med dekomposisjonene Pauli, Krogager og Yamaguchi med rotasjon på siden etter. Komponentene i Pauli-dekomposisjonen er skalert for visualiseringshensyn. Som vanlig er overflatespredning vist i blått, dobbel bounce i rødt og volumspredning i grønt. Denne dekomposisjonen viser hvordan bygninger, skip, is, vegetasjon, sjø og annet gir ulik respons i hver av polariseringskanalene. Krogager viser komponentene kule, diplan og heliks. Yamaguchi med rotasjon viser en klar forskjell mellom volumspredning fra vegetasjon (grønt), overflatespredning fra åkre og annet (blått) og dobbeltspredning fra menneskeskapte objekter (rødt).

En annen sammenlikning er vist i Figur 5.8, som viser et fullpolarimetrisk RADARSAT-2-bilde fra nord for Svalbard med store mengder havis. Et utsnitt av bildet inneholder kystvakt-skipet KV Svalbard inni isen, og utsnittet er vist i HH-polarisering og dekomposisjon med Pauli, Krogager og Yamaguchi. Som det fremgår av figuren gir de forskjellige metodene ulik fremstilling av skipet og isen i bakgrunnen.

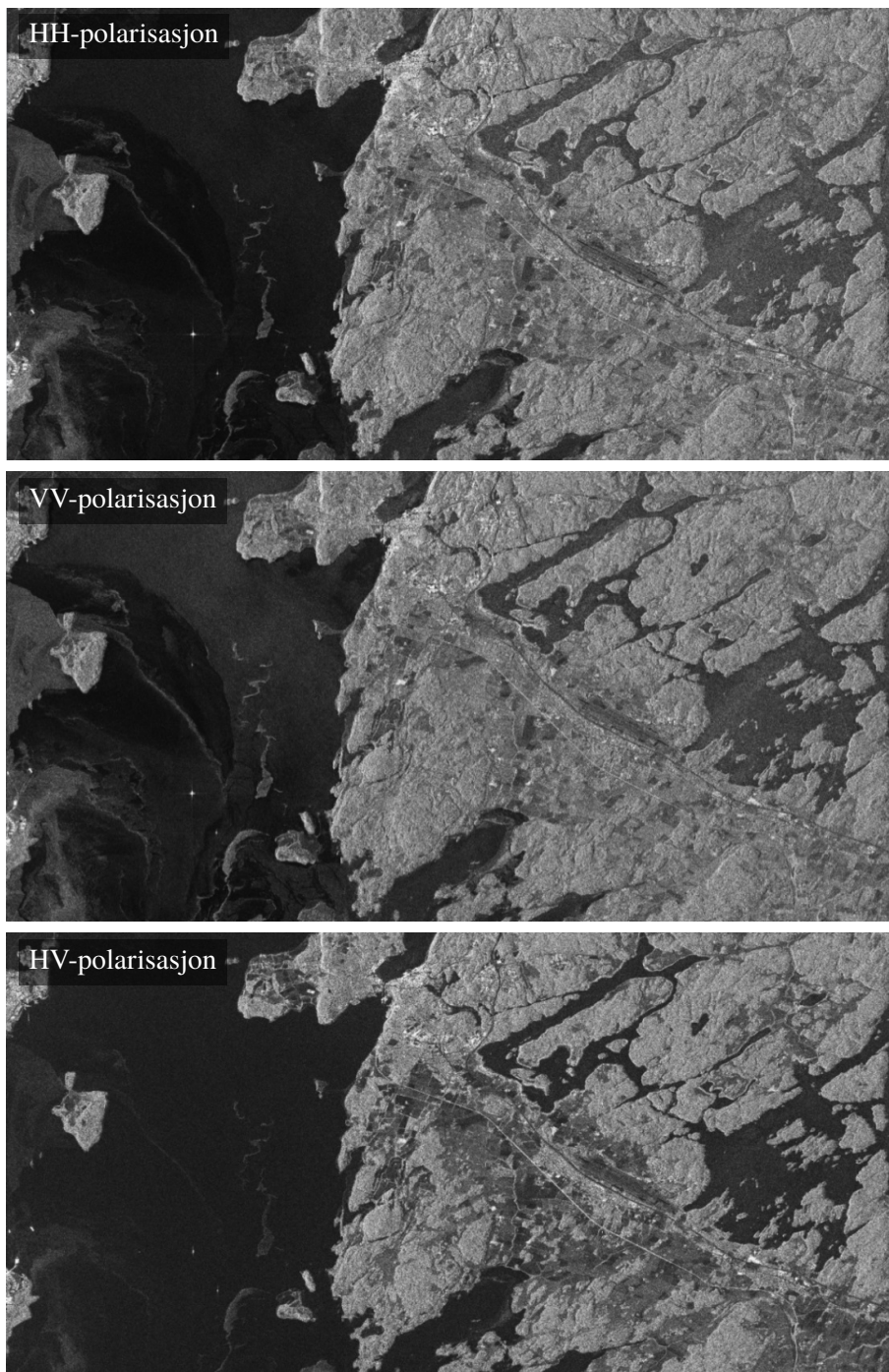
### 5.3.2 Kompakt polarimetri

Kompakt polarimetri vil bli mer tilgjengelig i nær fremtid, som beskrevet i kapittel 4.3. Det kan allerede foretas simuleringer av data ved å bruke fullpolarimetriske data fra eksisterende satellitter. Her vises noen eksempler på simuleringer av *Dual Circular Polarimetry* (DCP, se kapittel 4.3) ved bruk av fullpolarimetriske RADARSAT-2-data. I simuleringen blir de sirkulære polariseringskomponentene RR og RL først beregnet fra fullpolarimetriske data. Deretter regnes Pauli-komponentene overflatespredning (HH + VV), dobbeltspredning (HH – VV) og krysspolarisering (HV) direkte ut fra RR og RL.

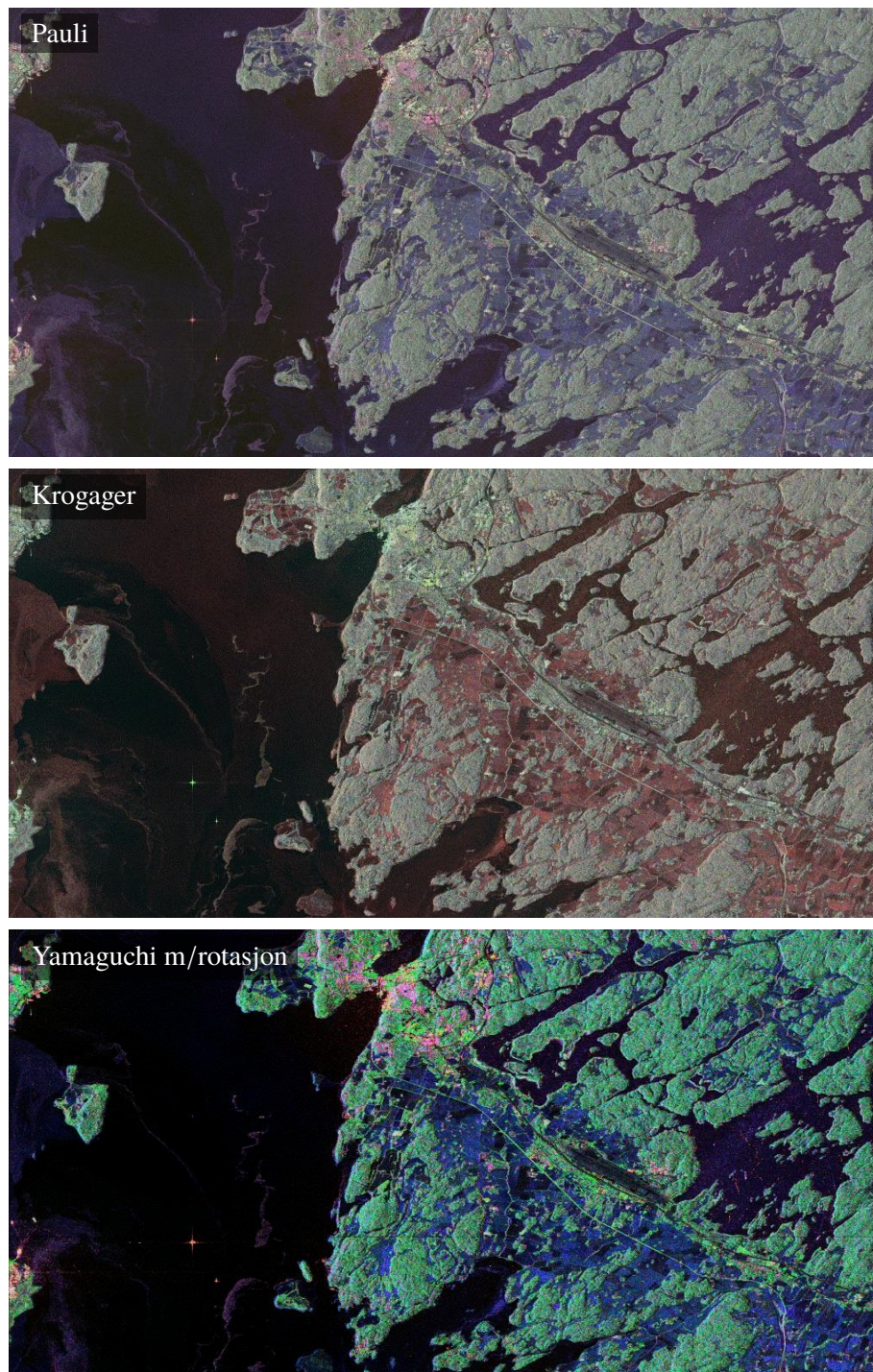
Dobbeltspredning er vist øverst i Figur 5.9 både for simulert DCP og vanlige fullpolarimetriske data fra RADARSAT-2. Dobbeltspredningen beregnes litt annerledes for SAR-data med kompakt polarimetri enn for SAR-data med fullpolarimetri. Midten av figuren viser på samme måte simulert og beregnet overflatespredning (HH + VV), og man kan se at denne spredningsformen er tilnærmet lik. Volumspredning, som estimeres fra krysspolariseringen HV, er vist nederst i figuren. Her kan det sees at kompakt polarimetri overestimerer volumspredning i urbane områder.

De tre spredningsbidragene er slått sammen i en Pauli-dekomposisjon øverst til venstre i Figur 5.10, og her ser man at den grønne fargekanalen med volumspredning er overestimert i DCP-simuleringen. Øverst til høyre kan man tilsvarende se en Pauli-dekomposisjon for en simulering av  $\pi/4$ -modusen og nederst til venstre en simulering for “Circular Transmit-Linear Receive”-modusen. Den vanlige fullpolarimetriske Pauli-dekomposisjonen er vist nederst til høyre.

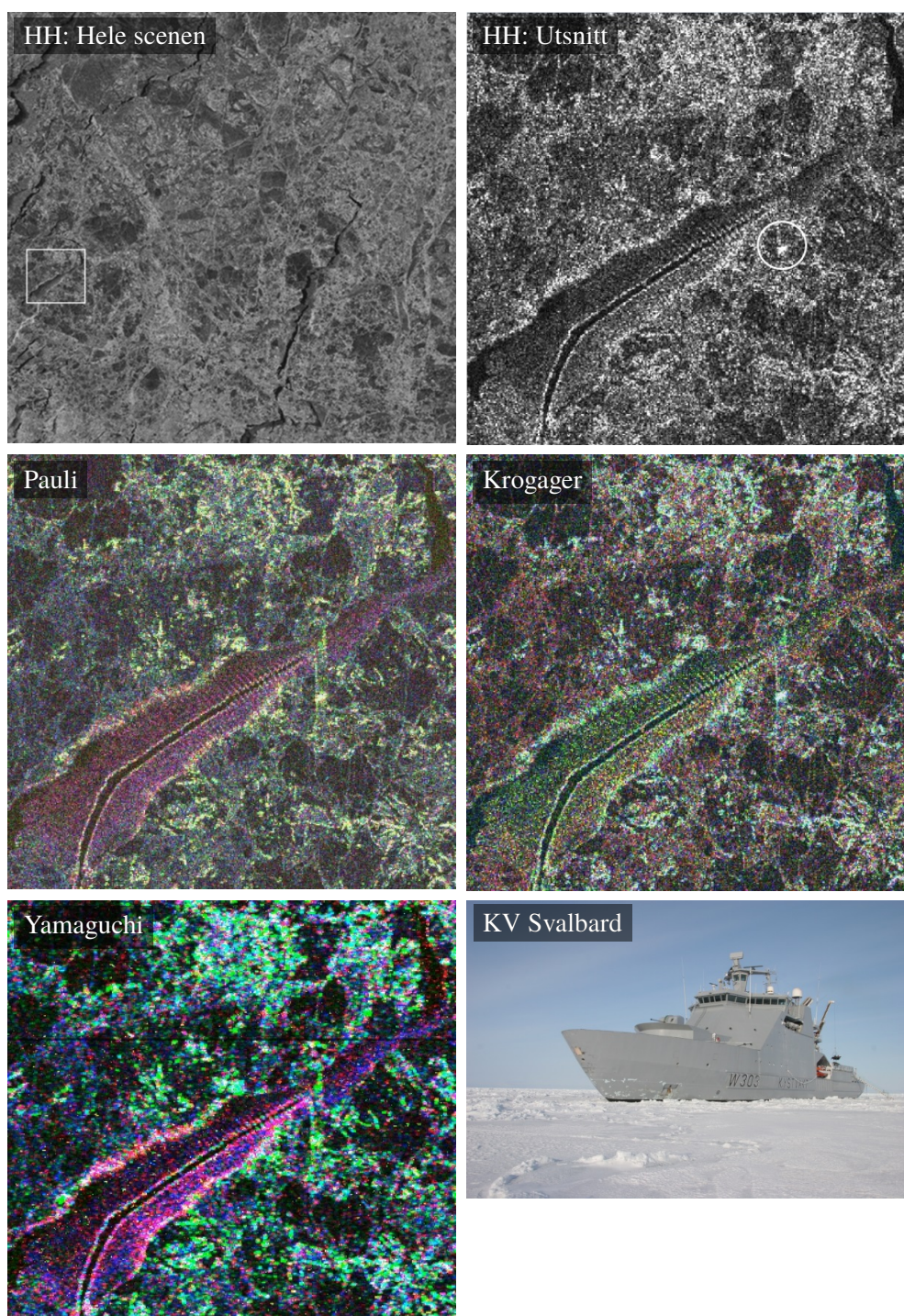
Hvis man sammenlikner simuleringene av Pauli-dekomposisjonene for DCP, CTRLR og  $\pi/4$  i Figur 5.10, ser det ut til at det er  $\pi/4$ -modusen som likner mest på den fullpolarimetriske versjonen.



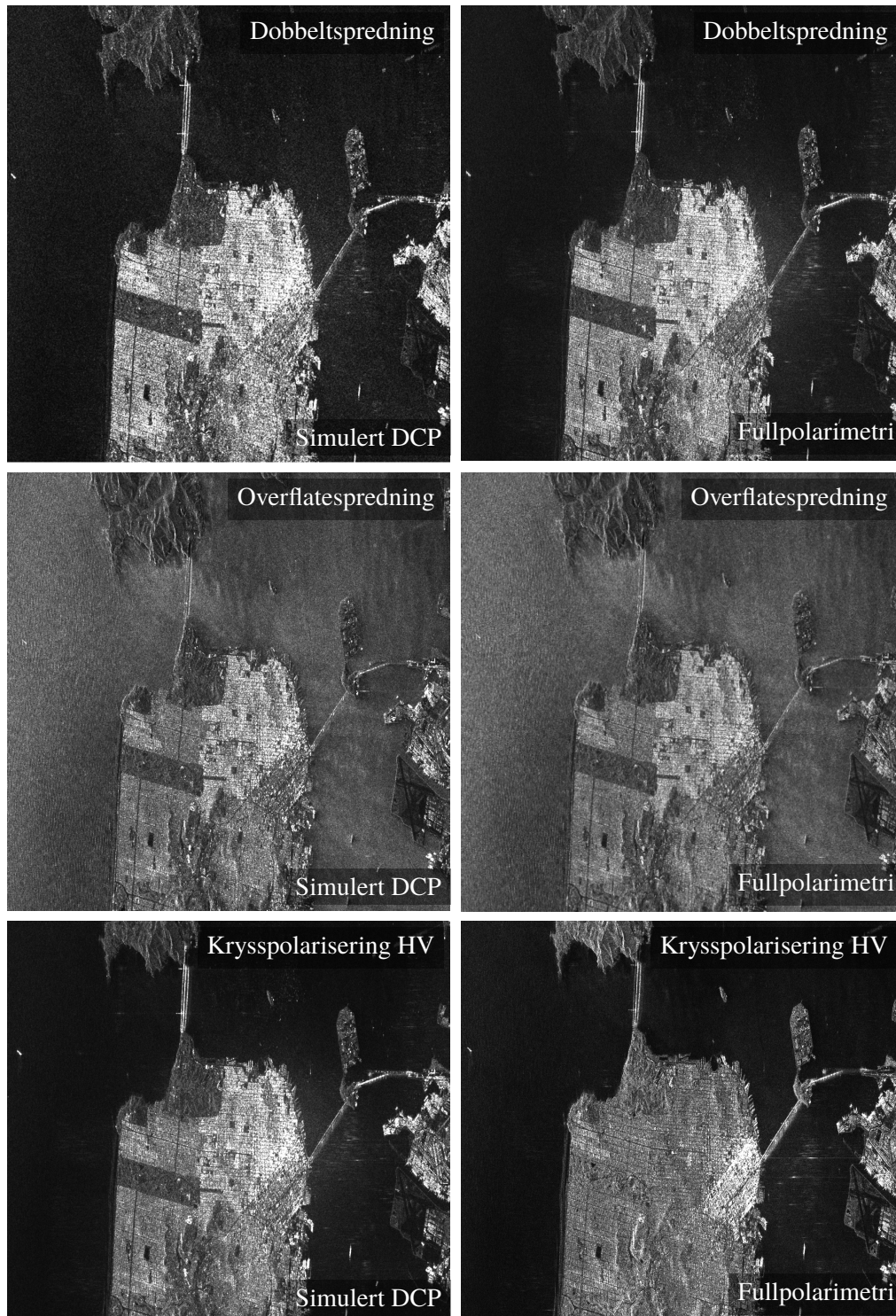
*Figur 5.7 Fortsetter neste side.*



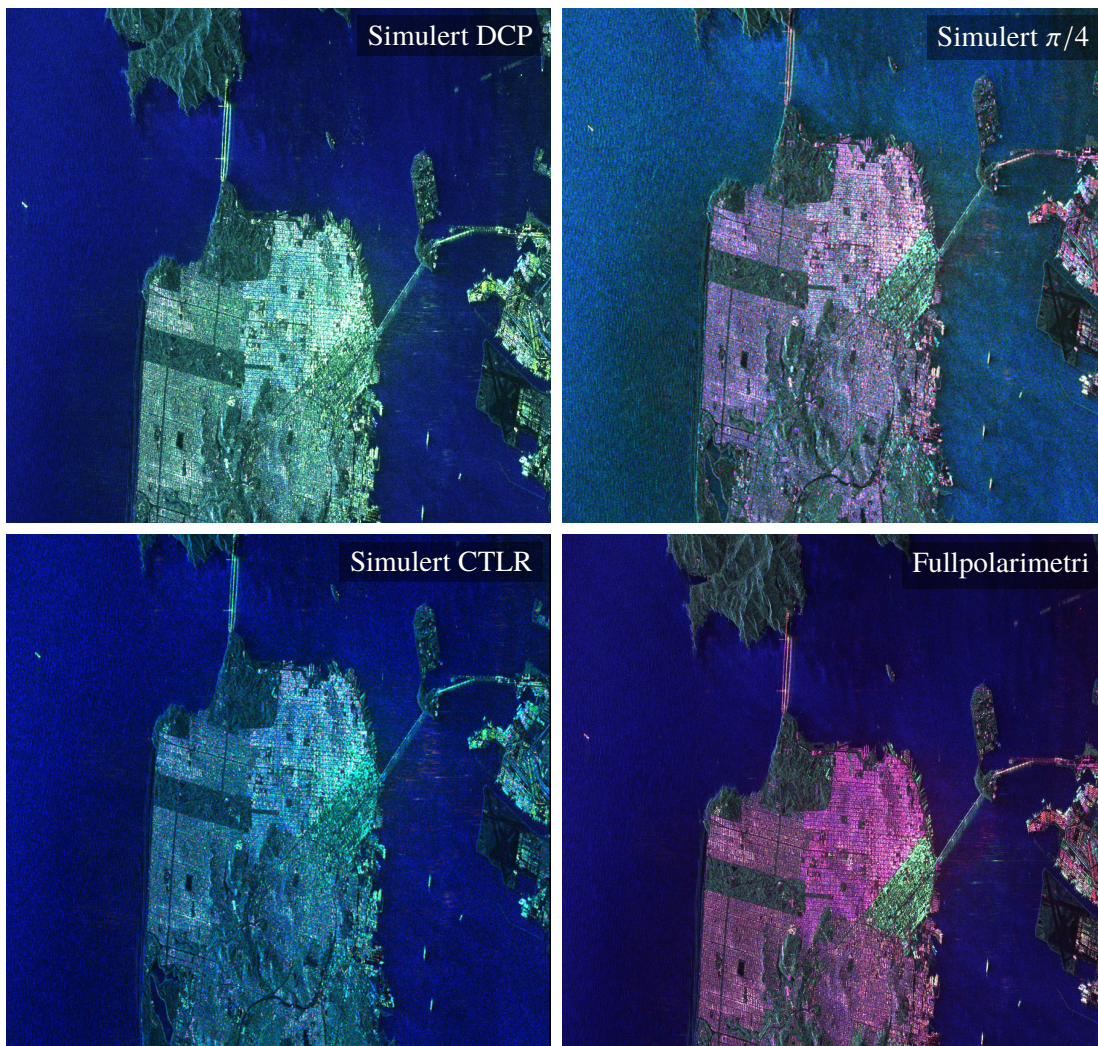
Figur 5.7 Utsnitt av et RADARSAT-2 fullpolarimetrisk bilde fra 7. februar 2010 over deler av Oslofjorden. Området er vist i HH-polarisering (øverst forrige side), VV-polarisering, HV-polarisering, Pauli, Krogager og Yamaguchi med rotasjon (nederst denne siden). (RADARSAT-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. Prosessering fra SLC på FFI.)



Figur 5.8 RADARSAT-2 Fine quad-pol-bilde med HH-polarisering (øverst til venstre) 13. April 2011. Et utsnitt av bildet med KV Svalbard inni sirkelen er vist i HH-polarisering (øverst høyre), Pauli (midten venstre), Krogager (midten høyre) og Yamaguchi (nederst venstre). Et bilde av KV Svalbard er vist nederst til høyre. (RADARSAT-2 SAR data: © raw data CSA, 2011, provided by NSC/KSAT 2011. SAR-bilder prosessert fra SLC på FFI.)



Figur 5.9 Dobbeltspredning, overflatespredning og volumspredning fra simulert DCP til venstre. Tilsvarende for fullpolarimetrisk data til høyre. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)

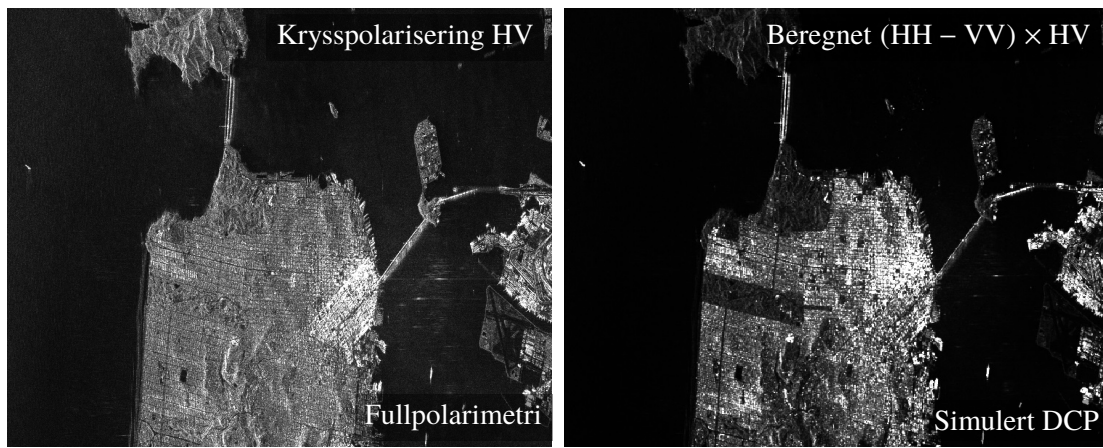


Figur 5.10 Pauli-dekomposisjon for simulert kompakt polarimetri (DCP,  $\pi/4$  og CTLR) og fullpolarimetriske data. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)

---

Denne modusen får bedre fram dobbeltspredning enn de to andre, noe som også er rapportert i [21]. Det kan imidlertid ses at simulert DCP og CTRLR får frem overflatespredning (blåfarge) fra havet bedre enn  $\pi/4$ .

Ved hjelp av simulerte DCP-data ble det beregnet et produkt  $(HH - VV) \times HV$ , altså dobbeltspredning multiplisert med krysspolariseringen HV (dette ble beregnet fra sirkulær polarisering R og L som er brukt i DCP). Resultatet er vist i Figur 5.11 og sammenliknet med krysspolarisering fra fullpolarimetrisk data. Som det fremgår av figuren kan det tydelig ses hvor det er menneskeskapte strukturer, noe som er lovende for bruk av data fra for eksempel RADARSAT Constellation Mission. En annen observasjon er at bakgrunnen er mer undertrykt enn i det fullpolarimetrisk bildet.

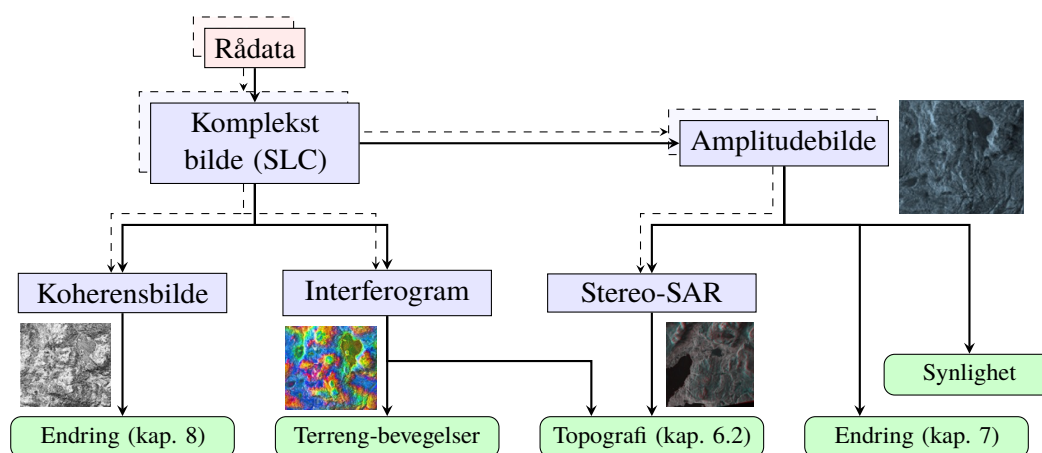


Figur 5.11 Venstre: Krysspolarisering (HV) fra fullpolarimetrisk data. Høyre: Beregnet produkt  $(HH - VV) \times HV$  fra simulert DCP. (RADARSAT-2 Data and Products © MacDonald, Dettwiler and Associates Ltd., 2008 - All Rights Reserved. Prosessering fra SLC på FFI.)

## 6 Interferometrisk og stereo-SAR

Ved å ta to SAR-opptak over samme område kan man få fram tredimensjonal informasjon i området som blir avbildet. Det er to forskjellige måter å gjøre dette på. Den første ligner på metoden som brukes med fotogrammetriske stereoopptak fra fly eller satellitt, og kalles *stereo-SAR*. Den andre kalles *interferometrisk SAR* (InSAR) og bruker faseforskjeller i de to radarbildene. Metodene kan brukes hver for seg eller kombineres.

En visuell fremstilling av relevante interferometriske anvendelser er vist i Figur 6.1. De ulike anvendelsene vil bli nærmere beskrevet i dette kapitlet samt kapittel 7 og 8. For en innføring i interferometrisk SAR anbefales også [22] og [23].



Figur 6.1 Anvendelser av interferometri og endringsdeteksjon med ulike bildeprodukter. Spesielt relevante kapitler for enkelte bokser er indikert.

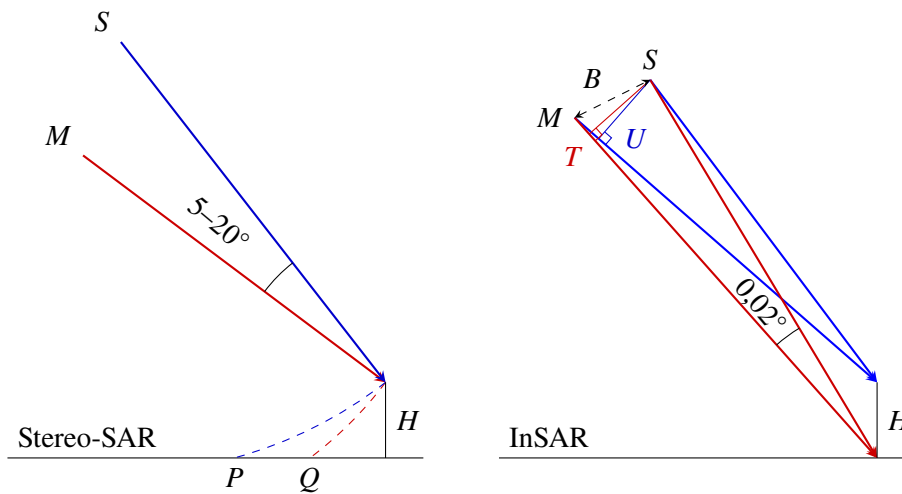
### 6.1 Generelt om interferometri

#### 6.1.1 Opptaksgeometri for stereo-SAR og InSAR

De to basisteknikkene for å beregne høyder fra to SAR-bilder over samme område er illustrert i Figur 6.2. Illustrasjonen til venstre viser geometri for stereo-SAR sett langs satellittbanen, der  $M$  og  $S$  er henholdsvis første og andre satellitt. På engelsk kalles disse *Master* og *Slave*. Hvis man setter en sirkel med sentrum i satellittene og trekker en sirkelbue ned på et referanseplan, skjærer disse i henholdsvis  $Q$  og  $P$ . Høyden  $H$  over planet bestemmes ved å beregne skjæringspunktet mellom sirkelbuene gitt at  $P$  og  $Q$  først er beregnet. Forskjellen i innfallsvinkler for stereo-SAR kan være fra 5 til 20 grader. Stereo-SAR brukes gjerne til å beregne absolutt høyde til ett eller flere faste punkter på bakken, såkalte *ground control points* (GCP).

Illustrasjonen til høyre i Figur 6.2 viser prinsippet for interferometrisk SAR, såkalt *InSAR*. Her er  $M$  og  $S$  veldig mye nærmere hverandre, så vinkelforskjellen er typisk på bare noen få hundredels grader.





Figur 6.2 Geometri for stereo-SAR til venstre og InSAR til høyre. Vinklene for InSAR er forstørret i figuren for visualiseringshensyn.

Når faseforskjellene fra to bilder beregnes i et interferogram, er det egentlig avstandsforskjellen mellom  $MT$  og  $MU$  som blir beregnet. Faseverdiene i interferogrammet brukes til å beregne relative høyder. Når faseverdiene i et utpakket interferogram omregnes til høyder og legges til fastpunkt-høyden, får vi en digital elevasjonsmodell (DEM).

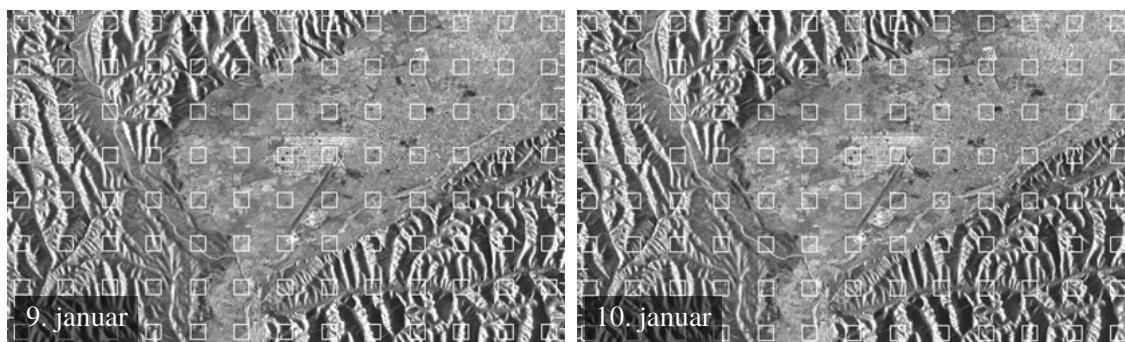
### 6.1.2 Viktige interferometriske uttrykk

I interferometri (InSAR) ønsker man å bruke fasen til radarsignalet i tillegg til amplituden. Man benytter da komplekse bilder av typen *Single Look Complex* (SLC). Bølgelengden i SAR er gjerne 3–24 cm som beskrevet i kapittel 2, og ved å sammenlikne flere bilder kan faseforskjeller indikere forandringer på millimeternivå. Dette prinsippet er også brukt i koherent endringsdeteksjon, som er nærmere beskrevet i kapittel 8. For interferometriske anvendelser kan man benytte to satellitter som flyr etter hverandre eller samme satellitt over flere pass. Uansett er det ønskelig med en noenlunde lik opptaksgeometri for hvert opptak for å kunne sammenlikne fasen i det tilbakespredte signalet.

For å kunne sammenlikne to bilder på pikselnivå er det nødvendig å *koregistre* bildene slik at hver piksel representerer samme geografiske punkt (også kalt samregistrering). Geometrien kan variere noe over bildet, og det er derfor vanlig å bruke en varierende koregistring av bildet inkludert resampling av pikslene. Én metode for å utføre dette går ut på å dele opp bildet i *sub-bilder*, og variere posisjonen til sub-bildene fra hvert bilde slik at man maksimerer krysskorrelasjonen [24]. En annen metode bruker Fourier-transform av sub-bildene. To liknende scener med sub-bilder er vist i Figur 6.3.

Etter koregistring kan man danne et *interferogram* av de komplekse bildene, og dette er relatert til den fysiske høydeforskjellen. Interferogrammet dannes ved å multiplisere det ene bildet med den kompleks-konjugerte av det andre bildet. Hvis bildene kalles  $s_1$  og  $s_2$ , med tilhørende faser  $\phi_1$  og  $\phi_2$ , kan man skrive

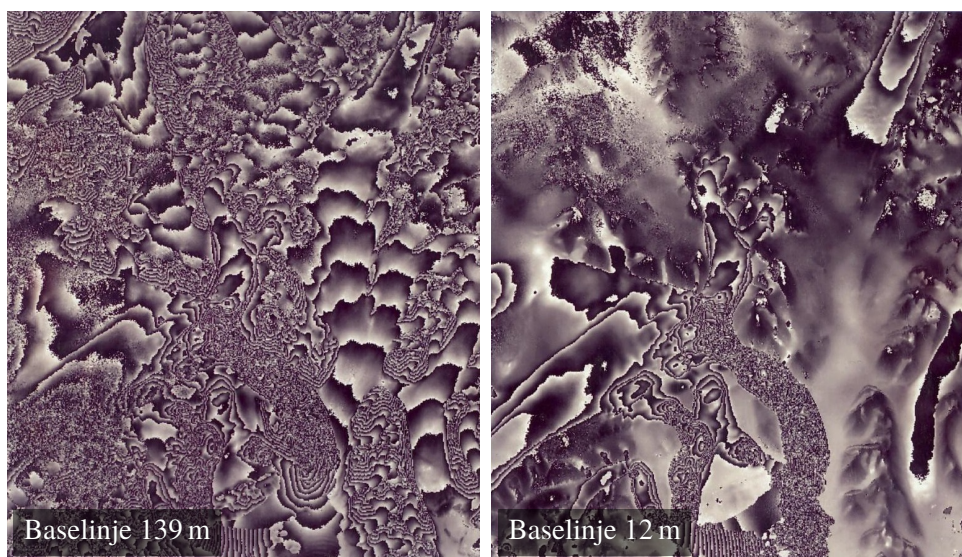
$$\text{Interferogram} = s_1 s_2^* = |s_1| \cdot |s_2| e^{j(\phi_1 - \phi_2)}. \quad (6.1)$$



Figur 6.3 Koreregistrering av to liknende scener fra COSMO-SkyMed, med et sett av sub-bilder. Bildene ble tatt i januar 2010 i nærheten av Meymaneh, Afghanistan. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© COSMO-SkyMed Product-ASI 2010, distributed by e-GEOS)

Siden fasen varierer mellom 0 og 360 grader, oppstår det såkalte *fringes* i interferogrammet i overgangen fra 360 til 0. Det er derfor nødvendig å pakke ut interferogrammet for å få mer kontinuerlige variasjoner, noe som kan være en krevende prosess. Et eksempel på interferogram med fringes er vist i Figur 6.4.

Høydeendringen i hver fringe kalles *ambiguitetshøyde*, og er relatert til den såkalte *baselinjen* som er avstanden mellom satellittbanene under opptak. Baselinjen er indikert som  $B$  i Figur 6.2, og er vanligvis på noen titalls eller hundretalls meter. En større baselinje vil gi mindre ambiguitetshøyde og dermed flere fringes. Dette kan sees i Figur 6.4, som viser to opptak tatt over samme område men med ulik baselinje.



Figur 6.4 Forskjell i baselinje utgjør en stor forskjell i interferometri, her fra opptak med ERS over Svalbard. Bildet til venstre har større baselinje, som gir mange flere fringes. (© Rådata levert av ESA, all dataprosessering utført på FFI)

---

---

Ved å bruke SAR-bilder fra to eller flere pass kan man sammenlikne den interferometriske fasen ved såkalt *differensiell interferometri*. Hvis bildene hadde blitt tatt med nøyaktig samme opptaksgeometri, ville man kunne se forandringer ned til millimeter-nivå direkte uten bidrag fra topografi. Dette er imidlertid ikke realistisk i praksis, og det vil alltid forekomme en viss baselinje. Da kan man benytte en eksisterende DEM for å kompensere for topografi. Eventuelt kan man bruke tre satellittpass der to av dem genererer DEM og det tredje detekterer oppståtte høydeendringer.

Fra to komplekse bilder kan man også se på *koherens*, som er en lokal krysskorrelasjon mellom de komplekse bildene. Den beskriver altså likheten mellom fasen i bildene, og matematisk kan den uttrykkes

$$\text{Koherens} = \frac{E [s_1 s_2^*]}{\sqrt{E [s_1 s_1^*] E [s_2 s_2^*]}}. \quad (6.2)$$

$E [\cdot]$  betyr her forventningsverdi, som medfører at det midles over et lite område rundt hver piksel. Koherensen er spesielt viktig for koherent endringsdeteksjon som er beskrevet i kapittel 8.

### 6.1.3 Stereo-interferometrisk SAR (StInSAR)

Kombinasjonen av stereo-SAR og InSAR kalles *StInSAR*, og denne teknikken er spesielt relevant for topografi og geokoding. Dette er fordi man under geokoding må bruke høyden til pikslene for å vite hvor mye de har blitt forskjøvet i range-retning. Mer detaljerte beskrivelser av StInSAR-prosessering er beskrevet i [25] i kapittel 3, [26] i kapittel 3 og [27] i kapittel III. En beskrivelse av høydeberegning og geolokalisering i stereo-SAR er også beskrevet i siste referanse. Her rapporteres det at posisjoneringsnøyaktigheten av hjørnereflektorer som er stereo-høydeestimert er noen få desimeter ved bruk av TerraSAR-X-data.

## 6.2 Topografi

Ved produksjon av kart vil det være interessant å estimere landskapets topografi, og dette kan også være relevant når man vurderer fremkommelighet i kupert terreng. Det eksisterer høydemodeller fra hele verden med varierende nøyaktighet, men topografi kan også beregnes på egen hånd ut fra SAR-bilder. De følgende delkapitlene vil beskrive ulike måter dette kan beregnes på.

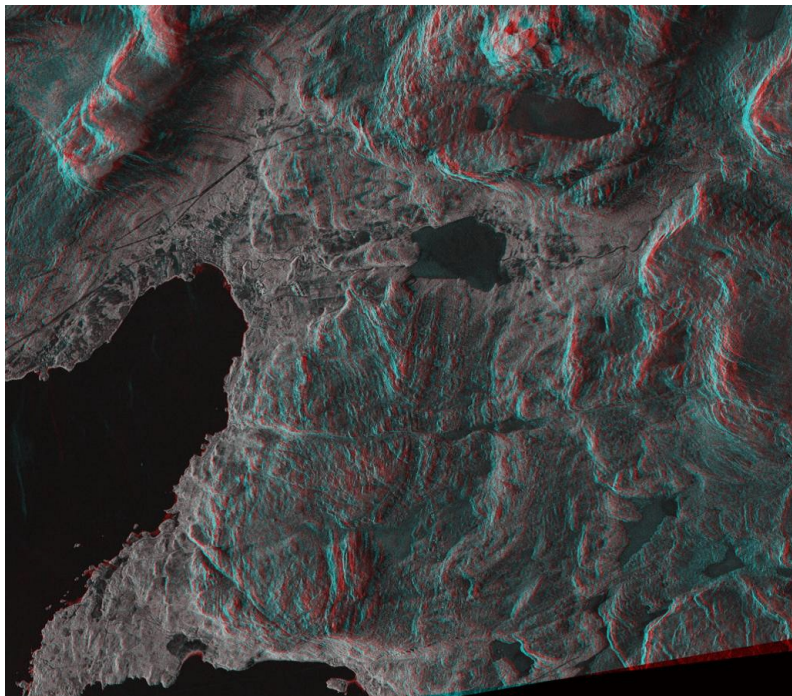
### 6.2.1 Enkel estimering av topografi fra stereo-SAR

Den kanskje enkleste metoden for beregning av topografi benytter stereo-SAR, og trenger kun to amplitudebilder med ulik innfallsvinkel. SAR-scenens fase er dermed ikke nødvendig, noe som for eksempel letter kravene til koregistrering. I Figur 6.5 er to bilder med innfallsvinkel på henholdsvis  $36^\circ$  og  $42^\circ$  satt sammen i en såkalt *anaglyf* ved å bruke to fargekanaler. I et slikt bilde kan man ved hjelp av spesielle anaglyfe briller (3D-briller) få et visuelt inntrykk av terrengets topografi. Også uten briller får man et godt inntrykk av hvor det er fjell der det er stor forskjell mellom de to fargekanalene. Anaglyfen her ble dannet ved å først geokode hvert av bildene til

---

---

UTM-projeksjon, koregistrere bildene ved å bruke ett enkelt punkt og til slutt plassere bildene i hver sin fargekanal [28].



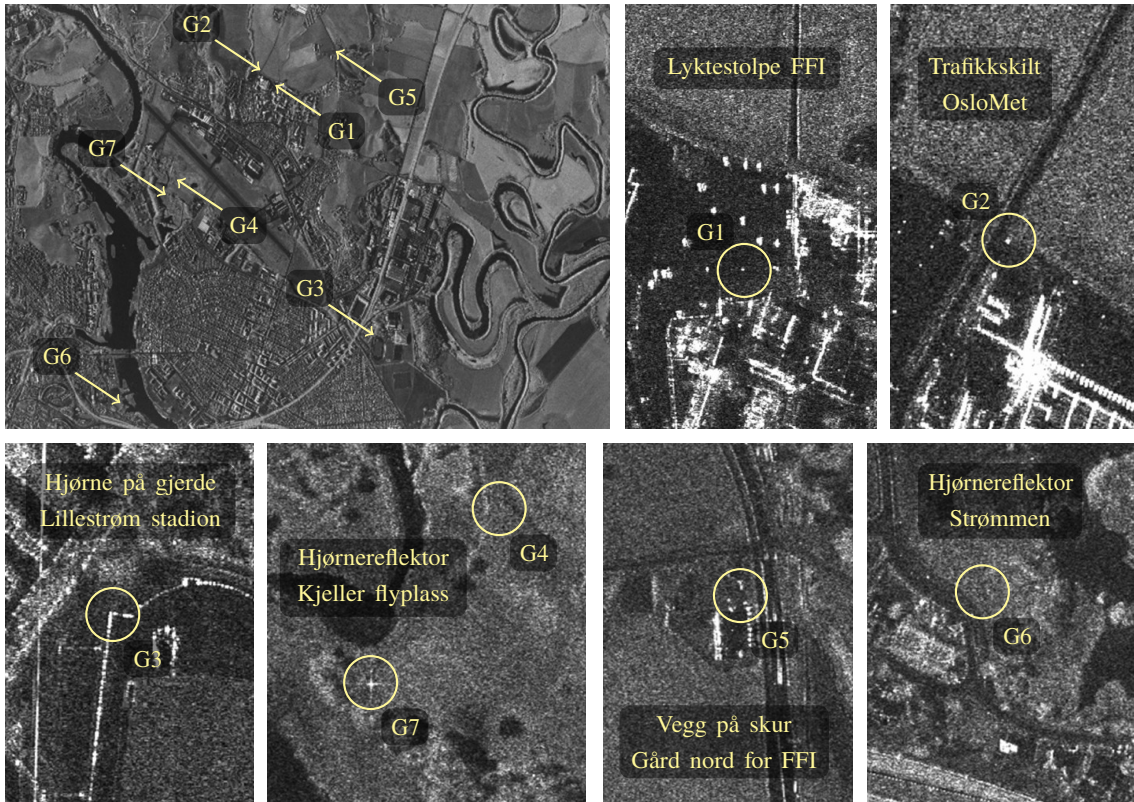
*Figur 6.5 Stereo-SAR anaglyf-bilde fra Bjerkvik i Nord-Norge produsert fra to RADARSAT-2 UltraFine-bilder tatt 8. og 11. april 2010. Oppløsningen er rundt 2 m og innfallsvinklene er 36° og 42° Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (RADARSAT-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010).*

Det er også mulig å beregne høyder fra stereo-opptak i stedet for å danne en anaglyf. Da lar man en maske vandre suksessivt over begge bildene mens man registrerer den lokale forskyvningen. Denne kan så oversettes til en høyde ut fra geometribetraktninger fra satellitten.

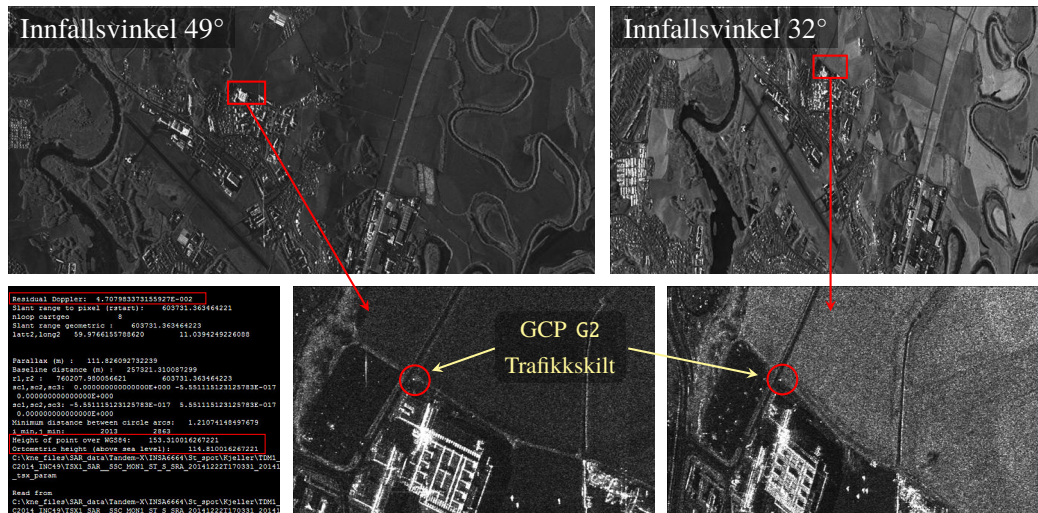
### **6.2.2 Topografi fra StInSAR**

Vi vil her demonstrere StInSAR-teknikken for å generere DEM ved bruk av data fra satellittene TanDEM-X (TDX) og TerraSAR-X (TSX). En høydeestimering ble først gjort for enkelte GCP-er, og disse punktene (G1–G7) er vist i Figur 6.6. Punktene G4 og G6 er hjørnereflektorer, men de er ikke synlige i bildet siden de er vendt østover og ment for sydgående pass. Punktene er imidlertid oppmålt med GPS, og kan derfor likevel brukes som GCP og som referansepunkt for å sjekke høydenøyaktighet av generert DEM.

Punktet G2 er et trafikkskilt ved siden av universitetsbygningen til OsloMet. I Figur 6.7 kan dette punktet ses i to scener tatt med Staring Spotlight-modusen fra TSX med innfallsvinkler på henholdsvis 32° og 49°. Beregnet høyde over havet er i dette tilfellet vist på figuren som 153 m, som er høyde over referanseellipsoiden fra WGS84. Ortometrisk høyde (høyde over havet) er 114,8 m.



Figur 6.6 Øverst til venstre: TSX Staring Spotlight-scene fra 9. mars 2015, med 6 GCP-er indikert. De andre bildene viser utsnitt rundt hver av GCP'ene. Innfallsvinkel er 49°. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 6.7 Høydeestimering for punktet G2 ved å bruke et stereo-par av Staring Spotlight-scener over Kjeller. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

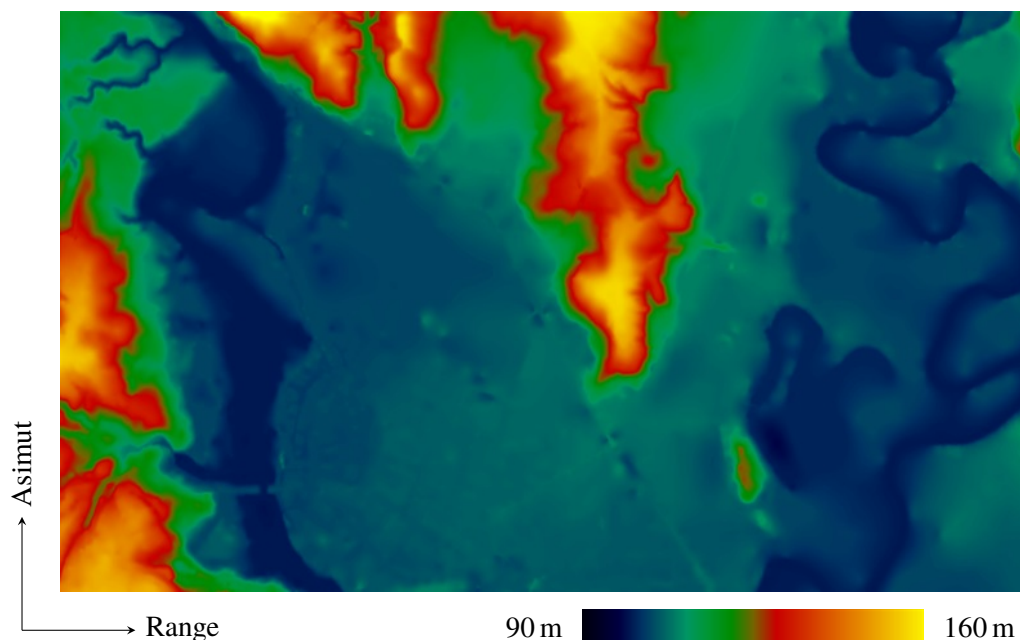
---

---

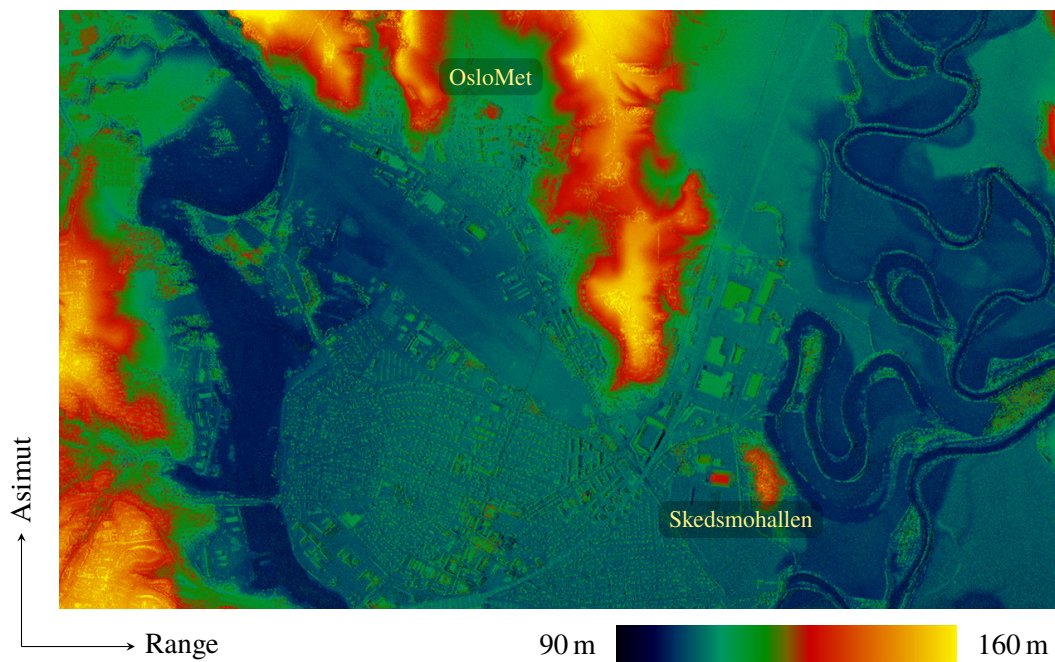
To scener tatt med omtrent samme opptaksgeometri fra TSX og TDX brukes deretter til å generere DEM, med innfallsvinkel på  $49^\circ$ . For å pakke ut det genererte interferogrammet ble det benyttet en eksisterende grov høydemodell fra området med 10 m oppløsning (nord og øst). Denne høydemodellen i slant-range er vist i Figur 6.8. Resultatet av det utpakkede interferogrammet er vist i Figur 6.9, og vi ser at det dukker opp mange detaljer som ikke finnes i den eksisterende høydemodellen. Spesielt OsloMet-bygningen og idrettshallen Skedsmohallen, som er de to høyeste bygningene i området, vises veldig klart. Et bananformet område blir også mer klart i nærheten av Skedsmohallen. Dette er et lite høydedrag med et skogholt som også ses i optiske satellittbilder fra området.

Den beregnede høydemodellen har så langt vært vist i slant-range, som har en annerledes geometri enn i virkeligheten. Forskjellen oppstår både ut fra innfallsvinkelen fra satellitten og fra forskyvning i range-retning ut fra høyden radarrefleksene kommer fra. For å geokode riktig må det brukes en høydemodell for å legge pikslene i riktig posisjon, slik som den genererte slant-range DEM-en i Figur 6.9. Et ferdig geokodet TSX-bilde tatt med Staring Spotlight-modusen er vist i Figur 6.10. Her ser man at kantene på bildet er noe ujevne på grunn av høydeforskjeller. En geokodet DEM fra StInSAR er vist i Figur 6.11.

For å estimere høydenøyaktigheten i de genererte høydemodellene kan man benytte fastmerker. Disse kan for eksempel finnes på [www.kartverket.no](http://www.kartverket.no), og Figur 6.12 viser et skjermbilde med trekantpunkter og jernbanepunkter. Høydenøyaktigheten er presentert i detalj i [25], og der er det vist at det holder å bruke ett GCP for å oppnå middels feilhøyde bedre enn 0,38 m og RMS-avvik bedre en 0,84 m. Det ble da midlet over 14 trigonometriske punkt og fire scener. Det er også vist at nøyaktigheten blir bedre ved å bruke tre hjørnereflektorer bestemt ved differensiell GPS som GCP-er. Grunnen til dette er sannsynligvis at hjørnereflektorene er plassert på et flatt jorde, og høydeberegningene bruker midling av piksler i små områder rundt punktene.



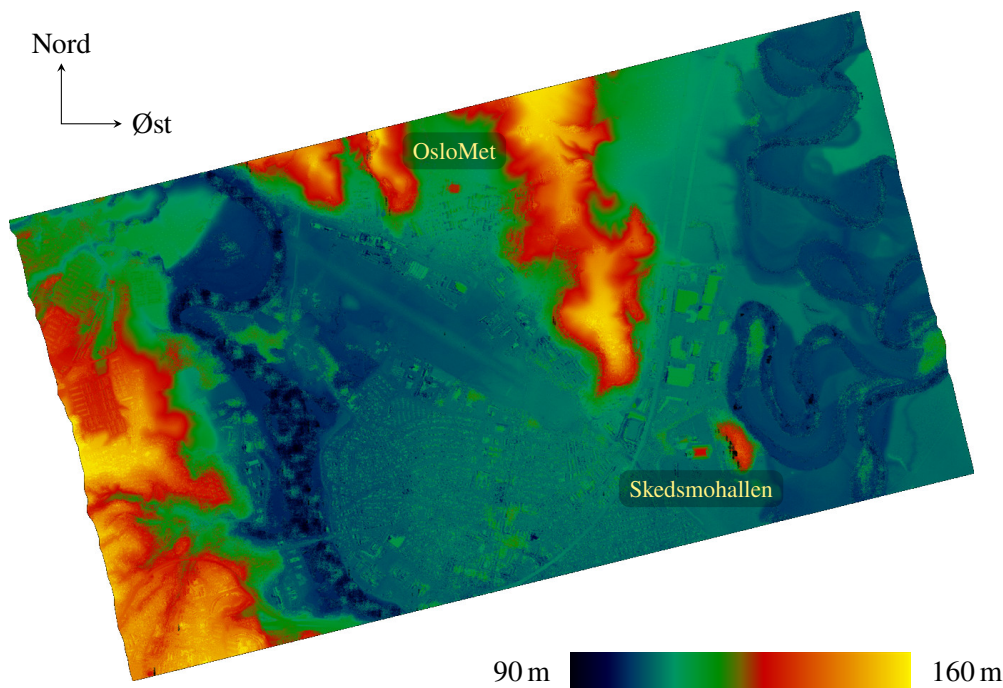
Figur 6.8 En grov 10 meters terrengmodell lagt i samme projeksjon som et SAR-bilde i slant-range. (Kilde: [www.kartverket.no](http://www.kartverket.no))



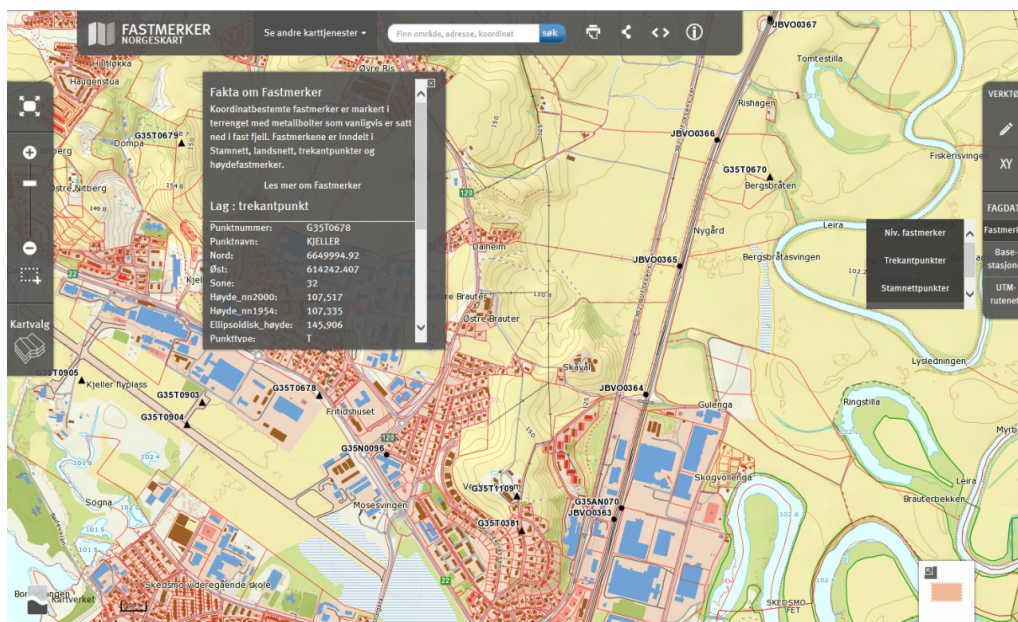
Figur 6.9 En slant-range DEM generert fra Staring Spotlight TSX/TDX data 24. januar 2015 over Kjeller og Lillestrøm. Innfallsvinkel er 49°. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 6.10 Geokodet Staring Spotlight TSX-bilde fra 10. mars 2015. Pikkelsestørrelsen er 1,8 m og innfallsvinkelen er 32°. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 6.11 Geokodet DEM fra 10. mars 2015. Området er det samme som i amplitudebildet i Figur 6.10. Fargeskala for høyder er vist fra 90–160 m. Pikselstørrelsen er 1,8 m. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 6.12 Kart som viser trigonometriske punkter (fastmerker) i Kjeller-området. Trekantpunktene er vist med en sort trekant (for eksempel G35T0678) og jernbanepunkter med en sort kule (for eksempel JBVO0364). (Kilde: [www.kartverket.no](http://www.kartverket.no))



---

---

En tidligere FFI-rapport beskriver en detaljert beregning av høydemodell over Bjerkvik i Nord-Norge, med bruk av COSMO-SkyMed-data [28]. Høydemodellen er sammenliknet med kart fra Statens Kartverk, og det vises at det er en mye større grad av detaljer i den interferometriske høydemodellen.

## 6.3 Estimering av høyden til objekter

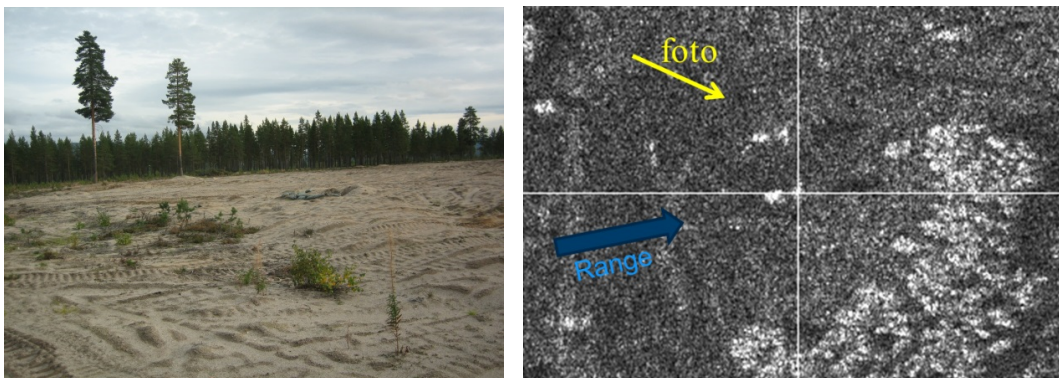
Både InSAR og stereo-SAR kan brukes til å estimere høyden til objekter. Man kan for eksempel bestemme høyden til punktliknende objekter i forhold til et flatt område på bakken. For punktformede objekter er stereo-SAR best egnet. Da kan man også bestemme absolutt høyde (altså høyde over havet som oppgis i et kart). Hvis det er utstrakte objekter, er det best å midle piksler i en InSAR-generert DEM.

### 6.3.1 Enkel høydeestimering fra radarskygge

Dersom SAR-bilder er tatt med stor innfallsvinkel, vil objekter i bildene etterlate signifikante skygger der radarsignalet ikke rekker frem. Dette gjør at høyden av for eksempel trær kan estimeres basert på målt lengde i bildet sammen med innfallsvinkelen. En slik høydeestimering kan utføres med kun ett amplitudebilde, og krever dermed ikke bruk av stereo-SAR eller InSAR.

I Figur 6.13 ser man to enkeltstående trær med klare skygger fra stammen og trekronen i range-retning. Fra det ene treet ble lengden av skyggen fra hele treet estimert i programvare til 31 m, mens skyggen av stammen ble estimert til 16 m. Bildet ble tatt med en innfallsvinkel på  $57^\circ$ , og ut fra dette kan trehøyden estimeres slik:

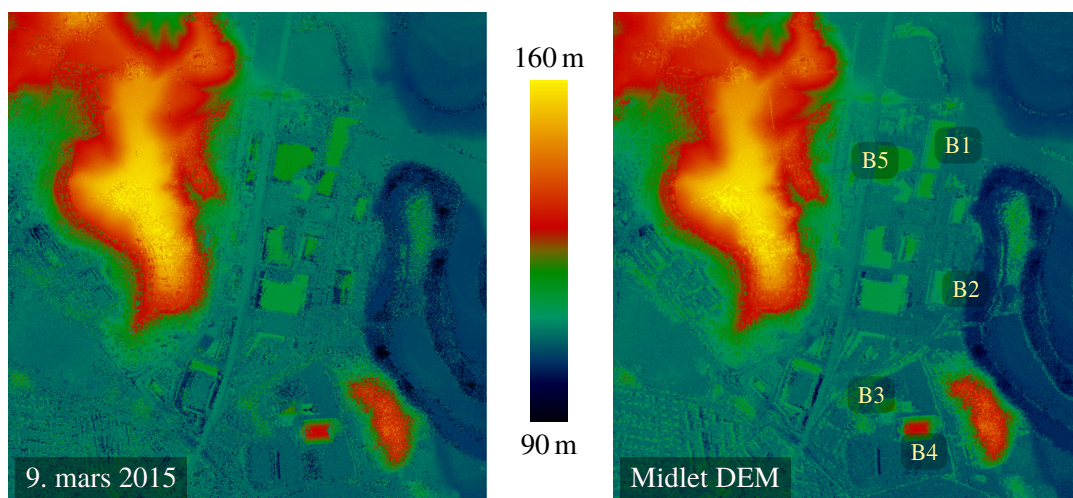
- Stammehøyde:  $16 \text{ m} \times \tan(90^\circ - 57^\circ) = 10 \text{ m}$
- Høyde av hele treet:  $31 \text{ m} \times \tan(90^\circ - 57^\circ) = 20 \text{ m}$



Figur 6.13 Estimering av trehøyde fra enkelttrær, ved hjelp av skyggen fra radaravbildningen.  
Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.

### 6.3.2 Høydeestimering basert på DEM

Et utsnitt av området rundt Skedsmohallen i nærheten av Lillestrøm, som er beskrevet tidligere i kapittel 6.2, er vist i Figur 6.14. Skedsmohallen er her bygning B4. Bildet til venstre viser en enkel



Figur 6.14 Venstre: DEM laget med StInSAR fra 9. mars 2015. Høyre: Gjennomsnittlig DEM fra 22. desember 2014, 24. januar 2015 og 9. mars 2015 som gir mindre støy. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

DEM fra 9. mars 2015 med innfallsvinkel på  $49^\circ$  generert med StInSAR. Bildet til høyre viser en midling av tre høydemodeller fra 22. desember 2014, 24. januar 2015 og 9. mars 2015. Alle bildene har en innfallsvinkel på  $49^\circ$ . Det er tydelig at støyen er redusert i den midlede DEM-en til høyre der flere detaljer kommer frem. Forskjellen ble kvantifisert ved å bruke ett GCP samt tre hjørnereflektorer og åtte trigonometriske punkter som referanser. Dette ga følgende for de to bildene:

- Gjennomsnittlig feil på 0,12 m og RMS-avvik på 0,81 m for scenen fra 9. mars.
- Gjennomsnittlig feil på 0,14 m og RMS-avvik på 0,48 m for midlet DEM.

Et annet eksempel er gitt i [25], der det er vist at midling over flere scener fra Nikel fra ulike tidspunkter og med ulike innfallsvinkler gir en betydelig forbedret høydenøyaktighet.

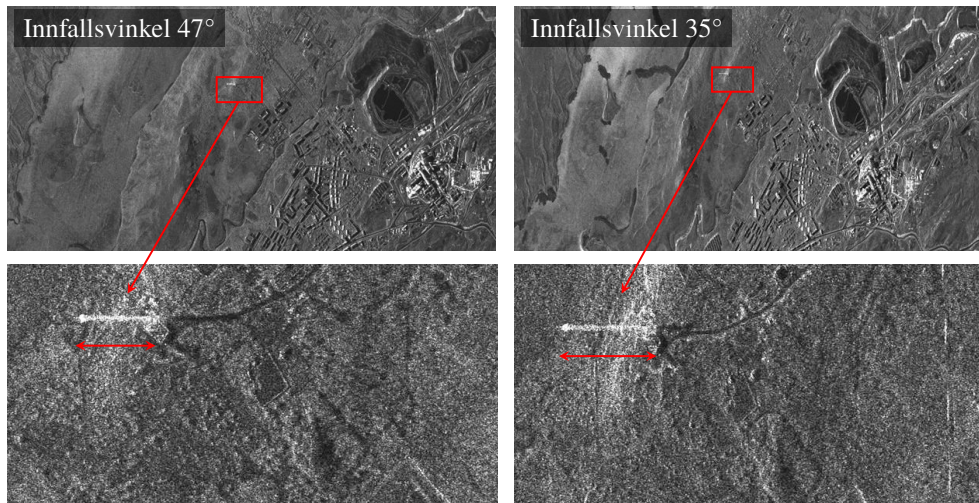
Beregnet høyde av bygningene er gitt i Tabell 6.1. Her er det også med en bygning B6 som ikke vises på Figur 6.14, og dette er OsloMet-bygningen som ligger lenger nordvest. Resultatene er sammenliknet med to ytterlige metoder som er måling med laserpenn med geometrisk utregning, samt høyder hentet fra Google Earth. Som vist i tabellen er forskjellen mellom beregnet høyde og målt høyde med laserpenn under én meter, bortsett fra for bygning B5 der forskjellen er 2,4 m.

	StInSAR DEM [m]	Laserpenn [m]	Google Earth [m]
B1	7,5	8,4	8
B2	9,6	10,0	10
B3	14,6	14,8	16
B4	23,2	23,5	24
B5	8,4	10,8	10
B6	14,6	15,3	15

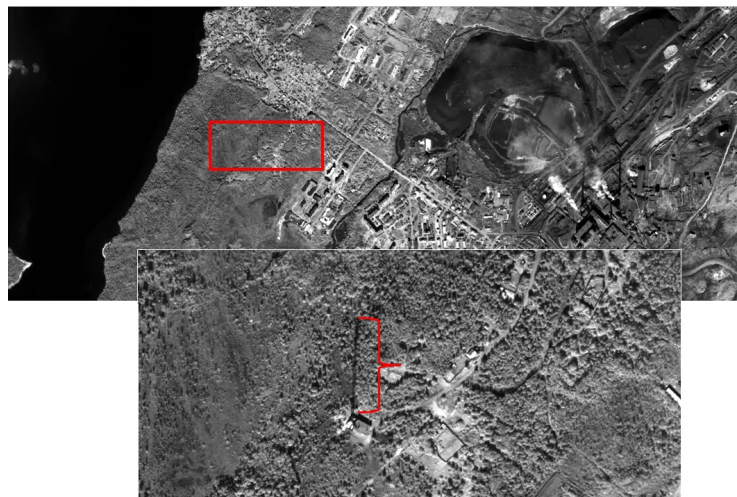
Tabell 6.1 Høyden av bygningene B1-B6 beregnet fra StInSAR. I tillegg målte høyder og oppgitte høyder fra terrengmodellen i Google Earth.

### 6.3.3 Høydeestimering kun basert på stereo-par

Stereo-SAR kan også brukes til å estimere høyden av objekter uten bruk av DEM. Figur 6.15 viser to scener fra Nikel i Russland fra ulike datoer. Bildene ble tatt med ulik innfallsvinkel på henholdsvis 47° og 35°, og man kan tydelig se det som kan være en radiomast som får ulik utstrekning i de to bildene. Stereo-SAR brukes til å estimere høyden, og ved å bruke to ytterligere stereo-par og midle alle tre blir høyden 74,7 m.



Figur 6.15 Et stereo TerraSAR-X bildepar over Nikel ved den norsk-russiske grense fra 13. januar (venstre) og 16. februar (høyre) 2015. Forstørrede bilder nederst viser et objekt som kan være en radiomast. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 6.16 WorldView-2 bilde over Nikel den 17. august 2011. Det nederste bildet er en forstørring av firkanten fra det øverste bildet, og her kan man se skyggen til masten. (© 2011 DigitalGlobe Incorporated, Longmont CO USA 80503-6493, DigitalGlobe and the DigitalGlobe logo are trademarks of DigitalGlobe)

---

---

Det samme objektet er vist i et optisk bilde fra satellitten WorldView-2 i Figur 6.16. I bildeutsnittet nederst er skyggen markert med en rød hake. Høyden kan da beregnes ved å bruke solhøyde. Lokalt tidspunkt for bildet var 13:10:03 den 17. august 2011, og ved å konsultere for eksempel nettsiden [www.timeanddate.com](http://www.timeanddate.com) oppgis vinkelhøyden til sola til 33°. Siden skyggen er målt til 118,1 m i bildet, gir dette en beregnet høyde for radiomasten på 76,7 m. Dette stemmer godt overens med beregnet høyde fra SAR på 74,7 m. Noe av usikkerheten oppstår fordi bestemmelsen av topp og bunn av masten er noe unøyaktig i bildene og solvinkelen kun er oppgitt i hele grader.

## 6.4 Studie av skogområder rundt Åraksbø

Vi vil her diskutere resultater fra skogområder rundt Åraksbø i Setesdal, som er et område med kupert terreng. Først brukes koherensbilder til å se på dekorrelasjon over skog. Deretter genereres en DEM som brukes til å estimere skoghøyde ut fra eksisterende høydemodell<sup>1</sup>. Satellittene som ble brukt i dette arbeidet er TSX og TDX. Disse satellittene opererer i X-bånd og har dermed liten penetrering inn i vegetasjonen.

Åraksbø er ei bygd i Setesdal i Agder, som ligger på østsiden av Åraksfjorden. Et kart over området er vist i Figur 6.17, og den samme figuren viser også et flybilde. Høyde over havet varierer fra 203 m på Åraksfjorden til 937 m på Reiskvæven mot nordøst. I flybildet ser man tydelig skogområdene nede i Setesdalen og oppover liene til der snauheia starter ved rundt 700 m. En kraftlinje går sørover fra vannet i nord, og følger tregrensa ganske nøyaktig det første stykket.

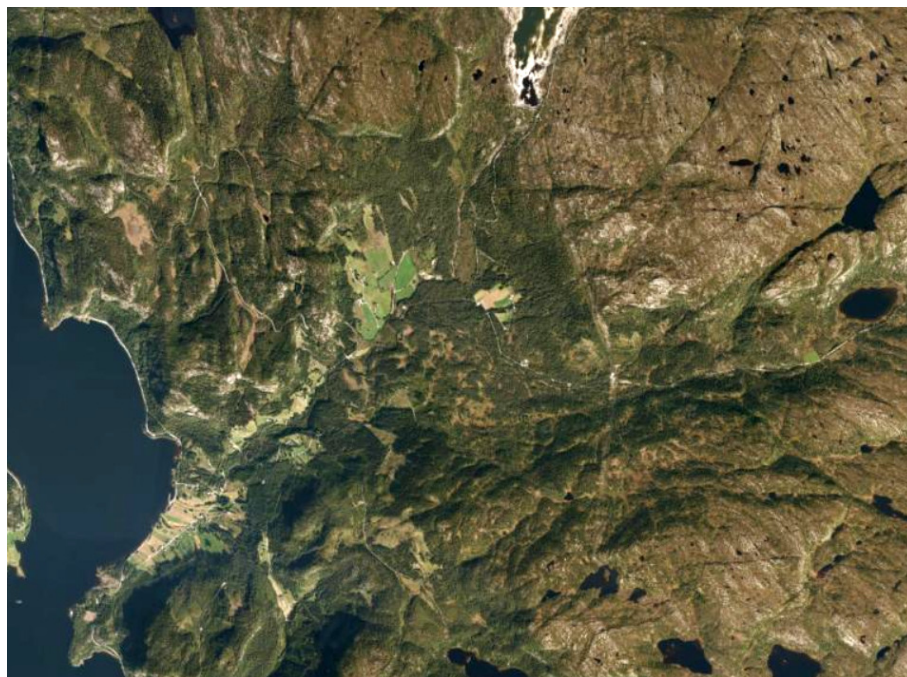
### 6.4.1 Diskusjon rundt koherensbilder

Figur 6.18 viser et monostatisk slant-range-bilde over Åraksbø, tatt med Spotlight-modusen til TSX. Denne dagen var det varierende grad av snø i området, med 30 cm snø i Åraksbø ved fjorden og 120 cm snø ved heiene i nærheten av vannet i nord. Nederst i samme figur vises koherensen for TSX og TDX i monostatisk modus, altså at satellittene sender og mottar radarsignaler hver for seg som vist i Figur 3.7. Vi ser at koherensen er aller best nede i bygda (gul/oransje) og noe lavere på heiene (mørk oransje). Dette er sannsynligvis på grunn av forskjellen i mengden snø. Det er også en betydelig dekorrelasjon over skogområdene (grønt med litt rødt), og noe av grunnen er tidsforskjellen på 10 sekunder mellom opptakene fra hver av satellittene. Det ses også at små skogkratt på heiene gir mer dekorrelasjon enn de snødekte bare heiene.

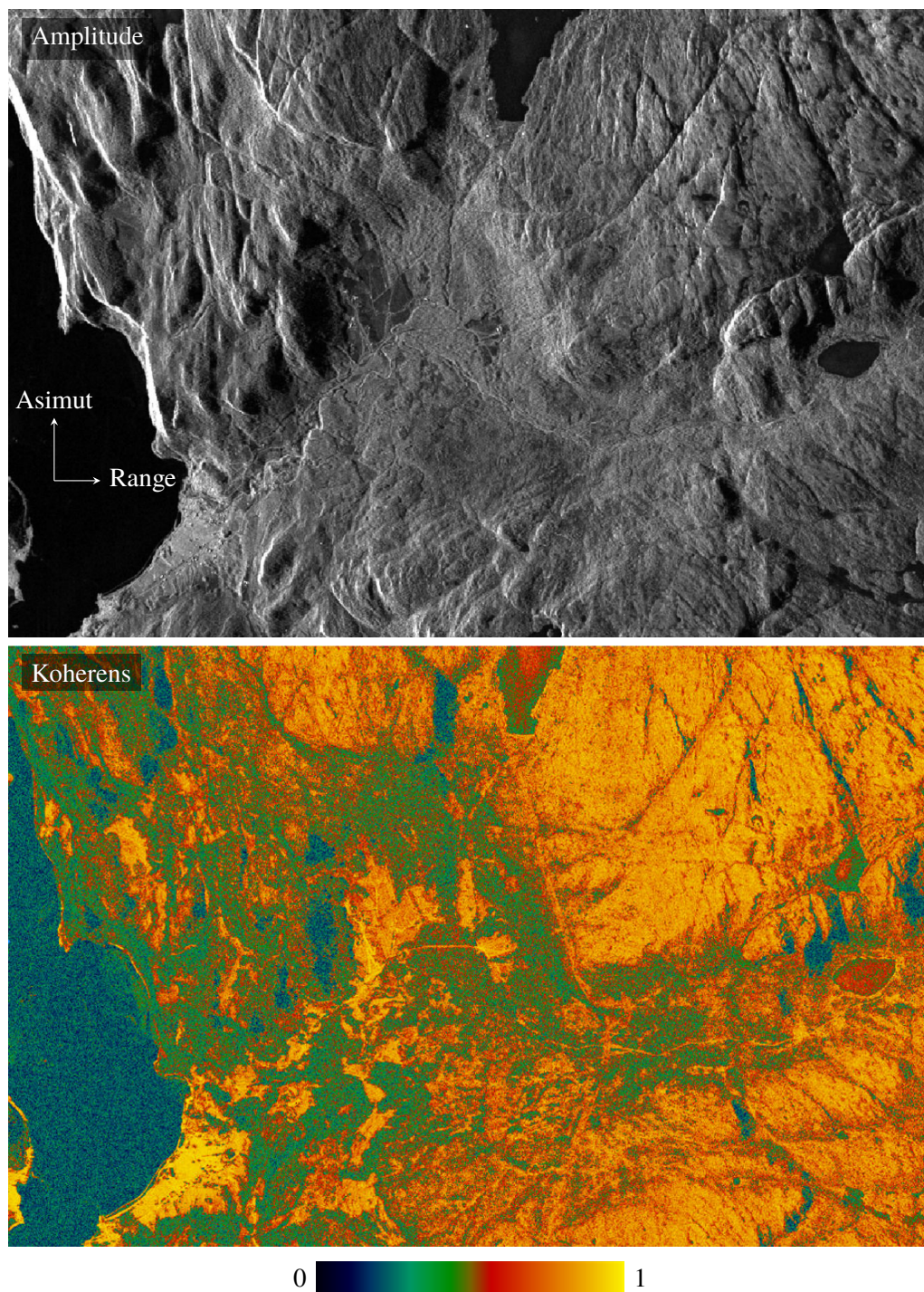
Et mindre geografisk område er vist i Figur 6.19. Figuren viser koherensbilder fra to ulike datoer, og begge er forskjellige fra Figur 6.18. Begge koherensbildene har innfallsvinkel på 35,4° som også er vesentlig lavere og medfører høyere koherens. Snødybden i det øverste bildet er også mindre, med 30 cm i lavlandet på Litveit (til forskjell fra 80 cm i Figur 6.18) og 60 cm på heia til høyre (til forskjell fra 120 cm). Vi kan derfor se at to satellitter i monostatisk modus med noen sekunders tidsforskjell er bra for å detektere skogområder, men det er noe vanskelig å estimere høyden.

---

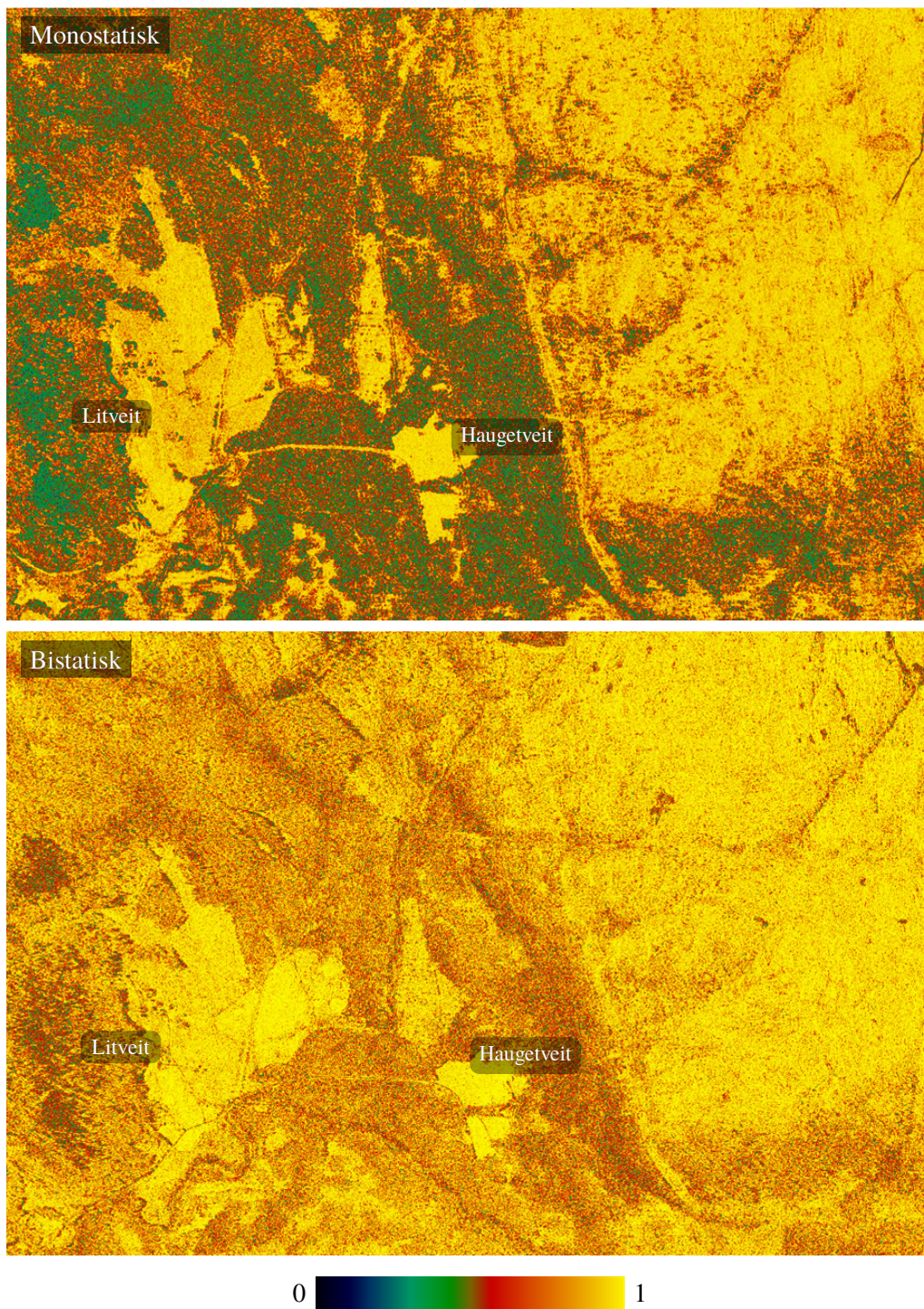
<sup>1</sup>For estimering av skoghøyde henvises det også til Figur 6.9 der et skogholt kom tydelig frem i forhold til terrengmodellen i Figur 6.8.



Figur 6.17 Kart over området rundt Åraksbø i Setesdal med UTM-rutenett og flyfoto for det samme området. Rutene i kartet er 1 km × 1 km. (Kilde: [www.norgebilder.no](http://www.norgebilder.no))



Figur 6.18 Øverst: Monostatisk slant-range Spotlight-bilde fra TSX tatt med innfallsvinkel på  $44,6^\circ$  over Åraksbø den 18. januar 2015. Nederst: Koherens av bildeparet sammen med TDX. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



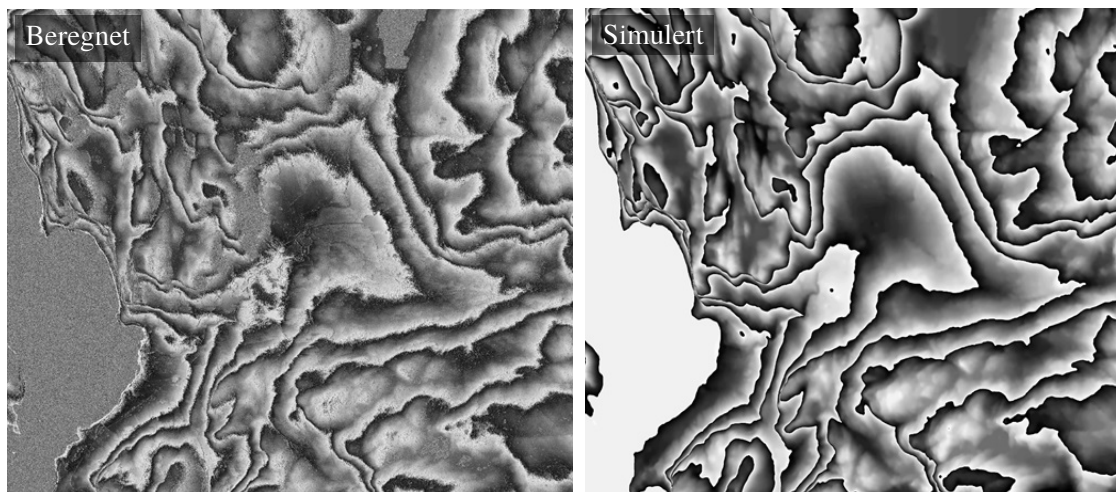
Figur 6.19 Koherens av to bildepar fra TSX og TDX over Åraksbø med innfallsvinkel på  $35,4^\circ$ . Øverst: Monostatisk Spotlight den 22. desember 2014. Nederst: Bistatisk Spotlight den 20. desember 2015. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

---

Nederst i Figur 6.19 er det et koherensbilde tatt i bistatisk modus, der opptakene fra TSX og TDX er tatt nesten samtidig med utsendt signal fra én satellitt. Det er da bare litt forskjell i innfallsvinkel (både i asimut og range) som gir dekorrelasjon. Vi ser at særlig skogen får høyere koherens, mens andre områder som jorder og snauhei ikke er mye forandret. Hvis skoghøyden skal estimeres er det da best å bruke bistatisk modus som beskrevet i neste avsnitt. En annen effekt som er forskjellig i de to bildene i Figur 6.19 er at den lavere koherensen i monostatisk modus fører til at noen strukturer fremstår mer synlig. Dette gjelder særlig bilveien mellom Litveit og Haugetveit samt kraftlinjen øst for Haugetveit. Det var ikke tilgjengelige målinger av snøhøyde for det bistatiske opptaket.

#### 6.4.2 Bruk av generert DEM

Et interferogram ble benyttet for å generere en DEM over området rundt Åraksbø. Det målte interferogrammet er vist til venstre i Figur 6.20, og det ble benyttet et bildepar fra TSX og TDX tatt i Spotlight-modus. Som man ser av figuren er det klare fringes overalt, også i skogområdene. Som hjelp til å pakke ut interferogrammet ble det benyttet et simulert interferogram som ble generert ut fra en 10 meters høydemodell fra Statens kartverk. Det simulerte interferogrammet er vist til høyre i Figur 6.20, og har klare likheter med den beregnede versjonen.

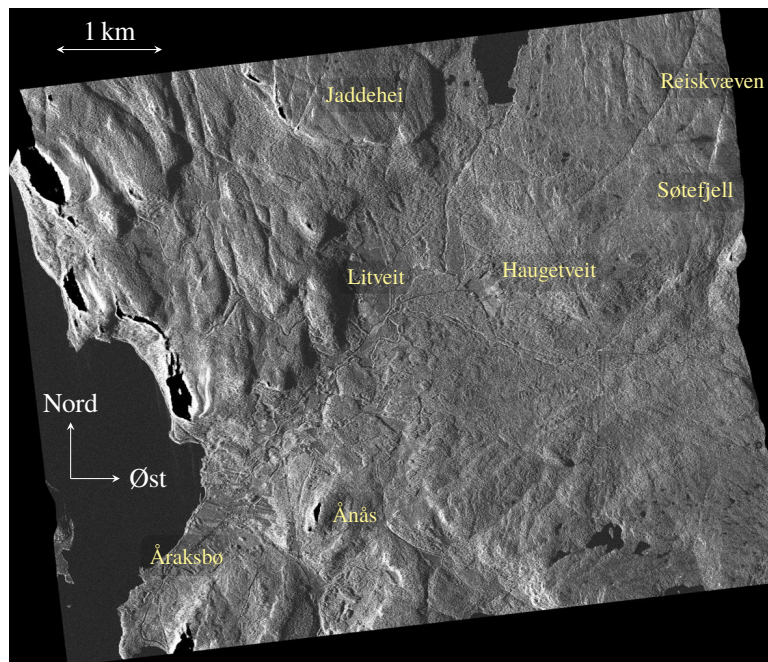


Figur 6.20 Venstre: Slant-range interferogram fra TSX/TDX den 16. november 2015. Høyre: Simulert interferogram fra høydemodell med nøyaktighet på 10 m. Innfallsvinkelen er  $52^\circ$  og ambiguitetshøyden er 77,2 m. (© Venstre: SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI. Høyre: Kartverket, [www.kartverket.no](http://www.kartverket.no))

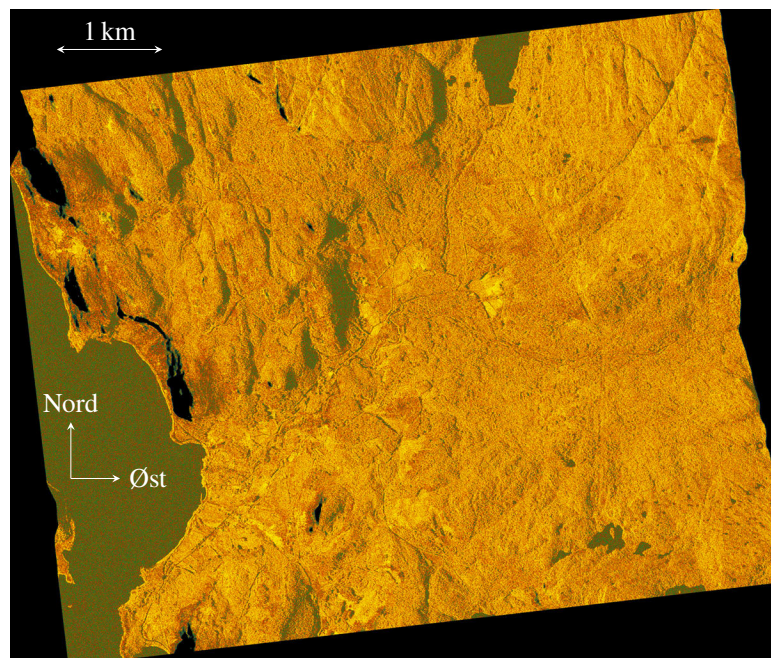
Den ferdige DEM-en ble brukt til å geokode TSX-scenen i Figur 6.21. Til venstre i figuren kan man se enkelte sorte felter som oppstår på grunn av geometrisk forskyvning fra kupert terreng (såkalt «foldover»). Opptaket ble utført med høy innfallsvinkel på  $52^\circ$  som fører til økt forskyvning.

Figur 6.22 viser koherensen for bildeparet fra TSX og TDX, som består av opptak i bistatisk Spotlight-modus. Som man ser av figuren er det generelt høy koherens over hele bildet. Det kan antydes en liten forskjell mellom skogområdene og snauheia, men koherensen er høy nok til å få høydeinformasjon fra skogen. I dette bildet ser man den geometriske forvrengningen med sorte





Figur 6.21 Geokodet TSX Spotlight-bilde over Åraksbø den 16. november 2015. Innfallsvinkelen er  $52^\circ$  og pikselavstanden er 2,0 m. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 6.22 Geokodet koherens-bilde fra TSX/TDX i bistatisk Spotlight-modus over Åraksbø den 16. november 2015. Innfallsvinkelen er  $52^\circ$  og pikselavstanden er 2,0 m. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

---

---

felter enda tydeligere. Enkelte felter med lav koherens (grønt) oppstår også der det er delvis skygge fra radaren, for eksempel i nærheten av Litveit.

Den ferdig geokodede DEM-en fra StInSAR er vist øverst i Figur 6.23. Nederst i samme figur vises differensen mellom denne og høydemodellen fra Statens kartverk, og dette blir én form for differensiell interferometri. Ambiguitetshøyden er 77,2 m, så ingen trær i dette området vil bli synlige i interferogrammet. Fra differansebildet ser vi at det er lite forskjell i snauheia med rundt 0 m der det er spredt bjørk og lite gran og furu. I området mellom Litveit og Haugtveit er radarhøyden av skogen vesentlig høyere (rundt 15 m). Tretoppene vil imidlertid være noe høyere siden radarbølgene trenger et stykke ned i skogen. Den estimerte trehøyden vil være veldig avhengig av skogtettheten, men for målinger i X-bånd kan den være  $1/2 - 2/3$  av høyden til tretoppene [29]. Skogholtet nede i bygda får en estimert radarhøyde på 30 m.

## 6.5 Ytterligere interferometriske anvendelser

Det finnes flere anvendelser av interferometri enn dem som er beskrevet i dette kapitlet. Vi vil derfor kort beskrive noen av mulighetene.

### 6.5.1 Polarimetrisk interferometri (PolInSAR)

I polarimetrisk interferometri går man lenger enn i vanlig interferometri ved at man også bruker flere polarisasjoner. Dette gjør det mulig å få informasjon om spredene i hver oppløsningscelle i tillegg til vertikal informasjon eller koherens.

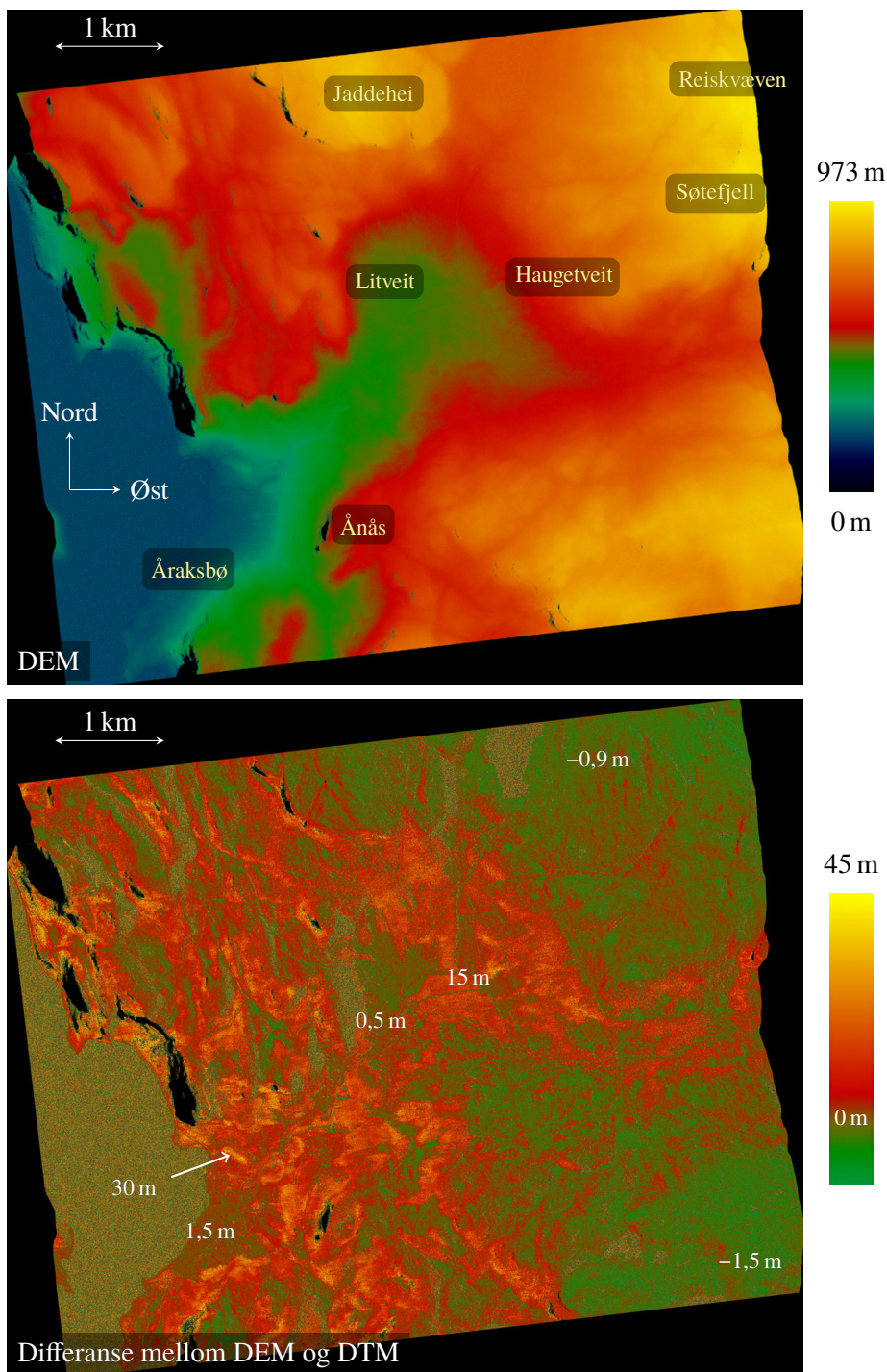
Den mest brukte applikasjonen av PolInSAR har vært måling av skoghøyde [23] med frekvenser som for eksempel L-bånd. Dersom man bruker flere interferometriske målinger, er det også til en viss grad mulig å estimere strukturen i skogen. I tillegg har PolInSAR blant annet vært brukt til estimering av avling i jordbruk [30] og beregning av høyde på bygninger [31].

### 6.5.2 Måling av brebevegelser

En artikkel som omhandler bre-bevegelser på Svalbard [32] er skrevet av forfattere fra UiO og Norsk polarinstitutt, og det refereres til FFI for beregning av brehastigheter ved hjelp av SAR-interferometri [33]. En annen relevant artikkel er [34], som omtaler beregning av brebevegelser fra interferogram prosessert ved FFI [33, 35].

### 6.5.3 Nedsynkingsanalyse

Norut (northern research institute) gjorde en studie om nedsynking av bakken i 2003 [34] der de brukte SLC-data prosessert med en SAR-prosessor fra FFI [33, 36]. Nedsynking ble også studert ved en masteroppgave ved FFI [22]. Denne rapporten omhandler en nedsynkingsanalyse av Oslo og omegn basert på SAR-bilder fra ERS-satellitten i perioden 1992–2000. Teknikken baserer seg på spredning fra punkter som er stabile over lang tid. I 2018 ble det også etablert en operasjonell tjeneste fra KSAT, Norut og PPO.labs for å overvåke bakkebevegelser [37].



Figur 6.23 Øverst: Geokodet StInSAR DEM fra TSX/TDX i bistatisk Spotlight-modus over Åraksbø den 16. november 2015. Innfallsvinkelen er  $52^\circ$  og pikselavstanden er 2,5 m. Nederst: Differansen mellom denne DEM-en og en høydemodell med 10 m pikselavstand fra Statens kartverk. Pikselavstanden fra SAR-produktene er 2,0 m. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

---

---

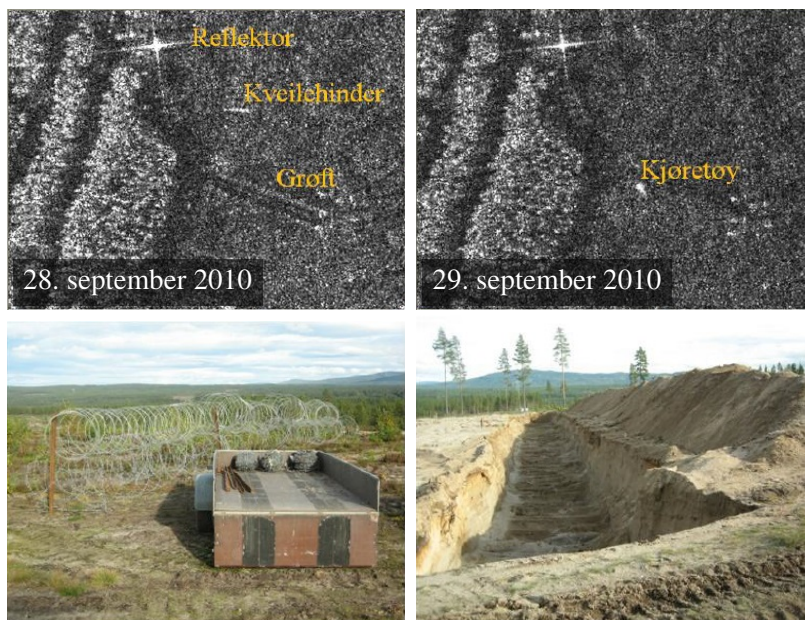
## 7 Inkohherent endringsdeteksjon

Inkohherent endringsdeteksjon tar utgangspunkt i SAR-bilders amplitude eller intensitet for bilder som er tatt på ulike tidspunkter. Metodene bruker deretter intensitetsforskjeller i bildene til å bestemme om noe har forandret seg i scenen. Dette blir gjerne en enklere prosess enn *koherent* endringsdeteksjon (beskrevet i kapittel 8), som også tar hensyn til fasen til radarsignalet.

### 7.1 Visuell sammenlikning av bilder

Den enkleste formen for endringsdeteksjon vil være å sammenlikne to bilder, og visuelt inspisere om noe er forskjellig. Med denne metoden er det ikke nødvendig å koregistrere bildene, og det er derfor mulig å utføre oppgaven raskt. Ulempen er at mange endringer kan være subtile, samtidig som SAR-scenen er stor. Endringene kan dermed være vanskelige å finne.

I 2010 ble det undersøkt hvordan spesifikke endringer utført på Rena ville ta seg ut i SAR-bilder med 1 m oppløsning [5]. Dette er vist i Figur 7.1, som inneholder to bilder tatt med ett døgn imellom. Figuren viser også to objekter som ble forandret i mellomtiden – et kveile-hinder ble fjernet og en grøft ble fylt igjen. Disse forandringene kan tydelig ses i SAR-bildene øverst. I det andre bildet har det også kommet med et kjøretøy ved grøfta, noe som gir en klar forskjell i bildet. I [5] er det gitt mange eksempler på hvordan ulike objekter av militær interesse fremstår i SAR-bilder.



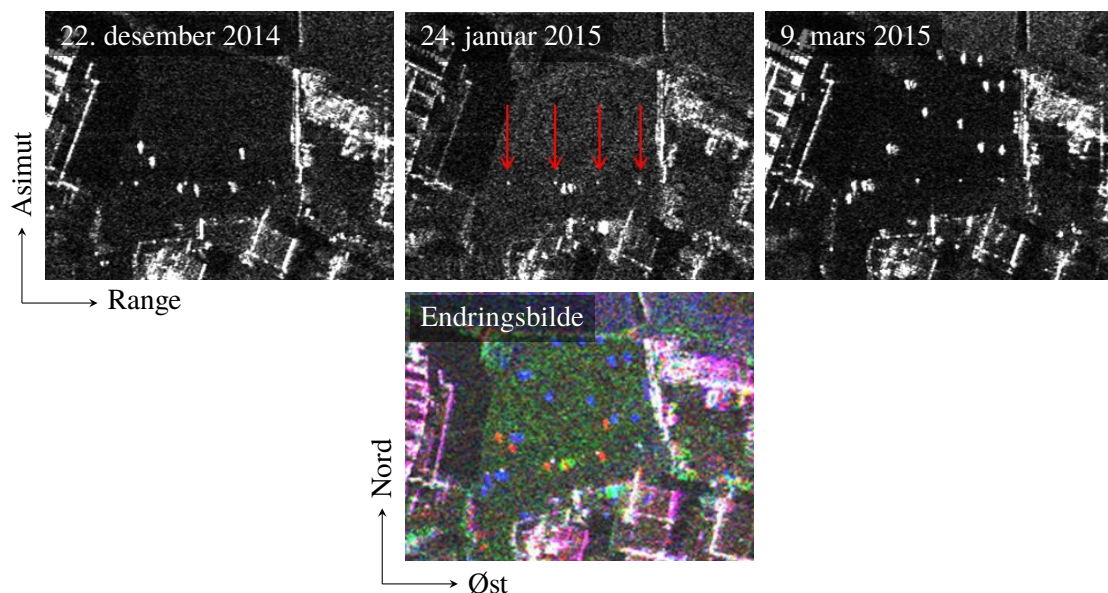
Figur 7.1 Endringer mellom to COSMO-SkyMed-bilder med 1 m oppløsning, tatt 28. og 29. september 2010 på Rena. I bildet til høyre kan det tydelig ses at kveile-hinderet er fjernet, grøfta er fylt igjen og et kjøretøy har ankommet. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© SAR-bilder: COSMO-SkyMed Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS)

## 7.2 Fargebilder fra koregistrerte bilder

To eller flere koregistrerte bilder kan settes sammen til ett RGB-bilde ved å bruke amplitudebilder (som er i sort-hvitt) i ulike fargekanaler. De ulike fargene i slike endringsbilder gjør det lett å se hva som er forskjellig i hver av SAR-scenene.

Figur 7.2 viser utsnitt fra tre TSX Staring Spotlight-scener over parkeringsplassen nord for FFI. Amplitudene fra SLC-scenene er midlet  $1 \times 3$  i range og asimut for å få riktige geografiske forhold. Den 24. januar, som er en lørdag, er det én eller to biler på parkeringsplassen. De fire lyktestolpene utenfor porten er synlige siden de virker som hjørnereflektorer når det er flatt på bakken, og disse er markert med røde piler. Lyktestolpene er synlige på de to andre bildene også, men står da i nærheten av biler. De to andre dagene er det noen flere biler, med flest biler 9. mars. Den 24. januar er det mer tilbakespredning fra parkeringsplassen enn på de to andre dagene, antakeligvis fordi det er mer snø og is.

De tre scenene er koregistrert og vist sammen i et endringsbilde nederst i figuren. Koregistreringen ble her utført ved hjelp av DEM-en generert med StInSAR, og ikke fra de opprinnelige slant-range-bildene. I endringsbildet ser man bilene fra 22. desember i rødt, 24. januar i grønt og 9. mars i blått. Lyktestolpene er tilstede i alle bildene, og fremstår derfor hvite i endringsbildet. Dette tyder på at bildene er veldig nøyaktig registrert. Selve parkeringsplassen fremstår grønn på grunn av den kraftigere tilbakespredningen fra snøen 24. januar. Snøen gjorde muligens også refleksjonen fra bygningene noe svakere, og det gir fravær av grønt (magenta).



Figur 7.2 TSX slant-range Staring Spotlight-bilder over parkeringsplassen nord for FFI fra mandag 22. desember 2014, lørdag 24. januar 2015 og mandag 9. mars 2015. Klokketid var 18:03 lokal tid alle dagene. Pixelstørrelse er 0,51 m i asimut og 0,60 m i range langs bakken for bildene øverst. Pixelstørrelsen i det geokodede bildet er 0,85 m nord og øst. (© SLC provided by DLR 2014/2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

---

---

Et annet lokalt eksempel fra de samme SAR-scenene, som viser Skedsmohallen og Lillestrøm stadion, er vist i Figur 7.3. Et flybilde er også vist som referanse. Den store plassen har løpebane og to lave hus som vises som to lyse streker. Firkanten nederst til høyre er en fotballbane med bevegelige fotballmål. Bærebjelkene for taket er godt synlig i to av bildene, men litt mindre synlig 24. januar noe som sannsynligvis skyldes snø og is på taket. Gjerdet rundt begge banene er også godt synlig i alle bildene, men litt mindre synlig noen steder rundt løpebanen i januar. Gjerdene er også langt mer synlig i SAR-scenene enn i det optiske flybildet. Fire rektangulære objekter kan ikke sees i januar-bildet, men derimot i de to andre bildene. Disse sees også i det optiske bildet som hvite kasser. På fotballbanen er det parvis lyse punkter som er på forskjellige steder på hver dato. Dette er de to stolpene i fotballmålene som kan trilles rundt på hjul, og slike mål ses også i flybildet. Hesteskoen oppe til venstre i løpebanen er et nettingstativ med tolv høye stolper, som også ses i flybildet. Dette stativet vises mest som lyse punkter i endringsbildet, som betyr at refleksen fra alle dagene var rimelig lik.

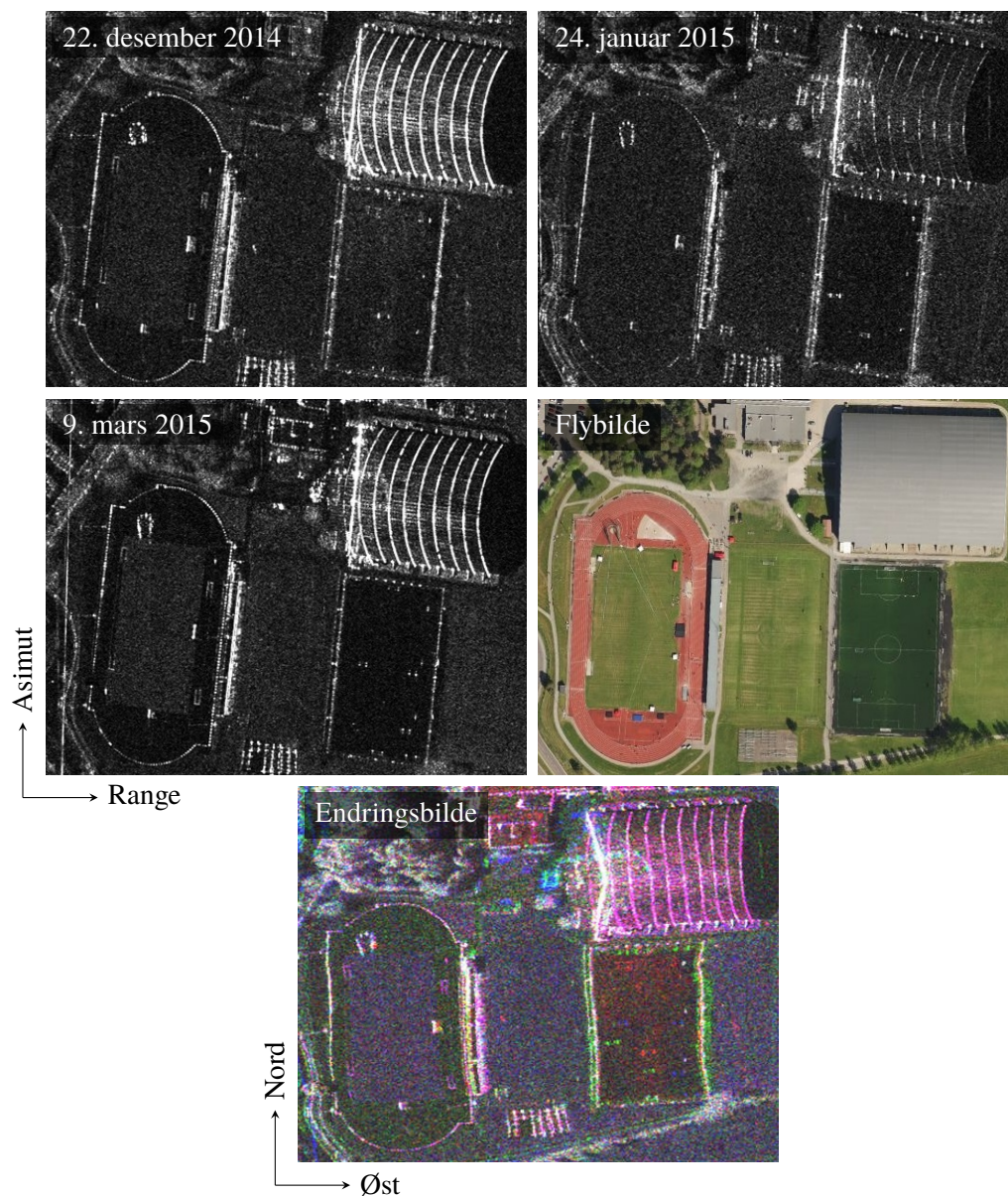
Det fargede bildet i midten av figuren er et endringsbilde satt sammen fra de tre datoene. Bygningen er geokodet ved hjelp av DEM-en fra StInSAR-prosesseringen, noe som gjør at bærebjelkene i stor grad er rettet ut her. Det er likevel fortsatt en liten krumning, spesielt langs kantene, og dette kan være på grunn av dobbeltspredning mellom bakken og bjelkene. Hallen fremstår igjen i magenta på grunn av den lavere tilbakespredningen i januar.

Et større endringsbilde av Lillestrøm-området er vist i Figur 7.4. Her er bildene tatt med bare én dags mellomrom fra 9.–10. mars 2015, og det er relativt få endringer. Innfallsvinklene var ganske forskjellige med helholdsvis  $49^\circ$  og  $32^\circ$ , og det gjør at det var sterkere tilbakespredning den andre dagen på grunn av mindre innfallsvinkel, som igjen fører til at bildet fremstår grønt. Ulik opptaksgeometri fører også til de røde og grønne kantene rundt bildet. Enkelte bygninger ga sterkere refleks den første dagen, noe som gjør at noen felter er røde. Reflekser fra hjørner vil være kraftige ved begge innfallsvinklene.

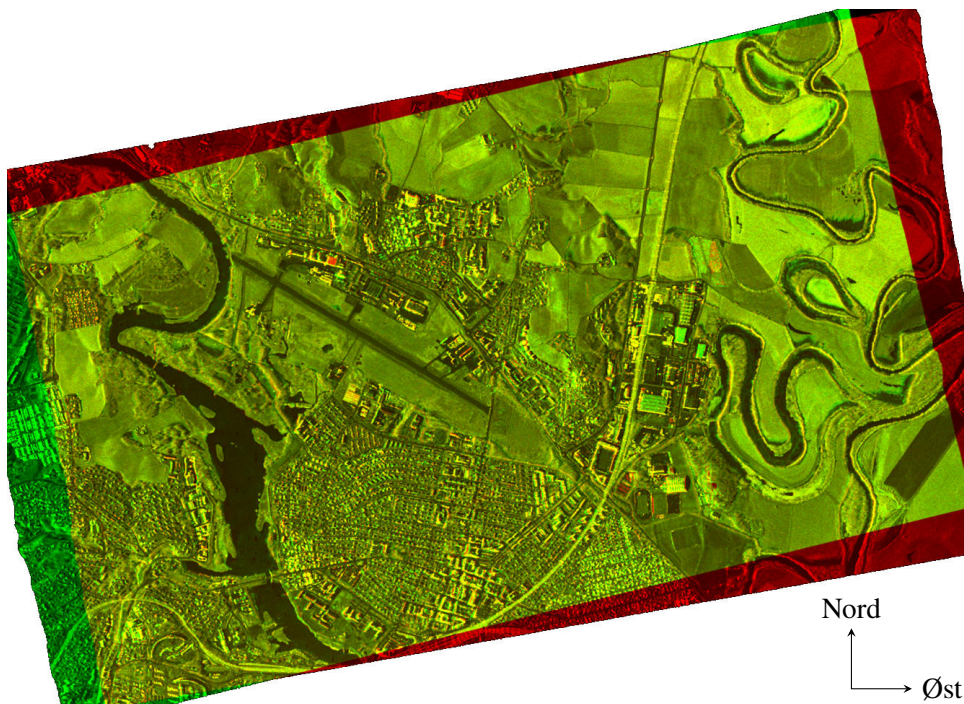
Metoden med plassering av SAR-bilder i ulike fargekanaler har vist seg å være effektiv for endringsdeteksjon i havner. Skip gir ofte et sterkt radaravtrykk mot sjøbakgrunnen, og gir dermed god kontrast. Dette gjør at forskjellene vil fremstå tydelig i et endringsbilde. Et eksempel på dette er gitt i Figur 7.5, som viser sammensetningen av to bilder fra høsten 1998 over Bergen. Selv om oppløsningen bare er på 9 m, kan man tydelig se at ulike deler av havnen har vært i bruk på de to datoene. Et annet eksempel er vist i Figur 7.6, der man kan se endringer fra tre datoer i 2011 over havnen i Rotterdam. De tre scenene er plassert i rød, grønn og blå fargekanal, og en mengde ulike plasseringer av skip fremstår. Der det ikke har vært endring mellom to eller tre av datoene oppstår det fargekombinasjonene gult, cyan, magenta og hvitt.

På parkeringsplasser kan det være effektivt å detektere biler og andre kjøretøy, som vist tidligere. I Figur 7.7 ser man et annet eksempel med to scener tatt over Setermoen i 2010, og i endringsbildet her ser man igjen tydelige forskjeller mellom de to dagene. Endringene er i hovedsak knyttet til parkeringsplasser og omlastingsplasser flere steder i leiren. Både militært materiell og sivile biler har flyttet seg mellom de to datoene, men det er ikke mulig å skille mellom ulike typer kjøretøy.

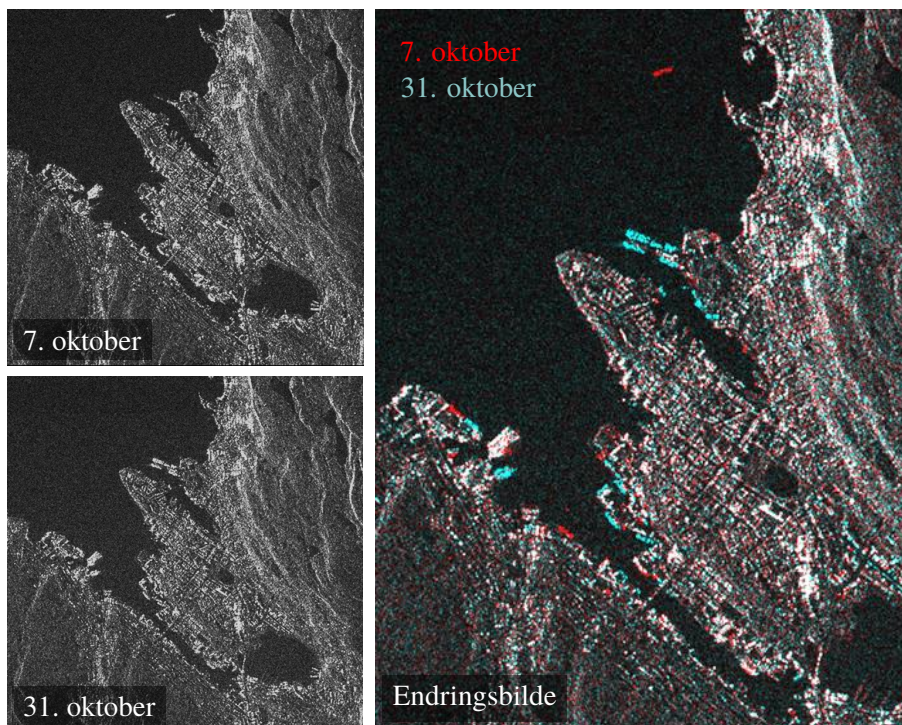
Til sist er det et eksempel fra Nikel ved den norsk-russiske grensen i Figur 7.8. Nikel er en industriby med mye forurensning der spesielt utslipp av svoveldioksid fra smelteverket er et miljøproblem. Figuren viser industriområdet rett nordøst for smelteverket, hvor det er mange jernbaner. Det ses tydelig at det er flere tog i området, som har vært brukt på ulike tidspunkt. Rett til venstre for



Figur 7.3 TSX-bilder med Staring Spotlight-modus i slant-range over Skedsmohallen og Lillestrøm stadion på tre datoer (mandag 22. desember 2014, lørdag 24. januar 2015 og mandag 9. mars 2015). Klokketid var 18:03 lokal tid alle dagene. Pikselstørrelse er 0,51 m i asimut og 0,60 m i range langs bakken. Et flyfoto av samme sted er vist nederst til høyre. (© SLC provided by DLR 2014/2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

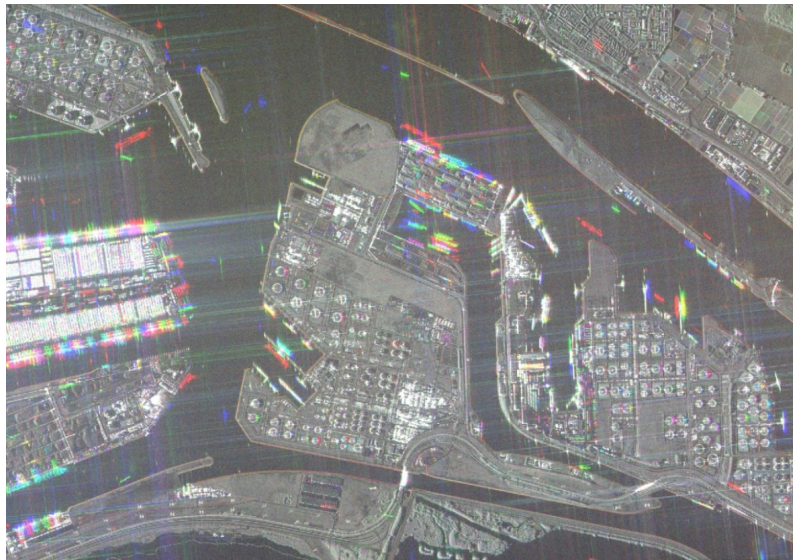


Figur 7.4 Endringsbilde i rødt og grønt av geokodede amplitude-bilder fra 9. og 10. mars 2015. Innfallsvinklene er henholdsvis 49° og 32°. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

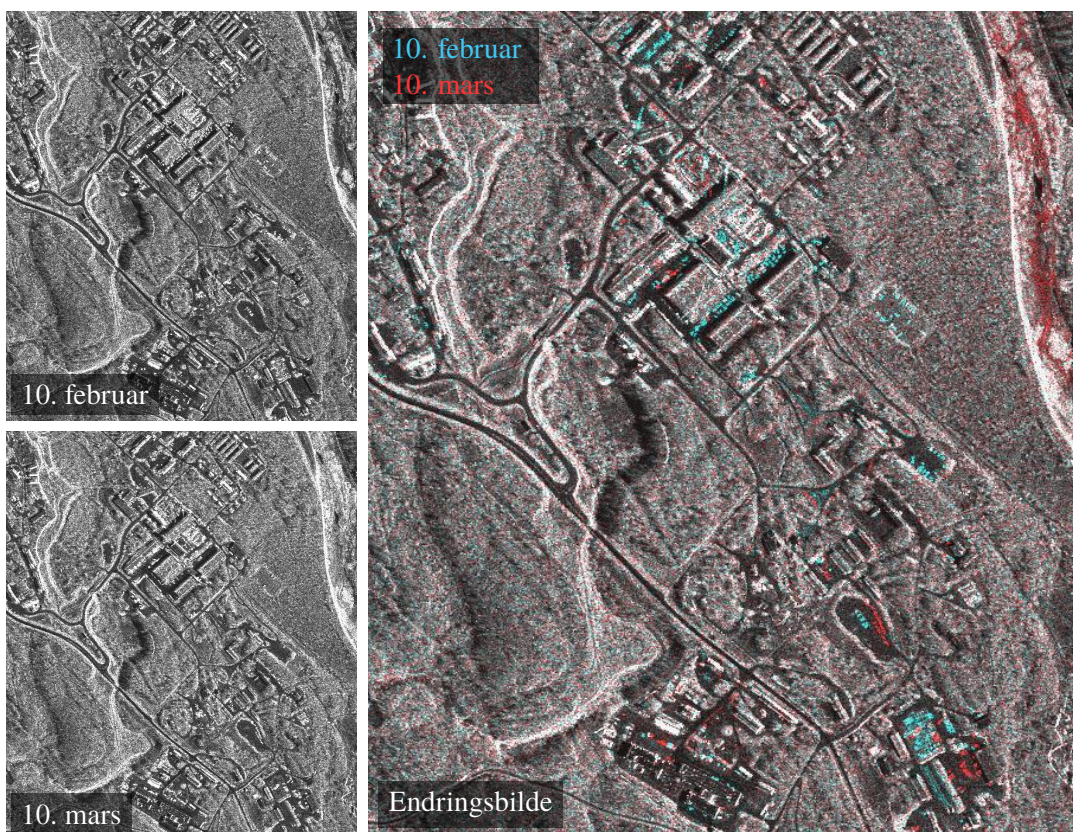


Figur 7.5 Visualisering av endringer i Bergen ved hjelp av fargekoding mellom to RADARSAT-bilder som er tatt 7. og 31. oktober 1998. Oppløsningen er på rundt 9 m.

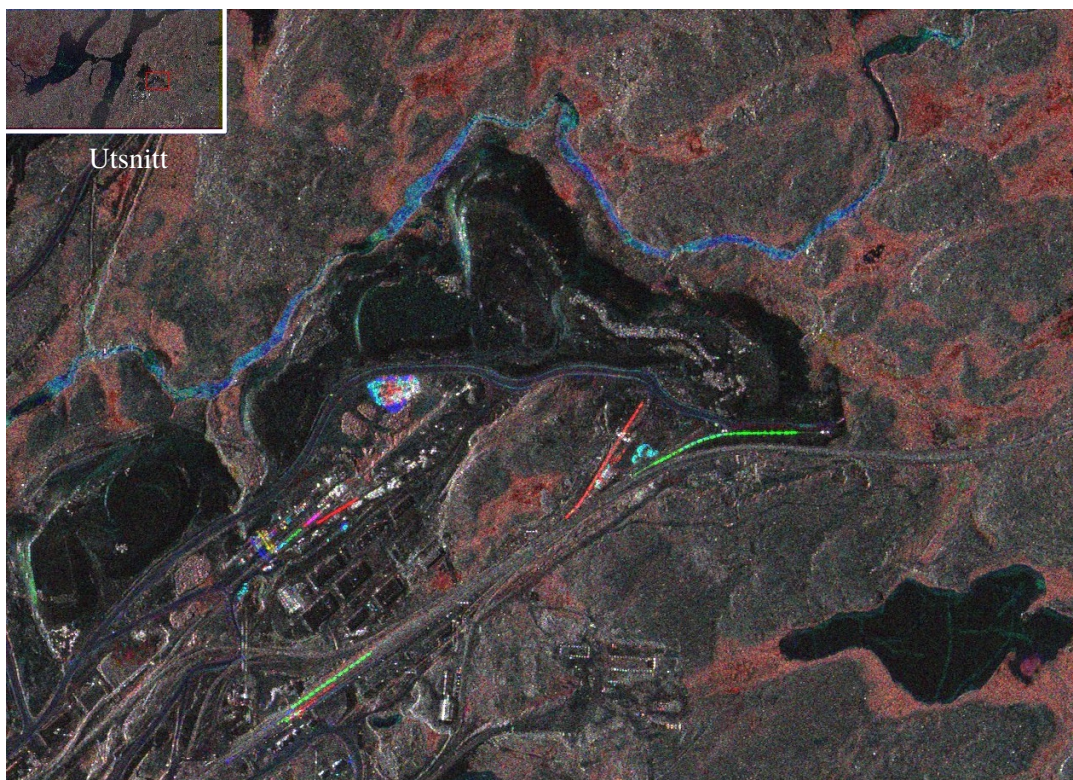




Figur 7.6 RGB-sammensetning av tre COSMO-SkyMed-bilder fra havnen i Rotterdam i 2011. Blått er her 30. juni, grønt 3. juli og rødt 7. juli. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.



Figur 7.7 To scener fra Setermoen i Troms, fra 10. februar (øverst til venstre) og 10. mars (nederst til venstre) 2010. Endring kan ses i kombinasjonen til høyre. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.



Figur 7.8 Endringer ved byen Nikel i Russland, fra tre RADARSAT-2-bilder fra 2011. Bildene ble tatt 26. september (rødt), 7. desember (grønt) og 31. desember (blått), med 1,5 m oppløsning og HH-polarisasjon. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI.

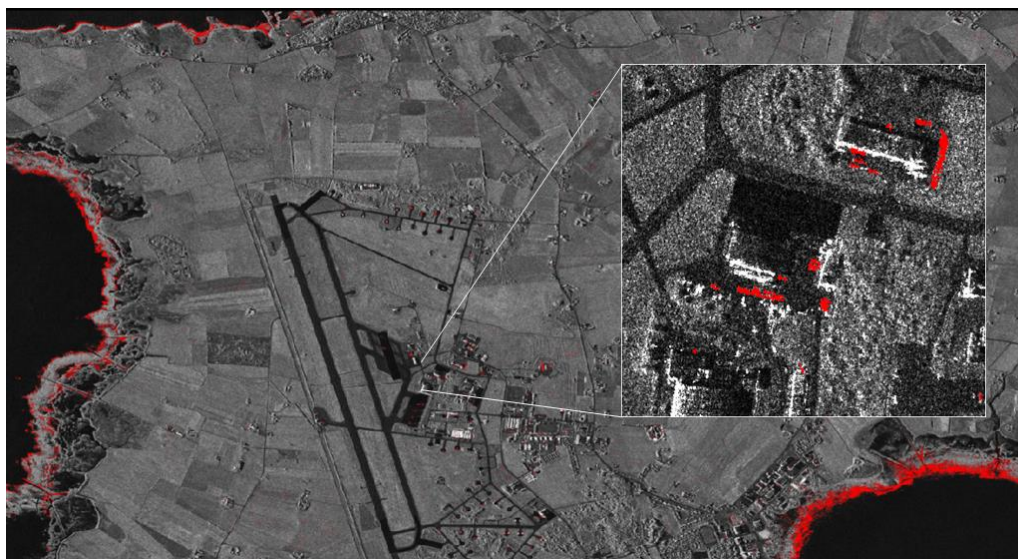
midten av bildet kan man se en flekk med mest blått, som kan være en avfallshaug der det har kommet til mer avfall. Elven nord for industriområdet ga sterkest tilbakespredning den 31. desember, sannsynligvis fordi elva var islagt på dette tidspunktet.

### 7.3 Divisjon av koregistrerte bilder

I tillegg til å registrere bilder i ulike fargekanaler, er det også mulig å visualisere endringer ved å dividere bilder<sup>2</sup>. Deler av bildet uten endring vil da ha amplituder i nærheten av én, mens områder med endring vil gi større utslag. Videre er det også mulig å bruke terskling av resultatet, der for eksempel alle piksler over en gitt verdi blir registrert med en annen farge.

Figur 7.9 viser et eksempel fra Ørland lufthavn fra to datoer i juni 2013. Her er endringer over et visst nivå markert i rødt for å tydelig vise forskjellene. I bildeutsnittet ser man at plassering av kjøretøy var noe forskjellig på de to dagene. Ved kysten ser man også at tidevannsforskjeller førte til ulik tilbakespredning, noe som gjorde at kystlinjene ble detektert.

<sup>2</sup>For amplitudebilder vil man bruke divisjon av bilder, men dersom bildene er logaritmiske er det mest aktuelt å bruke subtraksjon i stedet.

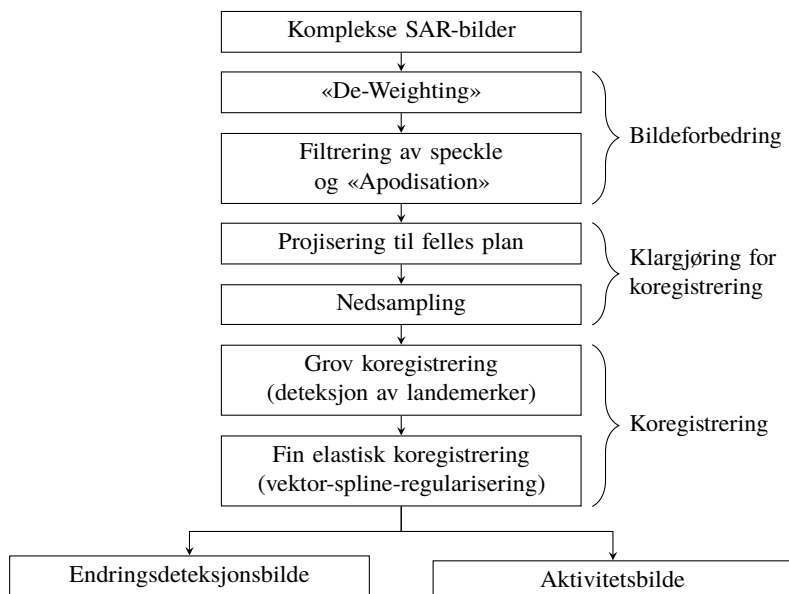


Figur 7.9 Endringer detektert med divisjon av to bilder og terskling. To TerraSAR-X-bilder fra 15. og 26. juni 2013 over Ørland flystasjon ble brukt, og det er tydelige endringer fra kjøretøy og tidevann. (© Fraunhofer IOSB)

## 7.4 Endringsdeteksjon basert på bilder fra ulike sensorer

Inkoherent endringsdeteksjon kan utføres med bilder fra ulike SAR-satellitter, noe som er fordelaktig med tanke på gjensnitt-tid. Et eksempel er gitt i [38] der det benyttes bilder fra TerraSAR-X og RADARSAT-2. Disse satellittene opererer i ulike frekvensbånd og leverer ulik bildeoppløsning. Etter hvert som data fra flere nye konstellasjoner blir tilgjengelig, blir kombinasjon av bilder fra ulike SAR-systemer en stadig mer aktuell problemstilling. Forskjellene mellom bildene fra ulike sensorer gjør det imidlertid mer krevende å oppnå gode resultater med endringsdeteksjon. Blant annet vil tilbakespredningen fra et mål variere med frekvensen, og bilder med ulik oppløsning må gjennomgå mer omfattende preprosessering for at de skal fremstå tilstrekkelig like til at man kan sammenligne dem piksel for piksel. Stegene i DLR sin prosessering er vist i Figur 7.10 og beskrevet nedenfor.

Endringsdeteksjon basert på bilder fra ulike sensorer forutsetter tilgang på SLC-bilder. Slike bilder har mye speckle-støy, og man vil kunne se sideløper omkring kraftige spredere. Koregistrering basert på «landemerker» vil fungere dårlig hvis det er mye støy og sideløper i bildene. Landemerker er punkter som skiller seg ut med hensyn på intensitet, kurvatur eller lignende og som gjenfinnes i begge bildene. De første stegene i prosesseringen er derfor bildeforbedring som filtrerer speckle og undertrykker sideløper. DLR sin metode for speckle-filtrering er ikke kjent i detalj, men det er beskrevet at den glatter ut støyen mens kanter blir bevart i full oppløsning. Én form for undertrykkelse av sideløper er kalt *apodisation*. Med tradisjonell sidelobeundertrykkelse benyttes en amplitudevektfunksjon som medfører en reduksjon av oppløsningen (hovedloben i impulsresponsen blir bredere). Apodisation bevarer derimot høy oppløsning (smal hovedlobe i impulsresponsen) samtidig som sidelobene blir lave. Metoden går ut på å lage  $N$  bilder ved bruk av ulike vektfunksjoner og kombinere disse til et ferdig bilde, for eksempel slik at hver pikselverdi i det ferdige bildet er den laveste av de  $N$  individuelle pikselverdiene i den aktuelle posisjonen.



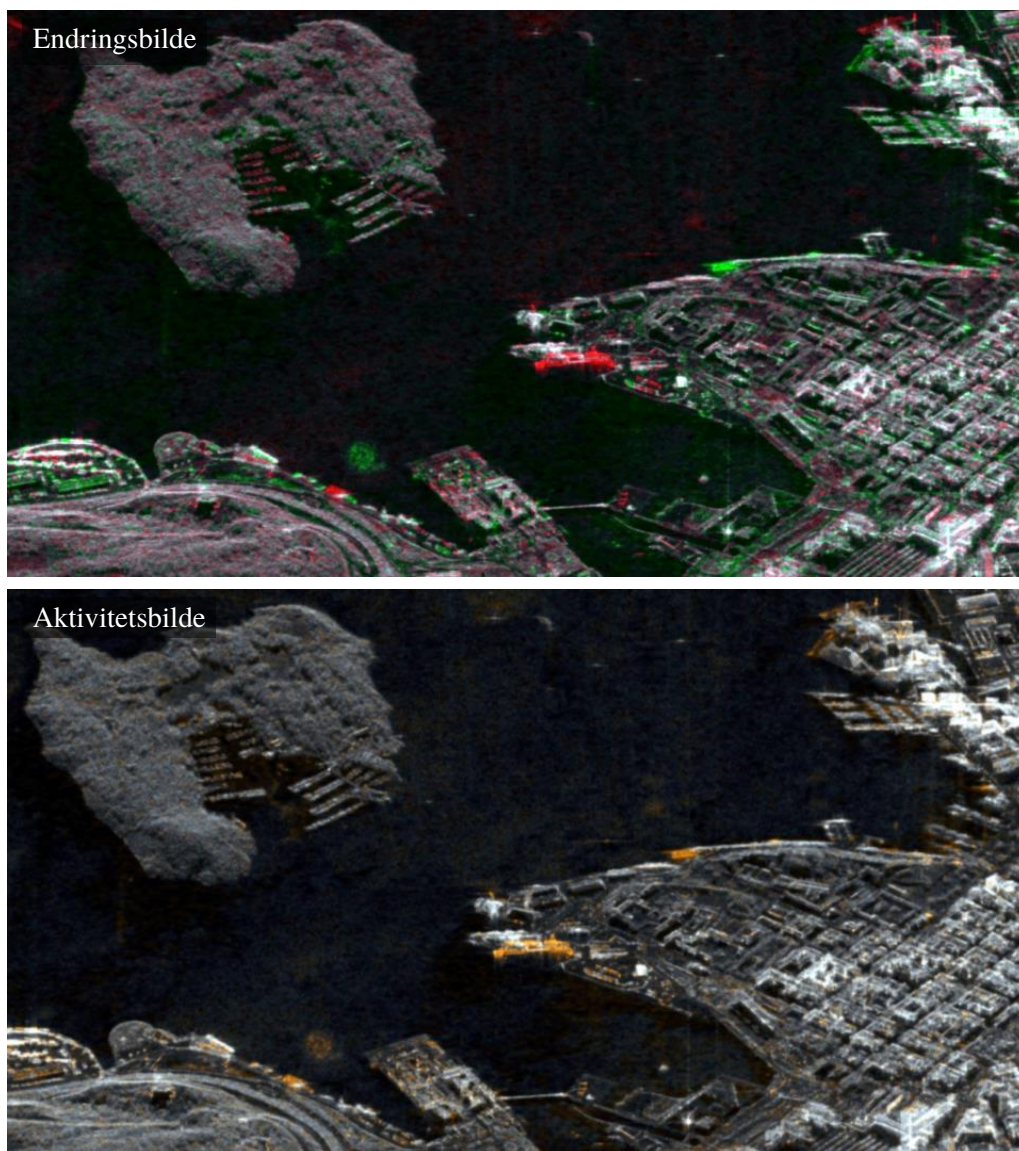
Figur 7.10 Prosesserkjede for endringsdeteksjon fra ulike sensorer som er benyttet for DLR sin metode.

Etter bildeforbedringen projiseres bildene til et felles plan utspent av ground-range og asimut. Bildet med høyest oppløsning blir nedsamlet til samme oppløsning som det med lavest oppløsning ved hjelp av multi-looking.

Koregistreringen mellom ulike sensorer gjøres i to steg. Det første steget er en grov koregistrering basert på automatisk deteksjon av landemerker. Det andre punktet er en elastisk koregistrering basert på såkalt *vektor-spline-regularisering*. Elastisk betyr her at det forekommer deformasjoner som virker lokalt i bildet, og ikke bare lineære transformasjoner som rotasjon og strekking av hele bildet. I begge stegene av koregistreringen kan det benyttes programvare med åpen kildekode.

Til slutt brukes det en fargekoding som visualiserer endringene mellom bildene. I et enkelt endringsdeteksjonsbilde er koregistrerte bilder fra to tidspunkter lagt inn i hver sin fargekanal i et RGB-bilde, slik som beskrevet tidligere i kapittel 7.2. Et eksempel på et slikt endringsdeteksjonsbilde fra Oslo havn er vist øverst i Figur 7.11. Dette bildet er basert på ett TerraSAR-X-bilde og ett RADARSAT-2-bilde samlet inn med én dags mellomrom.

Alternativt kan det lages et såkalt aktivitetsbilde der endringer visualiseres med farge og områder uten endring fremstår i gråtoner. Fargeintensiteten til hver piksel angir hvor mye endring det har vært i det aktuelle punktet. Et slikt bilde er vist nederst i Figur 7.11.



Figur 7.11 Øverst: Inkoherent endringsdeteksjon fra Oslo havn med RADARSAT-2-bilde i grønn fargekanal og TerraSAR-X-bilde i rød kanal. Nederst: Aktivitetsbilde for den samme scenen. Bilder fra [38].

---

---

## 8 Koherent endringsdeteksjon

Koherent endringsdeteksjon går ut på å sammenlikne koherens i radarbilder fra ulike tidspunkt. Koherensbilder kan lages fra SLC-bilder med noen dagers mellomrom, eller man kan lage et koherensbilde fra nesten samtidige opptak, og deretter se på endring i koherensen etter noen dager. Koherent endringsdeteksjon kan registrere små endringer på millimeter- eller centimeter-nivå. En ulempe i forhold til den inkoherende varianten er imidlertid at det er nødvendig å midle over et område for å redusere speckle-støy. Derfor er kanskje koherent endringsdeteksjon bedre for å detektere endring i litt større flater. Koherensbildene i dette kapitlet er så nøyaktig geografisk registrert at de kan brukes til endringsdeteksjon. Vanligvis krever dette en koregistrering med en relativ nøyaktighet mellom bildene bedre enn  $1/10$  piksel.

I kapittel 8.1 beskrives først metoden som sammenlikner tre SLC-bilder tatt med noen dagers mellomrom. Et koherensbilde blir først fremstilt fra de to første bildene, og et nytt koherensbilde blir fremstilt fra det andre og tredje bildet. I kapittel 8.2 beskrives deretter den andre metoden der man lager ett koherensbilde for hver dag (ved å bruke to satellitter), og deretter sammenlikner de to koherensbildene. Kapittel 8.3 beskriver CovAmCoh-metoden, som søker å utnytte den ekstra informasjonen i bildepar til å forstå hva bildet viser.

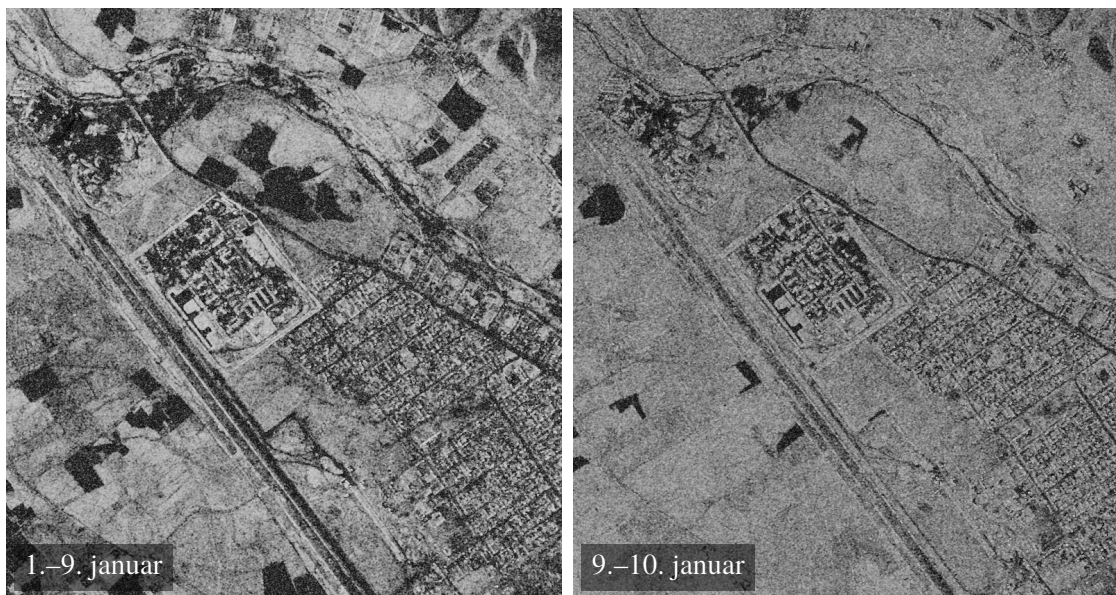
### 8.1 Koherensbilder for ulike tidspunkter

Den første metoden for koherent endringsdeteksjon går ut på å sette sammen komplekse SAR-bilder fra ulike tidspunkter til ett koherensbilde. Vi tar utgangspunkt i tre COSMO-SkyMed Spotlight-bilder tatt over Meymaneh, Afghanistan i begynnelsen av januar 2010 [39]. Bildene ble tatt med en innfallvinkel på cirka  $41^\circ$ , og ble nøyaktig koregistrert som beskrevet i kapittel 6.1.

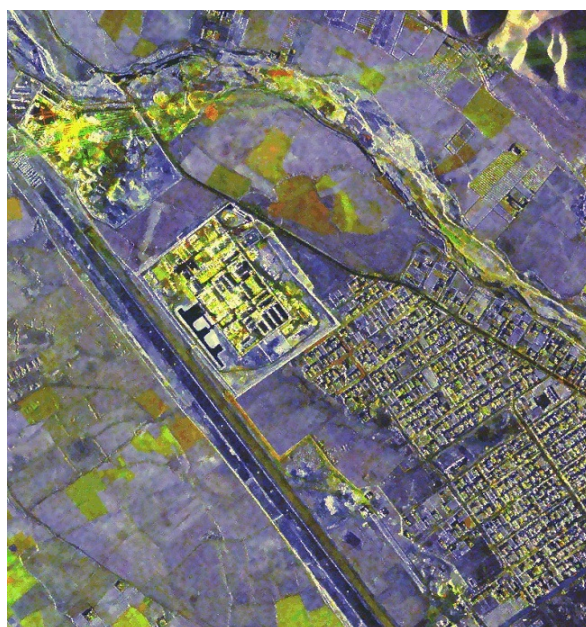
Etter koregistrering ble det dannet to koherensbilder ved å bruke likning 6.2 med midling over  $3 \times 2$  piksler. Det første koherensbildet beskriver koherensen mellom de to første bildene (tatt 1. og 9. januar), mens det andre beskriver koherensen mellom det andre og tredje bildet (tatt 9. og 10. januar). Utsnitt av begge koherensbildene er vist i Figur 8.1. Mørke områder i bildene viser steder der koherensen er lav, noe som ofte oppstår etter endringer. Alternativt kan de mørke områdene oppstå der det er lite tilbakespredning i de opprinnelige SAR-bildene, som for eksempel fra asfalterte veier og elver. Det kan derfor være nyttig å konsultere amplitudebildene sammen med koherensbildene.

I begge koherensbildene i Figur 8.1 er det mange mørke felter som tyder på endring. Det venstre bildet (1.–9. januar) har flere mørke felter, som kan være fordi tidsperioden er lenger enn for det andre bildet. Øverst til venstre i bildene er det en stampemølle hvor det ser ut til å være endring i begge tidsrommene. Det kan også tydelig ses endring over åkre utenfor bebyggelsen der ulike dyrkningsarealer har vært i bruk for hvert koherensbilde (for eksempel pløyning av jord eller innhøsting).

Koherensbilder kan også settes sammen med amplitudebilder i en bildefusjon. Dette er vist i Figur 8.2 som bruker koherensen fra 1.–9. januar sammen med de tilhørende amplitudebildene. Områder med blått har høy koherens, mens rødt og grønt angir fravær av koherens og høy tilbakespredning i amplitudebildene. Gult er kombinasjonen av rødt og grønt, og viser områder med lav koherens men



Figur 8.1 Koherensbilder for 1.–9. januar (venstre) og 9.–10. januar (høyre) i 2010, tatt med COSMO-SkyMed med rundt 1 m oppløsning. Mørke områder indikerer endring, og man kan se aktivitet langs veier, åkre og andre steder som en stampemølle øverst til venstre i bildet. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© COSMO-SkyMed Product-ASI 2010, distributed by e-GEOS)



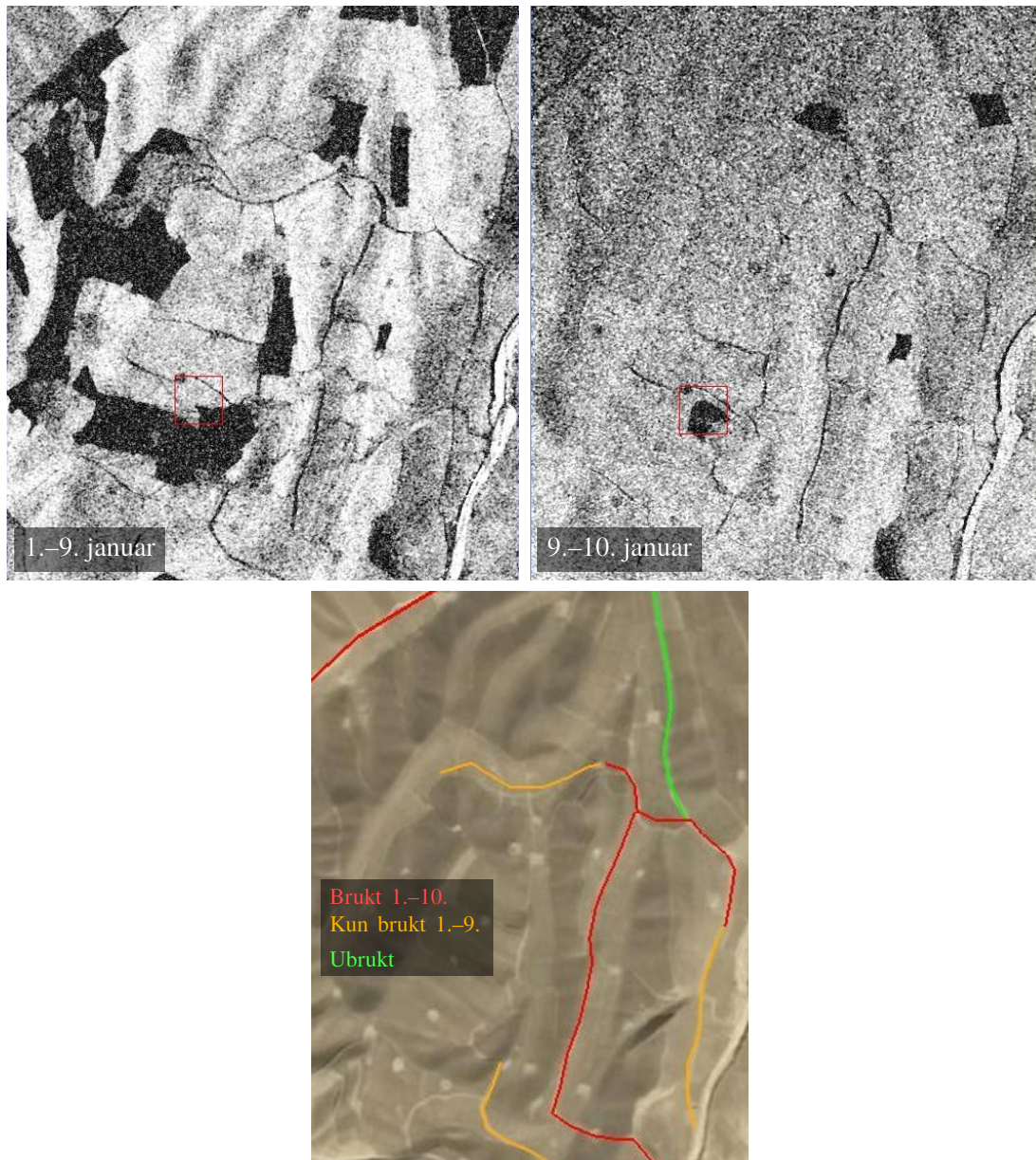
Rød: 9. januar  
 Grønn: 10. januar  
 Blå: Koherens

Figur 8.2 Bildefusjon av koherens og amplitudebilder fra 1.–9. januar tilsvarende venstre bilde i Figur 8.1. Blått viser områder med høy koherens, og gultoner viser områder med lav koherens med varierende amplitude. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© COSMO-SkyMed Product-ASI 2010, distributed by e-GEOS)

---

høy tilbakespredning i begge amplitudebildene. Det er verdt å merke at veiene og rullebanen på flyplassen fremstår mørke i dette bildet mens åkrene fremstår gule, selv om alt sammen er sort i Figur 8.1. Dette gjør det mulig å skille mellom bidrag fra lav tilbakespredning og lav koherens (der det har vært endring).

Noen kilometer vest for Meymaneh er det et åpent landskap med landeveier, og Figur 8.3 viser koherensbilder for dette området. Ved å studere de to koherensbildene kan man se at ulike veier er



Figur 8.3 Øverst: To koherensbilder mellom 1.-9. og 9.-10. januar 2010 for området vest for Meymaneh. Nederst: Informasjonen er satt sammen til en oversikt over når veiene i området ble brukt. Kilde: Dan Johan Weydahl, FFI. (© COSMO-SkyMed Product-ASI 2010, distributed by e-GEOS)



---

---

mørke i hver tidsperiode, noe som kan indikere at ikke alle veiene blir brukt kontinuerlig. Ved å konsultere kart eller optiske satellittbilder kan man også se flere veier som ikke kan ses i noen av koherensbildene, og som kan ha vært ubrukt i begge tidsperiodene. Denne informasjonen er satt sammen i den høyre delen av Figur 8.3, som viser hvilke veier som har vært brukt som et lag over et optisk satellittbilde.

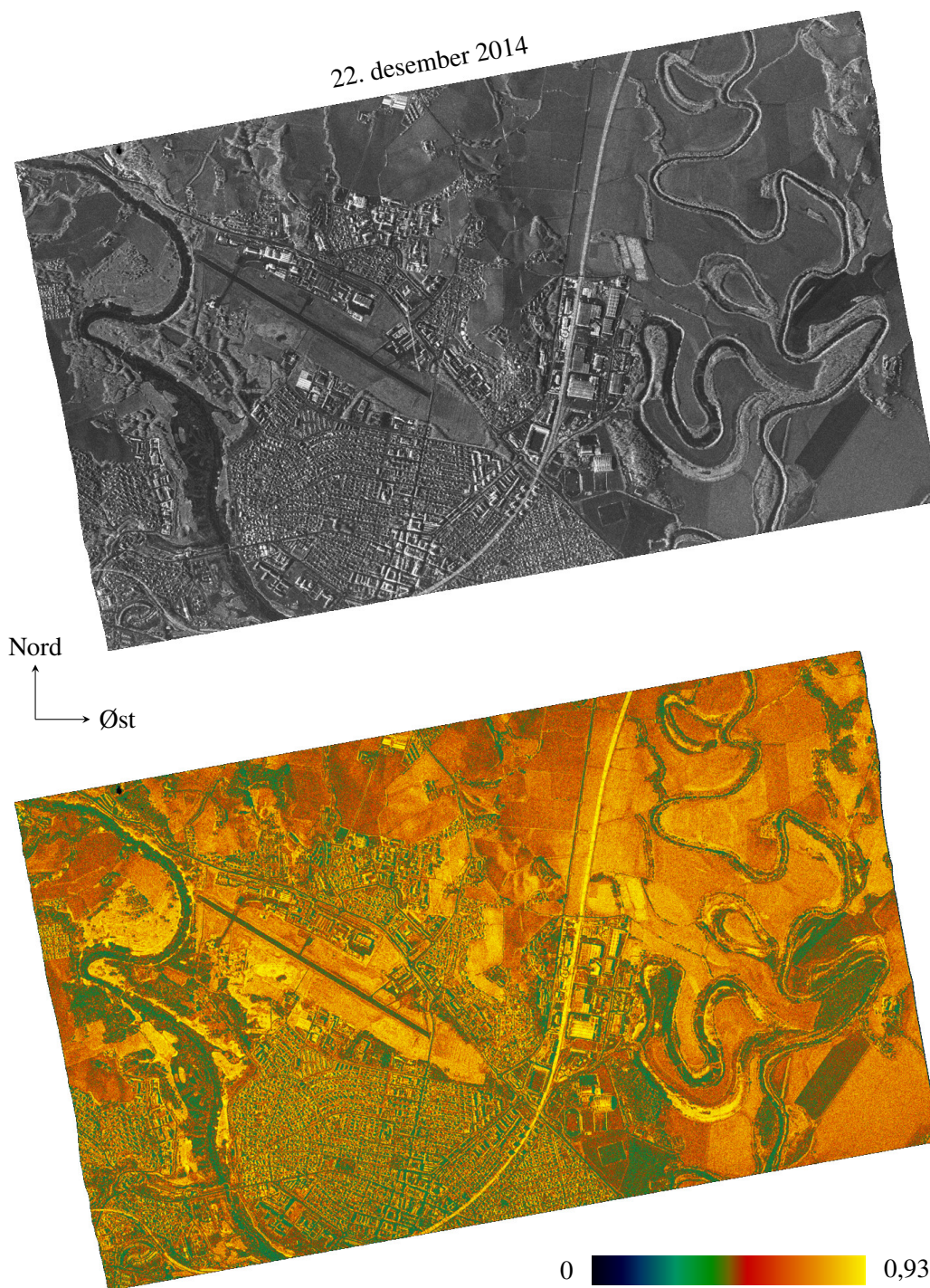
Det må bemerkes at forholdene i Meymaneh vist her var gode for koherent endringsdeteksjon med stabile, tørre klimaforhold. I Norge er det ofte mer påvirkning fra nedbør og mer vegetasjon som forandrer seg. Dette gjør at koherensen over terreng mistes raskere enn i Meymaneh, og i slike tilfeller bør det benyttes opptak med kortere tidsintervall.

## 8.2 Sammenlikning av flere koherensbilder

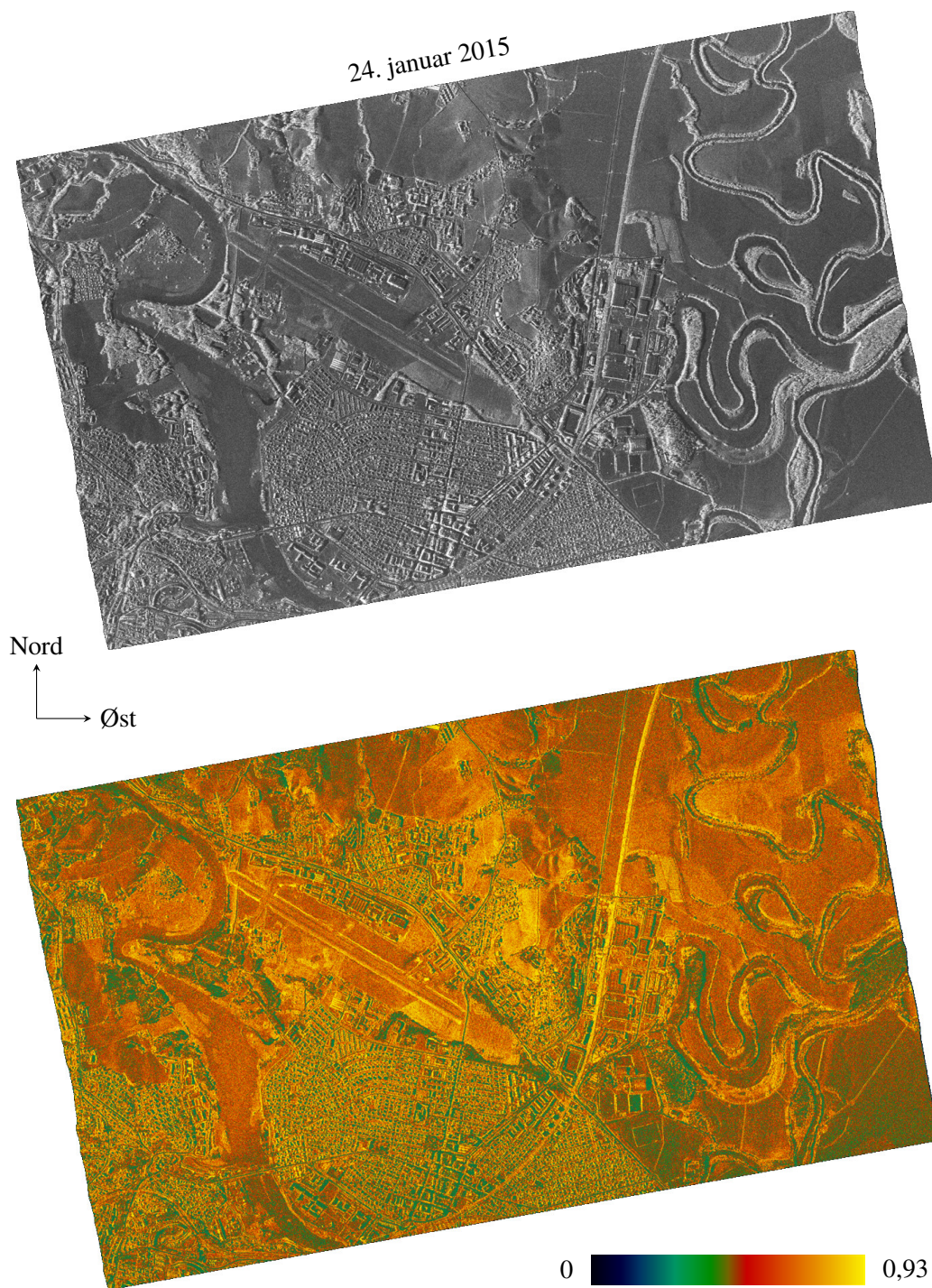
Vi vil her beskrive metoden for å sammenlikne koherensbilder fremstilt på ulike tidspunkter. Tre monostatisk bilder fra Kjeller/Lillestrøm-området er brukt i analysen. De er tatt med TerraSAR-X og TanDEM-X (TSX og TDX) med 10 s mellom opptakene. De tre bildesettene ble tatt 22. desember 2014, 24. januar 2015 og 9. mars 2015, og TSX-bildene er vist øverst i henholdsvis Figur 8.4, 8.5 og 8.6. Alle bildene ble tatt med omtrent samme innfallsvinkel på 49°, så det er minimale endringer fra opptaksgeometri. Det var imidlertid noe ulike snøforhold for bildene. Det var veldig lite snø målt utenfor FFI den 22. desember 2014, den 24. januar 2015 var det 25–30 cm snø og den 9. mars 2015 var det nesten bart. Middeltemperaturene var henholdsvis  $-2,9^{\circ}$ ,  $0,7^{\circ}$  og  $4,5^{\circ}$ , noe som gjør at det sannsynligvis var ulik fuktighet i snøen og dermed ulik tilbakespredning.

Koherensbilder ble generert for hvert bildepar etter koregistrering, og bildene ble først midlet med  $2 \times 7$  piksler i range/asimut for mer presis koregistrering. Koherensbildene for hver dato er vist nederst i Figur 8.4–8.6. Forskjellen mellom to og to koherensbilder er vist i Figur 8.7. Det øverste bildet viser differansen mellom koherensen 22. desember 2014 og 24. januar 2015, altså differansen mellom de nederste bildene i Figur 8.5 og 8.4. Det nederste bildet i Figur 8.7 viser på samme måte endring i koherensen fra 24. januar til 9. mars 2015.

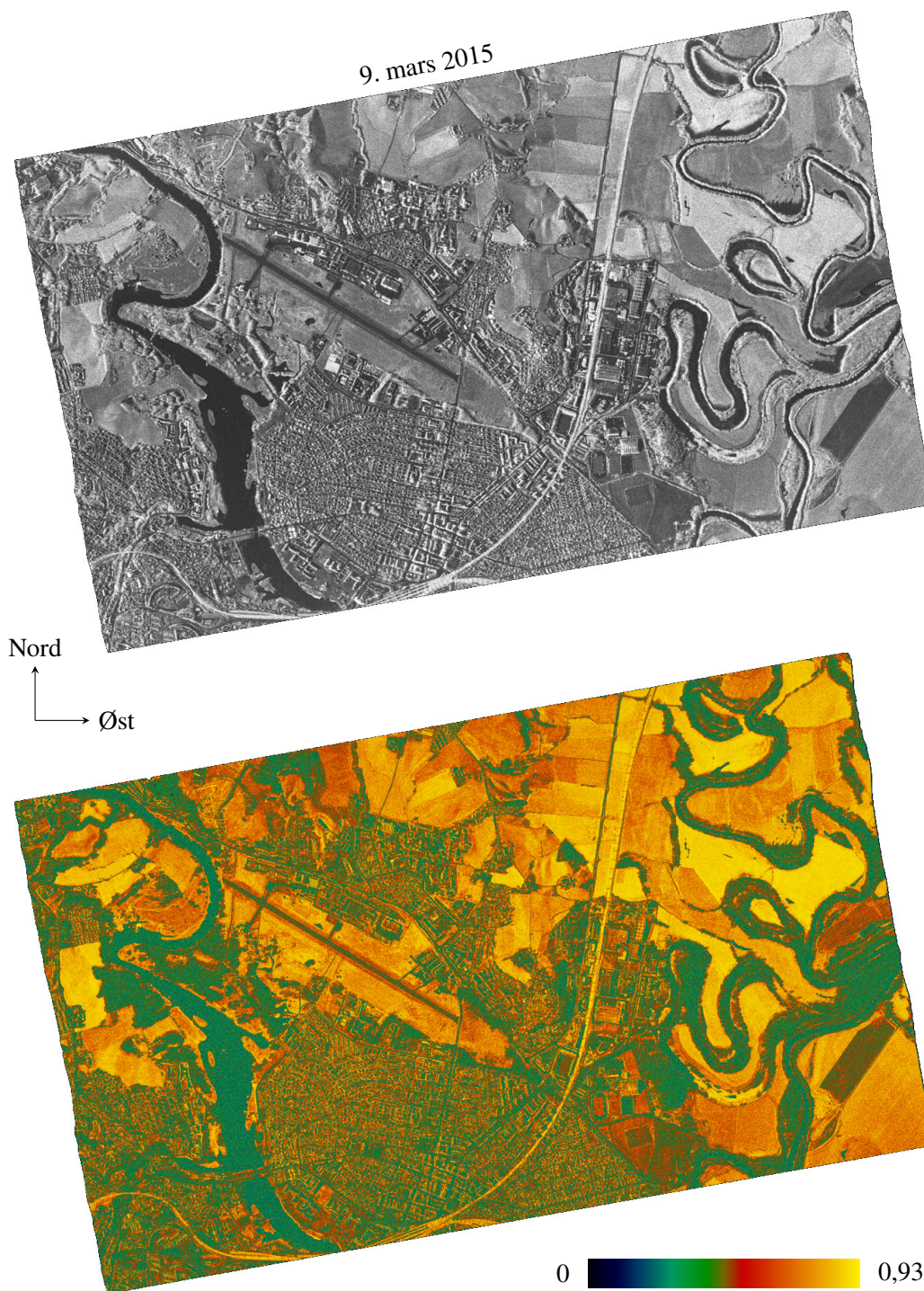
De følgende delkapitlene beskriver ulike deler av bildene. Generelt kan man si at der hvor intensiteten i SAR-bildene er lav vil også koherensen være lav. Dette gjelder spesielt over asfalten på flystripa på Kjeller flyplass og over vann som ikke er islagt. Hvis det hadde blåst litt over åpent vann, ville intensiteten økt i amplitudebildene. Koherensbilder med 10 sekunder mellom opptakene ville imidlertid ha vært mer eller mindre dekorrelert avhengig av hvor tilbakespredningen kom fra.



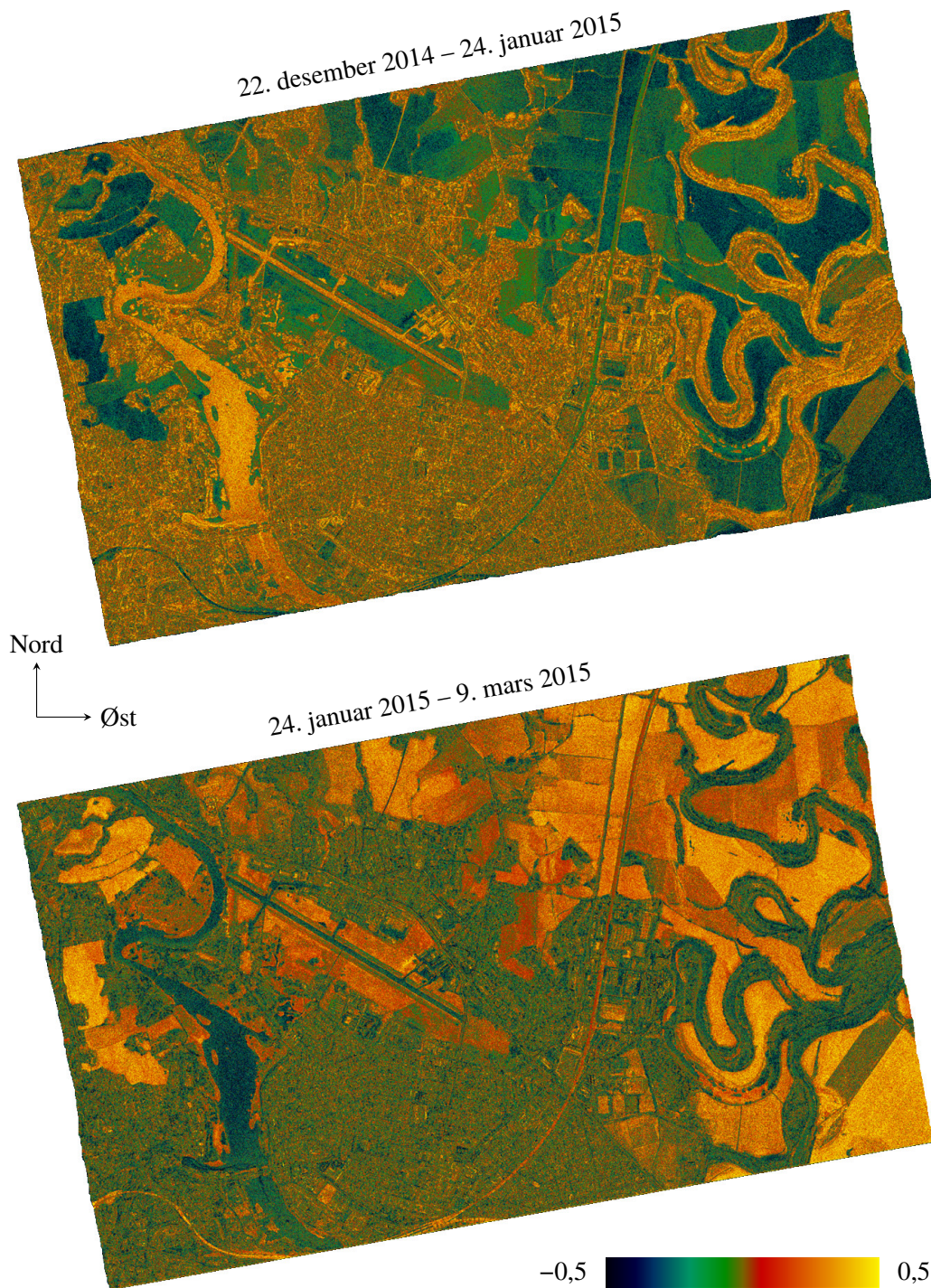
Figur 8.4 Øverst: Geokodet TSX Staring Spotlight-bilde over Kjeller og Lillestrøm 22. desember 2014. Pixel-størrelsen er 1,8 m og innfallsvinkelen er  $49^\circ$ . Nederst: Koherensbilde mellom TSX- og TDX-bildene. (© SLC provided by DLR 2014. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 8.5 Øverst: Geokodet TSX Staring Spotlight-bilde over Kjeller og Lillestrøm 24. januar 2015. Pikkels-størrelsen er 1,8 m og innfallsvinkelen er 49°. Nederst: Koherensbilde mellom TSX- og TDX-bildene. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 8.6 Øverst: Geokodet TSX Staring Spotlight-bilde over Kjeller og Lillestrøm 9. mars 2015. Pikkels-størrelsen er 1,8 m og innfallsvinkelen er 49°. Nederst: Koherensbilde mellom TSX- og TDX-bildene. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



Figur 8.7 Øverst: Endring i koherens fra TSX/TDX i monostatisk modus fra 22. desember 2014 til 24. januar 2015 (fra Figur 8.4 og 8.5). Nederst: Tilsvarende for 24. januar til 9. mars 2015. (© SLC provided by DLR 2014/2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)

---

---

### 8.2.1 Flyplassen midt i bildet

Den 22. desember er flystripen mørk i amplitudebildet øverst i Figur 8.4 der liten koherens er vist i grønt. Gresset rundt flystripen er noe lysere i amplitudebildet noe som betyr høyere koherens, og fargen varierer mellom mørk oransje og gul.

Den 24. januar var det 25–30 cm snø, og både amplitude- og koherens-bildene viser at flyplassen var brøytet litt bredere enn selve asfalten. Brøytetekantene i dette bildet gir noe høyere tilbakespredning i amplitudebildet enn områdene rundt. Selve asfaltstripa gir også noe høyere tilbakespredning enn den 22. desember, og har høyere koherens noe som tyder på at det ligger et lag av snø eller is på asfalten. Dette medfører en økning i koherens som kan ses øverst i Figur 8.7.

Den 9. mars er selve asfaltstripen blitt mørkere siden 24. januar i både amplitude- og koherens-bildene, noe som tyder på at asfalten er bar. Disse endringene vises nederst i Figur 8.7. Arealet på siden av asfaltstripa har noe mindre koherens enn der brøytetekantene lå tidligere. Koherensen på gressområdene er ellers høyere den 9. mars enn for begge de tidligere datoene.

### 8.2.2 Elvene Nitelva og Leira

Den 22. desember er det relativt mørke områder med litt lysere felter i begge elvene i SAR-bildene, både i Nitelva til venstre i bildet og i Leira til høyre i bildet. Koherensen viser en blanding av grønn og mørk oransje, noe som kan tyde på delvis isdekke. Den 24. januar er det jevnt høy koherens i elvene (mørk oransje), noe som tyder på fast og jevn is. Endringene øverst i Figur 8.7 viser betydelig økning i koherens, rundt 0,4 i Nitelva og rundt 0,25 i Leira. Den 9. mars er det jevnt grønn koherens i Nitelva, så her er nok isen nesten helt borte. I Leira er det derimot fortsatt noe mørk oransje langs elva og kanskje noe is. Endringene nederst i Figur 8.7 gir mye blått (-0,4) og grønt (-0,25) i Leira.

### 8.2.3 Dyrket mark

Det er betydelig variasjon i både amplitude- og koherens-bildene over dyrket mark, og det er størst variasjon når det er bart eller lite snø. Den 24. januar er dyrka mark for det meste mørk oransje, mens når det er lite snø den 22. desember og 9. mars, er det mye mer variasjon og generelt høyere koherens. Dette er fordi snøen reduserer tilbakespredning, noe som reduserer koherensen på jordene. Spesielt 9. mars er det noen flater som har veldig høy koherens (helt jevnt gule). Forskjellen på jordene uten snødekke er avhengig av om det er eng, stubbåker eller pløyd åker. Reduksjon i koherens kan ses øverst i Figur 8.7 (22. desember til 24. januar) som viser blått/grønt over dyrket mark og gressflatene på flyplassen. Økning i koherens er stor over de samme flatene fra 24. januar til 9. mars som vist nederst i Figur 8.7. Noen steder er økningen i koherens på nesten 0,5.

### 8.2.4 Skog

Opptakene mellom satellittene ble utført med 10 sekunders mellomrom, noe som medfører mye dekorrelasjon for skog og trær for alle datoene. Det er mange trær langs elva Leira til høyre i bildet og rett øst for bebyggelsen der det er et skogholt. I tillegg er det litt skog mellom flyplassen og Nitelva til venstre i bildet. Skogen er generelt ganske lys i amplitudebildene, og kan ha noe endringer over tid.

---

---

### 8.2.5 Bebygde områder

Bebygde områder slik som i Lillestrøm synes med redusert koherens i forhold til dyrket mark. Skrå hustak vil som oftest gi liten tilbakespredning dersom husene ikke står orientert rett mot radarstrålen. Hagene rundt kan også ofte ha trær som gir redusert koherens. Bygninger med store flate tak kan derimot gi noe koherens, slik som de som ligger mot øst i nærheten av Nitelva. Den 24. januar er koherensen for disse bygningene noe mindre enn for de andre datoene, sannsynligvis på grunn av snø som har lagt seg oppå takene. Det er derfor en reduksjon i koherens på takene øverst i Figur 8.7. I tettbygde områder slik som i Lillestrøm er det både økning og reduksjon lokalt. Hvis man ser på gjennomsnittsendring over et litt større område i bildene i Figur 8.7 er det derfor nesten ingen endringer hverken fra 22. desember til 24. januar eller 24. januar til 9. mars.

### 8.2.6 Jernbanelinje og veier

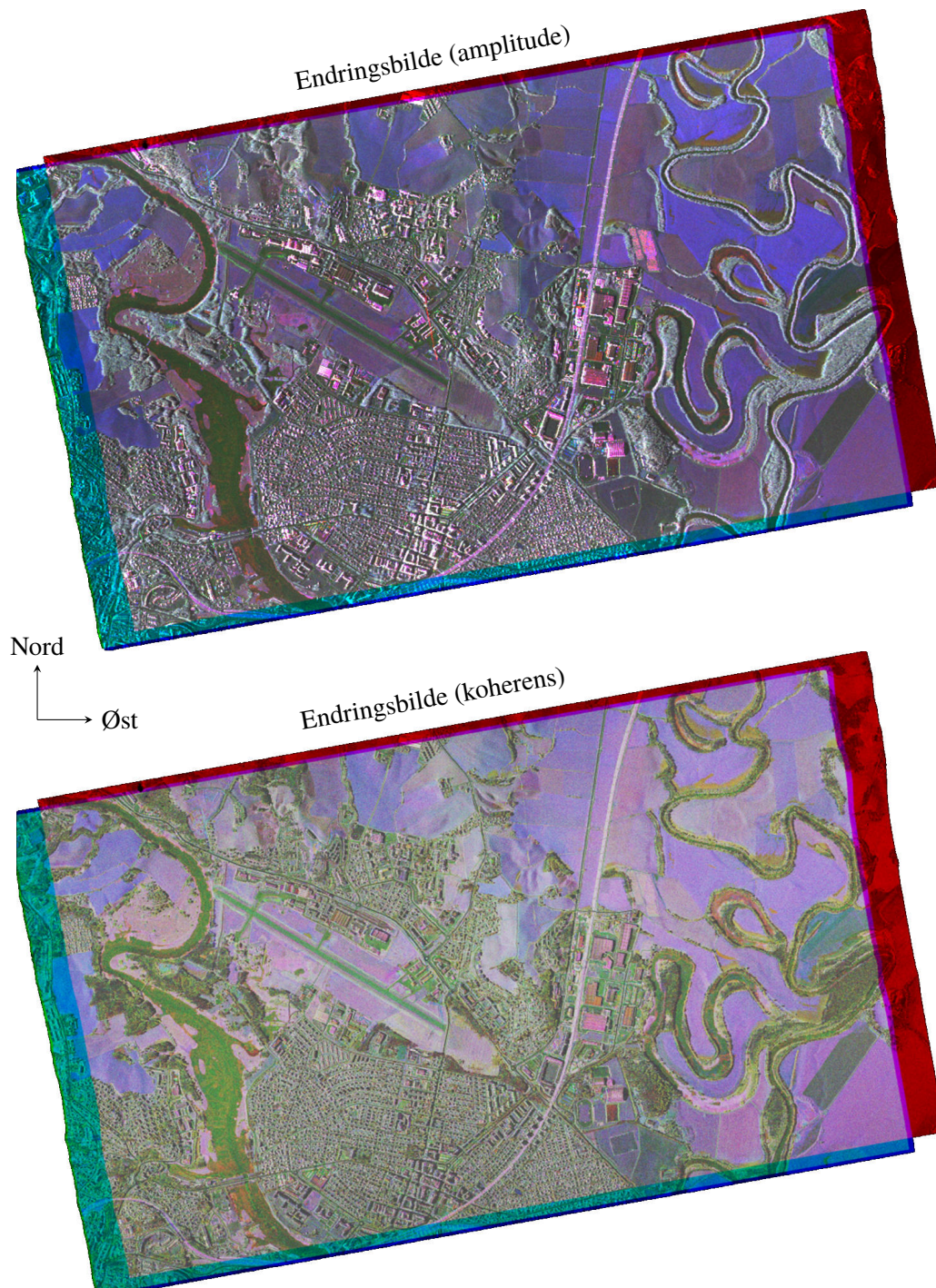
Koherensen på jernbanelinjen er generelt veldig høy siden den er bygget på lag av småstein. Den 24. januar er koherensen ved jernbanen noe lavere, sannsynligvis på grunn av dekorrelasjon fra is og snø mellom skinnene. Det er dermed en reduksjon i koherens øverst i Figur 8.7 (fra 22. desember til 24. januar) og en økning nederst (fra 24. januar til 9. mars).

Veier opptrer gjerne på motsatt vis i forhold til jernbanelinjer. Når det er bart, vil det være lite tilbakespredning fra asfalten og dermed lav koherens. Om vinteren kan det være et dekke av snø og is samt brøytekanter som øker begge deler. For å forstå endringene som kan leses ut av bildene kan det ofte være nyttig å konsultere optiske satellittbilder for å danne et inntrykk av landskapet.

### 8.2.7 Endringsbilder

I kapittel 7 ble det beskrevet hvordan RGB-endringsbilder kan brukes til å visualisere endringer. Et slikt eksempel er også vist øverst i Figur 8.8, som viser en RGB-sammensetning av amplitude-bildene fra øverste del av Figur 8.4, 8.5 og 8.6. Det sammensatte bildet viser også kantene som ikke er felles. Det var små områder som gikk tapt under koregistreringen, noe som tyder på at bildene ble godt plassert i forhold til der opptakene var bestilt. Som tidligere vil områder uten endringer ta en gråtoneverdi. Der tilbakespredningen er større for en eller to av dagene vil rød, grønn eller blå dominere (eller en kombinasjon av disse).

Nederste bilde i Figur 8.8 viser en annen type fremstilling, nemlig et RGB-sammensatt koherensbilde. Dette er altså en sammensetning av de nederste bildene fra Figur 8.4, 8.5 og 8.6. Det er ingen ny informasjon i sammensetningen i forhold til den tidligere sammenlikningen, men det kan være lettere å se hvor det er forskjeller. Dessuten er alle tre bildene registrert oppå hverandre, i motsetning til Figur 8.7 der to og to bilder er brukt.



Figur 8.8 Øverst: RGB-sammensatt geokodet TSX Staring Spotlight-bilde over Kjeller og Lillestrøm 22. desember 2014, 24. januar 2015 og 9. mars 2015. Nederst: RGB-sammensatt geokodet koherens-bilde for de samme datoene. (© SLC provided by DLR 2015. Prosessering fra SLC utført på FFI)



---

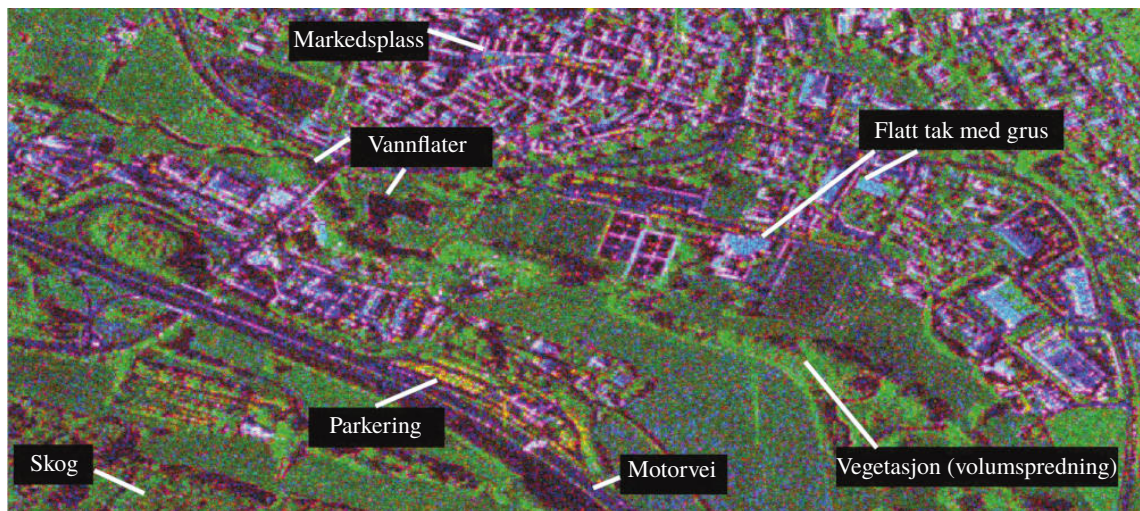
---

### 8.3 CovAmCoh-metoden









Et par av koregistrerte SAR-bilder samlet inn med identisk avbildningsgeometri inneholder mye informasjon som det kan være vanskelig å nyttiggjøre seg fullt ut. En spesiell visualisering av slike bildepar, kalt CovAmCoh, er utviklet av Fraunhofer IOSB i Tyskland som et hjelpemiddel for visuell eller automatisk bildetolkning [40, 41]. Hovedpoenget med CovAmCoh er altså ikke deteksjon av endringer mellom to bilder, men å utnytte den ekstra informasjonen som ligger i et bildepar til å forstå hva bildene viser.

Metoden går ut på å visualisere tre egenskaper – romlig variasjonskoeffisient (CoV), amplitude (Am) og koherens (Coh) – ved bruk av fargekanalene i et RGB-bilde. Et eksempel er vist på Figur 8.9. Den romlige variasjonskoeffisienten uttrykker om tilbakespredningen er homogen eller heterogen. Den kan beregnes som forholdet mellom standardavviket og middelveidien til pikselverdiene innenfor et lokalt område, og den beregnes over bildet med et glidende vindu på  $n \times n$  (for eksempel  $5 \times 5$ ) piksler. Amplituden er et uttrykk for tilbakespredningens intensitet, og koherensen uttrykker den temporære stabiliteten.

Ulike kombinasjoner av disse egenskapene fremhever ulike typer infrastruktur og terreng. Man har undersøkt hvordan dataene kan deles inn, og en inndeling i åtte klasser er funnet hensiktsmessig. En foreslått tolkningsnøkkel er beskrevet i Tabell 8.1.



Figur 8.9 Eksempel på CovAmCoh-bilde dannet fra to TerraSAR-X-bilder. Bilde hentet fra [40].

Farge	CovAmCoh-tolkning	Eksempler
 Mørk / svart	Ikke-lokal, lav tilbakespredning og ikke-koherent.	Skygger, vannflater, infrastruktur (avhengig av overflatens glatthet, sensor og avbildningsmodus). Infrastruktur kan fremstå mørkt blålig.
 Lys / hvit	Svært lokal, høy tilbakespredning og koherent.	Hjørner (byggningsfasader, takstrukturer, gjerder osv.).
 Rød	Svært lokal, lav tilbakespredning og ikke-koherent. (Rent rødt er sjeldent i CovAmCoh-bilder. Magenta- eller gul-toner forekommer oftere).	Kanter på skygger.
 Blå	Lys blå: Svært koherent og høy tilbakespredning. Mørkere blå: Mindre tilbakespredning.	Kandidater: Stabile menneskeskapte strukturer (f.eks. urbane områder).
 Grønn	Mørk grønn: Svært ikke-lokal, høy tilbakespredning og ikke-koherent. Grønn gul: Mer lokal, ikke-koherent, høy tilbakespredning. Grønn-cyan: Ikke-lokal, høy tilbakespredning og mer koherent.	Uslåtte enger, åkre, kratt, treklynger, skog, skip, tog, store kjøretøy. (Strukturer med romlig utstrekning, høy tilbakespredning og lav koherens.)
 Magenta	Svært lokal, lav tilbakespredning og koherent.	Små elementer av infrastruktur og urbane områder: Trafikklys, trafikkskilt, rekkverk, små hjørner osv.
 Gul	Svært lokal, høy tilbakespredning og ikke-koherent.	Menneskeskapte endringer / aktiviteter eller menneskeskapte strukturer som må endres: F.eks. Flyplass-gater, kloakkrenseanlegg osv.
 Cyan	Ikke-lokal, høy tilbakespredning og koherent.	Togskinner.

Tabell 8.1 Tolkningsnøkkel til fargene i et CovAmCoh-bilde.

---

---

## 9 Deteksjon av skip i havn

SAR er mye brukt til deteksjon av skip til havs, noe som er utenfor omfanget til denne rapporten. En annen interessant anvendelse for overvåkingsformål kan være å se på skip som ligger til kai. Kapittel 7.2 viste at inkohærent endringsdeteksjon kan være effektivt til å se når skip har vært i havn. Dette kapitlet vil beskrive deteksjon av skip på faste havneplasser i kapittel 9.1, hvordan koherent endringsdeteksjon kan gi en forbedring i kapittel 9.2 og til slutt hvordan silhuettene av skip kan brukes til klassifikasjon i kapittel 9.3.

### 9.1 Deteksjon basert på faste havneplasser

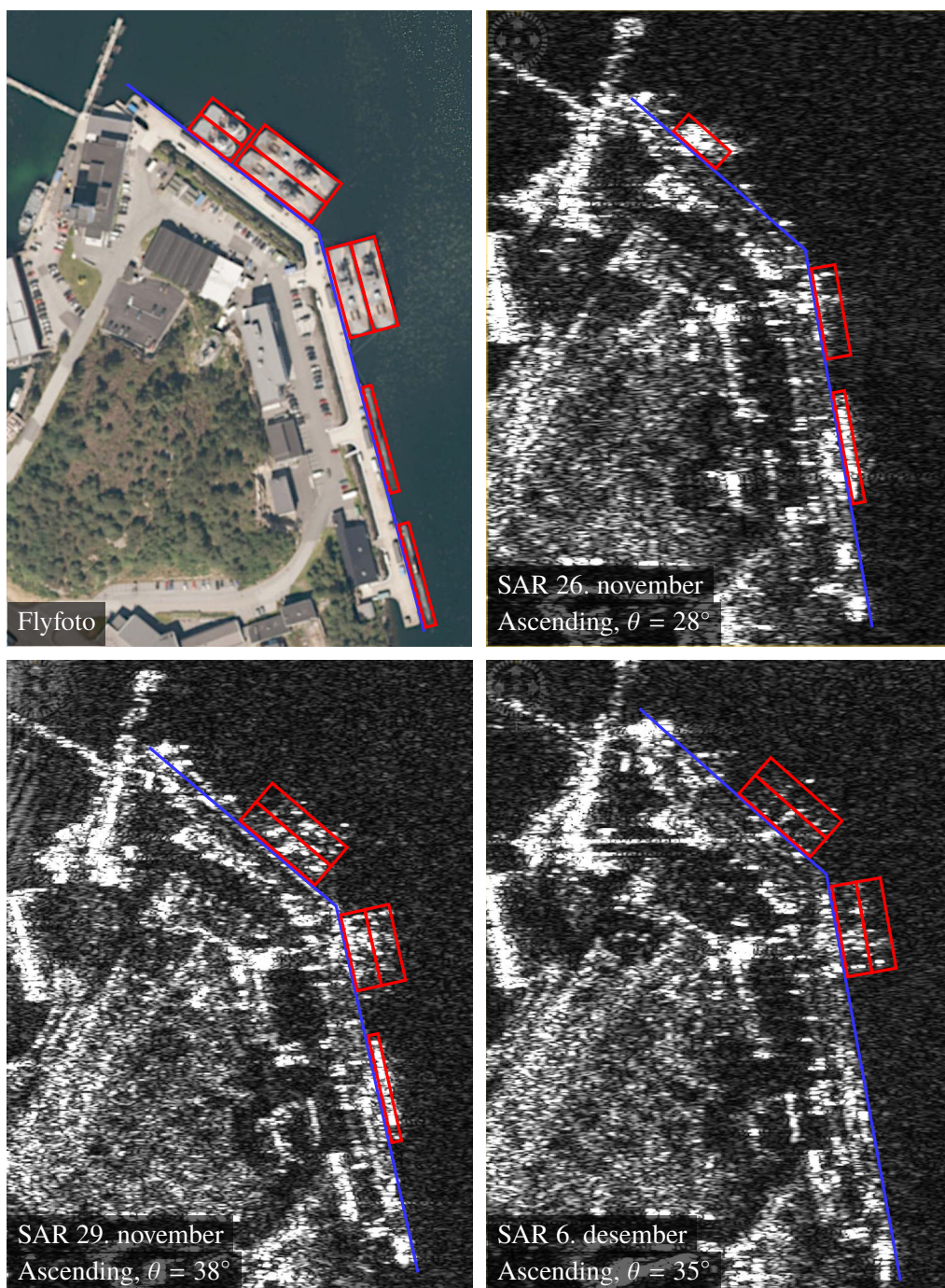
Både i SAR-bilder og optiske bilder ser man ofte en klar forskjell mellom havneanlegg og sjø, og dette gjør det mulig å se skip som ligger til kai. Ved rolig sjø fremstår ofte sjøen mørk i SAR-bilder på grunn av overflatespredning vekk fra satellitten, og skip har gjerne en sterkere tilbakespredning. Mange av teknikkene benyttet for skipsdeteksjon til havs vil derfor være aktuelle, for eksempel bruk av flerpolarimetriske data for forbedret gjenkjenning av mål [15].

I mange militære havner har skip faste plasser der de legger til. Dette oppstår gjerne på grunn av fasilitetene, siden større skip som fregatter og jagere krever større havneplass enn patruljefartøy. Ved å kjenne til spesifikke havneanlegg er det derfor til en viss grad mulig å se hvilke skip som ligger til kai og hvilke skip som er til sjøs. Dette kan enten gjøres manuelt ved å inspisere bilder eller mer sofistikert ved automatisk deteksjon. Siden SAR-scener forekommer med ulike opptaksgeometri, er det da nødvendig å bruke landemerker som kanten på kaiene for å finne skipenes normale fortøyningsposisjoner.

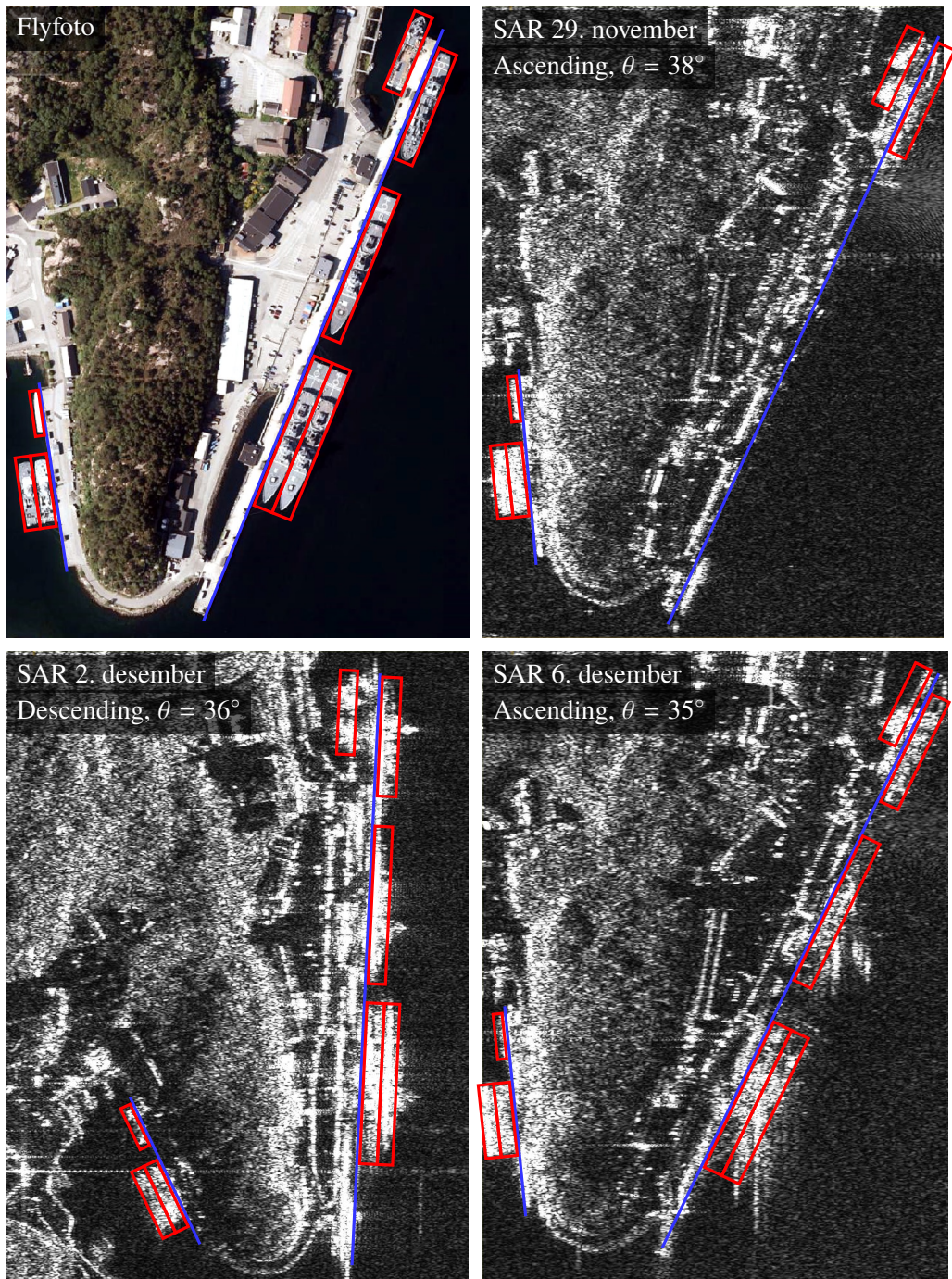
Vi vil her beskrive SAR-scener over Håkonsvern tatt med RADARSAT-2 i slutten av 2017, ved bruk av Spotlight-modusen med rundt 1,5 m oppløsning. Figur 9.1 viser den nordligste delen av marinebasen, med et flyfoto og SAR-bilder fra tre ulike datoer. Alle SAR-scenene ble tatt under et *ascending* satellittpass, der satellitten flyr nordover, mens innfallsvinkelen var noe ulik (mellom 28° og 38°). Flyfotografiet er her brukt som fasit, og viser kaikanten i blått og til sammen åtte skip markert med røde firkanter.

Ved å lage kaikanter i SAR-bildene og bruke lengdeforhold for å undersøke hver av fortøyningsplassene, ser man at det er en variasjon på hvilke skip som er tilstede, som er markert med røde firkanter. Den 26. november ser det ut til at tre skip har lagt til, mens det på de andre datoene er henholdsvis fem og fire skip.

Den sørlige delen av Håkonsvern er vist i Figur 9.2, og her er flyfotografiet igjen brukt som fasit. Dette bildet viser også åtte skip, av noe ulike klasser. I SAR-bildet fra 29. november ser man at de tre skipene i vest og de to nordligste skipene er i havn. I dette bildet kan man også antyde et ekstra skip helt sør som ikke er i flyfotoet, og ved å konsultere andre flyfoto ser man at dette også er en fortøyningsplass. I de to andre SAR-bildene ser det ut til at alle åtte skipene er tilstede. Merk at bildet fra 2. desember er tatt under et *descending* satellittpass, der satellitten flyr sørover, noe som gir en litt annerledes opptaksgeometri enn for de andre bildene. I dette bildet er det også mulig å antyde silhuetten fra noen av skipene.



Figur 9.1 Deteksjon av skip i Haakonssvern for tre datoer i 2017 tatt med RADARSAT-2 Spotlight med 1,5 m oppløsning. Ved å lage geometriske former basert på kjente fortøyningsplasser får man en indikasjon på hvilke skip som er i havn. (RADARSAT-2 SAR data: © raw data CSA, 2017, provided by NSC/KSAT 2017.)



Figur 9.2 Deteksjon av skip i Haakonsværn for tre datoer i 2017 tatt med RADARSAT-2 Spotlight med 1,5 m oppløsning. Ved å lage geometriske former basert på kjente fortøyningsplasser får man en indikasjon på hvilke skip som er i havn. (RADARSAT-2 SAR data: © raw data CSA, 2017, provided by NSC/KSAT 2017.)

---

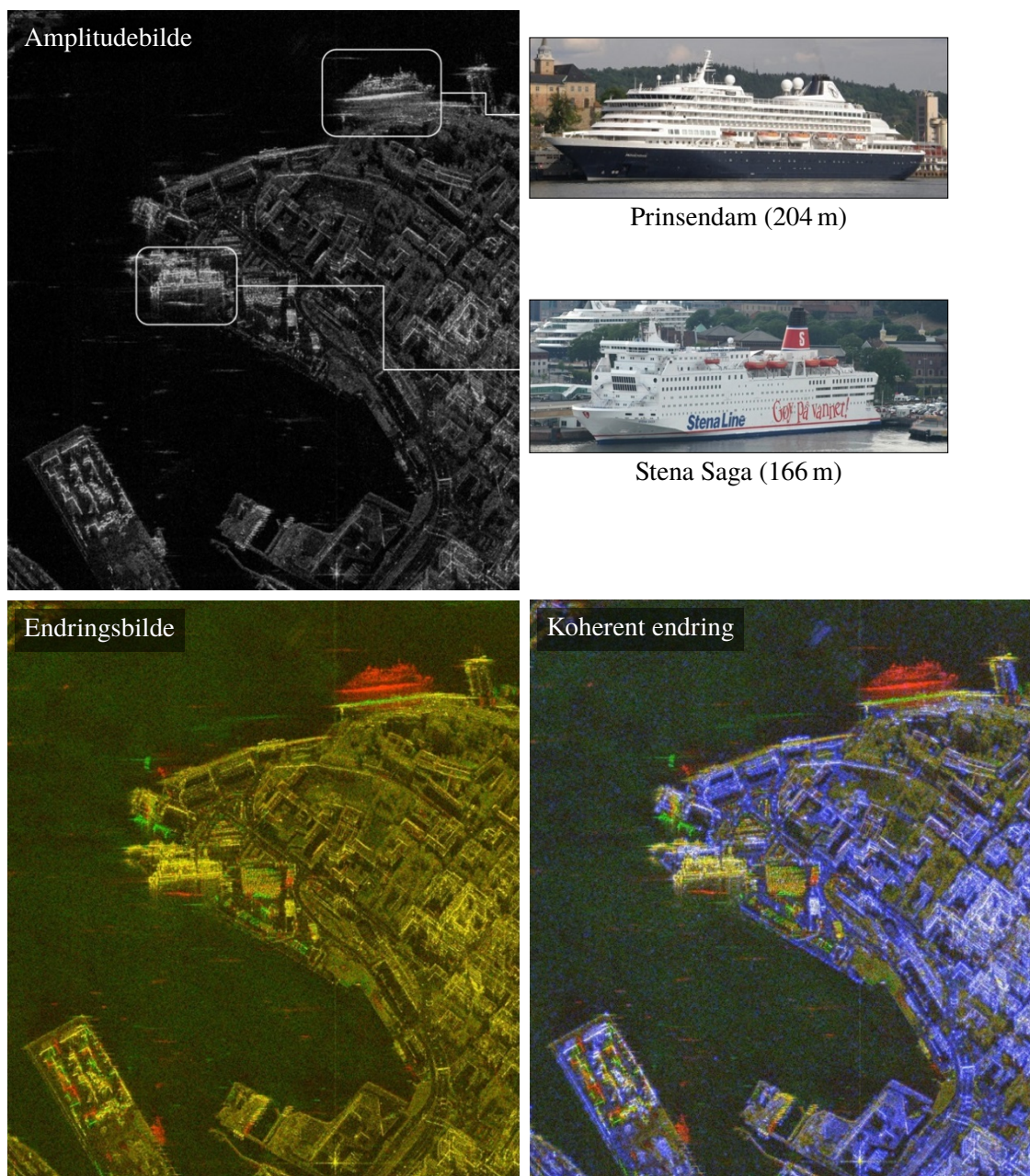
---

## 9.2 Bruk av koherent endringsdeteksjon

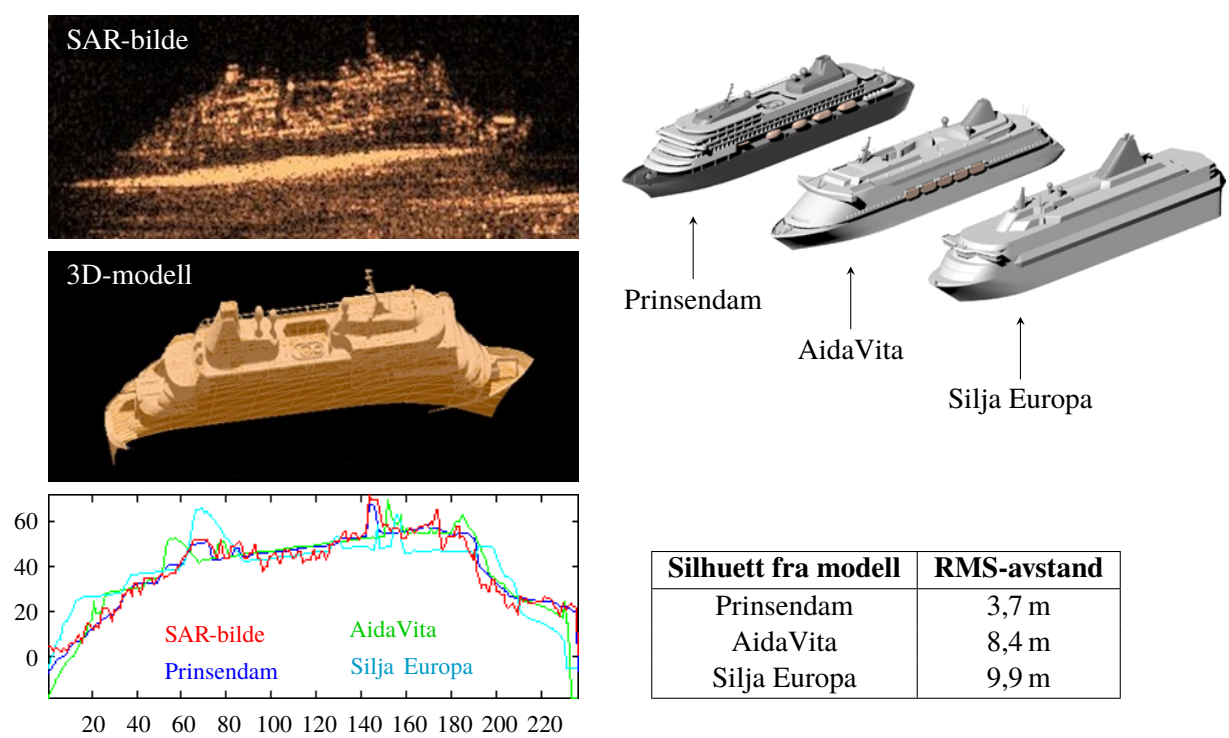
En utfordring ved analyse av SAR-bilder fra havneområder er å skille fartøyer fra omgivelsene. Basert på ett enkelt bilde er det gjerne ikke mulig å se hva som er deler av et skip og hva som er bygninger og utstyr på kaien. Tidsserier av SAR-bilder er dermed nyttige, og skip som er til stede i noen av bildene vil kunne detekteres ved endringsdeteksjon. Skip som har faste kaiplasser og er til stede i alle bildene i tidsserien er fremdeles en utfordring hvis man kun benytter amplitudeinformasjonen i bildene. Slike skip vil kunne se ut som faste installasjoner. Med koherent endringsdeteksjon er det imidlertid mulig å skille også disse skipene fra omgivelsene på grunn av potensialet for deteksjon av svært små endringer. Selv om skipene ligger ved sine faste kaiplasser, ligger de ikke eksakt på samme sted, og de vil dermed fremstå som endringer fra bilde til bilde. Dette er vist på Figur 9.3. Vi ser at danskebåten Stena Saga ikke vil gi utslag ved inkohørent endringsdeteksjon selv om den har seilt mange turer i tiden mellom de to bildene ble tatt, ettersom den ligger på sin faste plass begge dagene. Når koherens-informasjon er tilgjengelig (radarens fase er også med), skiller den seg imidlertid ut fra de stabile omgivelsene når den ikke ligger på centimeteren på samme sted. Dette kan ses i bildet nederst til høyre i Figur 9.3, der det er fravær av blått for Stena Saga.

## 9.3 Klassifikasjon av skip i havn

Når høyoppløselig SAR er tilgjengelig, er det mulig å få svært mye informasjon ut av bildene. Figur 9.4 viser et utsnitt av et PicoSAR-bilde over Oslo havn. PicoSAR er en SAR som i dette tilfellet er plassert på et fly, og som gir 60 cm oppløsning. 3D-modeller av forskjellige skip er laget på FFI, og disse sammenliknes med SAR-bildet. Ut ifra silhuetten er det mulig å identifisere skipet som Prinsendam, og en kan også se at RMS-avstanden i tabellen gir best treff med dette skipet.



Figur 9.3 Øverst: Utsnitt av TerraSAR-X-bilde av Oslo havn med ca. 1 m oppløsning. Nederst til venstre: Fargekodet bilde fra to koregistrerte SAR-bilder med 11 dagers mellomrom som er velegnet for inkoherent endringsdeteksjon. Rød kanal viser amplitude fra dag en og grønn kanal viser amplitude fra dag to. Nederst til høyre: Koherent endringsdeteksjonsbilde der rød kanal viser amplitude dag en, grønn kanal viser amplitude dag to og blå kanal viser koherens. Helt stabile objekter fremstår da i blått. Endringsdeteksjon er nærmere beskrevet i kapittel 7 og 8.



Figur 9.4 PicoSAR-bilde fra fly over Oslo havn sammenliknet med 3D-modeller av tre skip. Skipet ble identifisert som Prinsendam.



---

---

## 10 Ground Moving Target Indication

Ground Moving Target Indication (GMTI) er en radarmodus for deteksjon av objekter i bevegelse på overflaten. Deteksjon av bevegelse kan gjøres på en rekke forskjellige måter. Metoden som blir brukt avhenger blant annet av om radaren har én eller flere mottakerkanaler og om den opererer individuelt eller i et par av samarbeidende satellitter. Metodene er forskjellige med hensyn på anvendelsesområde og hvor mye informasjon som kan hentes ut. Det er for eksempel vesentlig om man kan få posisjons- og hastighets-estimerer for detekterte mål uten å anta at de kjører på kjente veier. GMTI er et bredt felt som omfatter en mengde forskjellige teknikker. I dette kapitlet gis en kortfattet oversikt.

### 10.1 Introduksjon til GMTI

I forbindelse med overvåkning kan deteksjon av en mengde forskjellige mål i bevegelse være av interesse. Dette inkluderer overflatemål som større kjøretøyer på veier og i terrenget, tog, skip på kanaler og andre steder nær land, kraner i havner og lignende. I prinsippet kunne man også inkludert personell og mange andre små mål, men slikt vil rombaserte sensorer ha mindre potensial for å observere. Det kunne også vært interessant å overvåke luftmål som helikoptre, UAV-er, fly og missiler. Deteksjon av små, hurtige mål fra rommet vil imidlertid være krevende, særlig på grunn av begrenset effekt, så en grundigere analyse vil være nødvendig for å avklare det eventuelle potensialet på dette feltet.

Det primære formålet med GMTI er deteksjon, men det er ofte også ønskelig med flere funksjoner som del av GMTI-prosesseringen. Eksempler på bruk av GMTI er å lage et fokusert bilde av målet, estimere hastighet og kurs, samt å flytte målet tilbake til sin egentlige posisjon når bevegelsen har gitt en forflytning i bildet.

Hovedutfordringen med GMTI er å skille mål fra omkringliggende clutter. Dette kan gjøres både i SAR-bilder og i data som ikke er fokusert til ferdige bilder. Begge strategier har utfordringer. I SAR-bilder vil mål med stor bevegelse fremstå som striper av ufokusert energi, og disse vil være vanskelige å detektere hvis de er svake. I data som ikke er prosessert til bilder må man kunne filtrere ut mål basert på bevegelse selv om tilbakespredningen deres ligger langt under clutter-nivået i de aktuelle range-cellene. Dette har slektskap med tradisjonell MTI der problemstillingen er deteksjon av luftmål over statisk terreng fra en fast posisjon. Med MTI kan man utnytte at terrenget ikke har Doppler-skift, mens refleksjonene fra fly vil ha et skift i frekvens og fase. Det som er konstant fra puls til puls kan fjernes ved koherent subtraksjon av det mottatte signalet fra to påfølgende pulser, og man står igjen med de bevegelige målene. Sammenlignet med tradisjonell MTI er det store utfordringer knyttet til rombasert GMTI. Når radaren er i rask bevegelse og radarstrålen har en viss bredde, vil tilbakespredningen fra terrenget ha en betydelig spredning i Doppler. For at et mål skal havne utenfor Doppler-båndbredden til terrenget, må det ha en hastighetskomponent mot eller fra radaren som overstiger det som kalles Minimum Detectable Velocity (MDV). For en radar som ser rett ut til siden kan følgende uttrykk gi et grovt overslag for MDV:

$$MDV = v \sin \frac{\Psi}{2} \quad (10.1)$$

---

---

der  $v$  er radarens hastighet og  $\Psi$  er strålebredden i asimut-retning. MDV vil typisk være noen få m/s fra luftbårne sensorer, mens den vil være fra mange titalls til flere hundre m/s fra satellitt. Deteksjon av langsommere mål vil kreve spesielle metoder som er omtalt i de neste avsnittene.

Hvilke GMTI-metoder som kan benyttes avhenger blant annet av antenntype og antall mottakerkanaler. Systemer med array-antenne kan benytte metoder basert på flere asimutkanaler hvis antennen er inndelt i flere segmenter langs asimut-retningen og disse har hver sin mottakerkjede. For eksempel har RADARSAT-2 og TerraSAR-X i utgangspunktet to asimut-kanaler, mens COSMO Second Generation trolig vil ha fem. Systemer med reflektorantenne kan ha flere mottaksstråler i asimut og separate kanaler for hver av disse. Men hvis mottaksstrålene ser forskjellige områder på bakken, kan man ikke uten videre benytte de samme metodene som man kan med array-antenner. Et system med reflektorantenne vil i noen tilfeller kunne tilpasses slike metoder [42], men dette må eventuelt undersøkes nærmere.

## 10.2 GMTI-metoder med én mottakerkanal

Med én mottakerkanal er det svært begrensede muligheter for deteksjon av langsomme mål i dataene før bildedannelsen. Det er da mest naturlig å gjøre GMTI etter bildedannelsen eller i forbindelse med SAR-prosesseringen.

Mål i bevegelse blir generelt dårlig fokusert i SAR-bilder. Svake mål som er veldig ufokuserte vil være vanskelige å detektere i bildene. Men de som er sterke nok kan detekteres på grunnlag av at de er dårlig fokuserte. Det er for eksempel mulig å kjøre autofokus på små utsnitt av et SAR-bilde, finne de målene som blir bedre fokusert av dette og anta at disse er i bevegelse. En slik metode vil kreve en god del prosessering. Mål i bevegelse vil som regel bli forflyttet fra sin egentlige posisjon i bildet, mens skyggen ikke blir forflyttet. I prinsippet kan dette også utnyttes for deteksjon av bevegelige mål, men det må antas å være en lite robust metode.

En annen fremgangsmåte som har blitt foreslått for å fremheve bevegelige mål er å benytte tidfrekvens (TF)-metoder istedenfor Fourier-transformasjoner i SAR-prosesseringen [43]. Istedenfor å danne ett tradisjonelt SAR-bilde der bevegelige mål blir ufokuserte, kan man ved hjelp av TF-metoder danne en bildesekvens der disse målene blir bedre fokusert og viser forflytning gjennom sekvensen. TF-metoder krever imidlertid mye mer prosessering enn tradisjonell SAR-prosessering.

Muligheten for deteksjon av svake mål øker hvis stasjonært land-clutter er undertrykt. Ulike metoder for å oppnå en viss grad av clutter-undertrykkelse med én kanal er beskrevet i litteraturen. I [44] deles den syntetiske aperturen opp, og de innsamlede dataene prosesseres til et antall subaperturebilder. Ved bruk av en spesiell metode for inkoherent sammenligning av subaperturebildene reduseres nivået på stasjonært clutter, og de ufokuserte målene kommer tydeligere frem. I [43] gjøres en inndeling i to subaperturer med et visst overlapp, og det foreslås å kompensere for faseforskjellene som skyldes subaperturenes ulike plassering, så undertrykkelsen av stasjonært clutter kan gjøres ved koherent prosessering. Det må påpekes at potensialet for clutter-undertrykkelse vil være mye mindre med én asimutkanal enn med flere kanaler, så en evne til deteksjon av små bevegelige mål omgitt av kraftig landclutter vil i praksis kreve flere kanaler.

Etter clutter-undertrykkelsen kan en refokuseringsmetode benyttes på de bevegelige målene. Med én kanal er det små muligheter for å bestemme målets bevegelse entydig og gi et nøyaktig estimat

---

---

for den egentlige posisjonen. En eventuell antakelse om at målet befinner seg på en vei, jernbane, kanal eller lignende kan gi gode hypoteser om posisjonen.

### 10.3 GMTI-metoder med to eller flere mottakerkanaler

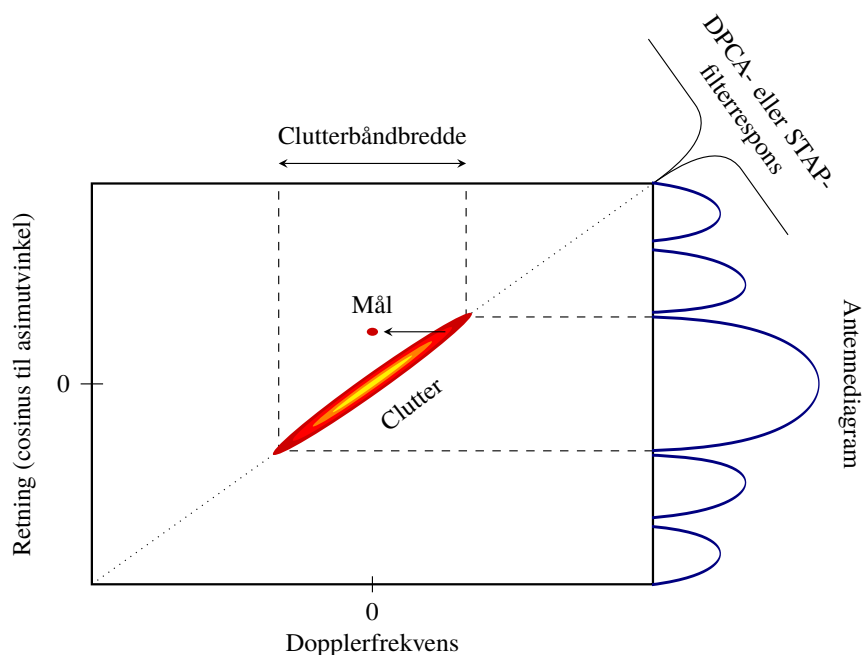
Når tilbakespredningen fra scenen mottas på flere asimut-kanaler samtidig, har man et mye større potensial for deteksjon av små mål med langsom bevegelse i kraftig terreng-clutter enn ved bruk av en enkelt kanal. Figur 10.1 kan gi en overordnet forståelse for hvorfor det er slik. Clutteret i scenen har Doppler-skift som er avhengig av retningen, så det danner en smal rygg i Doppler-retning-planet. Med én kanal mottas i utgangspunktet hele clutter-båndbredden, og et bevegelig mål observeres sammen med clutter hvis det ikke har så stor hastighet at det havner utenfor den totale clutter-båndbredden. Flere asimutkanaler gjør det mulig å bestemme retningen til de mottatte signalene. Det er dermed mulig å filtrere bort clutter-ryggen uten å fjerne alle andre signaler innenfor clutter-båndbredden. Både antennens totale lengde og antall kanaler er av betydning for hvor godt dette kan gjøres. Mål med tilstrekkelig Doppler-skift til å bli flyttet et stykke unna clutter-ryggen kan detekteres. Til deteksjonen benyttes typisk en constant false-alarm ratio (CFAR)-detektor.

En mengde ulike måter å utnytte flere kanaler på er beskrevet i litteraturen. De som får mest omtale faller inn under følgende kategorier:

- Along-track interferometri (ATI)
- Displaced phase-center antenna (DPCA)
- Space-time adaptive processing (STAP)

ATI er i utgangspunktet et sett av teknikker for bruk av to kanaler med separasjon i asimut. Det fins utvidelser for bruk av flere kanaler [45]. Den mest grunnleggende formen for ATI baserer seg på å sende pulsene med én sender og motta refleksjoner fra den samme scenen på to kanaler. Fra de to kanalene kan det genereres to SAR-bilder samlet inn med identisk avbildningsgeometri og et tidsintervall gitt av satellittens flytid mellom antennens fasesentre. Bildene koregistreres nøyaktig, og det kompenseres for faseforskjellen som skyldes tidsintervallet mellom bildene. Faseforskjellene man da står igjen med indikerer mål som har endret avstand til sensoren i løpet av intervallet og dermed må være i bevegelse. Med ATI kan små hastigheter detekteres, men raske mål kan gi flertydige hastighetsestimater. Det vil være en del støy i estimatene, og posisjonsbestemmelse av mål basert på ATI med én satellitt har gjerne en usikkerhet på flere hundre meter [46].

DPCA er en annen GMTI-teknikk for to kanaler. En generalisering til flere kanaler med elementer fra STAP kalles extended DPCA (EDPCA) [47]. Ideelt sett skal DPCA kansellere stasjonært clutter i SAR-bildene, så bare bevegelige mål gjenstår. En forutsetning for kanselleringen er at PRF velges ut fra plattformens hastighet og avstanden mellom antennens fasesentre slik at én puls mottas ved det ene fasesenteret eksakt samtidig som neste puls mottas ved det neste fasesenteret. På lignende måte som med tradisjonell MTI med en stasjonær sensor kan da stasjonært clutter kanselleres ved koherent subtraksjon. Dette kan gi svært effektiv clutter-undertrykkelse. En fordel med DPCA-baserte fremfor STAP-baserte metoder er at clutter-undertrykkelsen skjer etter bildedannelsen. Dette gir bedre forutsetninger for håndtering av svært varierende clutter, for eksempel når det både er sjø og land innenfor scenen. DPCA-baserte metoder stiller imidlertid strenge krav til blant annet en nøyaktig



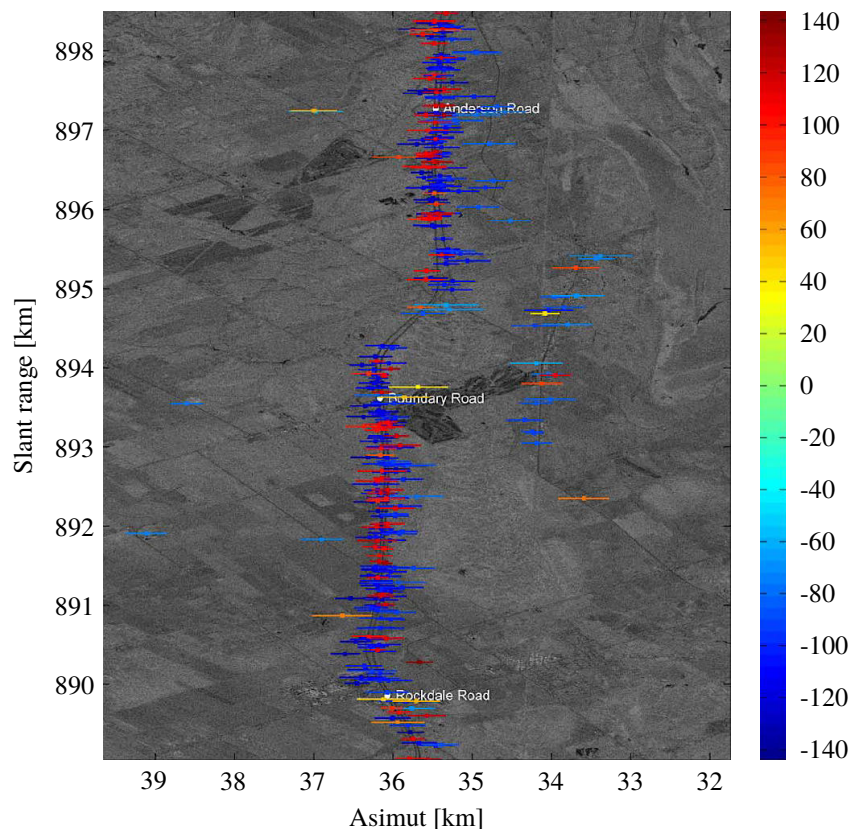
Figur 10.1 Skisse av clutter og bevegelig mål i Doppler-retning-planet. Merk at dette er et øyeblikksbilde som vil endre seg gjennom en lang integrasjonstid. Målet vil forflytte seg raskt i planet, mens clutter-ryggen vil forskyves og endres som følge av blant annet jordrotasjonen.

tilpasset PRF for at resultatet skal bli bra. Man mister altså friheten til å velge PRF ut fra andre hensyn, noe som er en viktig ulempe i et satellittbasert SAR-system.

STAP er et stort felt som det fins egne lærebøker om. Med STAP-baserte metoder er det mulig å oppnå svært god clutter-undertrykkelse uten de strenge kravene som DPCA stiller. Den grunnleggende idéen med STAP er å utnytte både romdimensjonen – flere kanaler – og tidsdimensjonen – flere pulser – på en adaptiv måte for å oppnå et best mulig forhold mellom signalet fra målet og summen av clutter, støy og interferens – det man kan kalle signal-to-clutter plus noise ratio (SCNR). At teknikken er adaptiv betyr at man hele tiden tilpasser seg de varierende nivåene av clutter, støy, eventuelle jammere og lignende. Det kan være mulig å formulere en optimal løsning for deteksjonsproblemet ut fra matematiske og statistiske betraktninger. Men en optimal STAP-løsning for deteksjon av bevegelige mål med satellittbasert multi-kanal SAR ville ført til uholdbar tung prosessering. I et slikt system vil det være fordelaktig å utnytte en lang integrasjonstid, der mål kan ha betydelig forflytning. For at et mål med vilkårlig bevegelse ethvert sted i scenen skulle blitt detektert med best mulig SCNR, måtte man hatt filtre for alle tenkelige målbevegelser. Dette er ikke praktisk mulig, så det må gjøres en eller annen ikke-optimal forenkling. En mengde forskjellige STAP-baserte GMTI-metoder er beskrevet i litteraturen. Med konvensjonelle STAP-metoder som opererer på dataene før bildedannelsen antas det at målet har liten forflytning, og det må benyttes kort integrasjonstid. Dette reduserer evnen til deteksjon av svake mål. En mer avansert fremgangsmåte som benytter lang integrasjonstid kalles imaging STAP (ISTAP) [48]. Her inngår en todimensjonal filterbank som tar høyde for at målet kan forflytte seg på mange forskjellige måter. Metoden krever

mye prosessering, men er realiserbar. Både EDPCA og ISTAP er blitt testet på RADARSAT-2-data med godt resultat. ISTAP har generelt høyest ytelse, men er mer følsom for heterogent clutter.

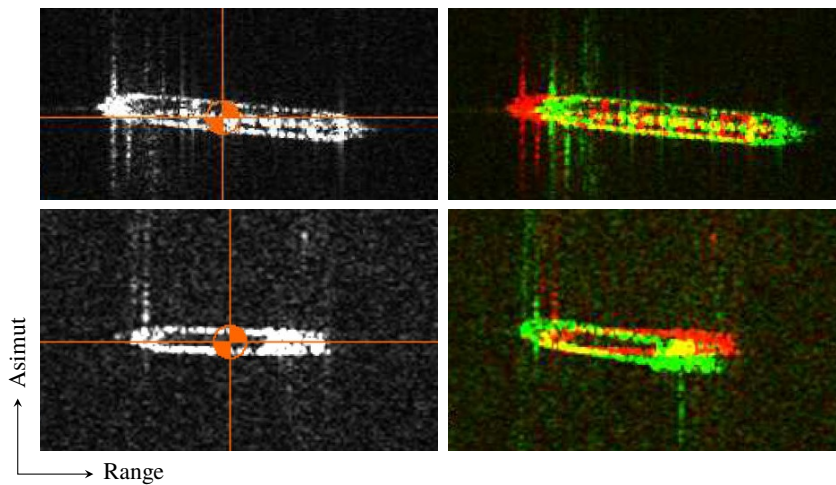
Etter selve deteksjonen kan det gjøres refokusering og relokalisering av målene. Sammenlignet med enkeltkanalsystemer har multikanalsystemer mye større potensial for å estimere bevegelsene til målet og hvor det faktisk befinner seg. Det er derfor mulig å plassere målene på riktig sted i SAR-bildene uavhengig av kjennskap til veier og lignende. Et eksempel på et GMTI-bilde fra RADARSAT-2 er vist i Figur 10.2.



Figur 10.2 Kjøretøyer detektert med ISTAP og relokalisert i et SAR-bilde fra RADARSAT-2 over en motorvei i Canada [48]. Fargekodingen angir estimert hastighet i km/t, og de horisontale stolpene angir usikkerhet i posisjonsestimaten.

## 10.4 GMTI-metoder med flere samarbeidende satellitter

Med to eller flere samarbeidende satellitter i en klynge er det mulig å oppnå mye bedre hastighets- og posisjonsestimater enn med én satellitt. Med én satellitt er tidsintervallet mellom SAR-bilder fra to asimut-kanaler i størrelsesorden 1 ms, og forflytningen til et bevegelig mål innenfor intervallet er neglisjerbar sammenlignet med en oppløsningscelle. Satellittparet TerraSAR-X og TanDEM-X har i en bestemt konfigurasjon flydd med 2,5 s separasjon. Da rekker de fleste bevegelige mål å forflytte seg gjennom flere oppløsningsceller innenfor intervallet, og man får et helt annet grunnlag for å estimere bevegelsen. Et eksempel er vist på Figur 10.3.



Figur 10.3 Til venstre: Fartøyer observert med TerraSAR-X. Til høyre: Bildeutsnitt fra TerraSAR-X (rød fargekanal) og TanDEM-X (grønn fargekanal) samlet inn med 2,5 s mellomrom [46].

I et GMTI-eksperiment med TerraSAR-X og TanDEM-X er det benyttet DPCA-basert clutter-undertrykkelse. Deretter er bevegelige mål detektert og refokusert, og forflytningen deres mellom bildene er estimert ved en todimensjonal korrelasjon [46]. Informasjonen som kan trekkes ut fra disse prosesseringsstegene gir grunnlag for nøyaktige posisjons-, hastighets- og kursestimater uten antakelser om at målene beveger seg på veier eller lignende. For kjøretøyer i det aktuelle eksperimentet er posisjoneringsfeilen i gjennomsnitt ca. 11 m, mens feilen i hastighetsestimaterne er ca. 0,6 km/t.

---

---

## 11 Framtidige satellitter

Antall SAR-satellitter er i stor vekst. Så vidt vi kjenner til er syv nye SAR-satellitter skutt opp i løpet av 2018. Disse har kommet fra både nasjonale og kommersielle aktører i Finland, Japan, Spania, Storbritannia, Argentina og USA. Mange titalls nye satellitter er planlagt de neste årene. Systemer som det kan bli mulig å få tilgang på data fra er av særlig interesse. Disse kan deles inn i tre kategorier: Nye systemer fra de man får data fra i dag – Canada, Italia, Tyskland og ESA, systemer fra andre land og større konstellasjoner fra kommersielle selskaper. Grensene mellom kategoriene er noe uklare.

### 11.1 Nye systemer fra de man får data fra i dag

Etter hvert som RADARSAT-2, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X/TanDEM-X og Sentinel-1A/1B begynner å nærme seg enden av sin levetid, vil satellittene bli erstattet av nye systemer som vil sikre kontinuitet i leveransene av C- og X-bånd SAR-data. I tillegg vil Tyskland og ESA komme med nye systemer som skal operere i lavere frekvensbånd.

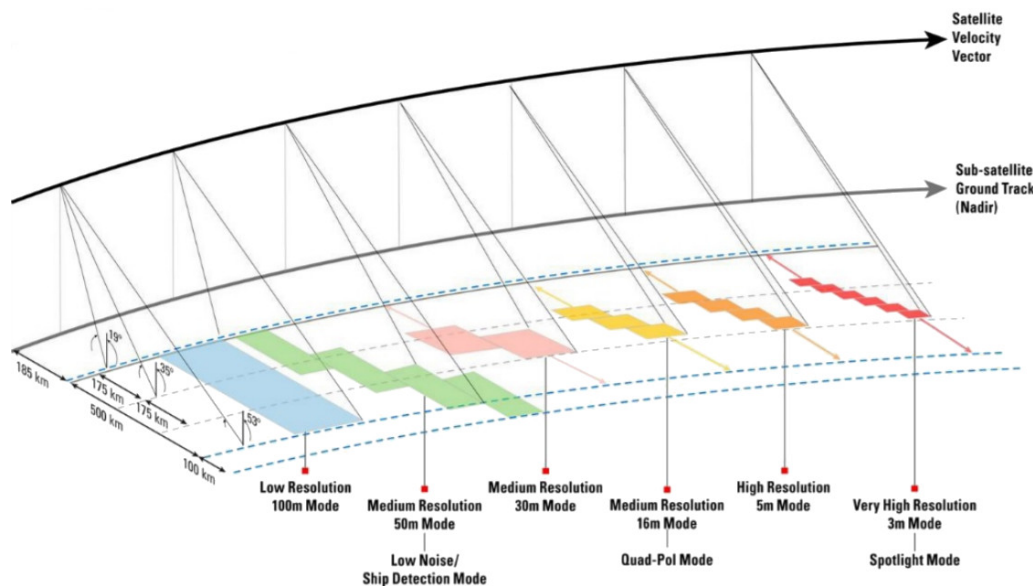
#### 11.1.1 RADARSAT Constellation

RADARSAT Constellation Mission (RCM) er en kanadisk konstellasjon av tre satellitter som etter hvert skal overta etter RADARSAT-2 [49]. Oppskytingen fant sted sommeren 2019, like før rapportens ferdigstillelse. Satellittene er utstyrt med C-bånd SAR og i tillegg AIS-mottaker. I likhet med RADARSAT-2 vil de ha en lang rekke bruksområder. Dessverre ser det foreløpig ut til at tilgangen til data blir vanskelig for andre land enn Canada.

Satellittene vil være betydelig mindre enn RADARSAT-2. De vil veie ca. 1400 kg og ha en antenne på  $6,88 \text{ m} \times 1,37 \text{ m}$  (altså  $9,45 \text{ m}^2$ ). Satellittene vil gå i en solsynkron «dawn-dusk»-bane med banehøyde rundt 593 km. Avbildningshyppigheten vil være den største forbedringen fra RADARSAT-2. Med tre satellitter vil et mye større areal kunne dekkes hver dag, og antall bildemuligheter blir større. Det er forventet å få 1–2 daglige passeringer over Norskehavet, 2–3 passeringer over Barentshavet og 3–4 passeringer over Svalbard.

Hyppigere avbildning gir bedre muligheter for endringsdeteksjon. Mens RADARSAT-2 har 24 dagers repetisjonssyklus, vil RCM-konstellasjonen ha fire dager. Dette vil innebære en svært stor forbedring av potensialet for koherent endringsdeteksjon.

RCM skal ha mange av de samme modusene som RADARSAT-2 som vist i Figur 11.1. Båndbredden på 100 MHz vil være den samme, og oppløsningen vil dermed også være tilsvarende. Største sporbredde med lav oppløsning vil være 500 km, og modusen som er optimalisert for skipsdeteksjon vil ha 350 km sporbredde. Høyeste oppløsning i spotlight-modus er oppgitt å være ca.  $3 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  (range  $\times$  asimut). Dersom den fulle båndbredden benyttes overalt, skulle kombinasjonen av båndbredde og innfallsvinkler tilsi at range-oppløsningen vil variere i området 1,9–4,6 m.



Figur 11.1 Utvalg av moduser for RCM [50]. (Kilde: CSA)

Valgmulighetene for polarisasjoner vil utgjøre en stor forbedring fra RADARSAT-2. I de fleste moduser vil både enkel ko- og kryss-pol, dual lineær, samt kompakt polarimetri være tilgjengelig. Kompakt polarimetri vil være tilgjengelig både i modusene med størst sporbredde og høyest oppløsning. Dette vil blant annet gi bedre muligheter for skip-/is-diskriminering og karakterisering av ulike mål og terrengtyper.

### 11.1.2 COSMO-SkyMed Second Generation

COSMO-SkyMed Second Generation (CSG) er en ny generasjon av satellitter som skal overta etter dagens COSMO-SkyMed (CSK). Det er i utgangspunktet planlagt to satellitter som er forventet oppskutt i 2019 og 2020. Det vil trolig være en overgangsfase der både gamle og nye satellitter er operative, så den totale dekingen blir bedre i denne perioden.

Satellittene er relativt store. De vil veie 2240 kg og ha antenner på 5,7 m × 1,4 m (altså 8,0 m<sup>2</sup>). Banehøyden vil være 619 km, og repetisjonssyklusen til hver satellitt vil være 16 dager Dette vil normalt bety 8 dagers repetisjonssyklus for en konstellasjon av to satellitter.

Radaren opererer i X-bånd. Oppgitt oppløsning og arealdekning i utvalgte moduser er oppsummert i Tabell 11.1. Opplysninger om båndbredde relativt til CSK kan tyde på at CSG har en maksimal båndbredde på hele 1,2 GHz [51, 52]. Dersom denne båndbredden benyttes ved alle innfallsvinkler, skulle det tilsi at en range-oppløsning i området 14–37 cm vil være oppnåelig. Det er imidlertid en del usikkerhet rundt disse opplysningene.

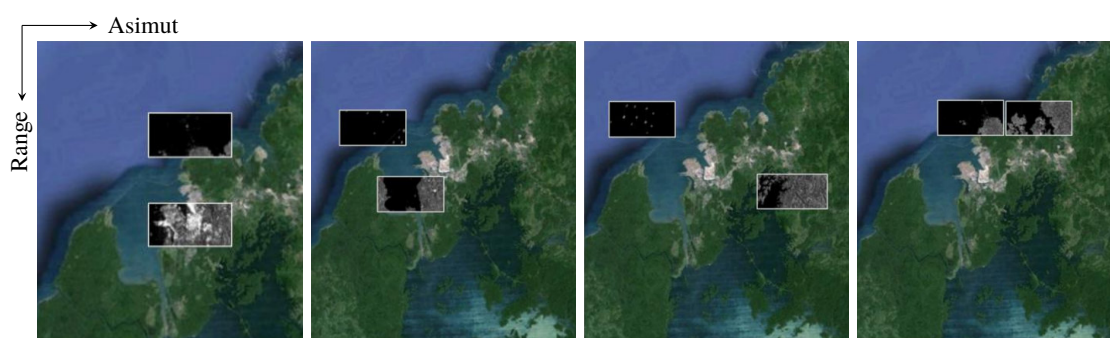
Mulighet for dual-polarisasjon ved svært høy oppløsning og fullpolarimetri ved 3 m oppløsning er en betydelig forbedring fra CSK. Det vil blant annet gi større mulighet for diskriminering mellom ulike typer mål.

Antennen består av separate paneler, og dette gir stor fleksibilitet i styringen av antennestrålen. Blant annet vil det være mulig å benytte nye moduser basert på teknikken «Discrete Stepped Strip»



Modus	Opplysning [asimut×gr. range]	Scenestørrelse [asimut× gr. range]; sporbredde	Polarisasjon
Spotlight 2A	0,35 m × 0,48–0,55 m	3,1 km × 7,3 km	Enkel, dual
Spotlight 2B	0,63 m × 0,63 m	10 km × 10 km	Enkel, dual
Stripmap	3 m × 3 m	40 km	Enkel, dual
Stripmap Quadpol	3 m × 3 m	15 km	Full
ScanSAR 1	20 m × 4 m	100 km	Enkel, dual
ScanSAR 2	40 m × 6 m	200 km	Enkel, dual

Tabell 11.1 Utvalgte moduser for COSMO-SkyMed Second Generation.



Figur 11.2 Eksempler på plassering av scener med høy oppløsning ved bruk av DI2S [51].

(DI2S), som krever styring av strålen fra puls til puls. Teknikken gir større fleksibilitet i plassering av scener enn tradisjonell spotlight-avbildning, og dette er illustrert på Figur 11.2.

Det argentinske systemet SAOCOM vil bli integrert med COSMO-SkyMed, så både L-bånd- og X-bånd-data fra de samme områdene vil bli tilgjengelige (se kapittel 11.2.2).

### 11.1.3 Etterfølgere av TerraSAR-X og TanDEM-X

I Tyskland utvikles det etterfølgere av TerraSAR-X, TanDEM-X og PAZ. Ettersom TerraSAR-X fremdeles er operativ, og PAZ nylig er kommet opp og vil sikre kontinuitet i leveransene av X-bånd-data i mange år fremover, har utviklingen av neste generasjon trolig hatt mindre hast enn opprinnelig tenkt. Det har vært skissert flere fremtidige generasjoner. Den første har vært kalt TSX-NG, og den neste har gått under betegnelsen High Resolution Wide Swath (HRWS). Beskrivelser av TSX-NG som har sirkulert i 4–6 år er trolig ikke gyldige lenger. Den siste informasjonen fra DLR og Airbus DS tyder på at TSX-NG ikke lenger er med i de nasjonale planene [53, 54]. Neste oppskyting er planlagt rundt 2023, og dette ser ut til å være en HRWS-satellitt.

Modus	Oppløsning [asimut × gr. range]	Scenestørrelse [asimut × gr. range] eller sporbredde	Tilgjengelige polarisasjonskanaler
Sliding SL	0,25 m × 0,25 m	> 20 km × 20 km	Enkel
Sliding SL	0,25 m × 0,25 m	> 15 km × 15 km	Full
Strip-Map	1 m × 1 m	50 km	Enkel
Strip-Map	3 m × 3 m	80 km	Enkel
ScanSAR	2 m × 8 m	120 km	Full
ScanSAR	2 m × 16 m	540 km	Enkel

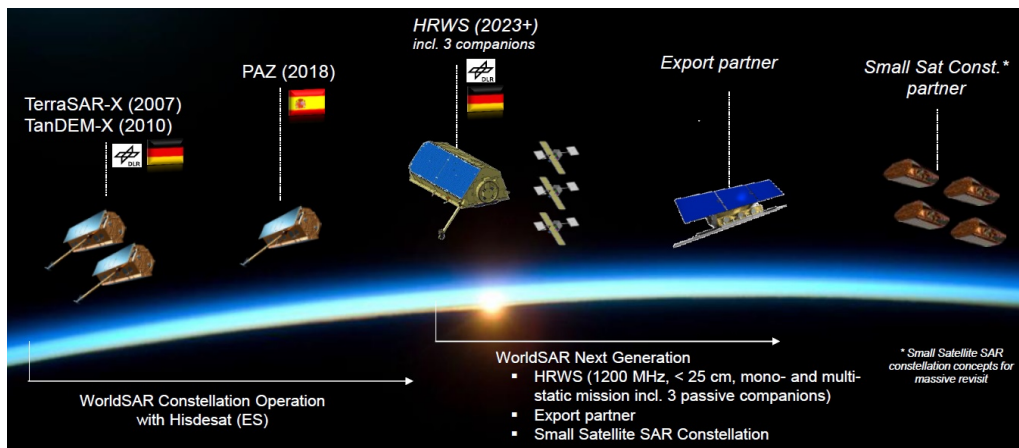
Tabell 11.2 Utvalgte moduser for HRWS-satellittene.

HRWS-satellittene vil ha en X-bånd SAR med 1,2 GHz båndbredde og i tillegg AIS-mottaker. Såkalt *digital beam forming* (DBF) og flere mottakerkanaler vil gi stor fleksibilitet og et bedre forhold mellom arealdekning og oppløsning enn man har med dagens satellitter. Spotlight-moduser med inntil 25 cm × 25 cm nominell oppløsning er beskrevet. Ut fra båndbredde og innfallsvinkler kan det forventes at en range-oppløsning i området 14–25 cm vil være oppnåelig i en monostatisk konfigurasjon. Det skal også være mulig å få quad-pol-data med inntil 25 cm oppløsning. En rekke moduser med sporbredder på opp til 540 km er beskrevet. Eksempler på moduser er oppsummert i Tabell 11.2.

Et svært interessant aspekt ved det planlagte HRWS-systemet er at det vurderes passive mottakersatellitter i tillegg til de aktive satellittene. Man tenker seg en klynge bestående av en aktiv hovedsatellitt og tre passive satellitter. Dette vil åpne opp muligheter for blant annet bistatisk avbildning, single-pass interferometri som muliggjør 3D-avbildning av både stasjonære og bevegelige mål, *ground moving target indication* (GMTI) og høyere oppløsning.

De nye satellittene er tiltenkt en lang rekke bruksområder. Det er planlagt å generere en digital elevasjonsmodell (DEM) med 4 m samplingsavstand og 2 m høydenøyaktighet. Systemet vil være velegnet for blant annet overvåkning av landsenkning, i tillegg til diverse oppgaver som krever svært høy oppløsning. Stor sporbredde og AIS-mottaker gir også stort potensial i forbindelse med maritim overvåkning.

Utforming av konstallasjonen er avgjørende for avbildningshyppighet og muligheter for endringsdetsjon, men det synes uavklart hvor mange satellitter som vil komme av denne typen. Det er lansert et konsept som kalles WorldSAR, der tyskerne inngår samarbeid med andre partnere som kjøper og eier sine egne satellitter i en felles konstallasjon med de tyske satellittene. Den første partneren er operatøren av den spanske satellitten PAZ. Denne satellitten er stort sett en kopi av TanDEM-X. Antakelig tar man sikte på at flere vil bli med i samarbeidet og anskaffe tyskutviklede satellitter. Figurene som tyskerne presenterer kan tyde på at satellitten som tidligere ble omtalt som TSX-NG nå er en eksportvariant. Konstallasjoner av småsatellitter kan også inngå i WorldSAR-konseptet, så man vil på sikt oppnå mye bedre avbildningshyppighet. De planlagte systemene er illustrert i Figur 11.3.



Figur 11.3 Planer for etterfølgere av TSX/TDX og videreføring av WorldSAR-konseptet [54].

#### 11.1.4 Sentinel-1C/1D og etterfølgende systemer

I ESAs Copernicus-program vil leveransene av C-bånd SAR-data videreføres etter at Sentinel-1A og -1B når enden av sin levetid. Satellittene vil erstattes av et nytt par av satellitter, Sentinel-1C og -1D, tidlig på 2020-tallet. Disse satellittene vil i stor grad ha samme spesifikasjoner som dagens satellitter, men med noen forbedringer. De viktigste nye elementene er AIS-mottaker og utstyr for optisk kommunikasjon [55]. Hver satellitt vil ha 12 dagers repetisjonssyklus, så konstellasjonen får seks dagers syklus. Det kan tenkes at Sentinel-1C kommer opp mens 1A fremdeles er operativ. I så fall vil den samlede ytelsen bli bedre i en overgangsperiode.

Sentinel-1C og -1D vil antakelig bli erstattet av en ny konstellasjon med mye høyere ytelse tidlig på 2030-tallet. Det har vært foreslått et system som utnytter mulighetene ved DBF og har høy oppløsning i et bredt spor. Et eksempel på dette er en modus med 3 m oppløsning i et 250 km bredt spor [56]. Det har også vært snakk om passive mottakersatellitter i tillegg til de aktive satellittene [57, 58]. Tidspunktet for å erstatte Sentinel-1C og -1D ligger imidlertid så langt frem i tid at det er høyst usikkert hvilken ytelse det nye systemet vil få.

#### 11.1.5 Tandem-L

Tandem-L er en planlagt konstellasjon av to SAR-satellitter som skal operere i L-bånd. Konstellasjonen har vært under planlegging ved det tyske romsenteret DLR i mange år, og den siste informasjonen tyder på at den ikke vil komme opp før i 2024 [59].

Tandem-L-satellittene vil være store, og SAR-antennene vil være utbrettbare reflektorer med diameter på hele 15 m. En illustrasjon av satellittene er vist på Figur 11.4. Det er planlagt at satellittene skal fly i formasjon i en polar bane med ca. 745 km høyde og repetisjonssyklus på 16 dager. Oppløsningen i asimut skal være ca. 7 m innenfor en sporbredde på maksimalt 350 km. Fullpolarimetrisk avbildning vil være tilgjengelig, men dette gir halvert sporbredde. Det store forholdet mellom sporbredde og oppløsning oppnås ved hjelp av flere mottakerkanaler i elevasjon



Figur 11.4 Illustrasjon av Tandem-L (Kilde: DLR).

og DBF på mottak. I tidligere beskrivelser av systemet var det nevnt en mulighet for avbildning med inntil 1 m oppløsning innenfor et begrenset område i krisesituasjoner [60]. Dette må bety at systemet har kapasitet til spotlight-avbildning. Maksimal båndbredde er oppgitt til 84 MHz, noe som skulle tilsi at oppløsningen i ground-range vil være begrenset til rundt 3 m.

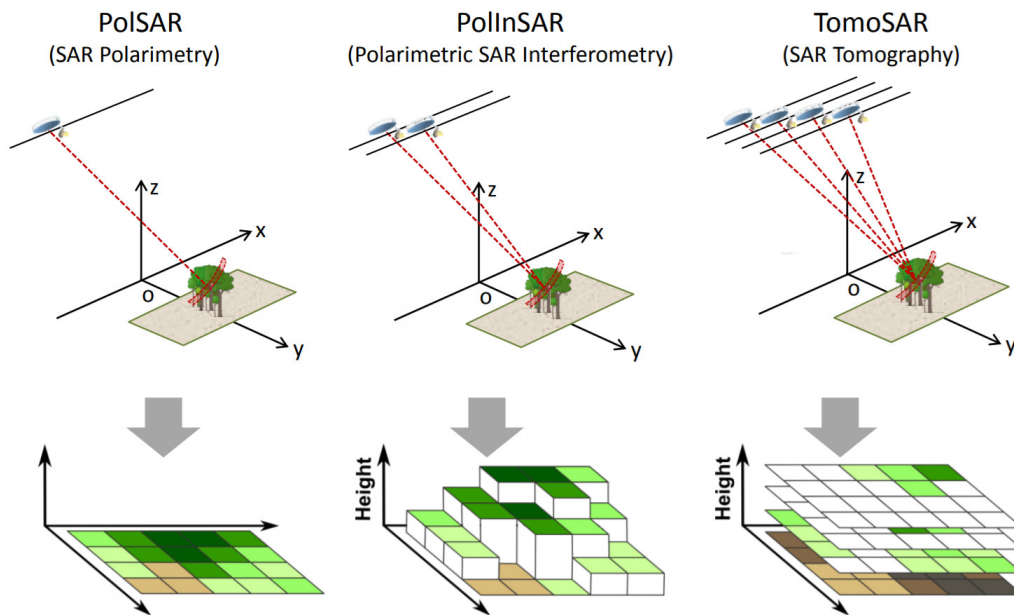
Blant formålene med Tandem-L er målinger av biomasse, isbreer, jordfuktighet og deformasjoner i jordoverflaten. Med TerraSAR-X og TanDEM-X ble det generert en digital elevasjonsmodell (DEM) med 12 m samplingsavstand horisontalt og 2 m høydenøyaktighet. Ettersom radarbølgene har liten inntrengningsdybde i vegetasjon i X-bånd, følger denne elevasjonsmodellen tretopper og lignende. Inntrengningsdybden er mye større i L-bånd, og Tandem-L kan dermed generere en DEM som gir et bedre bilde av topografien under vegetasjonen. Det er planlagt å generere en ny DEM med samme oppløsning og nøyaktighet som den som ble generert med TSX/TDX.

Med Tandem-L er det også planlagt en operasjonsmodus der man skanner et skogsområde fra flere vinkler og dermed får laget en tomografisk avbildning av skogen som vist på Figur 11.5 (altså en 3D-avbildning av strukturen i skogen). I militær sammenheng vil informasjon om trehøyder og skogstruktur blant annet være nyttig i forbindelse med estimering av fremkommelighet.

#### 11.1.6 Biomass

Biomass er et fremtidig ESA Earth Explorer satellittoppdrag. En SAR-satellitt som skal operere i P-bånd (rundt 435 MHz) er under utvikling, og skal etter planen være klar til oppskyting i 2021 [50]. Satellitten vil ha en utbreitbar reflektorantenne med diameter på ca. 12 m.

Ved så lave frekvenser som P-bånd vil radarbølgene i stor grad trenge gjennom vegetasjonen og også ha betydelig inntrengning i jordsmonn, is og bygninger. Den tilgjengelige båndbredden i dette



Figur 11.5 SAR-teknikker for målinger av biomasse [61].

frekvensområdet er imidlertid bare 6 MHz, så oppløsningen blir dårlig på rundt 50 m. Det primære formålet med systemet er å gjøre målinger av jordas biomasse. Det vil bli benyttet flere teknikker som er illustrert på Figur 11.5. Interferometri kan gi målinger av den tredimensjonale formen til terrenget, mens tomografi kan si noe om tettheten til vegetasjonen i tre dimensjoner.

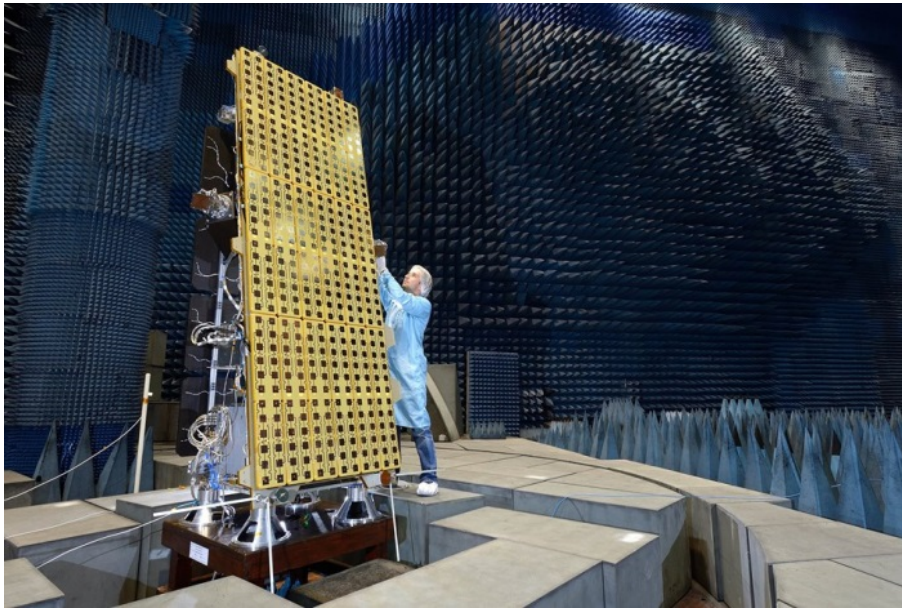
### 11.1.7 SARah

Tyskland har i dag en konstellasjon med fem militære SAR-satellitter kalt SAR-Lupe, som måler i X-bånd med en oppløsning på rundt 0,5 m i Spotlight-modus. Disse satellittene har vært i bane siden 2006–2008, og nærmer seg slutten av den planlagte levetiden. De planlagte etterfølgerne til SAR-Lupe kalles SARah, og lover en enda bedre oppløsning.

SARah vil bestå av tre satellitter. Den første er basert på TerraSAR-X, og vil ha en aktiv fasearray-antenne bygget av EADS Astrium. De to andre satellittene skal ha passive reflektorantennene fra OHB, og likner på SAR-Lupe. Det ser ut til at oppskytingen vil finne sted i 2020 eller 2021.

## 11.2 Systemer fra andre land

En rekke satellitter er for tiden under utvikling som nasjonale systemer med større eller mindre innslag av kommersielle aktører. Det foregår utvikling i land som Kina, Japan, Russland, Sør-Korea, Israel, Storbritannia og Argentina. Fra noen av disse systemene kan det være vanskelig å få tilgang til data, men systemer med større potensiale for norske interesser er nevnt under.



Figur 11.6 NovaSAR-1 med SAR-antennen i front. (Kilde: Airbus DS).

Modus	Oppløsning [asimut × gr. range]	Sporbredde
Stripmap	6 m	15–20 km
ScanSAR	20 m	100 km
ScanSAR Wide	30 m	140 km
Maritime	6 m × 13,7 m	> 400 km

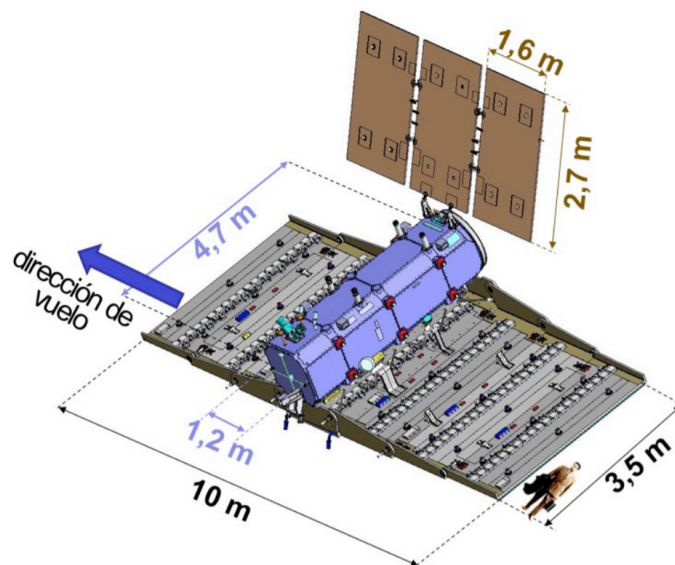
Tabell 11.3 Eksempler på SAR-moduser for NovaSAR-S.

### 11.2.1 NovaSAR-S

NovaSAR-S er et utviklingsprogram ledet av Surrey Satellite Technology Ltd. (SSTL) med tung støtte fra britiske myndigheter og en deltakelse fra Australia. Målet med NovaSAR-S har vært å utvikle relativt små og rimelige SAR-satellitter som kan benyttes i en konstellasjon. Den første satellitten er kalt NovaSAR-1, og har startet å levere bilder siden den ble skutt opp i september 2018. Denne kan betraktes som en teknologidemonstrator. Det er imidlertid ukjent hva som er status for den videre utviklingen frem mot en operativ konstellasjon, og hva spesifikasjonene er for satellittene som skal inngå i denne.

NovaSAR-1 veier ca. 400 kg, har en SAR-antenne på ca. 3 m × 1 m og er vist i Figur 11.6. Radaren opererer i S-bånd (ca. 3,1–3,3 GHz), og har en tilgjengelig båndbredde på 200 MHz. Satellitten er i tillegg utstyrt med AIS-mottaker, og vil kunne teste ut en rekke SAR-moduser. De som produsenten har nevnt som eksempler er oppsummert i Tabell 11.3. Fullpolarimetriske data er tilgjengelig.

Ut fra båndbredden og antennedimensjonene virker det sannsynlig at systemet i realiteten har kapasitet til avbildning med noe høyere oppløsning enn 6 m. Den eksperimentelle maritime modusen har tidligere vært oppgitt til å ha en sporbredde på hele 750 km [62], men i de nyeste beskrivelsene oppgis > 400 km [63]. Denne modusen vil etter all sannsynlighet gi svært mange ambiguiteter i bildene, og kan derfor bare benyttes over havet.



Figur 11.7 Fysisk utforming av SAOCOM-satellittene (Kilde: CONAE).

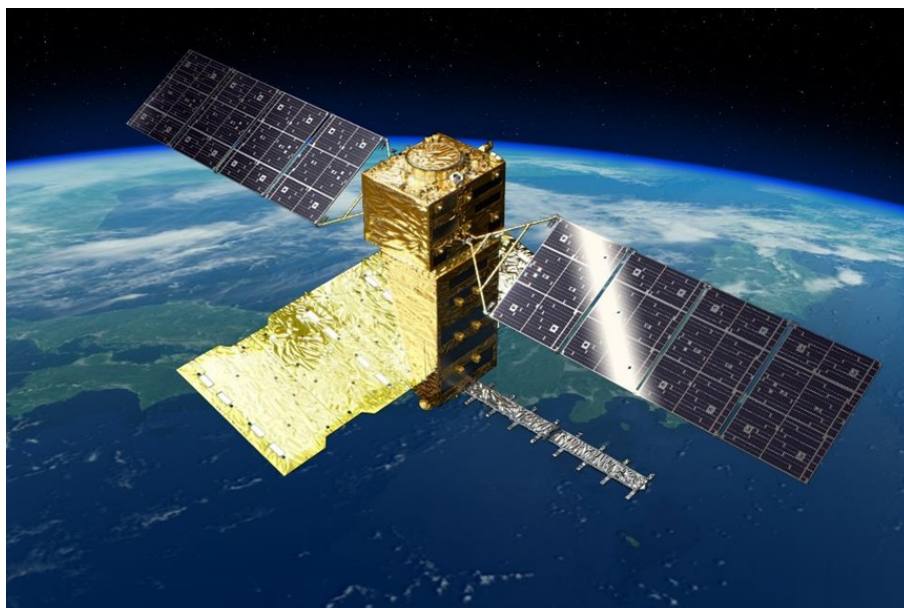
## 11.2.2 SAOCOM

SAOCOM er et argentinsk system bestående av to SAR-satellitter. Den første er kalt SAOCOM-1A, og ble skutt opp i 2018. SAOCOM-1B skal etter planen komme opp mot slutten av 2019. ESA har hatt planer om å bygge en passiv mottakersatellitt som skulle skytes opp sammen med SAOCOM-1B, men denne skal nå være kansellert [64, 65]. SAOCOM opererer i L-bånd (rundt 1,275 GHz) og tar i bruk en båndbredde på inntil 50 MHz. Satellittene er store, med en vekt på ca. 3 tonn og en SAR-antenne med areal på 35 m<sup>2</sup> [66]. Målene er vist i Figur 11.7.

Satellittene skal gå i en solsynkron polar bane. Hver satellitt har en repetisjonssyklus på 16 dager, og konstellasjonen vil ha en 8 dagers syklus. Viktige bruksområder er kartlegging av jordfuktighet, interferometrisk avbildning for generering av DEM og landsenkingskart, samt hydrologi og havovervåkning.

En høyoppløselig modus er for tiden ikke kjent, og høyeste oppløsning i stripmap-modus er oppgitt å være < 10 m. Den største sporbredde skal være minst 350 km og benyttes i modusen TOPSAR Wide som har en oppløsning på < 50 m. Både enkel-, dual-, fullpolarimetri og kompakt polarimetri vil være tilgjengelig fra SAOCOM, men fullpolarimetri gir imidlertid mindre sporbredde.

Argentina og Italia samarbeider om en integrasjon av SAOCOM og COSMO-SkyMed til et system kalt «the Italian-Argentine Satellite System for Emergency Management» (SIASGE) [67]. SAOCOM-satellittene har samme banehøyde, inklinasjon og repetisjonssyklus som COSMO-SkyMed, og det vil bli gjort koordinerte datainnsamlinger med de to systemene. Tilgang på både L- og X-bånd-data fra samme område vil ha stor nytteverdi innen naturforvaltning, jordbruk, håndtering av naturkatastrofer og lignende. Penetrasjonsdybden i vegetasjon, jordsmonn og is er mye større i L-bånd enn i X-bånd, og man kan dermed få mer informasjon om blant annet skog og isbreer. I forbindelse med endringsdeteksjon har L- og X-bånd komplementære egenskaper. Dekorrelasjonen er langsommere i L-bånd, så dette båndet gir større robusthet, mens X-bånd gir større nøyaktighet i de tilfellene det kan benyttes.



Figur 11.8 Illustrasjon av ALOS-4 (Kilde: JAXA).

Partnerne i SIASGE-systemet skal ha en målsetning om å gjøre data fra systemet kommersielt tilgjengelige, men foreløpig finnes det lite konkret informasjon om dette.

### 11.2.3 ALOS-4

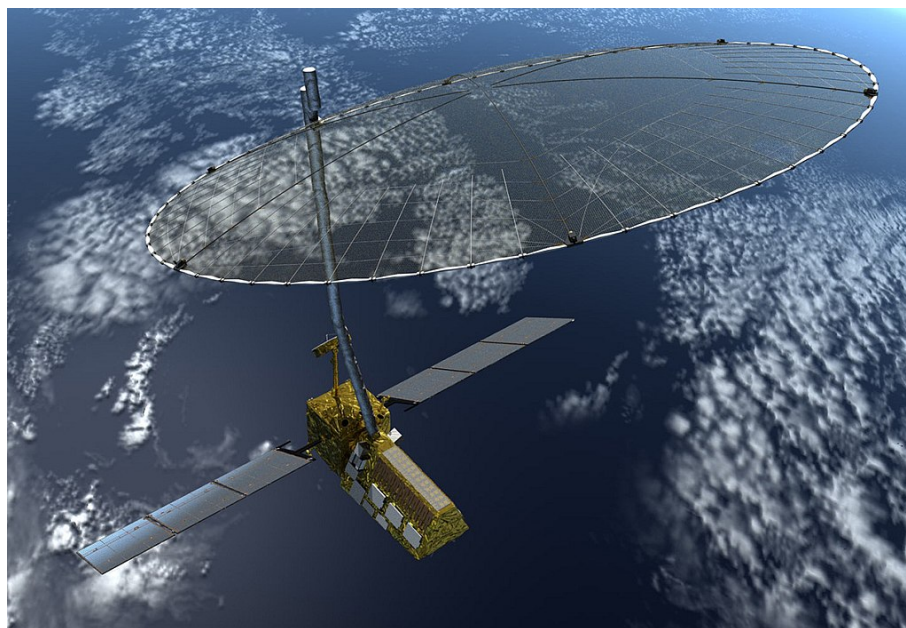
Det japanske romsenteret JAXA har operert L-bånd SAR-satellitter siden 1992 (med noen opphold), og vil videreføre denne kapasiteten etter at den nåværende satellitten ALOS-2 når slutten av sin levetid. En ny satellitt kalt ALOS-4 er under utvikling, og skal være klar til oppskyting rundt 2020. Satellitten skal gå i samme bane som ALOS-2, og det forventes en lang periode der begge satellittene er operative.

ALOS-4 blir en stor satellitt, med vekt på ca. 3 tonn og en SAR-antenne på  $10\text{ m} \times 3,6\text{ m}$ . I tillegg til SAR vil satellitten være utstyrt med AIS-mottaker. Figur 11.8 viser en illustrasjon av satellitten.

ALOS-4 vil oppnå et bedre forhold mellom arealdekning og oppløsning enn dagens satellitter, ved bruk av DBF i range og to mottakerstråler i asimut. En rekke moduser vil være tilgjengelige, inkludert spotlight-modus med ca.  $1\text{ m} \times 3\text{ m}$  oppløsning i en scene på  $35\text{ km} \times 35\text{ km}$ , stripmap med  $3\text{ m}$  oppløsning i en sporbredde på inntil  $200\text{ km}$  og ScanSAR med  $25\text{ m}$  oppløsning i en sporbredde på hele  $700\text{ km}$  [68, 69]. Quad-pol vil være tilgjengelig i stripmap-modus, men med redusert sporbredde.

Det er uklart i hvilken grad data fra ALOS-4 vil bli tilgjengelige for internasjonale kunder, men det skal være mulig å få kjøpt ALOS-2-data, så man kan trolig forvente det samme for den nye satellitten.





Figur 11.9 Illustrasjon av NISAR (Kilde: NASA JPL).

#### 11.2.4 NISAR

NISAR er et samarbeidsprogram mellom NASA og det indiske romsenteret ISRO, der det skal bygges en SAR-satellitt med to frekvensbånd: L-bånd og S-bånd. Satellitten skal være klar til oppskyting sent i 2021.

Satellitten blir ca. 2800 kg, og radarantennen vil være en utbrettbar parabol med en diameter på 12 m, som vist i Figur 11.9. Satellitten skal gå i en bane med repetisjonssyklus på 12 dager. Den vil levere enkel-, dual-, fullpolarimetri og kompakt-polarimetrisk data, og maksimal båndbredde vil være 80 MHz. Beste oppløsning er oppgitt til 7 m i asimut og 3 m i slant range, og dette betyr rundt 4,1–5,5 m i ground range. Sporbredde skal være minst 240 km, og det vil bli benyttet en innovativ SAR-teknikk kalt *SweepSAR* for å oppnå høy oppløsning og stor sporbredde samtidig [70].

Systemet har et vitenskapelig formål der man blant annet ønsker å studere is, biomasse og deformasjoner i jordoverflaten. Dataene skal være gratis og fritt tilgjengelige.

### 11.3 Kommersielle konstellasjoner under utvikling

Det foregår for tiden et kappløp mellom en rekke firmaer om å utvikle konstellasjoner av SAR-satellitter. Det er stor variasjon i konseptene, fra små mikrosatellitter til store og svært avanserte satellitter. Det finske firmaet Iceye var først med å få opp en SAR-mikrosatellitt. Fra et norsk synspunkt er MicroSAR-prosjektet til Space Norway det viktigste, men flere av de andre konseptene er også interessante. Følgende prosjekter er for tiden kjent:

- MicroSAR er et utviklingsprosjekt ledet av Space Norway. En test- og demo-satellitt skal etter planen skytes opp i 2019. Satellitten vil være i underkant av 100 kg, og vil ha en C-bånd

---

---

SAR i tillegg til AIS-mottaker. Ifølge åpne kilder skal satellitten kunne gjøre avbildning med ca. 4 m oppløsning i minst 200 km sporbredde [71]. Det primære bruksområdet er maritim overvåkning. En konstellasjon av ca. 10 satellitter er planlagt.

- Iceye (Finland) sendte opp sin første testsatellitt på 70 kg i januar 2018. Satellitten leverte bilder i begynnelsen, men sluttet å virke etter noen måneder. Den andre testsatellitten, som har flere forbedringer og er noe større, ble sendt opp i desember 2018, mens den tredje forventes i 2019. Deretter planlegges en konstellasjon av 18 satellitter [72, 73]. Satellittene opererer i X-bånd, og beste oppløsning for de planlagte satellittene skal være 1 m.
- Capella Space (USA) sendte opp sin første testsatellitt i desember 2018. Dette var ikke en komplett SAR-satellitt, men inneholdt deler av systemet som skulle testes i bane. Den neste testsatellitten skal etter planen levere SAR-data. Satellittene er svært lette, og har en vekt på under 40 kg. De skal ha store, utbrettbare reflektor/reflectarray-antenner med størrelse på  $2\text{ m} \times 4\text{ m}$ . Det planlegges en konstellasjon av 36 satellitter i 12 baneplasser. Dette skal kunne gi bildemuligheter med under en times intervall et vilkårlig sted i verden og kortere tidsintervall nær polene. For interferometriske anvendelser med samme opptaksgeometri forventes det intervaller på 10 timer. SAR-systemet opererer i X-bånd med en båndbredde på 500 MHz. Ut fra båndbredden kan det forventes en ground-range-oppløsning på rundt 50 cm. Det antydes en maksimal asimut-oppløsning på 30 cm eller bedre i detekterte bildeprodukter, mens single-look-complex (SLC)-data maksimalt vil ha 50 cm oppløsning på grunn av amerikanske restriksjoner [74]. Et stort nettverk av bakkestasjoner er tenkt brukt, og dette fører til rask tilgang til data for brukerne. Selskapet tenker seg abonnementsløsninger for tilgang til bilder, og her vil det være flere prisklasser.
- Umbra Lab (USA) har planer om en konstellasjon av 12 mikrosatellitter som skal operere i X-bånd og ha en oppløsning på inntil  $25\text{ cm} \times 10\text{ cm}$  (range  $\times$  asimut) innenfor en scene på  $4\text{ km} \times 4\text{ km}$ . Selskapet har bygget en radar som utnytter 1,2 GHz båndbredde [75], men for øvrig er få detaljer kjent.
- XpressSAR (USA) skal etter planen sende opp sin første satellitt i 2022. Det planlegges fire satellitter for hyppig dekning i området mellom  $45^\circ\text{S}$  og  $45^\circ\text{N}$  [76]. Den siste informasjonen tyder på at selskapet skal kjøpe TecSAR-satellitter fra Israel [77]. Disse satellittene veier noe under 300 kg og har utbrettbare parabolantenner. De opererer i X-bånd, har spotlight-modus med bedre enn 1 m oppløsning og flere andre moduser med større sporbredde. Dette systemet ser dermed ut til å bli basert på kjent teknologi. Israel har allerede to TecSAR-satellitter (skutt opp i 2008 og 2014), og Indias RISAT-2 er en variant av den samme satellitten.
- Trident Space (USA) og deres partner Trident Pacific (Taiwan) har ambisiøse planer om en stor konstellasjon av SAR-satellitter [78–80]. Den siste informasjonen tyder på at de planlegger å få opp sin første satellitt rundt 2021 og at de har som mål å bygge opp en konstellasjon av 48 satellitter. Satellittene skal veie rundt 300 kg, ha utbrettbare parabolantenner og operere i X-bånd. Det antydes en maksimal oppløsning på 30 cm. På grunn av den store konstellasjonen skal det være mulig å gi bildemuligheter med 10 minutters intervall de fleste steder i verden.
- UrtheCast (Canada) planlegger en svært ambisiøs konstellasjon kalt OptiSAR [81]. Denne skal inneholde 8 par av satellitter, der hvert par skal bestå av én SAR-satellitt og én optisk

---

---

satellitt. SAR-satellitten skal være stor med en vekt på rundt 1800 kg, og skal ha en svært avansert radar som opererer i både X- og L-bånd. Radaren skal ha en fasestyrt array-antenne på  $6\text{ m} \times 1,8\text{ m}$  som skal benyttes i begge frekvensbånd. Den skal ha multiple aperturer, DBF og Multi-Input-Multi-Output (MIMO)-kapasitet, og det skal være mulig å gjøre samtidig avbildning i begge frekvensbåndene. En mengde SAR-moduser er planlagt. I X-bånd er høyeste oppløsning ca. 1 m, mens maksimal sporbredde på 140 km oppnås i en ScanSAR-modus med 30 m oppløsning i L-bånd. Det er planlagt rask SAR-prosessering og skipsdeteksjon om bord i satellitten, og deteksjonene skal benyttes til å taske den optiske satellitten (som flyr noen minutter bak i samme bane) til å gjøre høyoppløselig avbildning av målene. UrtheCast har kontrakt på bygging av minst én SAR-satellitt for en ukjent kunde før OptiSAR-satellittene skal bygges. Den første OptiSAR-satellitten skal etter planen sendes opp i 2023.

- I Japan er en X-bånd SAR-satellitt på ca. 135 kg under utvikling i et samarbeid mellom JAXA og flere japanske universiteter [82, 83]. Satellitten skal etter planen skytes opp mot slutten av 2019. Det har vært publisert mye fra dette utviklingsprosjektet de senere årene, så mange detaljer er kjente. Satellitten skal ha en passiv array-antenne på  $4,9\text{ m} \times 0,7\text{ m}$ . Maksimal oppløsning i spotlight-modus vil være 1 m. En mulig konstellasjon basert på denne teknologien promoterer av et firma som kalles Synspective.
- Chiba University i Japan utvikler SAR-teknologi med støtte fra blant annet indonesiske partnere [84–86]. Det planlegges satellitter på rundt 150 kg med utbrettbare parabolantener. Sensorene benytter sirkulær polarisasjon, og både L-, C- og X-bånd skal være aktuelle frekvensbånd. Det japanske firmaet iQPS promoterer en mulig konstellasjon av 36 satellitter som ser ut til å være basert på den aktuelle teknologien [87].
- Space Advisory Company (Sør-Afrika) promoterer SAR-satellitter basert på PanelSAR-radaren til nederlandske SSBV [88], og den skal opereres i X-bånd. Det mest spesielle med denne radaren er at den ikke benytter tradisjonelle radarpulser, men derimot *Frequency Modulated Continuous Wave* (FMCV)-bølgeformer. Dette medfører en mindre nødvendig spisseffekt. I en av de foreslåtte konfigurasjonene tenker man seg satellitter på under 550 kg med SAR-antenne på  $3\text{ m} \times 1\text{ m}$ . I spotlight-modus er beste oppløsning 1 m innenfor en scene på 4 km. I maritim modus med oppløsning på 30 m er sporbredden 200 km. Satellittene vil i tillegg til radaren være utstyrt med AIS-mottaker. Det reklameres med muligheten for en konstellasjon av slike satellitter, men det er ukjent om det finnes konkrete planer om realisering.

## 11.4 Diskusjon om utviklingstrekk

Det er verdt å merke seg noen trekk ved utviklingen de nærmeste årene. Først og fremst blir det flere SAR-satellitter. Det blir også en større variasjon i størrelser og typer av SAR-satellitter. De tradisjonelle aktørene satser fremdeles på stadig mer avanserte systemer der satellittene veier over ett tonn. Disse systemene vil ha mange fremskritt i tiden fremover:

- SAR og AIS på samme satellitt ser ut til å være standard på nye store SAR-satellitter.
- Flere polarisasjoner blir tilgjengelig også i høyoppløselige moduser.

- 
- 
- De mest høyoppløselige modusene får enda bedre oppløsning. Oppløsningen begrenses av den største tillatte båndbredden i de ulike frekvensbåndene. Den største båndbredden forekommer i X-bånd med 1,2 GHz, noe som kan gi bedre enn 25 cm × 25 cm oppløsning.
  - Forholdet mellom arealdekning og oppløsning blir bedre.
  - Satellitter som opererer i par eller klynger kan gi mulighet for bistatisk avbildning, GMTI, 3D-avbildning ved hjelp av single-pass interferometri og tomografisk avbildning som blant annet gir informasjon om tettheten til vegetasjon.
  - Det vil være data tilgjengelig i flere frekvensbånd.
  - Satellittoperatørenes samarbeid om å danne større konstellasjoner vil gi mulighet for hyppigere oppdateringer og mer informasjon om et målområde.

Når det gjelder de planlagte konstellasjonene fra nye aktører i markedet, er situasjonen mer uoversiktlig. Det synes åpenbart at det kommersielle markedet ikke vil være tilstrekkelig stort til at alle konstellasjonene blir realisert full ut. Noen aktører vil ha et konkurransedyktig konsept, noen vil kunne få statsstøtte av mer politiske årsaker, mens andre kan bli oppkjøpt eller utkonkurrert.

SAR-data er nyttige for mange formål, og de forskjellige bruksområdene stiller ulike krav til kvalitet på dataene. I forbindelse med militære landanvendelser er blant annet oppløsning, støynivå, avbildningshyppighet og mulighet for koherent endringsdeteksjon av betydning. De planlagte amerikanske konstellasjonene ser alle ut til å ha høyoppløselig avbildning med hyppig oppdatering som et viktig formål. Størrelsen til satellittene er imidlertid svært forskjellig, og det må da forventes store forskjeller i kvalitet på dataene. Det blir blant annet interessant å se om de minste satellittene har tilstrekkelig signal-støy-forhold for små landmål, og tilstrekkelig stabil satellittbane over tid til at koherent endringsdeteksjon blir vellykket.

## 12 Praktiske aspekter

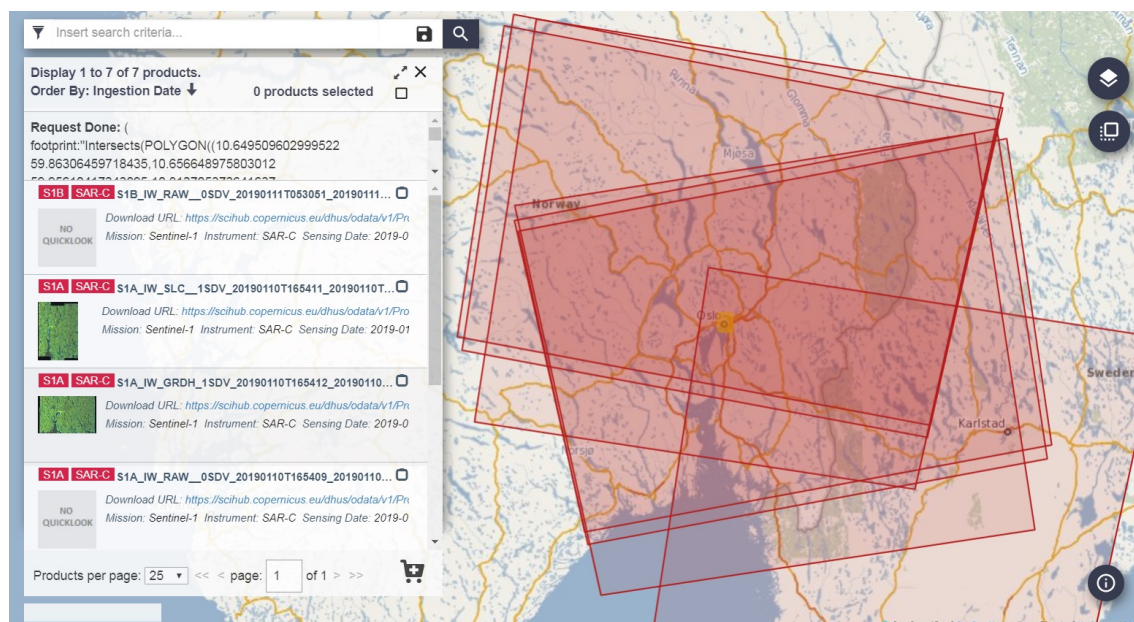
### 12.1 Åpent tilgjengelige satellittdata

Enkelte satellitter tilbyr gratis tilgang til data, og motivasjonen for dette er først og fremst å gjøre SAR-bilder tilgjengelige for forskningsformål.

Blant dagens satellitter er det særlig Sentinel-1A og -1B som tilbyr gratis data. Ved hjelp av en internettportal fra ESA tilgjengelig på <https://scihub.copernicus.eu/>, er det mulig å søke etter bilder over bestemte områder. Det er først nødvendig å opprette en gratis brukerprofil. Deretter kan man definere et geografisk område, og spesifisere datoer, ønskede satellitter og type data. En ulempe med denne portalen er imidlertid at det er en tidsforsinkelse på noen timer før scenene er tilgjengelige (minst tre timer). Det kan derfor være vanskelig å benytte bildene til operativt bruk.

Et søk fra ESAs portal over Oslo 10.-11. januar 2019 er vist i Figur 12.1. Disse dagene var det sju scener tilgjengelige over Oslo, og disse er vist med røde firkanter til høyre i figuren. Til venstre kan man se at det er scener fra både Sentinel-1A og -1B i listen. Scenene kan fås enten som rene amplitudebilder (GRDH) eller komplekse data (SLC). For mange av bildene tilbys det også nedskalerte versjoner kalt *quicklook*.

Sentinel-data kan også finnes fra den norske portalen [www.satellittdata.no](http://www.satellittdata.no). Bildene på denne siden er levert direkte fra KSAT, og er ofte raskere tilgjengelige enn på SciHub-portalen. Det er også her mulig å velge et geografisk område i søket. I tillegg kan man se planlagte Sentinel-opptak for de neste dagene.



Figur 12.1 Søkeresultat fra ESAs dataportal, som viser tilgjengelige scener fra Sentinel-1 over Oslo 10.-11. januar 2019.

---

---

Noe data fra andre satellitter er tilgjengelige fra ESA på siden <https://tpm-ds.eo.esa.int/oads/access/collection>, ved å opprette en brukerprofil. Dette er for det meste eldre satellitter, samt COSMO-SkyMed-bilder som er noen få år gamle. Dataene vil derfor ikke kunne brukes operativt, men kan være nyttige til forskningsformål.

## 12.2 Aktuelle programmer

Den følgende listen beskriver noen aktuelle programvaresystemer som leser, prosesserer, analyserer og produserer produkter fra SAR-data:

- **SOCET GXP** fra BAE Systems. GXP (Geospatial eXplotation Products) er et programvaresystem for bildeanalyse med spesielt fokus på satellittfjernmåling, og som håndterer data fra de fleste tilgjengelige fjernmålingssatellitter. Systemet har et velutviklet funksjonsapparat for SAR-analyse. SOCET GXP Developer's Toolkit gjør det mulig å integrere egenutviklet programvare i systemet.
- **RemoteView** fra Textron Systems. RemoteView og RemoteView Pro er programvaresystemer for bildeanalyse med et utvalg verktøykasser (toolsets) rettet inn mot forskjellige bildeanalyser, som for eksempel RVSAR for analyse av kommersielle SAR data.
- **ERDAS IMAGINE** fra Hexagon Geospatial. ERDAS IMAGINE (Earth Resource Development Assessment System) er et programvaresystem for bildeanalyse med spesielt fokus på satellittfjernmåling, og som håndterer data fra de fleste tilgjengelige fjernmålingssatellitter. Programmet har muligheter for kalibrering, geokoding, koregistrering, endringsdeteksjon og interferometri. IMAGINE er tilgjengelig i tre produktnivåer: 'Essentials', 'Advantage' og 'Professional'. Advantage og Professional har funksjonalitet for SAR-analyse gjennom en egen Radar Toolbox. Tilleggsmodulen IMAGINE Developers' Toolkit gjør det mulig å integrere egenutviklet programvare i systemet.
- **Sentinel Application Platform (SNAP)** er et programvaresystem utviklet for ESA bestående av et utvalg verktøykasser (toolboxes) rettet inn mot de forskjellige satellittsystemene i Sentinel-programmet. Sentinel-1 toolbox (S1TBX) dekker SAR og har funksjonalitet for analyse av data fra ESAs SAR-satellittsystemer Sentinel-1, ERS-1/2 og ENVISAT ASAR. S1TBX håndterer også tredjeparts SAR-data fra ALOS-1/2, TerraSAR-X, TanDEM-X, COSMO-SkyMed og RADARSAT-2. I tillegg finnes det en egen *Developer Guide* som viser hvordan egenutviklet programvare kan integreres i SNAP.
- **ENVI** fra Harris Corporation. ENVI er et generelt programvaresystem for bildeanalyse. Med tilleggsmodulen ENVI SARscape vil systemet ha funksjonalitet for å lese, prosessere og analysere SAR-data fra de fleste eksisterende satellittsystemer og noen utvalgte flysystemer. Denne modulen tilbyr mye av den samme funksjonaliteten som ERDAS IMAGINE, i tillegg til funksjonalitet for polarimetri. ENVI tilbyr også en egen API for integrering av egenutviklet programvare.
- **GAMMA** fra Gamma Remote Sensing er et programvaresystem som består av fire moduler. Disse inneholder mange ulike funksjoner med både SAR-prosessering, interferometri, polarimetri, geokoding, koregistrering med mer. Programmene skal ha støtte for alle de relevante satellittene i dag.

SNAP er gratis og kan lastes ned fra ESAs nettsider. De øvrige systemene er kommersielle.

---

---

### 12.2.1 Programvare benyttet i denne rapporten

ERDAS IMAGINE er brukt til å vise en del av gråtonebildene i rapporten<sup>3</sup>. Programmet kan importere bilder fra forskjellige satellitter, og gir et bra visuelt inntrykk. Noen av bildene ble preprosessert i egenutviklet programvare skrevet i språket Fortran og lagret i binær form. Disse ble importert med funksjonen 'Generic Binary', mens andre bilder ble importert direkte fra TIFF-format.

En del arbeid i polarimetri og interferometri ble utført ved hjelp av egenprodusert programvare i IDL (Interactive Data Language), og programmet ble også brukt til å vise fargebilder og gråtonebilder<sup>4</sup>. IDL kan forholdsvis enkelt brukes til å behandle bilder, ved å skrive 'iimage' i programmets konsoll og bruke 'File' til import av binære bilder. Det finnes også mange predefinerte fargeskalaer som kan velges med 'Edit Palette'. Liknende funksjonalitet kan også finnes i programmet MATLAB og programmeringsspråket Python med tilleggsbiblioteker.

En del prosessering og beregning ble utført med programmeringsspråket Fortran, og dette ble utført ved hjelp av utviklingsverktøyet Intel Parallel Studio XE med tillegget QuickWin. Dette arbeidet gikk blant annet ut på å vise fargene i de polarimetriske dekomposisjonene i Figur 5.6 og 5.10. QuickWin ble også benyttet til å programmere museklikk og lese pikselposisjoner ved beregninger med stereo-SAR, som for eksempel i Figur 6.7.

## 12.3 Kurs

For å bli kjent med bruken av SAR-bilder kan det være nyttig å delta på kurs. Det finnes flere grunnleggende SAR-kurs, samt fjernmålingskurs på NTNU og UiO (institutt for teknologisystemer). Carl-Cranz-Gesellschaft eV (CCG) i Tyskland holder hver høst et en-ukers intensivt SAR-kurs, og mye av fokuset er på landanvendelser. Kurset er å anbefale. FFI har også holdt kurs flere ganger der flere av forfatterne av denne rapporten har vært instruktører. Dette har blant annet vært kurs på Forsvarets Operative Hovedkvarter (FOH) og kurs for satellittoperatorene hos KSAT. Hvis det er ønskelig med et kortvarig kurs kan man gjerne ta kontakt med FFI.

---

<sup>3</sup>Bildene fra ERDAS IMAGINE er for eksempel Figur 5.3, 5.4, 5.9, 5.11, 6.6 (uten tekst), 6.16 og 6.20.

<sup>4</sup>Bilder generert med IDL er blant annet Figur 5.7, 5.8, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.14, 6.18, 6.19, 6.21, 6.22, 6.23 (uten tekst), 8.4, 8.5, 8.6 og 8.7.

---

---

## 13 Konklusjon og anbefalinger

SAR har i mange år vært benyttet i Norge for maritim overvåkning. Det har imidlertid vært begrenset bruk av SAR-bilder over landområder hos Forsvaret, og denne rapporten søker derfor å gå i dybden på hvilke muligheter som finnes innen dette fagfeltet.

I tillegg til en innføring i SAR og en presentasjon av nåværende og fremtidige satellitter, fokuserte mye av rapporten på polarimetri, interferometri og ulike typer endringsdeteksjon. Polarimetri er nyttig for å skille ulike spredningstyper, og kan for eksempel brukes til å se forskjell på menneskeskapt objekter, vegetasjon og annet. Interferometri kan brukes til mange typer høydeberegninger og forandring i høyde ned til millimeternivå. Endringsdeteksjon kan utføres enten med eller uten radarens fase, og man kan se forflytning av skip og kjøretøy, bruk av veier med mer. Enda flere anvendelser ble presentert i rapporten som for eksempel CovAmCoh-metoden og Ground Moving Target Indication (GMTI).

Ettersom kvaliteten på SAR-data blir bedre og bedre på mange områder, er det derfor tydelig at flere av disse metodene også har militære anvendelser. Forfatterne ønsker derfor å anbefale en utvidet bruk av landanvendelser.

Noen av anvendelsene kan kreve hyppig tilgang til data, som for eksempel koherent endringsdeteksjon. For noen av metodene har det derfor vært en utfordring med operativ bruk, men dette bedrer seg fremover med et økende antall SAR-satellitter i bane. I nær fremtid skal det være mulig med daglig interferometrisk bruk av SAR ved bruk av store satellittkonstellasjoner. Dette er en stor forbedring i forhold til å bruke en enkelt satellitt som kan trenge flere uker på å komme tilbake til samme opptaksgeometri.



---

---

## Referanser

- [1] S. Anfinssen. «Statistical Analysis of Multilook Polarimetric Radar Images with the Mellin Transform». Ph.d.-avh. University of Tromsø, 2010.
- [2] D. J. Weydahl. *Vurdering av framkommelighet på Finnmarksvidda ved hjelp av satellitt SAR-bilder*. FFI-rapport 2011/01285, 2011.
- [3] J. B. Hamar, A. B. Salberg og F. Ardelean. «Automatic detection and mapping of avalanches in SAR images». I: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China*. 2016.
- [4] S. Puliti, S. Solberg, E. Næsset, T. Gobakken, E. Zahabu, E. Mauya og R. E. Malimbwi. «Modelling above Ground Biomass in Tanzanian Miombo Woodlands Using TanDEM-X WorldDEM abd Field Data». I: *Remote Sensing* 9.10 (2017), s. 984.
- [5] D. J. Weydahl. *Satellitt SAR-bilder over Rena i 2010*. FFI-rapport 2011/01286, 2011.
- [6] *RADARSAT-2 product description. Issue 1/14: September 10, 2018. RN-SP-52-1238*.
- [7] Airbus Defence og Space. *TerraSAR-X / PAZ Constellation*. [https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r390\\_9\\_int\\_045\\_tsxpaz\\_en\\_low\\_pdf](https://www.intelligence-airbusds.com/files/pmedia/public/r390_9_int_045_tsxpaz_en_low_pdf). 2014. (Lest 12.03.2019).
- [8] K. Bach, H. Kahabka, F. Cerezo og J. I. C. Pérez. «The TerraSAR-X / PAZ Constellation: Operational Preparation». I: *Proc. ASTRO 2018*. 2018.
- [9] Y. Kankaku, Y. Osawa, S. Suzuki og T. Watanabe. «The Overview of the L-band SAR Onboard ALOS-2». I: *Proceedings of PIERS (Progress in Electromagnetics Research Symposium)*. 2009.
- [10] *ALOS-2 End User Licence Agreement*. [http://en.alos-pasco.com/offer/ALOS-2\\_EULA\\_English\\_20150722.pdf](http://en.alos-pasco.com/offer/ALOS-2_EULA_English_20150722.pdf). (Lest 12.03.2019).
- [11] Y. Kobayashi og T. Ogawa. «Multiple Applications of NEXTAR Platform to Earth Observation Represented by ASNARO Satellite Series». I: *Proc. 4S (Small Satellites Systems and Services) Symposium*. 2014.
- [12] *Japan EO Satellite Service, ltd (JEOSS) announces the Start of Commercial Operation*. <http://jeoss.co.jp/press/japan-eo-satellite-service-ltd-jeoss-announces-the-start-of-commercial-operation/>. 2018. (Lest 12.03.2019).
- [13] J. S. Lee og E. Pottier. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*. CRC Press, 2009.
- [14] E. Pottier, J. S. Lee og L. Ferro-Famil. *PolSARpro v3.0 - Lecture Notes, Advanced Concepts*. Tilgjengelig på [https://earth.eas.int/documents/653194/656796/LN\\_Advanced\\_Concepts.pdf](https://earth.eas.int/documents/653194/656796/LN_Advanced_Concepts.pdf).
- [15] T. N. A Hannevik, K. Eldhuset og R. B. Olsen. *Improving ship detection by using polarimetric decompositions*. FFI-rapport 2015/01554, 2015.

- 
- 
- [16] S. E. Sakshaug. «Evaluation of Polarimetric SAR Decomposition methods for tropical forest analysis». Masteroppg. University of Tromsø, Norway, 2012.
- [17] S. R. Cloude og E. Pottier. «A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 34.2 (1996), s. 498.
- [18] V. Alberga, E. Krogager, M. Chandra og G. Wanielik. «Potential of coherent decompositions in SAR polarimetry and interferometry». I: *2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Anchorage, USA*. 2004, s. 1792–1795.
- [19] Y. Yamaguchi, T. Moriyama, M. Ishido og H. Yamada. «Four-Component Scattering Model for Polarimetric SAR Image Decomposition». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43.8 (2005), s. 1699–1706.
- [20] Y. Yamaguchi, A. Sato, W. M. Boerner, R. Sato og H. Yamada. «Four-Component Scattering Power Decomposition With Rotation of Coherency Matrix». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49.6 (2011), s. 2251–2258.
- [21] M. E. Nord, T. L. Ainsworth, J-S. Lee og N. J. S. Stacy. «Comparison of Compact Polarimetric Synthetic Aperture Radar Modes». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47.11 (2009), s. 174.
- [22] M. Ramberg. *Interferometrisk nedsynkningsanalyse og superoppløsning av SAR satellittbilder*. 2007. URL: <https://www.ffi.no/no/Rapporter/07-01639.pdf>.
- [23] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek og K. P. Papathanassiou. «A Tutorial on Synthetic Aperture Radar». I: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 1.1 (2013), s. 6–43.
- [24] G. Franceschetti og R. Lanari. *Synthetic Aperture Radar Processing*. CRC press, 1999.
- [25] K. Eldhuset. «Combination of stereoSAR and InSAR for DEM generation using TanDEM-X spotlight data». I: *International Journal of Remote Sensing* 38.15 (2017), s. 4362. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2017.1320452>.
- [26] K. Eldhuset og D. J. Weydahl. «Using stereo SAR and InSAR by combining the COSMO-SkyMed and the TanDEM-X mission satellites for estimation of absolute height». I: *International Journal of Remote Sensing* 34.23 (2013), s. 8463. URL: <https://publications.ffi.no/handle/20.500.12242/457>.
- [27] K. Eldhuset og D. J. Weydahl. «Geolocation and Stereo Height Estimation Using TerraSAR-X Spotlight Image Data». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 49.10 (2011), s. 3574. URL: <https://publications.ffi.no/handle/20.500.12242/792>.
- [28] D. J. Weydahl og K. Eldhuset. *Høyoppløsnings SAR satellittbilder tatt over fjellpartiet ved Bjerkvik i Nord-Norge*. FFI-rapport 2010/01092, 2010. URL: <https://publications.ffi.no/handle/20.500.12242/2376>.
- [29] D. J. Weydahl. *Validation of SRTM elevation data in Norway*. FFI-rapport 2005/02600, 2005. URL: <https://publications.ffi.no/handle/20.500.12242/1824>.

- 
- 
- [30] J. D. Ballester-Berman, J. M. Lopez-Sanchez og J. Fortuny-Guasch. «Retrieval of biophysical parameters of agricultural crops using polarimetric SAR interferometry». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43.4 (2005), s. 683–694.
- [31] H. Cai, P. He, B. Zou og M. Lin. «Building parameters extraction from PolInSAR image using hybrid method». I: *Proc. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2011.
- [32] T. Schellenberger, T. Dunse, A. Kaab, J. Kohler og C. H. Reimer. «Surface speed and frontal ablation of Kronebreen and Kongsvegen, NW Svalbard, from SAR offset tracking». I: *The Cryosphere* 9 (2015), s. 2339. URL: <https://www.the-cryosphere.net/9/2339/2015/tc-9-2339-2015.pdf>.
- [33] K. Eldhuset, P. H. Andersen, S. Hauge, E. Isaksson og D. J. Weydahl. «ERS tandem InSAR processing for DEM generation, glacier motion estimation and coherence analysis on Svalbard». I: *International Journal of Remote Sensing* 24.7 (2003), s. 1415. URL: <https://publications.ffi.no/handle/20.500.12242/804>.
- [34] B. Wangensteen, D. J. Weydahl og J. O. Hagen. «Mapping glacier velocities on Svalbard using ERS tandem DinSAR data». I: *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography* 59 (2005), s. 276. URL: <https://folk.uio.no/bjoernw/NGT05.pdf>.
- [35] K. Eldhuset, F. Aanvik, K. Aksnes, J. Amlien, P. H. Andersen, S. Hauge, E. Isaksson, T. Wahl og D. J. Weydahl. «First Results from InSAR Processing on Svalbard». I: *ESA SP-406: Proc. Fringe'96*. 1996. URL: [http://earth.esa.int/workshops/fringe\\_1996/eldhuset/](http://earth.esa.int/workshops/fringe_1996/eldhuset/).
- [36] K. Eldhuset. «High-Resolution Spaceborne SAR Processing Using the Decomposed Transfer Function». I: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* 53.5 (2017). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7887754>.
- [37] KSAT GMS. *KSAT Ground Monitoring Services*. <http://gms.ksat.no/> og <https://insar.ngu.no/>. (Lest 19.03.2019).
- [38] T. Kempf og H. Anglberger. «Image Fusion of Different Spaceborne SAR Sensors for Change Detection». I: *IEEE National Radar Conference - Proceedings*. 2013.
- [39] D. J. Weydahl. *The Potential of Commercial Satellite SAR Images for IED Prediction*. NATO MP-SET-175-12, 2011.
- [40] K. Schulz, D. Brunner og M. Boldt. «Comparison of CovAmCoh and ILU image products for interferometric very high resolution SAR image pairs». I: *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2011.
- [41] M. Boldt, A. Thiele og K. Schulz. «Generalized Interpretation Scheme for Arbitrary HR InSAR Image Pairs». I: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2013.
- [42] S. Bertl, P. López-Dekker, M. Younis og G. Krieger. «Along-track SAR interferometry using a single reflector antenna». I: *IET Radar, Sonar & Navigation* 9.8 (2015), s. 942–947.
- [43] R. Lipps, V. Chen og M. Bottoms. «Advanced SAR GMTI techniques». I: *Proceedings of the IEEE Radar Conference*. 2004.

- 
- [44] M. Newey, G. R. Benitz, D. J. Barrett og S. Mishra. «Detection and Imaging of Moving Targets With LiMIT SAR Data». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 56.6 (2018), s. 3499–3510.
- [45] A. Budillon, V. Pascazio og G. Schirinzi. «Multichannel Along-Track Interferometric SAR Systems: Moving Targets Detection and Velocity Estimation». I: 2008 (2008).
- [46] S. V. Baumgartner og G. Krieger. «Large along-track baseline SAR-GMTI: First results with the TerraSAR-X/TanDEM-X satellite constellation». I: *2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Vancouver, BC, Canada*. 2011.
- [47] D. Cerutti-Maori og I. Sikaneta. «A Generalization of DCPA Processing for Multichannel SAR/GMTI Radars». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 51.1 (2013), s. 560–572.
- [48] D. Cerutti-Maori, I. Sikaneta og C. H. Gierull. «Optimum SAR/GMTI Processing and Its Application to the Radar Satellite RADARSAT-2 for Traffic Monitoring». I: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 50.10 (2012), s. 3868–3881.
- [49] M. Doyon, J. Smyth, G. Grounink, C. Carrie, M. Sauvagneau, J. F. Lévesque, F. Babiker, V. Abbasi, C. Ciguère, J. Bergeron og S. Côté. «RADARSAT Constellation Mission: Toward launch and operations». I: *2018 SpaceOps Conference*. 2018.
- [50] *eoPortal fra ESA*. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions>. (Lest 22.02.2019).
- [51] E. Z. Faustini og M. Piemontese. «La missione COSMO-SkyMed: stato dell'arte, Applicazioni e Prospettive future». I: *1 Workshop nazionale*. 2017.
- [52] e-geos. *COSMO-SkyMed Data*. [http://www.telespazio.com/documents/9986169/81090103/body\\_COSMO\\_SkyMed\\_Data.pdf](http://www.telespazio.com/documents/9986169/81090103/body_COSMO_SkyMed_Data.pdf). (Lest 13.03.2019).
- [53] DLR. *Remote Sensing Institute - Status Report 2013–2018*. DLR, 2018.
- [54] M. Jochum og J. Janoth. *HRWS: X-band-SAR der nächsten Generation*. [https://registrierung.cdonline.de/erdbeobachtung/downloads/vortraege/Tag2/6a/1\\_Jochum\\_HRWS-X-Band-SAR.pdf](https://registrierung.cdonline.de/erdbeobachtung/downloads/vortraege/Tag2/6a/1_Jochum_HRWS-X-Band-SAR.pdf). 2018. (Lest 13.03.2019).
- [55] R. Torres, S. Lokas, G. Cosimo, D. Geudtner og D. Bibby. «Sentinel 1 Evolution: Sentinel-1C and -1D Models». I: *Proc. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2017.
- [56] P. López-Dekker, M. Sanjuan-Ferrer, M. Zonno, M. Younis, S. Baumgartner og A. Gabriele. «Application-level performance and trade-offs for the post-Sentinel HRWS SAR Systems». I: *Proc. 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 2016.
- [57] P. López-Dekker, H. Rott, S. Solberg, M. Zonno, M. Rodriguez-Cassola, P. Prats-Iraola og A. Moreira. «Companion SAR constellations for single-pass interferometric applications: The SESAME mission». I: *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2017.

- 
- [58] D. Giudici, D. Mapelli, M. v. d. Oever, E. D. Witte, V. Boccia, J. Roselló og B. Rommen. «Performance Analysis of a Multi-static SAR mission concept enhancing Sentinel-1 capabilities». I: *Proc. 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 2018.
- [59] DLR. *Tandem-L Satellite Mission Proposal for Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface*. 2018.
- [60] Helmholtz Association. *Tandem-L Satellite Mission Proposal for Monitoring Dynamic Processes on the Earth's Surface*. 2016.
- [61] T. Le Toan. *The Biomass mission – How it works, what it measures?* Presentasjon på [http://seom.esa.int/polinsar-biomass2015/files/D2S1\\_Opening\\_3.pdf](http://seom.esa.int/polinsar-biomass2015/files/D2S1_Opening_3.pdf). 2015. (Lest 2019).
- [62] R. Bird, P. Whittaker, B. Stern, N. Angli, M. Cohen og R. Guida. «NovaSAR-S: A low cost approach to SAR applications». I: *Proc. 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. 2013.
- [63] M. Cohen, D. Hall og P. L. Semedo. «NovaSAR-S Low Cost SAR Payload». I: *Proc. 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 2016.
- [64] N. Gebert, B. C. Domínguez, M. W. J. Davidson, M. D. Martin og P. Silvestrin. «SAOCOM-CS – A passive companion to SAOCOM for single-pass L-band SAR interferometry». I: *Proc. 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR)*. 2014.
- [65] I. Barat, M. M. Serrano, B. De Vogeler, B. Duesmann og C. Mezzera. «SAOCOM-CS: Flight Dynamics operational approach to a highly demanding formation». I: *Proc. 26th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD)*. 2017.
- [66] L. Frulla og D. Caruso. «SAOCOM Mission Overview». I: *The 37th International Symposium on Remote Sensing of Environment (presentasjon tilgjengelig online)*. 2017.
- [67] M. L. Battagliere, M. Daraio, F. Lenti, A. R. Pisani og A. Coletta. «COSMO-SkyMed and the ASI-CONAE cooperation: the SIASGE programme». I: *Proc. 68th International Astronautical Congress (IAC)*. 2018.
- [68] JAXA. *Advanced Land Observing Satellite-4 (ALOS-4)*. <http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos4/>. (Lest 22.02.2019).
- [69] T. Motohka. *ALOS-4 status update*. Presentasjon på [http://ceos.org/document\\_management/Ad\\_Hoc\\_Teams/SDCG\\_for\\_GF0I/Meetings/SDCG-13/Presentations/SDCG13\\_Session4\\_Item16a\\_ALOS4\\_ALOS3\\_MOLI.pptx](http://ceos.org/document_management/Ad_Hoc_Teams/SDCG_for_GF0I/Meetings/SDCG-13/Presentations/SDCG13_Session4_Item16a_ALOS4_ALOS3_MOLI.pptx). 2018. (Lest 22.02.2019).
- [70] J. Kellndorfer og P. Siqueira. *The NISAR Mission Overview*. Presentasjon på [https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kyoto/jan2017\\_kc23/pdf/3-07\\_KC23\\_NISAR\\_Kellndorfer.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/kyoto/jan2017_kc23/pdf/3-07_KC23_NISAR_Kellndorfer.pdf). 2017. (Lest 22.02.2019).
- [71] A. H. Kaljord. *KSAT Earth Observation for Maritime Operations – Current Capabilities and Future Potential*. Presentasjon på [https://www.norwep.com/content/download/31293/225975/version/1/file/KSAT\\_Norwep\\_Mai2017.pdf](https://www.norwep.com/content/download/31293/225975/version/1/file/KSAT_Norwep_Mai2017.pdf). (Lest 22.02.2019).
- [72] Iceye. *Satellite Missions*. <https://www.iceye.com/resources/satellite-missions>. (Lest 22.02.2019).

- 
- 
- [73] J. Finnholm. «ICEYE – Global Monitoring, When It Matters». I: *ITU Symposium and Workshop on small satellite regulation and communication systems*. Presentasjon på <https://www.itu.int/en/ITU-R/space/workshops/2016-small-sat/Documents/ICEYE-SSS-16.pdf>. 2016.
- [74] G. Farquharson, W. Woods, C. Stringham, N. Sankarambadi og L. Riggi. «The Capella Synthetic Aperture Radar Constellation». I: 2018.
- [75] *Umbra Lab*. <https://umbralab.com/>. (Lest 22.02.2019).
- [76] *XpressSAR*. <http://www.xpresssar.com/>. (Lest 22.02.2019).
- [77] IAI. *XpressSAR, Inc. selects IAI's TecSAR technology for its high-resolution X-band satellite constellation*. <http://www.iai.co.il/2013/37382-49092-en/MediaRoom.aspx>. (Lest 22.02.2019).
- [78] *Trident Space*. <http://www.trident.space.com/>. (Lest 22.02.2019).
- [79] *Trident Pacific*. <http://www.tridpacific.com/>. (Lest 22.02.2019).
- [80] S. Erwin. *Trident Space's challenge: Standing out from the crowd of SAR satellite startups*. <https://spacenews.com/trident-spaces-challenge-standing-out-from-the-crowd-of-sar-satellite-startups/>. (Lest 22.02.2019).
- [81] P. C. Fox, G. Tyc og K. Beckett. «The UrtheCast SAR-XL multi-band, multi-aperture spaceborne SAR system». I: *Proc. 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. 2017.
- [82] H. Saito, P. R. Akbar, H. Watanabe, V. Ravindra, J. Hirokawa, K. Ura og P. Budhaditya. «Compact X-Band Synthetic Aperture Radar for 100kg Class Satellite». I: *IEICE Transactions on Communications* E100.B.9 (2017), s. 1653–1660.
- [83] K. Hirako, S. Shirasaka, T. Obata, S. Nakasuka, H. Saito, S. Nakamura og T. Tohara. «Development of small satellite for X-band compact synthetic aperture radar». I: *Journal of Physics: Conference Series* 1130 (2018).
- [84] K. N. Urata, J. T. Sri Sumantyo, N. Imura, K. Ito og S. Gao. «Development of a circularly polarized L-band SAR deployable mesh reflector antenna for microsatellite earth observation». I: *Proc. 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. 2017.
- [85] K. N. Urata, J. T. Sri Sumantyo, C. E. Santosa og T. Viscor. «A compact C-band CP-SAR microsatellite antenna for Earth Observation». I: *Acta Astronautica* (2019).
- [86] J. T. Sri Sumantyo, N. Imura, K. N. Urata, R. H. Triharjanto og S. Gao. «Multiband Circularly Polarized Synthetic Aperture Radar (CP-SAR) Onboard Microsatellite Constellation». I: *2018 Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS-Toyama)*. 2018.
- [87] iQPS. *World smallest SAR system for less than 150kg satellite which was developed and supplied by iQPS Inc. was press released by Chiba University Professor Josaphat Laboratory (JMRSL)*. <https://i-qps.net/news/61>. (Lest 22.02.2019).
- [88] *Space Advisory*. <http://www.spaceadvisory.com/>. (Lest 22.02.2019).

---

---

## A Forkortelser

<b>ATI</b>	Along-Track Interferometry
<b>CFAR</b>	Constant False Alarm Ratio
<b>CSA</b>	Canadian Space Agency
<b>CSM</b>	COSMO-SkyMed
<b>CTLR</b>	Circular Transmit Linear Receive
<b>DCP</b>	Dual Circular Polarimetry
<b>DEM</b>	Digital Elevasjons-Modell
<b>DLR</b>	Deutsches zentrum für Luft- und Raumfahrt
<b>DPCA</b>	Displaced Phase-Center Antenna
<b>ERS</b>	European Remote Sensing satellite (tidligere satellitt)
<b>FFI</b>	Forsvarets Forskningsinstitutt
<b>GCP</b>	Ground Control Point
<b>GMTI</b>	Ground Moving Target Indication
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>H</b>	Horisontal polarisering
<b>HH</b>	Horisontal sendt – Horisontal mottatt
<b>HV</b>	Horisontal sendt – Vertikal mottatt
<b>InSAR</b>	Interferometrisk SAR
<b>KSAT</b>	Kongsberg Satellite services
<b>MDV</b>	Minimum Detectable Velocity
<b>MTI</b>	Moving Target Indication
<b>PolInSAR</b>	Polarimetrisk Interferometrisk SAR
<b>PRF</b>	Puls-Repetisjons-Frekvens
<b>RCM</b>	RADARSAT Constellation Mission
<b>RGB</b>	Rød, Grønn, Blå
<b>RMS</b>	Root Mean Square (gjennomsnittlig avvik)
<b>SAR</b>	Syntetisk Apertur-Radar
<b>SLC</b>	Single Look Complex
<b>StInSAR</b>	Stereo Interferometrisk SAR
<b>STAP</b>	Space-Time Adaptive Processing
<b>STK</b>	Systems Toolkit (simuleringsprogram)
<b>TDX</b>	TanDEM-X(satellitt)
<b>TSX</b>	TerraSAR-X(satellitt)
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator
<b>V</b>	Vertikal polarisering
<b>VH</b>	Vertikal sendt – Horisontal mottatt
<b>VV</b>	Vertikal sendt – Vertikal mottatt

## About FFI

The Norwegian Defence Research Establishment (FFI) was founded 11th of April 1946. It is organised as an administrative agency subordinate to the Ministry of Defence.

### FFI's MISSION

FFI is the prime institution responsible for defence related research in Norway. Its principal mission is to carry out research and development to meet the requirements of the Armed Forces. FFI has the role of chief adviser to the political and military leadership. In particular, the institute shall focus on aspects of the development in science and technology that can influence our security policy or defence planning.

### FFI's VISION

FFI turns knowledge and ideas into an efficient defence.

### FFI's CHARACTERISTICS

Creative, daring, broad-minded and responsible.

## Om FFI

Forsvarets forskningsinstitutt ble etablert 11. april 1946. Instituttet er organisert som et forvaltningsorgan med særskilte fullmakter underlagt Forsvarsdepartementet.

### FFIs FORMÅL

Forsvarets forskningsinstitutt er Forsvarets sentrale forskningsinstitusjon og har som formål å drive forskning og utvikling for Forsvarets behov. Videre er FFI rådgiver overfor Forsvarets strategiske ledelse. Spesielt skal instituttet følge opp trekk ved vitenskapelig og militærteknisk utvikling som kan påvirke forutsetningene for sikkerhetspolitikken eller forsvarsplanleggingen.

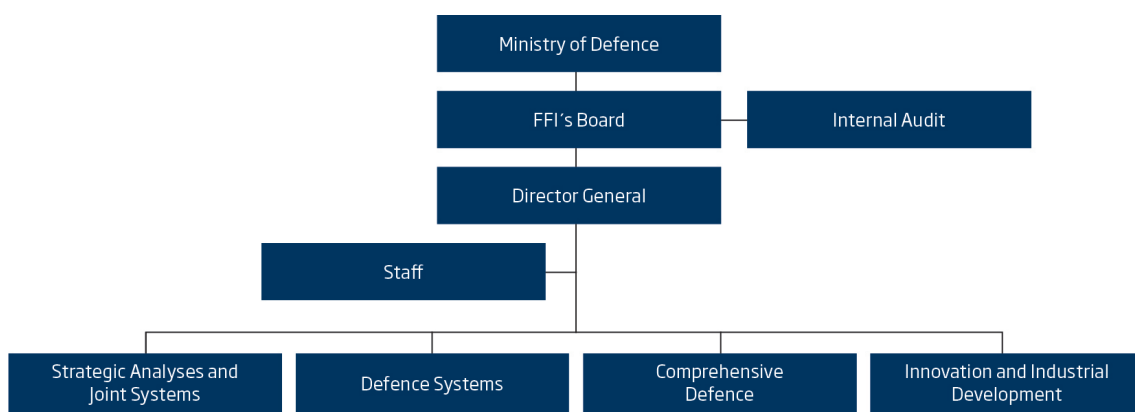
### FFIs VISJON

FFI gjør kunnskap og ideer til et effektivt forsvar.

### FFIs VERDIER

Skapende, drivende, vidsynt og ansvarlig.

## FFI's organisation





**Forsvarets forskningsinstitutt**  
Postboks 25  
2027 Kjeller

Besøksadresse:  
Instituttveien 20  
2007 Kjeller

Telefon: 63 80 70 00  
Telefaks: 63 80 71 15  
Epost: [ffi@ffi.no](mailto:ffi@ffi.no)

**Norwegian Defence Research Establishment (FFI)**  
P.O. Box 25  
NO-2027 Kjeller

Office address:  
Instituttveien 20  
N-2007 Kjeller

Telephone: +47 63 80 70 00  
Telefax: +47 63 80 71 15  
Email: [ffi@ffi.no](mailto:ffi@ffi.no)