

Høyoppløsnings SAR satellittbilder tatt over fjellpartier ved Bjerkvik i Nord-Norge

Dan J. Weydahl og Knut Eldhuset

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

4. juli 2011

FFI-rapport 2010/01092

110402

P: ISBN 978-82-464-1951-0

E: ISBN 978-82-464-1952-7

Emneord

Syntetisk Aperture Radar

Tilbakespredning

Synbarhet

Forandringer

Høydekart

Godkjent av

Richard B Olsen

Prosjektleder

Johnny Bardal

Avdelingsjef

Sammendrag

Vi har brukt høyoppløsnings Radarsat-2 og COSMO-SkyMed™ syntetisk aperture radar satellittbilder (SAR) tatt i april 2010 for å evaluere fremkommelighet og noen utvalgte særtrekk ved fjellterrenget øst for Bjerkvik i Nord-Norge. Vi har vist potensialet ved å bruke stereo SAR opptak med den kanadiske Radarsat-2 satellitten til å utlede høydekart i dette området, og hvordan man kan bruke 1-dags interferometriske SAR-opptak gjort med de italienske COSMO-SkyMed™ satellittene til å lage høydekart med en nøyaktighet som overgår eksisterende 1:50 000 topografisk kartserie.

English summary

We used high-resolution Radarsat-2 and COSMO-SkyMed™ synthetic aperture radar (SAR) satellite image data acquired in April 2010 to evaluate terrain accessibility and certain ground features in a mountainous terrain outside Bjerkvik in North Norway. We have shown the potential of using stereo SAR images from the Canadian Radarsat-2 satellite to generate topographic maps in the region, and how 1-day interferometric SAR acquisitions with the Italian COSMO-SkyMed™ satellites can be used to generate elevation maps with height accuracies better than the existing 1:50 000 topographic data.

Innhold

1	Innledning	9
2	Litt bakgrunn om satellitt SAR-bilder	10
2.1	Oppløsning	10
2.2	Satellittbaner og opptaksgeometri	10
2.3	SAR bildetyper og anvendelser	12
2.4	Hvordan tolke radar ekkoet	14
3	Testområde og datasett	16
3.1	Geografisk testområde	16
3.2	Satellitopptakene	18
4	For-prosessering av SAR-bildene	18
5	Analyse av SAR-bildene	20
5.1	Dam – Store Trollvatnet	20
5.2	Myrdrag – Svartvatnet	22
5.3	Framkommelighet i bratt terreng - WP1, WP2, WP3	25
5.4	Kryssing av elv – WP4	31
5.5	Myr og Bekkekryss – WP5, WP6 og WP7	33
5.6	Myr – WP 8	37
5.7	Myr – WP11	38
5.8	Anleggsvei – WP 9	41
5.9	Hallarneset - WP10	43
5.10	Fjelltopp – WP 13	46
5.11	Hytte - WP12	47
5.12	Sirkler på islagt vatn	49
5.13	Nedtapping av damanlegg	51
6	Høydekart fra stereo SAR opptak	55
6.1	Stereo SAR anaglyf	55
6.2	Beregne DEM fra stereo SAR opptak	56
7	Høydekart fra interferometriske SAR-opptak	57
7.1	Litt bakgrunn om SAR-opptakene	57
7.2	Hva påvirker høydenøyaktigheten når DEM lages fra InSAR data?	57
7.3	Hvordan vi lager en DEM fra InSAR dataene over Bjerkvik	59

7.4	Resultater – sammenligning av InSAR DEM mot kartverkets 1:50 000 DEM	60
7.5	Resultater – høydenøyaktigheten for InSAR DEM'en over Bjerkvik	63
7.6	Resultater – SAR interferogrammet	66
8	Konklusjon	67
	Referanser	68

Forord

Resultatene beskrevet i denne rapporten inngår som en del av arbeidet ved INNOSAT-II prosjektet på FFI. I dette prosjektet skal blant annet bilder fra de nye, høyoppløsnings Syntetisk Aperture Radar (SAR) satellittene evalueres i forhold til visse ytelser og anvendelser.

Det er opplagt at når oppløsningen på SAR-bilder fra canadiske Radarsat-2, tyske TerraSAR-X og italienske COSMO-SkyMed™ er helt ned mot 1 til 2 meter, gir dette muligheter for å detektere, gjenkjenne, observere og kartlegge detaljer som ikke var mulig for bare noen få år siden, da oppløsningen fra slike radarsatellitter kun lå på mellom 9 og 25 meter.

De ovenfor nevnte satellittene er kommersielle, og Kongsberg Satellite Services (KSAT) i Tromsø kan foreta bestilling og levering av bildeprodukter fra alle disse satellittene.

Mulighetene Norge i dag har til selv å lese ned, prosessere og distribuere satellitt SAR data har bidratt positivt til at både Forsvaret (deriblant HVS Ingeniør/Milgeo) og flere norske forskningsgrupper viser økende interesse for å teste ut og bruke SAR-bilder tatt med høy oppløsning.

Dette er litt av bakgrunnen for at det ble bestilt flere høyoppløsnings satellitt SAR-bilder over et fjellområde øst for Bjerkvik i Narvik kommune i april 2010. Disse bildene er evaluert ved FFI og resultater dokumentert blant annet i denne rapporten.

1 Innledning

En radar kan gjøre opptak uavhengig av lys og skydekke. Syntetisk Aperture Radar (SAR) er en spesiell type radarinstrument som man benytter til å se ned på terrenget fra et fly eller en satellitt, og hvor radarantennens bevegelse framover gjør at en får en god oppløsning ikke bare i radarens se-retning, men også i flyretningen. Man ender da opp med et to-dimensjonalt gråtonebilde som kan minne litt om et svart/hvitt flyfoto tatt ned over et terreng.

I dag kan man bestille satellitt SAR-bilder fra kommersielle aktører. Disse bildene kan ha en oppløsning helt ned mot 1 til 2 meter. Detaljnivået er da så rikt at det begynner å bli interessant å bruke SAR-bildene for å oppdatere kart og til å detektere endringer, i for eksempel infrastruktur, over tid.

Det er også mulig å lage topografiske kart (DEM) ved å kombinere to SAR-opptak. Opptakene bør da helst gjøres nært i tid - med bare én, eller noen få dagers, mellomrom. Slike høydekart kan potensielt gi en høydenøyaktighet som overgår de vanlige 1:50 000 kartene.

Denne rapporten beskriver resultater fra en studie over et fjellparti sydøst for Bjerkvik i Nord-Norge (Narvik kommune) hvor følgende spørsmål står sentralt:

- Hva kan vi se av detaljer i de nye høyoppløsnings satellitt SAR-bildene når vi beveger oss i et typisk fjellterreng hvor det stedvis er innslag av skog?
- Kan man lage topografiske kart fra SAR-dataene med en høydenøyaktighet som er tilstrekkelig for å vurdere framkommeligheten til kjøretøy/scootere i fjellterreng?

Denne studien bruker flere satellitt SAR-bilder som ble tatt med bare noen få dagers mellomrom i begynnelsen av april 2010. Vi har konsentrert oss om SAR-satellittene Radarsat-2 og COSMO-SkyMed™, hvor dataene er levert av Kongsberg Satellite Services (KSAT) i Tromsø. HVS Ingeniør/Milgeo har bidratt med bakkefoto som ble tatt den 27. februar 2011, med andre ord 5-6 uker før selve SAR-opptakene.

Vi viser i denne rapporten hvordan naturlige strukturer i fjellheimen fremtrer i SAR-bildene, og hvordan man kan tolke forskjellige naturlige og menneskelagde fenomener. Vi har videre evaluert muligheten for å utlede et godt høydekart fra de SAR-dataene vi har tilgjengelig i denne studien.

Analysen over vårt testområde har også gitt opphav til noen spennende ny-oppdagelser som vi ennå ikke har funnet det hele og fulle svaret på.

2 Litt bakgrunn om satellitt SAR-bilder

2.1 Oppløsning

En radar er et aktivt instrument som kan gjøre opptak uavhengig av lys og skydekke, og som normalt gir en god oppløsning i se-retningen (range retning). SAR (Syntetisk Aperture Radar) er en spesiell type radarinstrument som benytter radarantennens bevegelse til å få en god oppløsning også i flyretningen (azimuth retning).

Fra år 1991 og ti år framover ble det skutt opp flere SAR-satellitter fra både romfartsorganisasjoner (ESA, NASDA) og enkeltland (Canada). Den beste oppløsningen på SAR-bilder fra disse første satellittene har typisk ligget fra 10 til 25 meter. I 2007 kom det en ny generasjon høyoppløsnings-, kommersielle SAR satellitter. Disse kan i dag levere 2-dimensjonale bilder med en oppløsning helt ned mot 1 til 2 meter i både range og azimuth retning. Et slikt detaljnivå gir også muligheter til å bruke disse SAR-bildene til kartlegging og direkte sammenligning mot høyoppløsnings optiske satellittbilder eller flyfoto.

2.2 Satellittbaner og opptaksgeometri

Banehøyden til de fleste observasjonssatellitter kan typisk være fra 500 km til 800 km over jordens overflate. Med en fart på over 7 km/s, så tar det bare rundt 100 minutter for en slik satellitt å fly rundt jorda en gang. Satellitten vil da rekke å fly ca. 14 omløp i døgnet.

De fleste observasjonssatellittene går i solsynkrone polare satellittbaner. Inklinasjonen¹ til disse satellittbanene er rundt 98°, se illustrasjonen i Figur 2.1. De polare satellittbanene gjør at deknningen ved våre breddegrader blir særlig god – flere ganger i døgnet på sitt beste. Dersom man daglig ønsker å lese ned data fra en slik satellitt, vil man fra en bakkestasjon i Tromsø kunne lese ned data fra hele 10 av de 14 omløpene, mens man vil kunne lese ned data fra hvert eneste omløp hvis bakkestasjonen befinner seg på Svalbard.

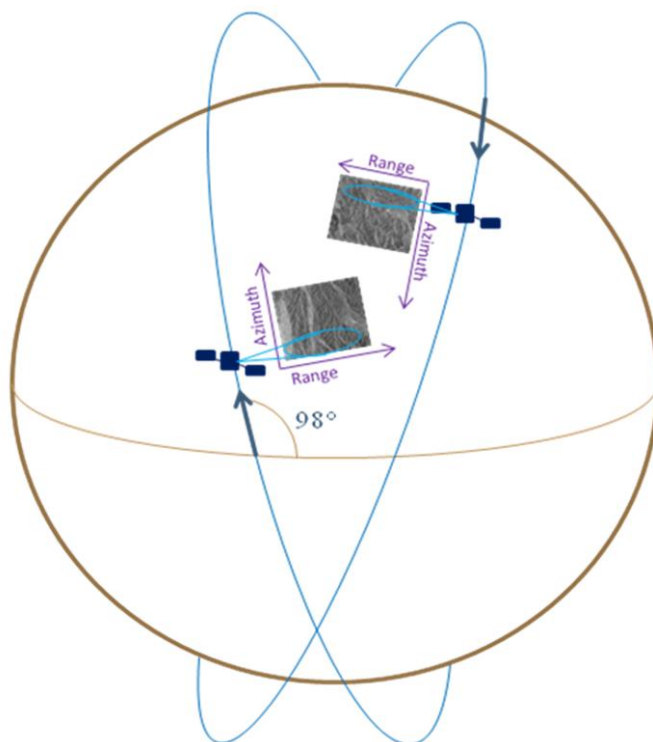
Etter et visst antall dager, så vil en satellitt gå inn i nøyaktig den samme satellittbanen som tidligere, sett fra en som observerer den nede fra bakken. Vi sier at satellitten opererer med et visst antall dager ”repeat-pass”². Gjentatte opptak i repeat-pass gjør det mulig å få flere bilder fra samme område gjort med så å si samme opptaks-geometri. Dette kan være avgjørende for å tolke enkelte menneskelagde endringer mellom to opptak, og er helt nødvendig dersom man skal utlede høydekart ved å benytte en teknikk som man kaller SAR interferometri.

¹ Vinkelen mellom satellittens baneplan og ekvator, regnet når satellitten beveger seg nordover (det vil si ”i oppadstigende knute”).

² Canadiske Radarsat-2 opererer med 24 dagers repeat-pass, mens den italienske COSMO-SkyMed™ er en samling av fire identiske satellitter som kombinert kan gi 1, 4, 5, 7, 8, 9, 12 eller 16 dagers repeat-pass. Den tyske TerraSAR-X har 11 dagers repeat-pass.

Man har mulighet til å bestille SAR-opptak som er gjort mens satellitten enten flyr nordover i sin satellittbane, eller sydover. Dette kaller vi opptak som er gjort i oppadgående ("ascending") eller nedadgående ("descending") satellitt passering. Se illustrasjon i Figur 2.1.

SAR-instrumentet ser vanligvis 90° grader ut til høyre for sin fartsretning, og på skrå ned på terrenget under seg. Dagens satellitter kan typisk gjøre opptak med en skrå radar innfallsvinkel³ som varierer fra 23° til 50° . Bruken/anvendelsen av SAR-bildene kan til en viss grad være styrende for om man velger å bestille opptak som er gjort med en lavere (23° - 30°) eller høyere (40° - 50°) innfallsvinkel. For en del anvendelser hvor man ønsker å studere menneskelagde objekter, har det vist seg at en høyere innfallsvinkel kan gi bedre synbarhet. Flexibiliteten i å velge radar innfallsvinkel gjør at man også har mulighet for å dekke et gitt geografisk område *oftere* enn om SAR antenna var fiksert til én opptaksvinkel.



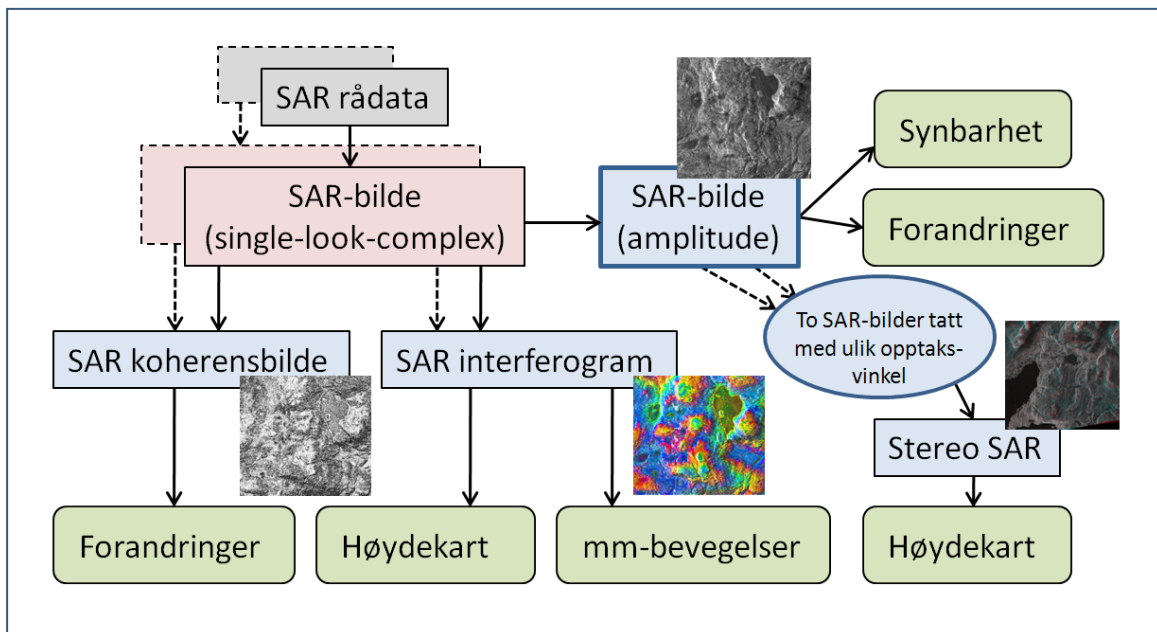
Figur 2.1 Illustrasjon som viser to SAR-satellitter i hver sin solsynkrone polare bane. Satellittene kan gjøre opptak ut til siden for seg og ned på jordoverflaten mens de flyr nordover eller sydover.

³ Radar innfallsvinkel er definert som vinkelen mellom radarstrålen der den treffer jorda og loddlinja på det stedet. For en flat-jord tilnærming, så blir da radar sevinkel og radar innfallsvinkel like store. I virkeligheten (altså for en krum jord) vil radar innfallsvinkelen typisk være *litt* større enn radar sevinkelen.

2.3 SAR bildetyper og anvendelser

Et SAR-bilde vises vanligvis fram som et rent *amplitude bilde* hvor den tilbakespredte radar ekkostyrken er representert med forskjellige grånivåer. Denne type bilde finner vi igjen i illustrasjonen i Figur 2.2 (se tekstboks med tykk, blå kant). Fra SAR amplitude bilder er det også mulig å utlede høydekart ved hjelp av *stereo SAR* teknikken hvor man tar to opptak med ulik radar innfallsvinkel. Dette er mer inngående beskrevet i kapittel 6.

Distributøren av satellittbilder (for eksempel KSAT i Tromsø) kan også levere SAR-bilder på "single-look-complex" form. Dette er et litt mer avansert bildeprodukt hvor både amplituden og fasen til radarsignalet er til stede. Et slikt bildeprodukt er helt nødvendig hvis man ønsker å utlede enda mer detaljerte endringer eller høydekart enn det som et rent SAR amplitudebilde kan gi. Man benytter i så fall fasen til først å lage et *SAR koherensbilde* eller *SAR interferogram* (se illustrasjon i Figur 2.2) for siden å generere forandringer eller høydekart.



Figur 2.2 Illustrasjon som viser flyttdiagram for hvilke SAR bildetyper (kvadratiske tekstbokser) man bør bruke for visse anvendelser (avrundete kvadratiske tekstbokser).

Metodikken for *SAR interferometri* er utdypet noe mer i begynnelsen av kapittel 7, men kort sagt kan man si at SAR interferometri kan brukes til å gjøre følgende målinger mellom to geometrisk like opptak tatt fra samme type SAR sensor:

- Få et generelt mål på hvor det har skjedd mye/lite forandring mellom to opptaksdatoer (SAR koherens). Koherensverdiene er vanligvis angitt mellom 0.0 og 1.0. En *høy koherensverdi* (med verdier som for eksempel ligger mellom 0.8 og 1.0) viser da et *godt samsvar* mellom opptakene, eller sagt på en annen måte: det har da vært en *svært liten forandring* på bakken mellom opptakene.

- Lage høydekart for et område (SAR interferometri)
- Bestemme millimeter-bevegelser på jordoverflaten (SAR interferometri)

Radarstrålen fra SAR-instrumentet peker vanligvis ut til høyre for instrumentplattformens flyretning, og med en skrå vinkel (radar innfallsvinkel) ned på terrenget under seg. Noen få satellitter kan kommanderes til å peke enten til venstre eller høyre side for seg. De fleste av dagens SAR-satellitter har stor fleksibilitet til å gjøre opptak med radar innfallsvinkler fra 23° til 50°. Man angir ønsket vinkel ved bestilling av SAR-opptaket.

En oversikt over noen anvendelser med tilhørende metode og anbefalt SAR opptaksmodus, er vist i Tabell 2.1.

Anvendelse	Metode	SAR opptaksmodus
Kartlegging	Se etter synlige objekter/mønstre	Ett SAR-opptak gjort med høyere innfallsvinkel
Detektere naturlige forandringer over større områder	Sammenligne amplituden mellom to bilder	To eller flere SAR-opptak gjort med lik eller forskjellig opptaksgeometri
	Evaluere koherensen mellom to bilder	To opptak i SAR repeat-pass
Detektere forandringer av menneskelagde objekter	Sammenligne amplituden mellom to bilder	To opptak i SAR repeat-pass
	Evaluere koherensen mellom to bilder	To opptak i SAR repeat-pass
Lage høydekart	Stereo SAR	To eller flere SAR-opptak (samme-side) med forskjellige innfallsvinkler, og helst gjort tett etter hverandre i tid
	SAR interferometri	To opptak i SAR repeat-pass

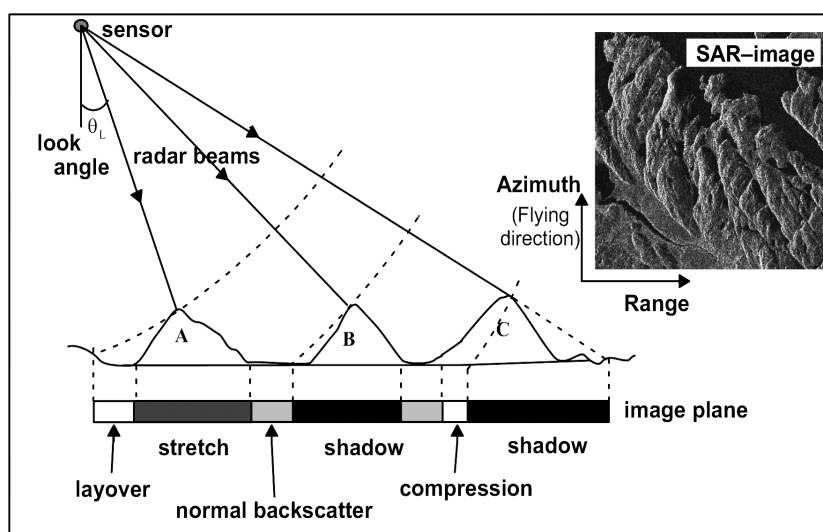
Tabell 2.1 En generell oversikt over hvilke SAR opptaksmodus og metoder som kan være aktuelle for visse typer anvendelser.

2.4 Hvordan tolke radar ekkoet

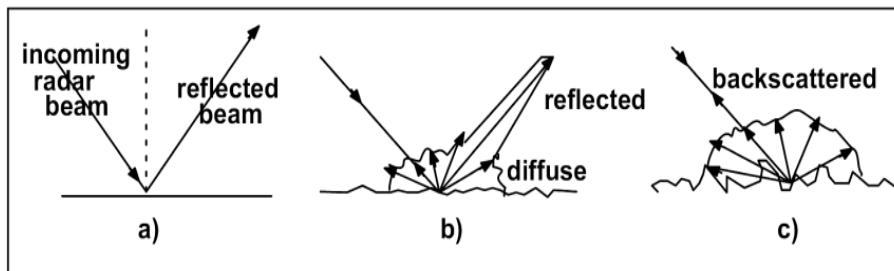
Et SAR-instrument sender og mottar vanligvis på samme fysiske radarantenne. Når SAR-instrumentet ser på skrå ned på terrenget, vil det bare være en brøkdel av radarsignalet som returneres tilbake mot SAR-antennen (tilbakespredt radarsignal).

Styrken på det tilbakespredte signalet vil være avhengig av flere faktorer, og vi vil her kort skissere noen av de mest sentrale refleksjonsmekanismene for SAR:

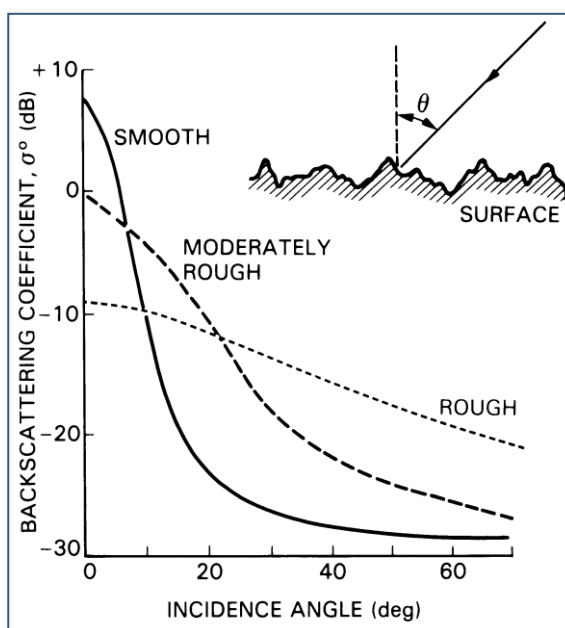
- Topografi kan gi folding- og skygge-effekter i SAR-bildet, se Figur 2.3. Foldingeffektene kommer av at radaren måler avstand (range) til objekter på bakken. Objekter som da returnerer ekkoet til samme tid vil bli notert med samme avstand. Skygge-effekter gjør seg gjeldende der fjelltopper, trær og bygninger vil stå i veien for radarstrålens side-seende geometri.
- Større ruhet på en overflate gir som regel et sterkere ekkosignal tilbake til satellitten, se Figur 2.4.
- En ru/ujevn overflate oppfattes av radaren som glattere etter hvert som radar innfallsvinkelen øker, se illustrasjon i Figur 2.5.
- En ujevn og fuktig overflate gir større tilbakespredning enn om den samme flaten er tørr.
- SAR-signalet kan penetrere mange decimeter eller meter ned i et tørt volum (eks. kald og tørr snø, tørr vegetasjon) før det treffer en eller flere strukturer og begynner å reflektere tilbake. Lengre radar bølgelengder vil slik sett trenge lengre ned i vegetasjon og tørr jordoverflate/snø, se Figur 2.6.
- SAR-signalet går ikke gjennom en våt flate (vann eller våt snø).
- Styrken på tilbakespredningen fra menneskelagde objekter er ofte avhengig av SAR opptaksgeometrien. Komplekse strukturer gir som regel et sterkt SAR ekko over flere opptaksvinkler. En kombinasjon av flere opptak kan derfor være en hjelp i tolkningen.



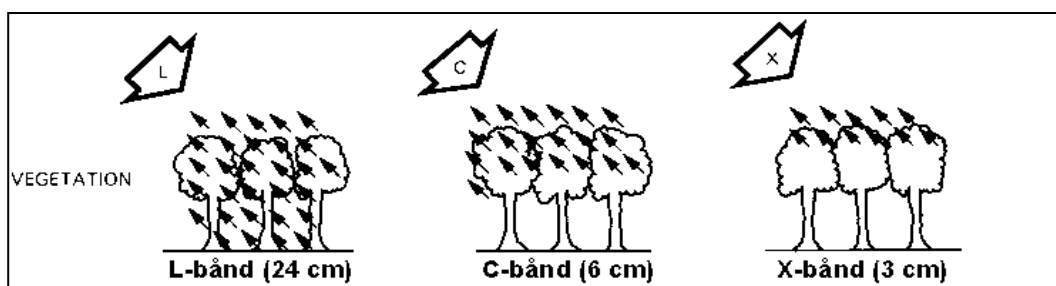
Figur 2.3 Den side-seende geometrien til en SAR kan gi betydelige folder- og skygge-effekter i terreng med sterk topografi.



Figur 2.4 Det tilbakespredte ("backscattered") SAR-signalet, som SAR antennen mottar, vil være lav for en jevn flate, og betydelig høyere for en ujevn flate.



Figur 2.5 Typiske kurver for SAR tilbakespredning ved økende radar innfallsvinkel (θ) fra flater som er glatte, moderat glatte eller ujevne (Illustrasjon hentet fra NASA 1989).



Figur 2.6 Lengre radar bølgelengder vil trenge lengre ned i vegetasjon og tørr jordoverflate/snø (Illustrasjon hentet fra NASA 1989).

3 Testområde og datasett

3.1 Geografisk testområde

Fjellområdet sydøst for Bjerkvik består av høydedrag, dammer, vatn, veier, myr, og en høyspentlinje som krysser nord-syd akse. Terrenget er variert med en del bratte skrenter. Det er noe løvskog i området. Se flyfoto og kart i henholdsvis Figur 3.1 og Figur 3.2



Figur 3.1 Flyfoto hentet i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.



Figur 3.2 Kart hentet fra 1:50 000 databasen.

3.2 Satellitopptakene

Det ble gjort fem satellittbildeopptak med to forskjellige SAR satellitter i begynnelsen av april 2010 over Bjerkvik i Nord-Norge, se Tabell 3.1. Vi har her forsøkt å holde oss til opptak fra satellitter på vei nordover ("ascending"), og med radar innfallsvinkler ned mot flatt terreng som varierer mellom 28° og 43°.

Opptaksdato	Satellitt	Opptaksmodus, satellittpass (Ascending/Descending)	Opptaks-tidspunkt [UTC]	Radar innfalls-vinkel [grader]	Oppløsning (range x azimuth) [m]
5. april 2010	Radarsat-2	UltraFine79, Asc	16:02:03	28.8°	2.7 x 2.1
7. april 2010	COSMO-SkyMed™	Spotlight, Asc	04:21:11	37.5°	0.89 x 1.07
8. april 2010	COSMO-SkyMed™	Spotlight, Asc	04:21:09	37.5°	0.89 x 1.06
8. april 2010	Radarsat-2	UltraFine9, Asc	16:14:34	36.4°	2.2 x 2.1
11. april 2010	Radarsat-2	UltraFine18, Asc	16:27:06	42.9°	1.9 x 2.1

Tabell 3.1 Opptak med høyoppløsnings SAR-satellitter over Bjerkvik i april 2010.

SAR-bildene vi har mottatt fra KSAT i Tromsø ligger i sin opprinnelige SAR radargeometri ("slant-range, single-look-complex"). Dette er også bakgrunnen for den gode oppløsningen som er angitt i Tabell 3.1 ovenfor.

Merk at Radarsat-2 bruker C-bånd radar (6 cm bølgelengde) mens COSMO-SkyMed™ (CSK) bruker X-bånd (3 cm bølgelengde).

Radarsat-2 bildet dekker et større område på bakken enn CSK, henholdsvis 21x16 km og 10x10 km.

4 For-prosessering av SAR-bildene

SAR-bildene i seg selv kan leveres som forskjellige produkttyper. Noen bildeprodukter er mer bearbeidet enn andre, slik at de lettere kan importeres rett inn i et standard GIS verktøy for videre evaluering sammen med annen kartinformasjon.

SAR-bildene vi har bestilt til denne studien er lite bearbeidet og ligger mer opp til det opprinnelige data formatet. På fagspråket kaller vi dem "single-look-complex" (SLC) bildedata. Disse bildene ligger i den opprinnelige radar-geometrien, slik at alle terrengfolderinger er godt synlig, og med de to bildeaksene som henholdsvis radar se-retning ("range") og flyretning ("azimuth"). Det er en fordel å starte med dette bildeproduktet hvis man skal gjøre SAR interferometri, og hvis man selv ønsker å ha kontroll på den videre bearbeidingsprosessen.

De nevnte SLC bildeproduktene må geokodes til en mest mulig riktig kartgeometri for at man lettere skal kunne sammenligne stedegegne særtrekk med for eksempel flyfoto eller kart. Vi har brukt et kommersielt dataprogram (ENVI/SARscape) til å geokode bildene.

Nå er det to hovedmåter å geokode SAR-bildene på:

- 1) Geokode ved å projisere bildepikslene inn på WGS84 ellipsoiden.
- 2) Geokode ved å projisere SAR bildepikslene rett inn i kartriktige koordinater ved å bruke en digital terrengmodell.

Geokodingsmetode 1) er enklest og raskest. Ved dette valget kan man i tillegg angi om man ønsker å projisere bildepikslene inn på en viss høyde over referanse-ellipsoiden. Dersom man for eksempel opererer på et høydeplata på 950 m over havflaten, så vil man få en mer riktig geokoding av terreng som ligger på nettopp slike høyder hvis man geokoder med en referanse-ellipsoidehøyde på 950 meter.

Metode nummer 2) gir et SAR-bilde med best geografisk samsvar inn mot et standard kart, men for at denne metoden skal fungere bra, må man ha en god digital høydemodel (DEM) med en grid størrelse på samme nivå som SAR-bildets oppløsning. Så vidt vi vet, eksisterer det ikke en så god DEM i fjellområdet rundt Bjerkvik, så vi har valgt å evaluere satellittbildene ved kun å gjøre en første ordens bildeopprettning (altså geokoding til en WGS84 ellipsoide med en fast referansehøyde på null meter, og ved å bruke et grid på 2x2 meter).

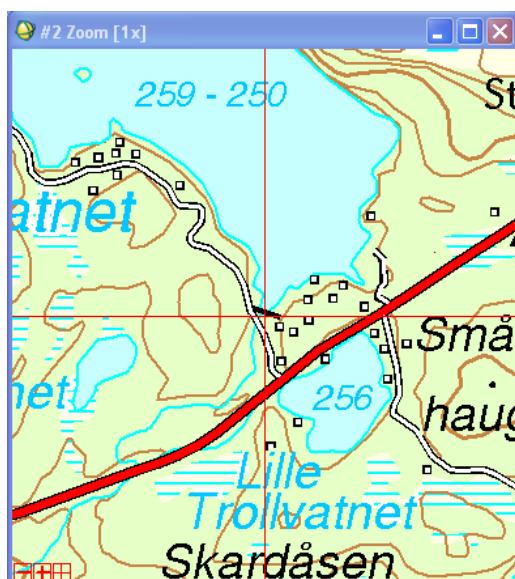
SAR-bildene har av natur en karakteristisk form for "salt-og-pepper støy" som vi på engelsk kaller "*speckle*". For noen anvendelser kan det være bra å redusere støyen i SAR-bildene før man går i gang med selve tolkingen/analysen/klassifiseringen. Slik støyfiltrering kan gjøres på to måter:

- a) Slå sammen flere nærliggende piksler til ett nytt piksel. Verdien på det nye pikselet er middelverdien av de opprinnelige. Dette kalles også "blokk-midling" eller "multi-looking". Vi ender da opp med et glattere bilde, men hvor den romlige oppløsningen, naturlig nok, er blitt dårligere.
- b) Kjøre et adaptivt speckle filter. Vi lar da en lokal maske (f eks 5x5 eller 7x7 piksler) gli over bildet for å gjøre lokale statistiske beregninger. Dette danner grunnlaget for om man skal redusere støyen mye (i homogene områder) eller bevare strukturer og kanter (i inhomogene områder).

I denne studien er det ikke kjørt noe adaptivt speckle filter på SAR-bildene ettersom vi ønsker å bevare mest mulig av finstrukturene når vi foretar en visuell analyse. Vi har derimot valgt å kjøre multi-looking når vi lager koherensbilder og interferogram.

5 Analyse av SAR-bildene

5.1 Dam – Store Trollvatnet



Figur 5.1 Kart over demningen og omgivelsene rundt ved Store Trollvatn.

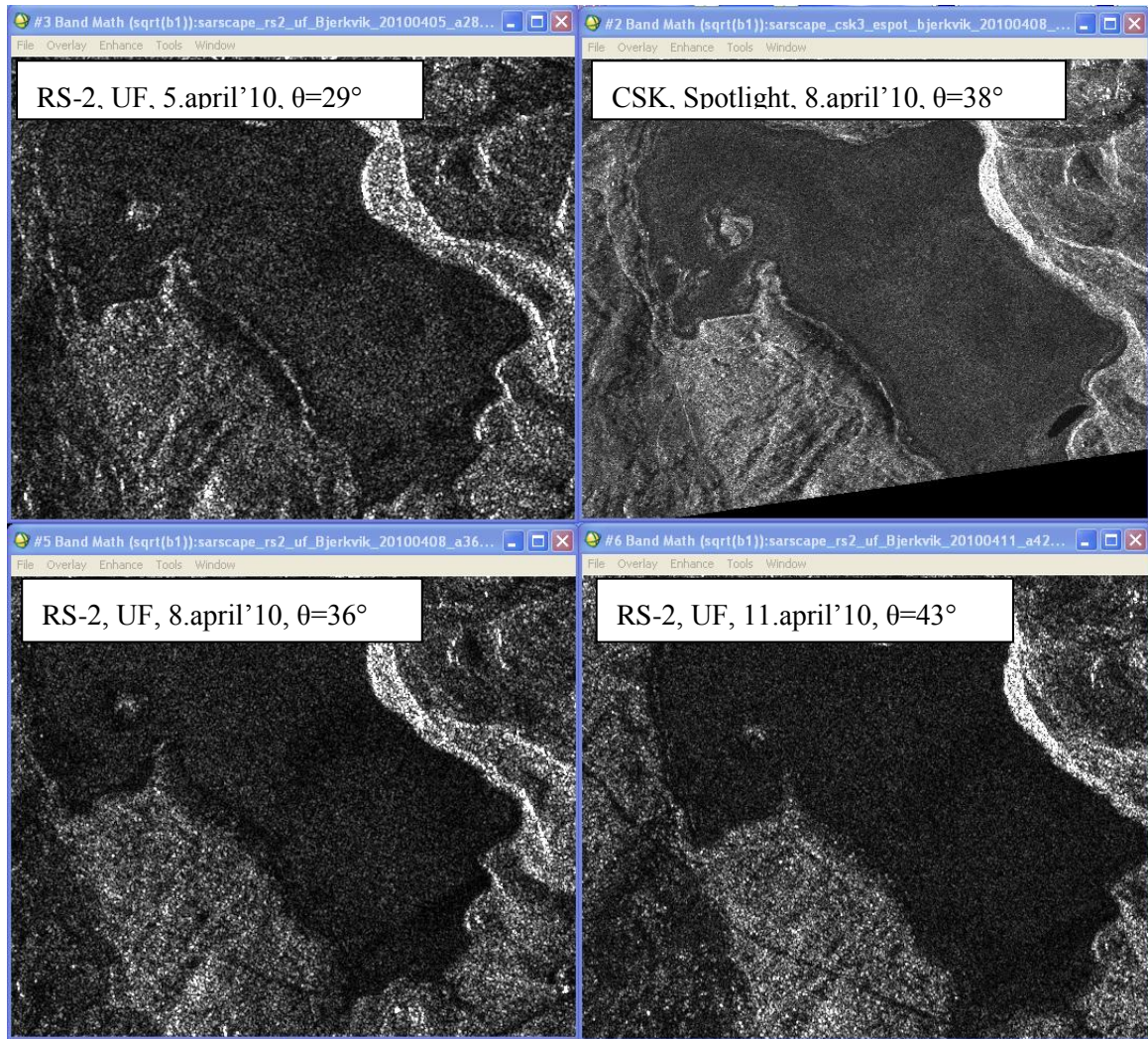
Demningen på dammen er ikke synlig i SAR-bildene, se Figur 5.2. Det er vanskelig å si om det er breknings av is i strandsonen etter nedtapping. På SAR-bildene ser det ikke slik ut – da ville det vært en lys stripe langs kantsonen som en følge av stor ruhet.

Det lyse partiet som synes på østlig kant i alle de fire SAR-bildene, er terrengfoldinger som skyldes SAR instrumentets opptaksgeometri. Dette er klart ettersom foldingene også varierer med SAR innfallsvinkel: mye folding ved liten innfallsvinkel.

Det virker som om finstrukturer kommer bedre fram i CSK sitt X-bånd (3 cm) bilde, sammenlignet med de tre RS2 C-bånd (6 cm) bildene.

En lys linje i CSK på vestlig side av vatnet kan skyldes ski- eller scooterspor.

En mørk linje skjærer gjennom et skogsparti sydvest for Store Trollvatn. Denne linjen er mest fremtredende ved høyere innfallsvinkler. Her er det ingen hjelp å hente fra kartet, men flyfotoet antyder en kraftlinjegate som går i gjennom skogsområdet her. Kontrasten mellom grov vegetasjon (trær) og finere undervegetasjon (busker i kraftgata) er altså størst for C-bånd radar tatt ved høyere innfallsvinkel.



Figur 5.2 SAR-bilder over Store Trollvatnet. Opptak er gjort i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)



Figur 5.3 Foto av dammen tatt i retning mot sør-øst. Foto: HVS Ingeniør/Milgeo.

5.2 Myrdrag – Svartvatnet



Figur 5.4 Kart over Svartvatnet.

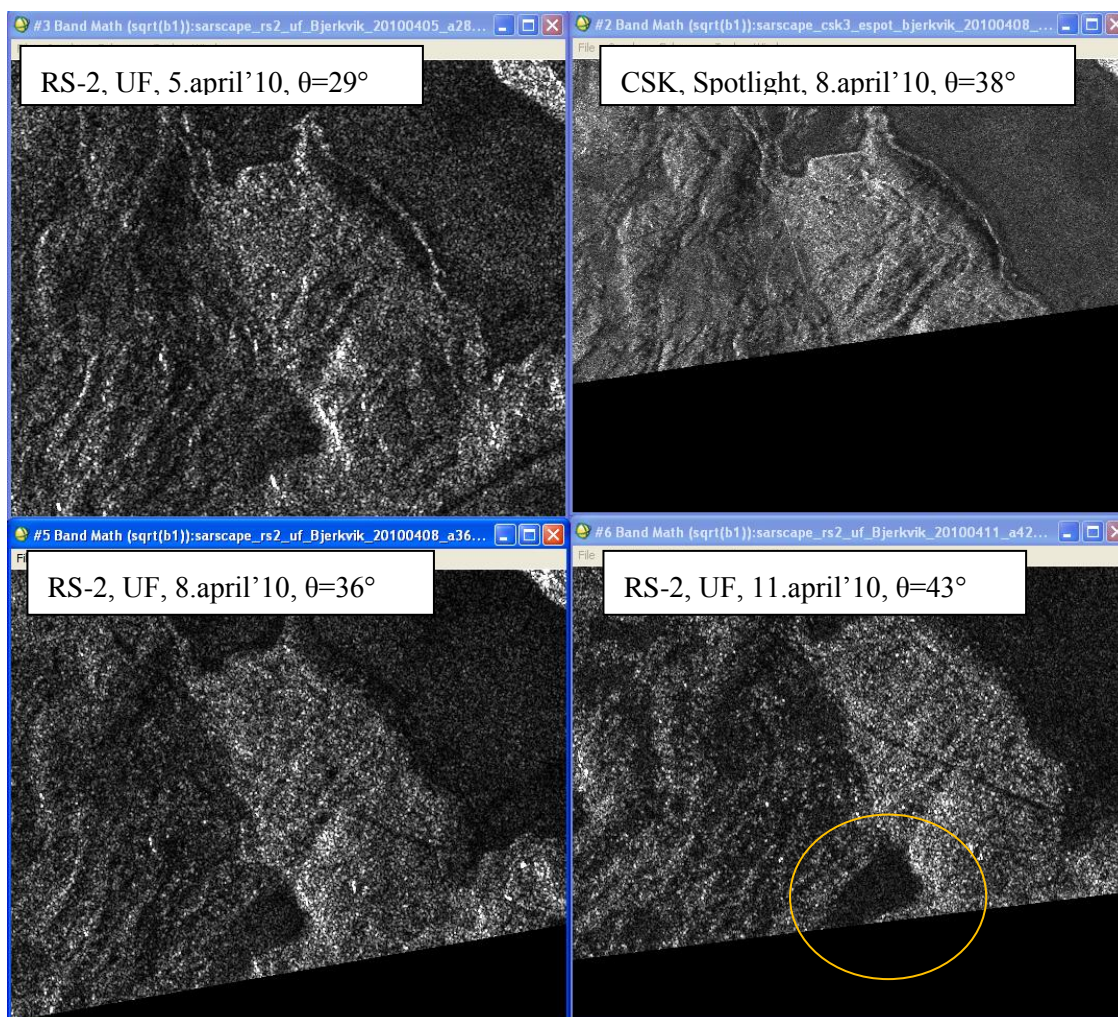


Figur 5.5 Flyfoto over Svartvatn. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

De fire SAR-bildene er vist fram i Figur 5.6. Svartvatnet falt dessverre utenfor sydlig bildekant til CSK-opptaket.

Svartvatnet er synlig som et mørktonet område i alle tre RS2-bildene, men er mest markant ved bildet tatt den 11. april hvor innfallsvinkel var ca. 43 grader. På denne dagen var det antagelig også temperaturer over frysepunktet, noe som gjør at våt snø på åpne flater (vatn og myrområder) vil gi *lav* SAR tilbakespredning. På dette RS2-bildet (bildet nederst til høyre) kan man også se antydning til mørkere områder nord-nordvest fra Svartvatnet. Dette kan være myrdrag som strekker seg i nordvestlig retning.

I RS2-bildene ser vi en lys stripe ned mot Svartvatnet på østlig kant. Dette kan være en skrent. Det er i så fall også en skrent på sørsiden av vatnet. Det kan virke som om skrenter er mest markante med en lys gråtone ved lavere radar innfallsvinkler (med andre ord *mer* markant ved 29° enn ved 36° eller 42°).



Figur 5.6 SAR-bilder over myrdrag nord og nordvest for Svartvatnet (markert med sirkel). Bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)



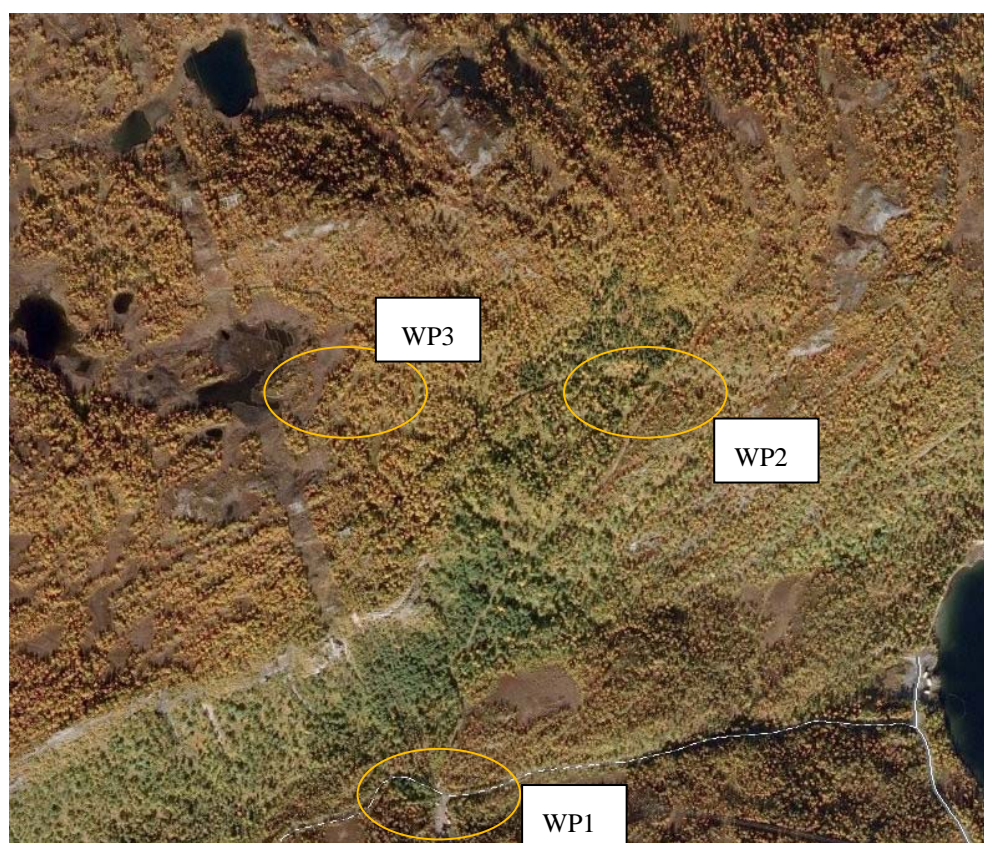
Figur 5.7 Svartvatnet. Foto av myrdrag tatt mot nord (øverst), foto av søndre del av Svartvatnet tatt mot sør (nederst). Fotos: HVS Ingeniør/Milgeo.

5.3 Framkommelighet i bratt terreng - WP1, WP2, WP3

I området vest-nordvest for Store Trollvatnet er det en bratt stigning mot nord som vist i kartutsnittet for WP1, WP2 og WP3, se Figur 5.8 og Figur 5.9.



Figur 5.8 Kart over terrenget for tre steder på stien nordvest for Store Trollvatn som her er angitt som henholdsvis WP1, WP2 og WP3.

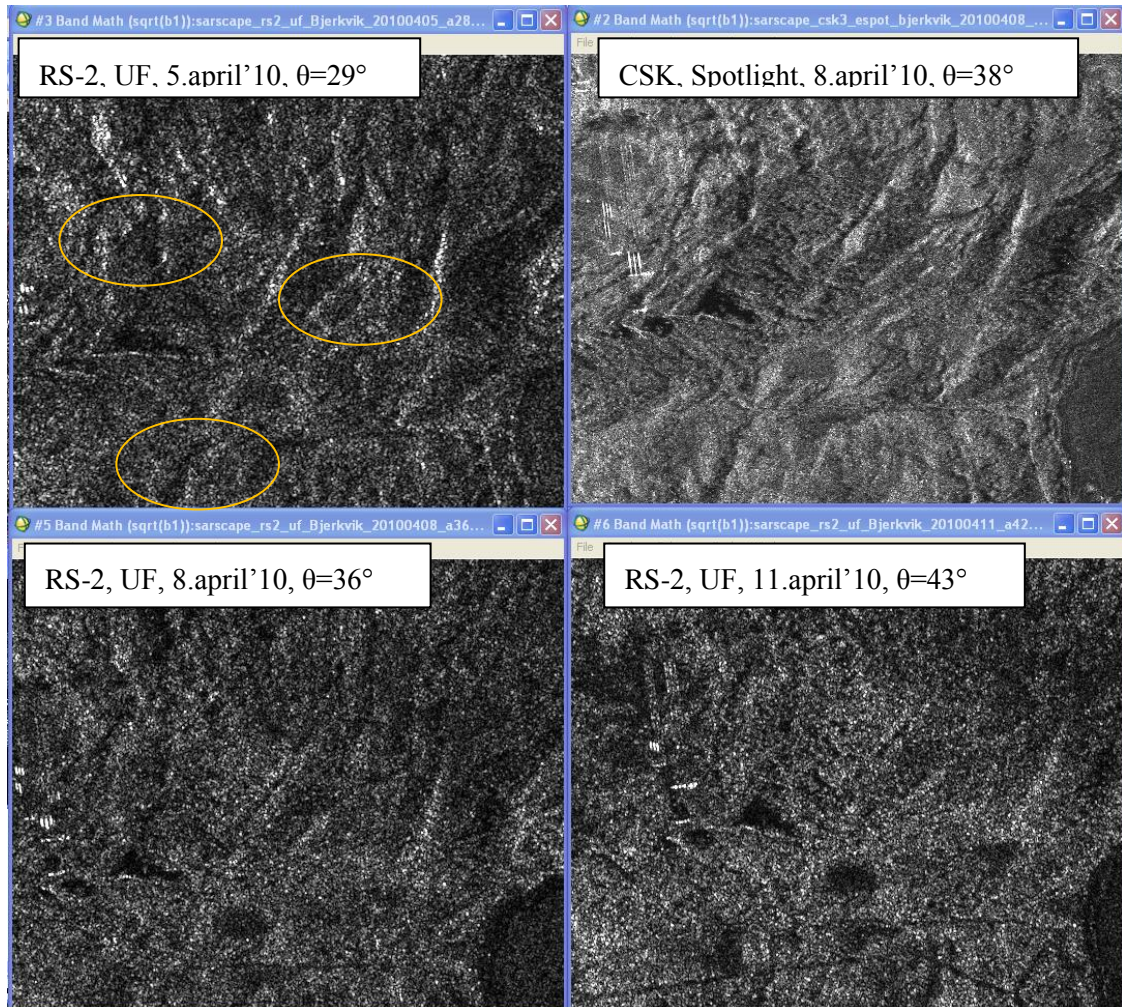


Figur 5.9 Flyfoto fra området med en bratt skråning. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

Det er svært vanskelig å skulle si noe om framkommeligheten i det bratte terrenget ved kun å analysere grånivå og tekstur i de fire SAR-bildene vi har tilgjengelig, se Figur 5.10.

Denne type SAR-bilder gir oss lite informasjon om tettheten til skogen, og stien er heller ikke markant her. Hva vi kan antyde, er at stien må være betydelig smalere enn en kraftgate, for vi kan detektere noen slike kraftgater som mørke linjer i bildet - se særlig RS-2 bildet tatt med 43° innfallsvinkel den 11. april.

Det er en stor kraftlinje som går omtrent i nord-syd retning. Foto av kraftlinjene er vist i Figur 5.11. Deler av denne kraftlinja synes i SAR-bildene ved at vi får et sterkt radar-ekko fra både stolper (enkelt punkt) og selve kablene (lyse linjer parallelt med hverandre). Dette er synlig i både CSK sin X-bånd og RS2 sin C-bånd. Det kan være mulig å beregne høyden på kraftlinjene ved å se hvor mye refleksjonen fra selve kablene er forflyttet i forhold til stolpene. Dette kommer særlig godt fram i CSK-bildet i Figur 5.12 og Figur 5.17.

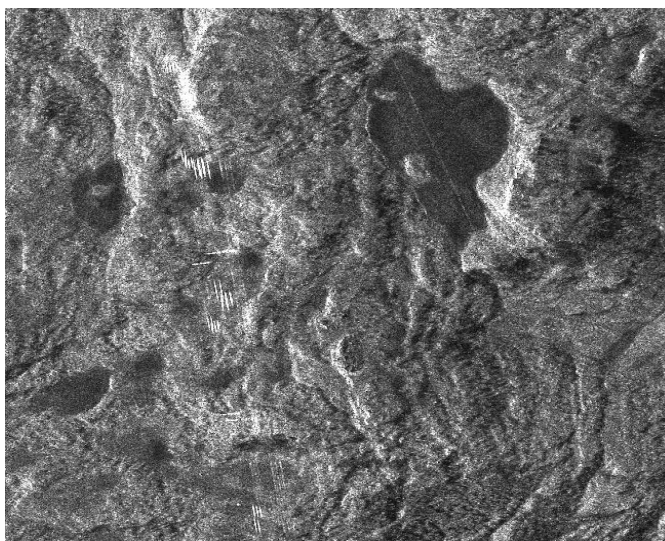


Figur 5.10 SAR-bilder over bratt, sørvendt skråning vest-nordvest for Store Trollvatnet. Plasseringen av de tre interessante punktene langs stien er forsøkt markert med sirkler. SAR-bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product - ASI 2010, distributed by e-GEOS.)



Figur 5.11 Foto av sti mellom WP2 og WP3 (øverst). Foto tatt mot sør fra trasé opp mot WP3 (midten). Foto tatt mot sør litt nord for WP3 (nederst). Fotos: HVS Ingeniør/Milgeo.

En annen interessant observasjon i CSK-bildet i Figur 5.12 er en lys rett linje som går tvers over isen på Rundvatnet. Dette kan skyldes skispor eller snøscooterspor.



Figur 5.12 CSK SAR amplitude bilde fra området vest og sydvest for Rundvatnet. Vi legger spesielt merke til kraftlinjene og et mulig scooterspor på det islagte vannet. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

Vi har lagd et SAR koherensbilde og et SAR interferogram fra området ved hjelp av de to CSK 1-dags opptakene, se bildene i Figur 5.13 og Figur 5.14. Dessverre var det ene CSK-bildet tatt litt langt mot nord slik at WP 1 faller utenfor interferogrammets sydlige grenser, men vi har forsøkt å markere inn plasseringen til WP3 i interferogrammet i Figur 5.14.

Interferogramtypen som er vist fram i Figur 5.14 er et *sammensatt bilde* hvor SAR amplitudebildet ligger i bakgrunnen og hvor SAR koherensbildet angir intensiteten på fargefringene.

SAR koherensbildet tolker vi på følgende måte:

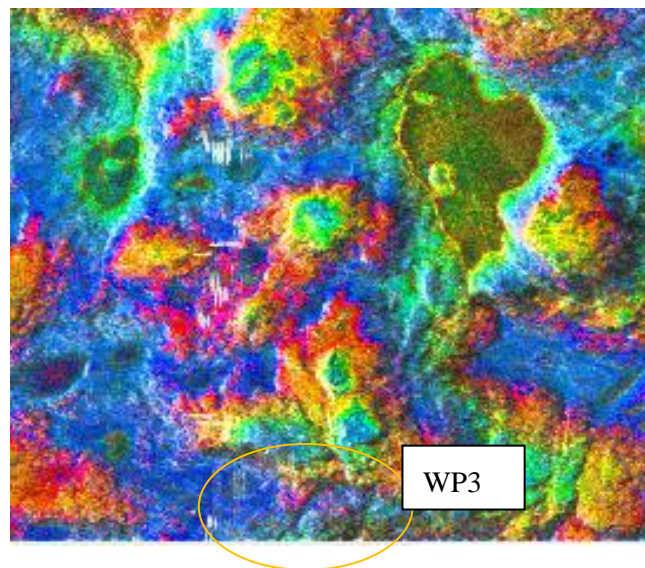
- mørk gråtone betyr lav koherens (dvs lavt 'samsvar') mellom bildeopptakene. Det har altså skjedd en god del *endringer* mellom de to CSK opptakstidspunktene.
- steder med endringer vil gi større unøyaktigheter i DEM'en man eventuelt forsøker å utlede.

Likevel, vi ser at interferogrammet synes å gi stedvis gode høydekoter, men at koherensbildet er mørkt i områder hvor vi har en bratt stigning (se nedre bildekant i koherens-bildet). Det synes derfor noe urealistisk å skulle lage et DEM med 1 m høydenøyaktighet fra CSK SAR interferogrammet i området med WP1, WP2 og WP3, men at potensialet kan være tilstede i andre mer åpne fjellpartier hvor stigningen er slakere.

Vi vil her kort bemerke: man kan utlede en mer nøyaktige DEM i vestvendte eller østvendte skråninger fra interferometriske satellitt SAR opptak dersom man kombinerer opptak som er gjort fra både oppadgående og nedadgående satellittpasseringer.



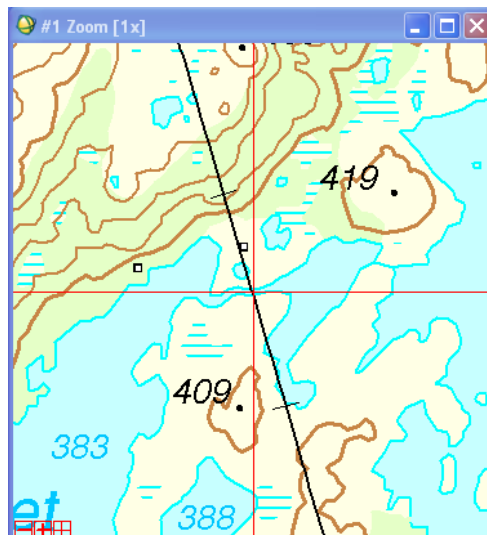
Figur 5.13 CSK SAR koherens bilde fra området vest og sydvest for Rundvatnet. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)



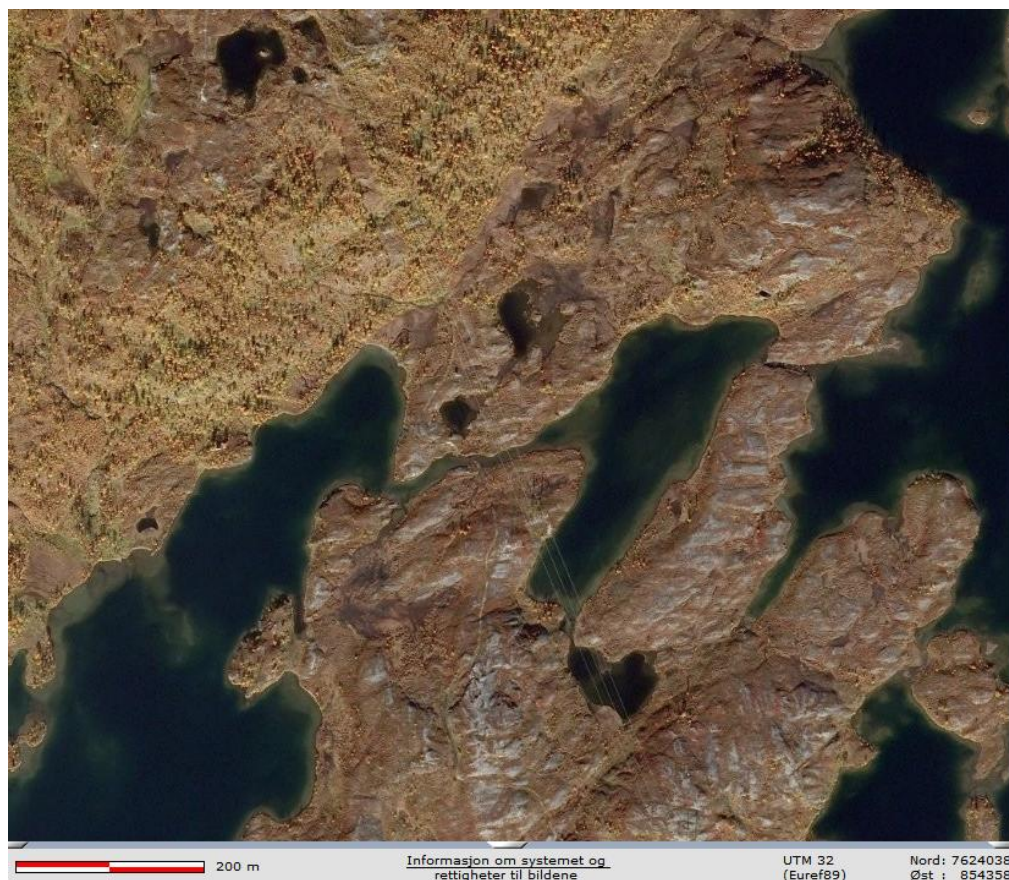
Figur 5.14 CSK interferogram fra området vest og sydvest for Rundvatnet. Denne interferogramtypen er vist fram som et sammensatt bilde hvor SAR amplitudebildet ligger i bakgrunnen og hvor SAR koherensbildet angir intensiteten på fargefringene. Vi legger merke til at de fargekodete fase-fringene til SAR interferogrammet følger godt høydedragene i terrenget. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

5.4 Kryssing av elv – WP4

Det er et krysningspunkt ved en elv som går mellom Høgvatnet og Holmvatnet, se kart og flyfoto i Figur 5.15 og Figur 5.16.



Figur 5.15 Kart fra elvedrag nord i Høgvatnet.

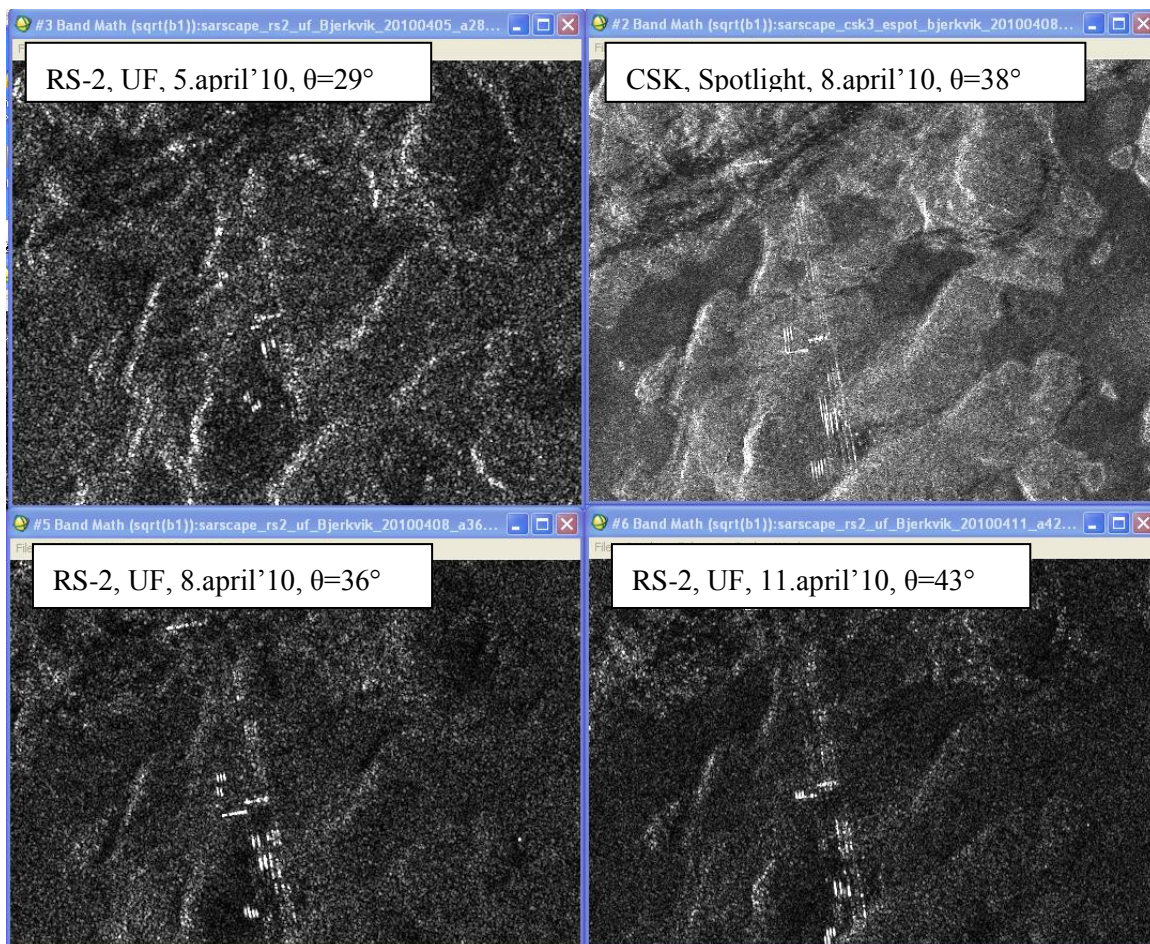


Figur 5.16 Flyfoto fra Høgvatnet. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

Det er svært vanskelig å detektere dette smale elveløpet i Radarsat-2 bildene, - selv ved høyere innfallsvinkler blir ikke dette bedre, se Figur 5.17.

Det er vanskelig å skulle si noe om tilstanden til elven ved å se på CSK-bildet, men når elven fremstår med en litt annen gråtone og tekstur enn områdene rundt, så kan det tyde på at den fremdeles er markant i terrenget (selv om det er snø der): det kan tyde på at elven har andre radar-tilbakespredningsegenskaper enn den omkringliggende overflaten til vannene.

Kraftlinjer og stolper er godt synlig i CSK-bildet, men også i RS-2 bilder tatt med høyere radar innfallsvinkel.

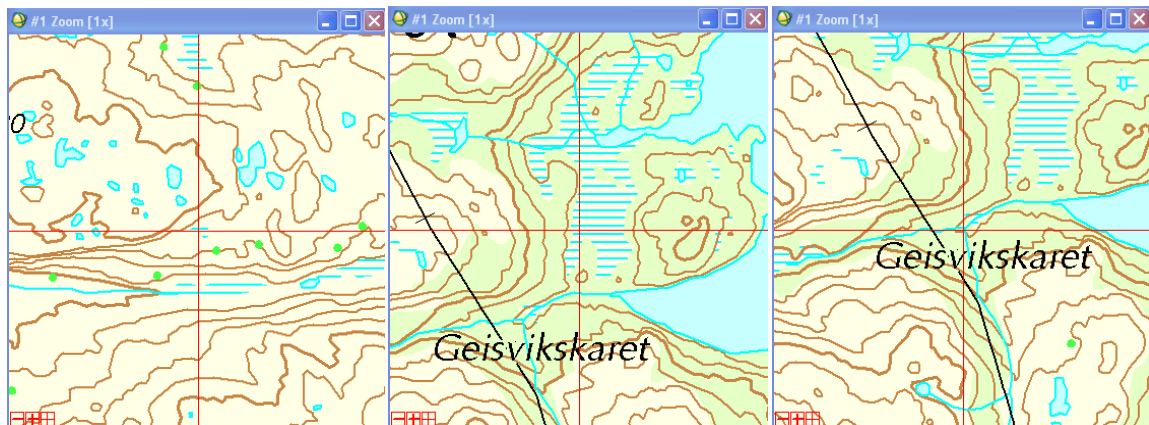


Figur 5.17 SAR-bilder over elveløp ved Høgvatnet. SAR-bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

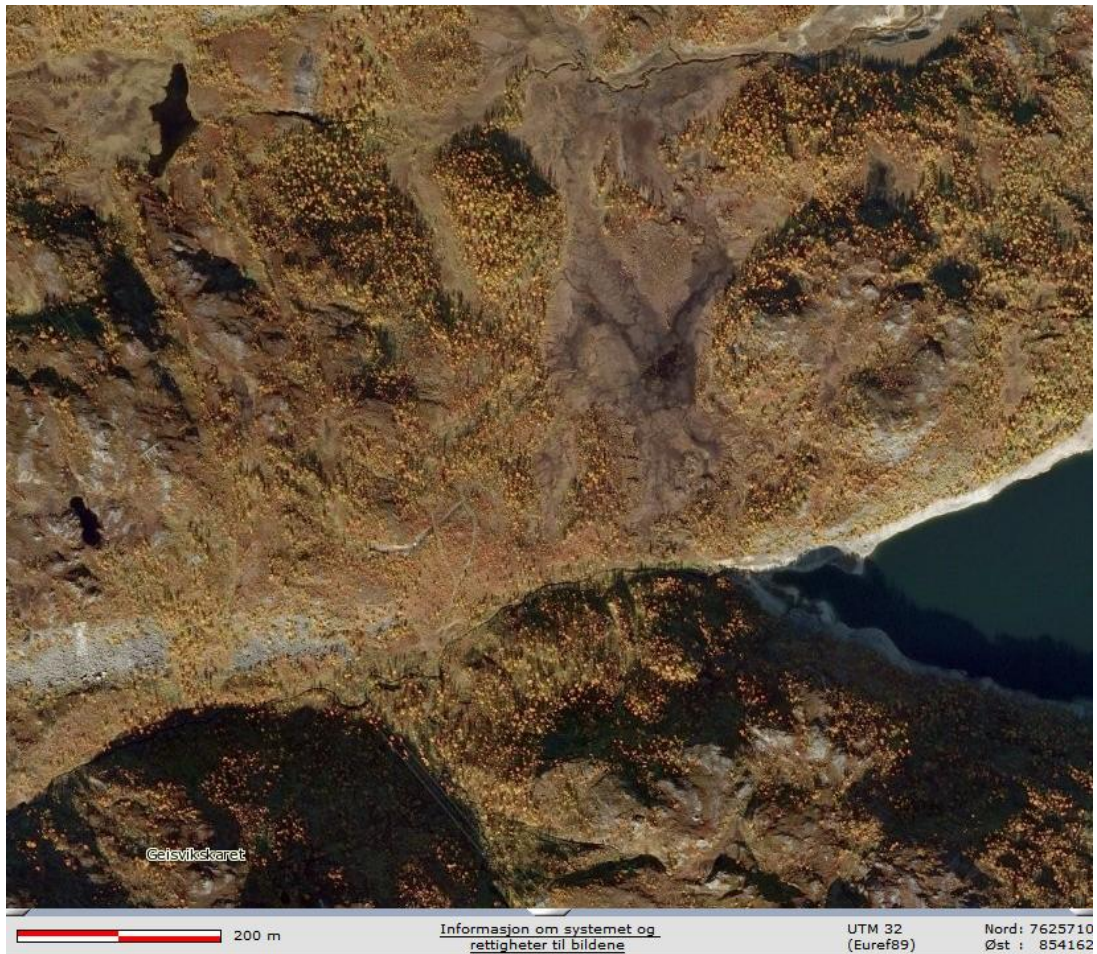


Figur 5.18 Foto tatt i østlig retning ved krysningspunkt for WP4 nordøst på Høgvatnet. Foto: HVS Ingeniør/Milgeo.

5.5 Myr og Bekkekryss – WP5, WP6 og WP7



Figur 5.19 Kartutsnitt over to myrområder og ett bekkekryss (WP7).



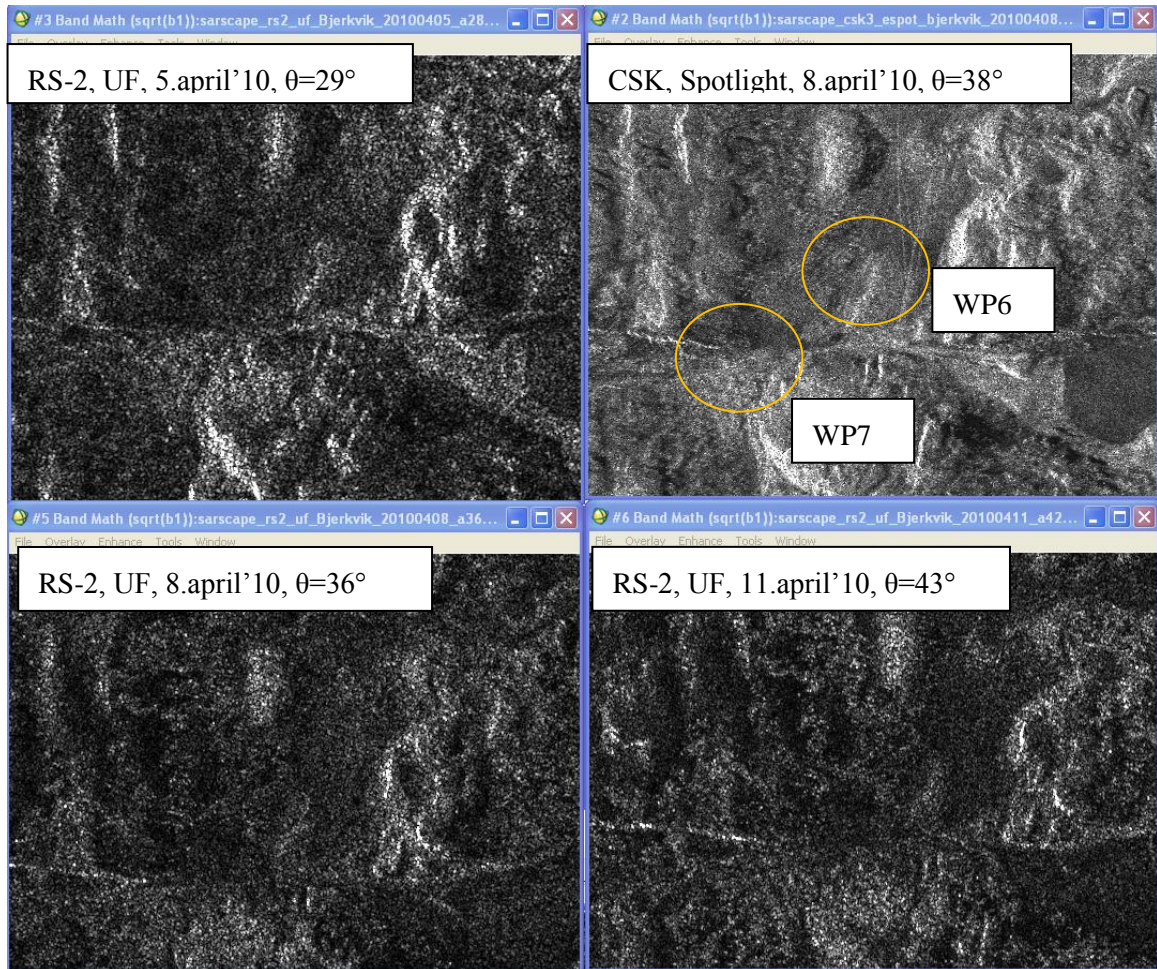
Figur 5.20 Flyfoto over Geisvikskaret. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

Myr:

Det er vanskelig å tolke Radarsat-2 SAR-bildene i Figur 5.21 annet enn at det synes å være en noe mørkere gråtone der det er store, åpne flater. Dette kan tyde på en stabil situasjon. I CSK bildet kan vi se noen lyse striper som strekker seg i nordlig retning over myrområdet. Dette kan tolkes som scooterspor eller skispor, og kan tyde på at noen har vært der og at det er god framkommelighet på dette stedet.

Bekkekryss:

Dette krysset er vanskelig å finne igjen i SAR-bildene.

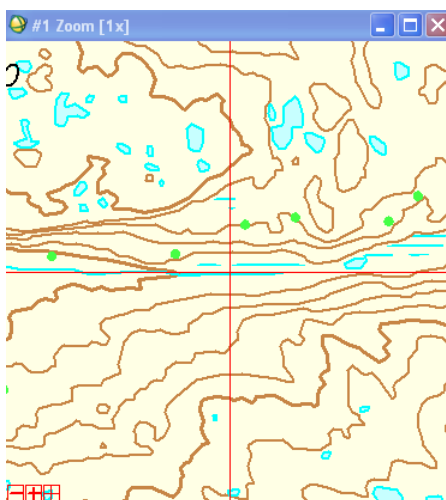


Figur 5.21 SAR-bilder over noen myrområder og et bekkekryss. SAR-bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)



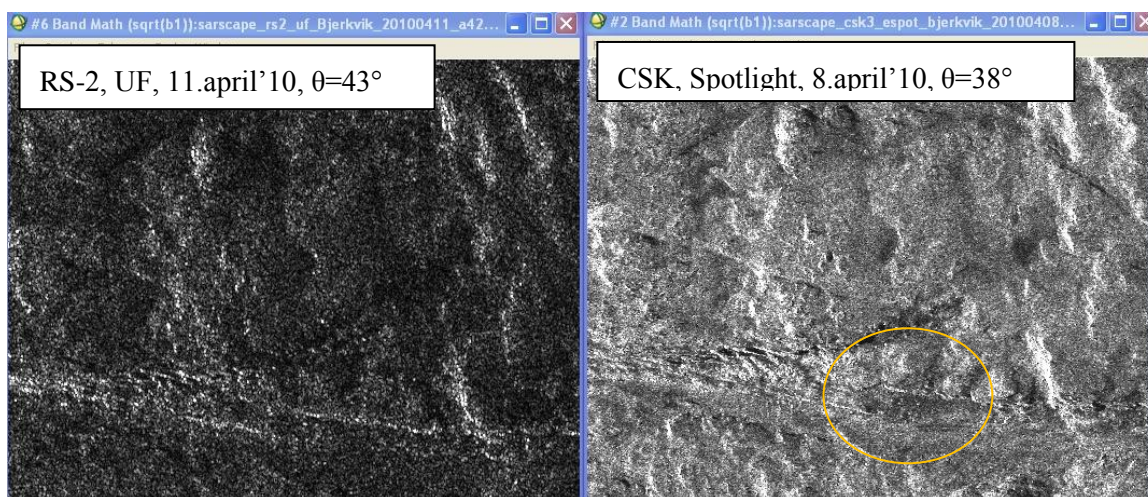
Figur 5.22 Foto av myrdrag ved WP6 tatt mot sør (øverst). Foto av bekkekryss ved WP7 tatt i retning nord-nordvest (nederst). Fotos: HVS Ingeniør/Milgeo.

5.6 Myr – WP 8



Figur 5.23 Kartutsnitt over et myrområde i et lite dalføre.

To av satellitt SAR-bildene er vist fram i Figur 5.24. CSK bildet til høyre antyder at det er forskjellig tilbakespredning fra overflaten i området. Dette kan skyldes forskjellig type vegetasjonsdekke på myrområdet sammenlignet med områdene rundt (eks. busker/trær/skog). Myrområdet ser altså ut til å gi en noe *mørkere* gråtone enn omgivelsene rundt, noe som antyder en jevnere flate dersom overflaten (snøen ?) er fuktig/våt.



Figur 5.24 SAR-bilder over et myrområde i et lite dalføre. SAR-bildene er tatt i april 2010.
(Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

5.7 Myr – WP11



Figur 5.25 Kartutsnitt over myr øst for Hartvikvatnet, og like sør for Vassdalen.

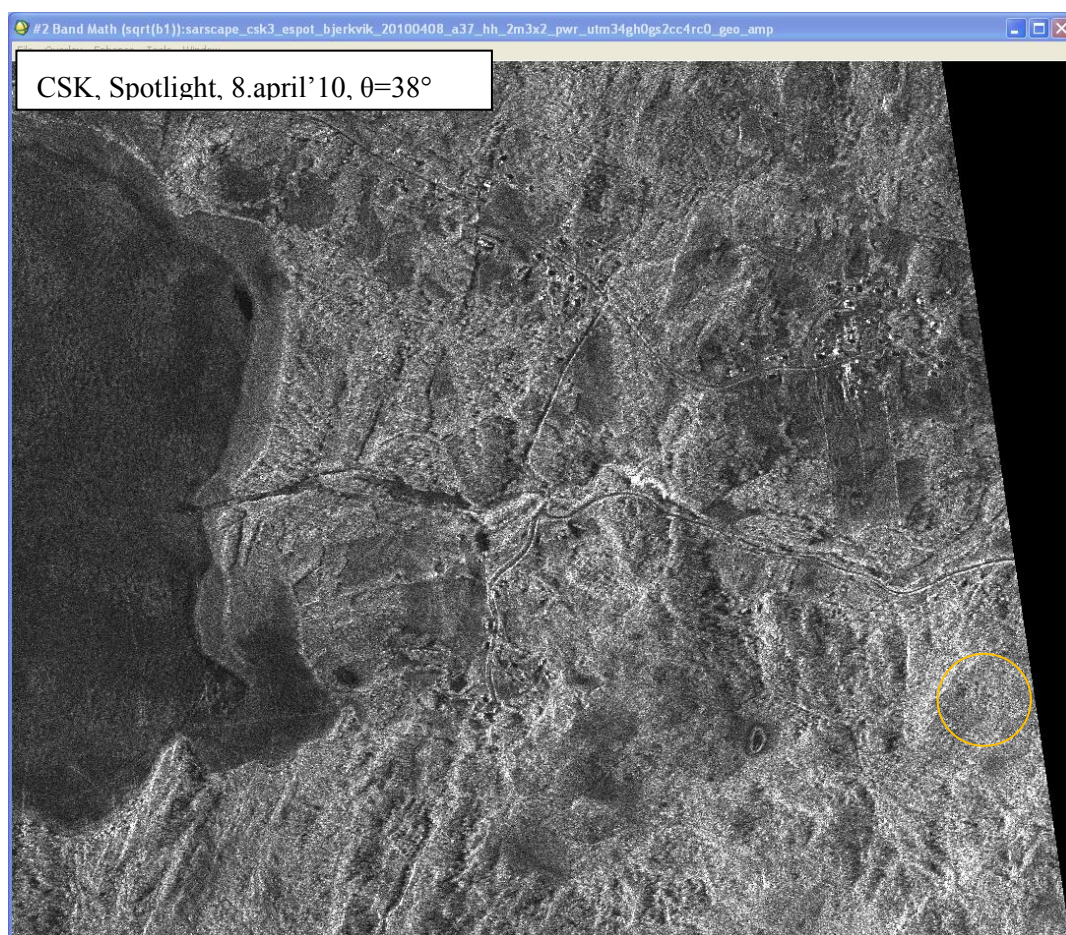


Figur 5.26 Flyfoto fra skogsområde syd for Vassdalen. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

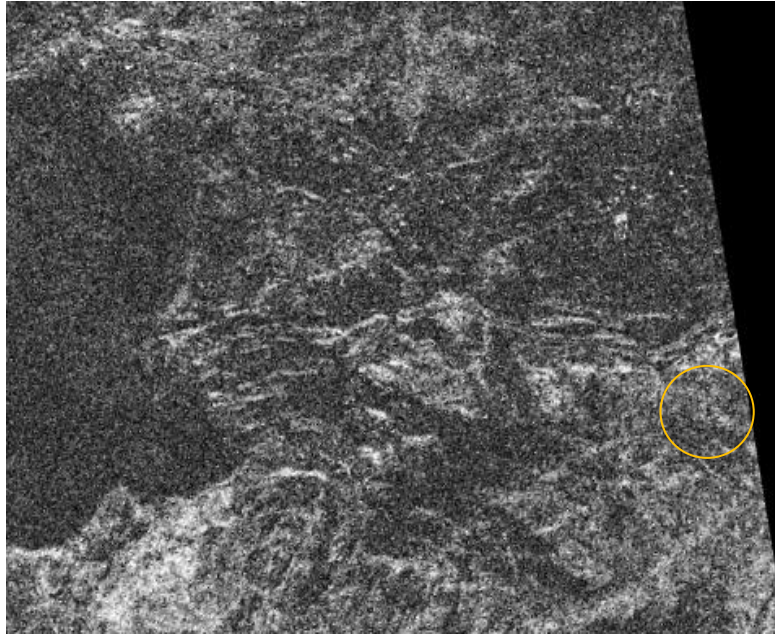
Denne myra er ikke synlig på verken CSK eller Radarsat-2 bildene, se henholdsvis Figur 5.27 og Figur 5.29. Derimot er andre myrer like vest av denne, synlig i form av en mørkere gråtone i forhold til omgivelsene sine. Det er da nærliggende å tro at myra ved WP11 er delvis gjengrodd, eller at den har fått en beskaffenhet som er mer eller mindre lik terrenget rundt, mens de andre myrene i området skiller seg ut fra terrenget omkring på en mer markant måte (ikke bare radar-ekko messig, men også i form av hva som befinner seg der rent fysisk).

Et utsnitt fra CSK SAR koherensbildet er vist i Figur 5.28. Det er tydelig at det er mange områder med relativt lav koherens (lite samsvar) når man sammenligner opptak fra den 7. og 8. april 2010. Årsaken til dette kan være at terrenget er dekket av snø, og at fasen i radarsignalet opplever en endring som skyldes avsmelting eller fryseprosesser i snøpakka. Den markerte myra (WP11) har koherensverdier som varierer fra 0.1 til 0.4. Dette er relativt lavt.

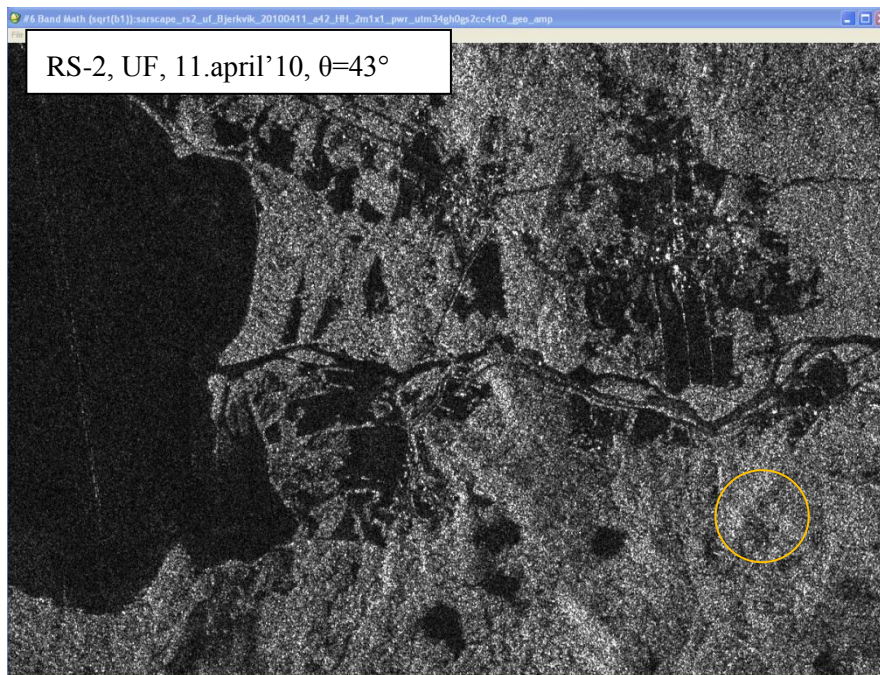
CSK SAR-bildet viser for øvrig et interessant sirkelformet ekko i randsonen til en annen myr (lenger vest) som har et lite vatn inni seg.



Figur 5.27 CSK SAR-bilde tatt den 8. april 2010. Plasseringen av myrområdet (WP11) litt sør i Vassdalen er markert med sirkel. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product - ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

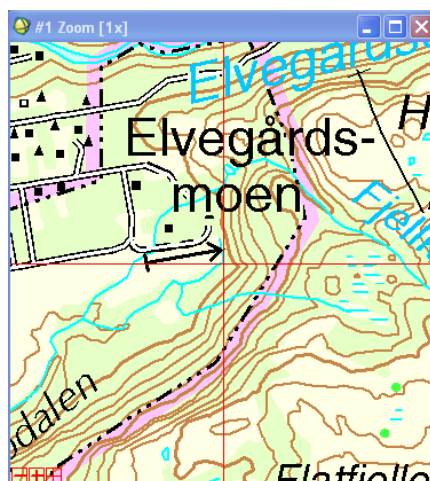


Figur 5.28 CSK SAR koherensbilde fra april 2010. Plasseringen av myrområdet (WP11) litt sør i Vassdalen er markert med sirkel. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product - ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

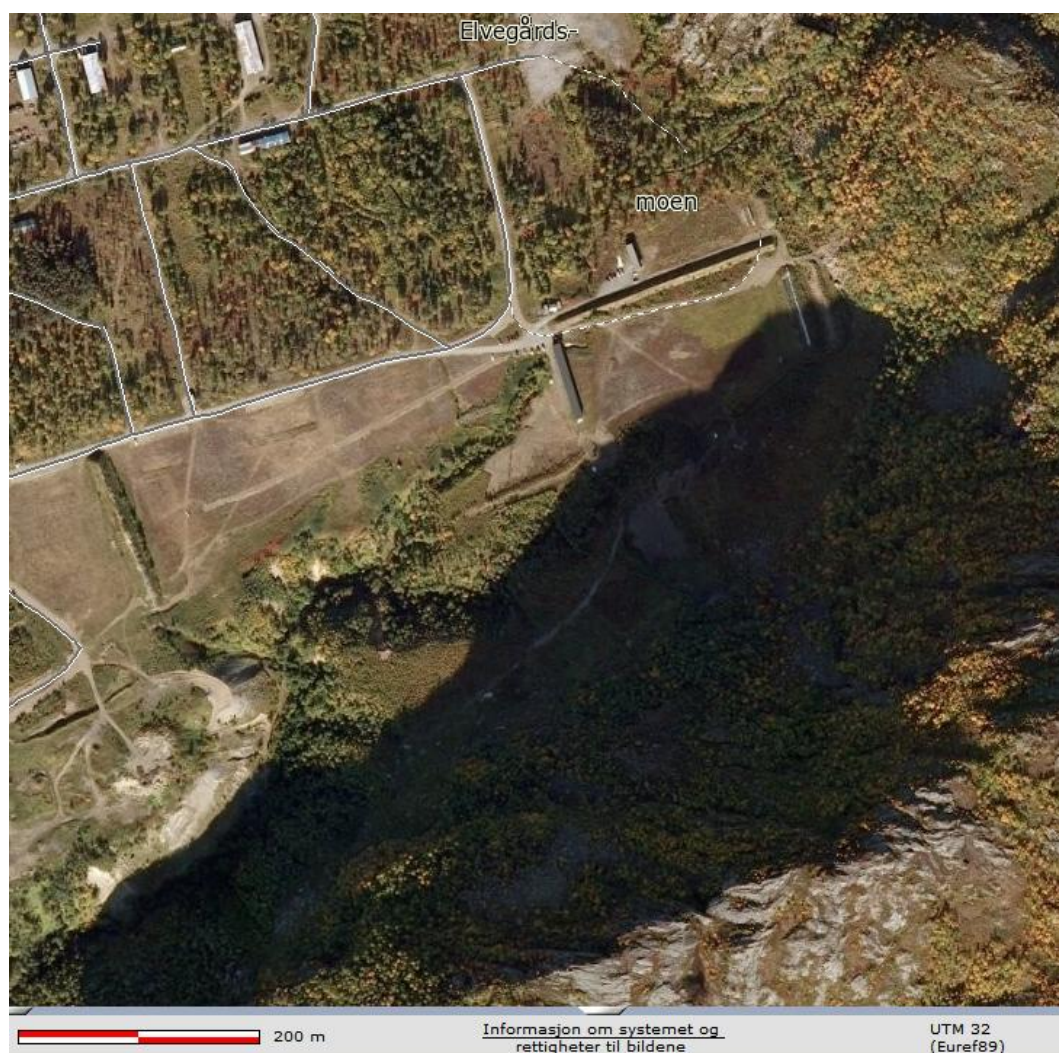


Figur 5.29 Radarsat-2 bildet fra den 11. april 2010 viser tydelig lav tilbakespredning fra en rekke åpne jorder, - men også myrområder. Fra dette kan vi tolke at myrområdene ikke er gjengrodd med vegetasjon som busker og trær, men at de er åpne, og at den våte, jevne snøoverflaten reflekterer vekk radarsignalet. Plasseringen av myrområdet (WP11) er markert med sirkel. Denne myra har en annen beskaffenhet enn de andre myrområdene. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010.)

5.8 Anleggsvei – WP 9



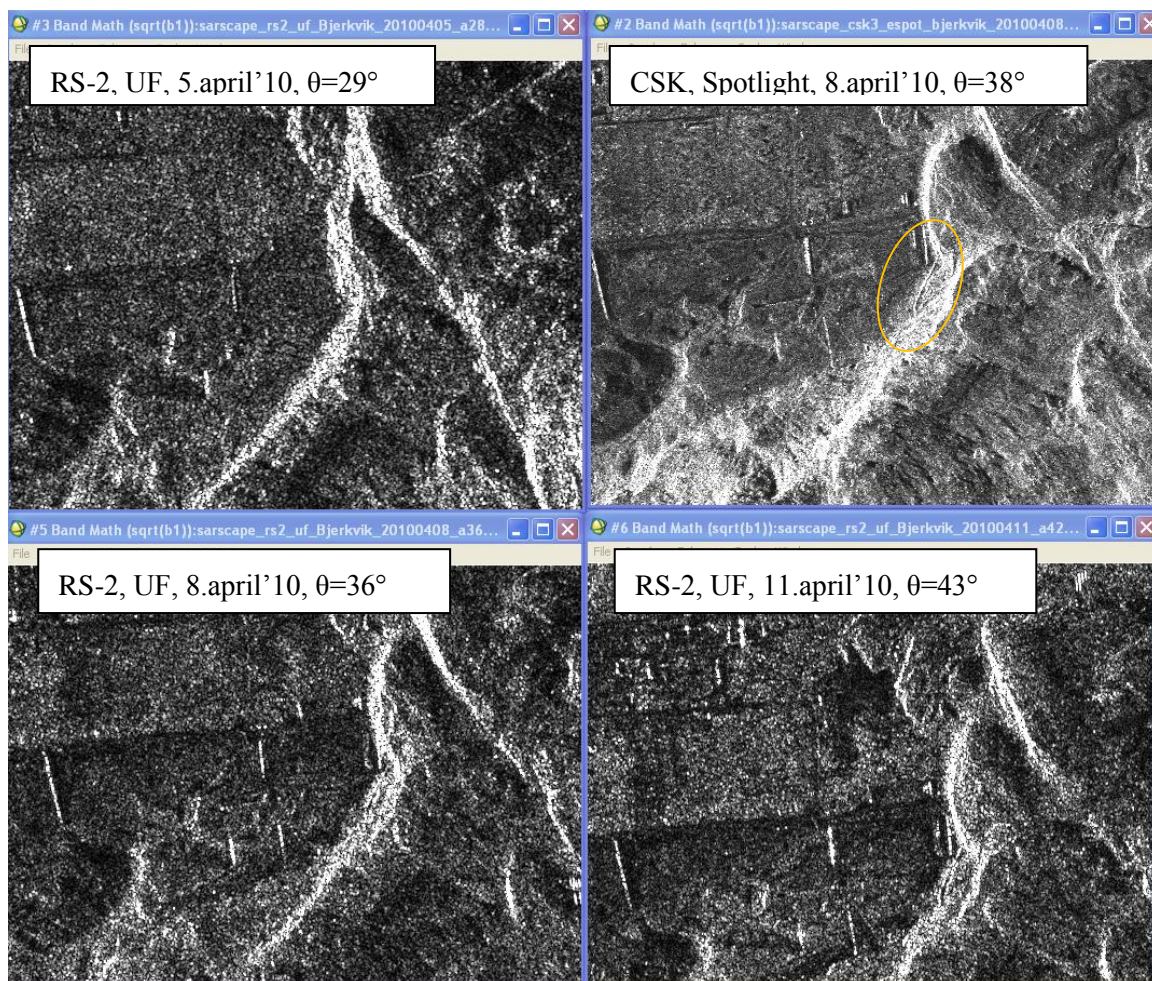
Figur 5.30 Kartutsnitt over Elvegårdsmoen sydøst for Bjerkvik sentrum. Det markerte krysset viser hvor den nye anleggsveien skal finne seg.



Figur 5.31 Flyfoto fra Elvegårdsmoen sydøst for Bjerkvik. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

Den nye anleggsveien i dette området skal ligge like innunder et bratt fjellparti. Alle SAR opptakene er gjort i oppadgående passering mens radarinstrumentet har sett ut til høyre for seg (tilnærmet sett mot østlig retning). Det betyr at mye av fjellpartiet oppover skråningen rett øst for anleggsveien kan ha blitt foldet over veien. Hvis dette er tilfelle, vil vi ikke få ut noen informasjon fra stedet.

Ved å studere CSK-bildet i Figur 5.32, kan det se ut som om det er en linjestruktur som går mot nord-nordøst. Dette *kan* være anleggsveien. Samme struktur er også synlig i Radarsat-2 bildene tatt med 36° grader og 43° innfallsvinkel (bildene henholdsvis nederst til venstre og nederst til høyre i Figur 5.32). Disse strukturene er nesten umulig å oppdage om vi ikke på forhånd visste at vi skulle undersøke dette området spesielt for nettopp slike rette strukturer.



Figur 5.32 SAR-bilder over mulig anleggsvei ved Elvegårdsmoen. SAR-bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

5.9 Hallarneset - WP10



Figur 5.33 Kartutsnitt over Hallarneset i Hartvikvatnet.



Figur 5.34 Flyfoto fra Hallarneset i Hartvikvatnet. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

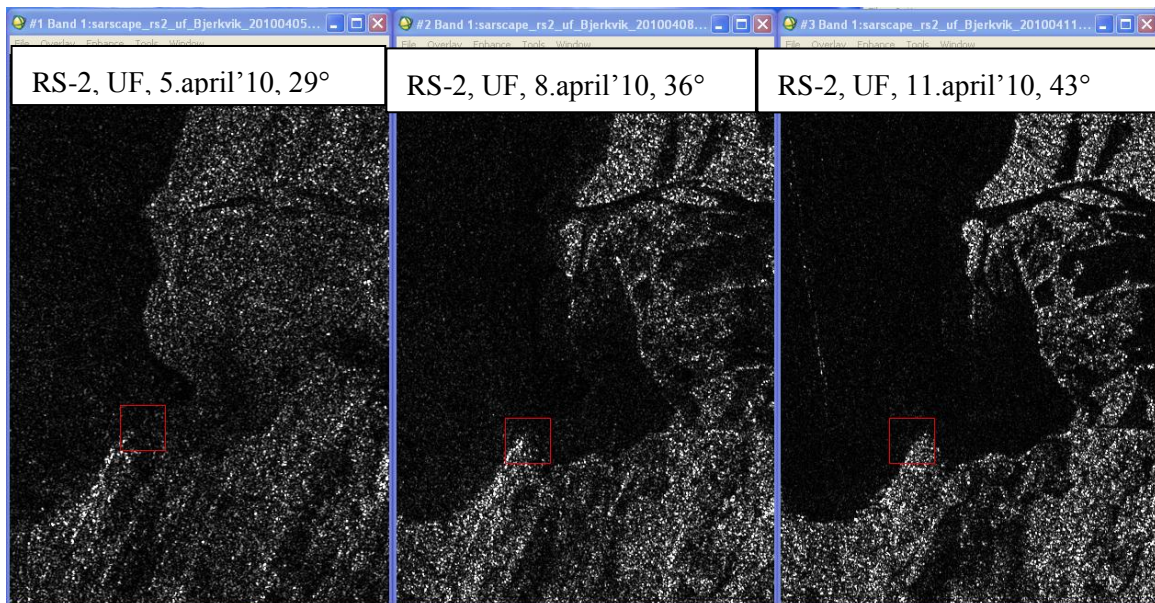
Hallarneset er best synlig ved de høyere SAR innfallsvinkler, se Figur 5.35.

Det er tydelig forskjell i SAR tilbakespredning fra deler av vatnet langs strandkanten inn mot Bakkejorda og Sørgård. Dette kan skyldes varierende fuktighetsforhold som en følge av avsmelting disse dagene i april.

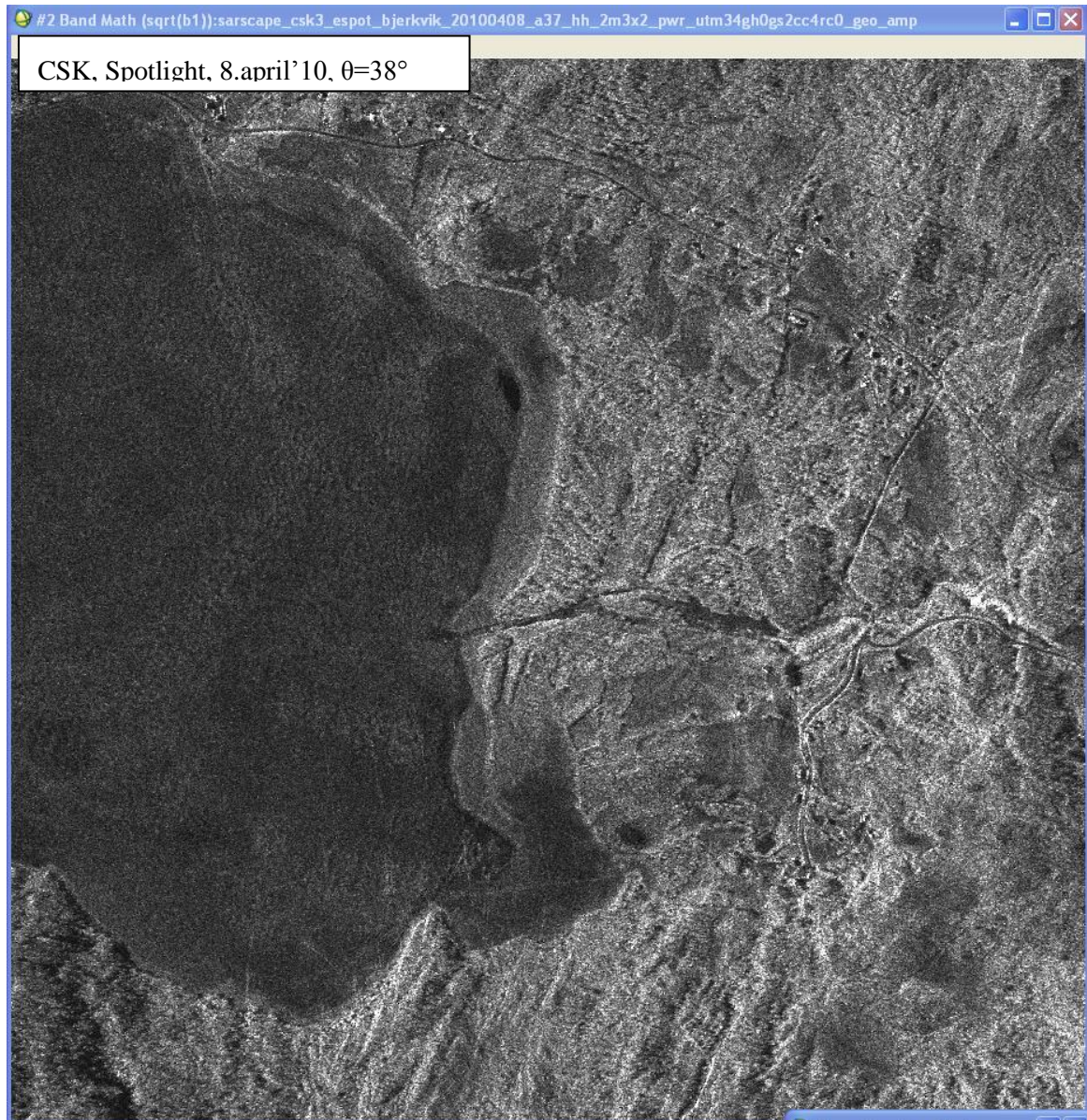
Jordene gir et spesielt lavt SAR ekko ved Radarsat-2 opptaket den 11. april. Opptaket denne dagen ble også gjort med den høyeste innfallsvinkelen. Erfaring fra opptak andre steder på denne årstiden kan tyde på at jordene er dekket av våt snø på denne dagen. Opptak som er gjort når jordene er dekket av våt snø, gir en god kontrast til omkringliggende vegetasjon og skog, - som da får (relativt sett) en mye høyere SAR tilbakespredning enn jordene.

I CSK-bildet i Figur 5.36 og det ene Radarsat-2 bildet i Figur 5.35 er det også antydning til scooterspor på det islagte vannet.

Veier og veikryss kan ses godt i CSK-bildet. De lyse kantene langs flere veier kan skyldes grove snøfonner etter brøyting.



Figur 5.35 Radarsat-2 SAR-bilder over Hallarneset og det omkringliggende landskapet. SAR-bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010.)



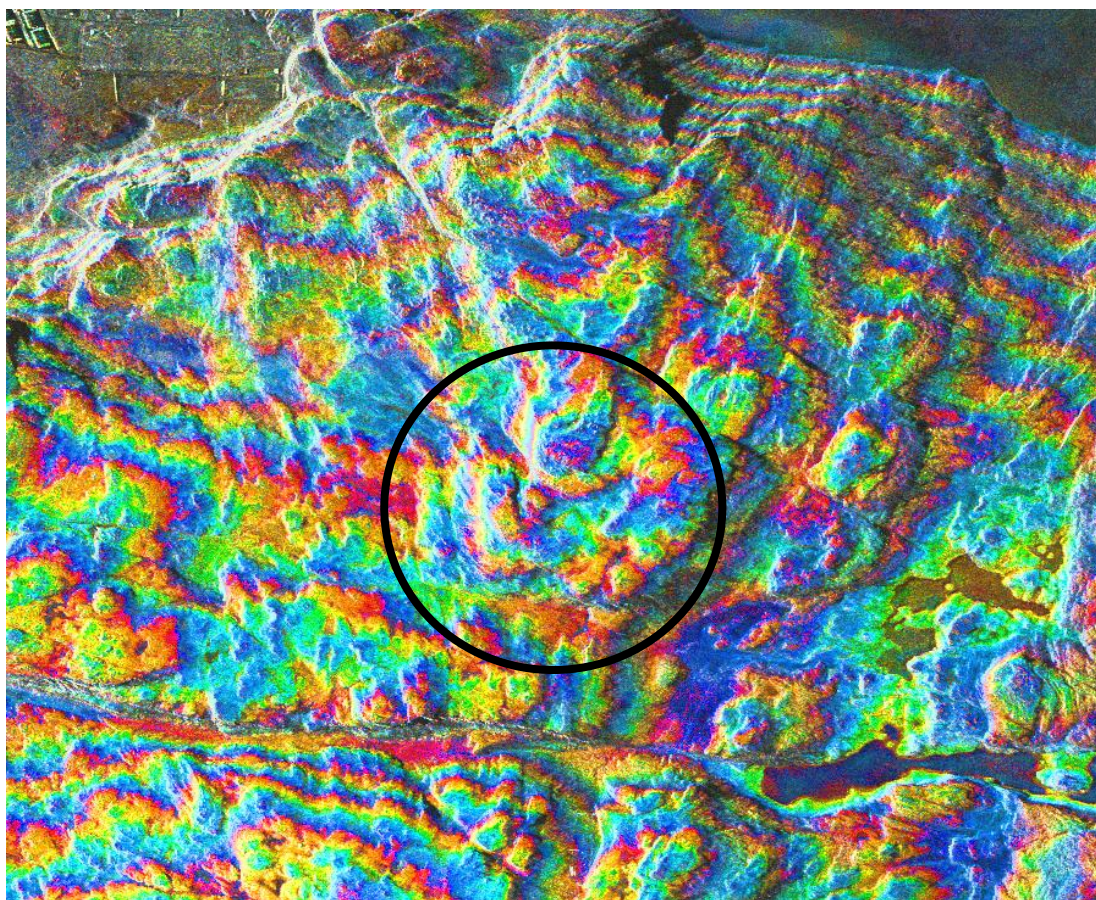
Figur 5.36 CSK bildet viser Hallerneset tydelig. Det er også antydning til scooterspor på det islagte vannet. Veier og veikryss kan ses. De lyse kantene langs flere veier kan skyldes grove snøfonner etter brøyting. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

5.10 Fjelltopp – WP 13



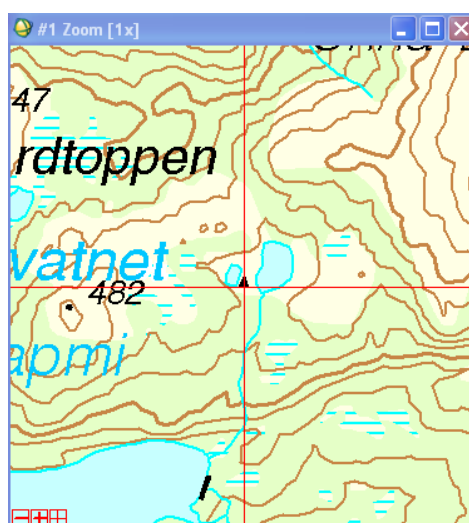
Figur 5.37 Kartutsnitt som viser Vasslitinden med omkringliggende område.

Vasslitinden er godt synlig i SAR-bildene. Fjelltoppen har god SAR koherens, og CSK interferogrammet gir derfor relativt gode "høydekoter", se Figur 5.38. Kvaliteten av utledet DEM fra interferogrammet er ennå ikke sjekket med andre kilder.



Figur 5.38 CSK SAR interferogram over fjellheimen med Vasslitinden. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

5.11 Hytte - WP12



Figur 5.39 Kartutsnitt nordøst for Fiskelausvatnet hvor det er markert inn hytte.

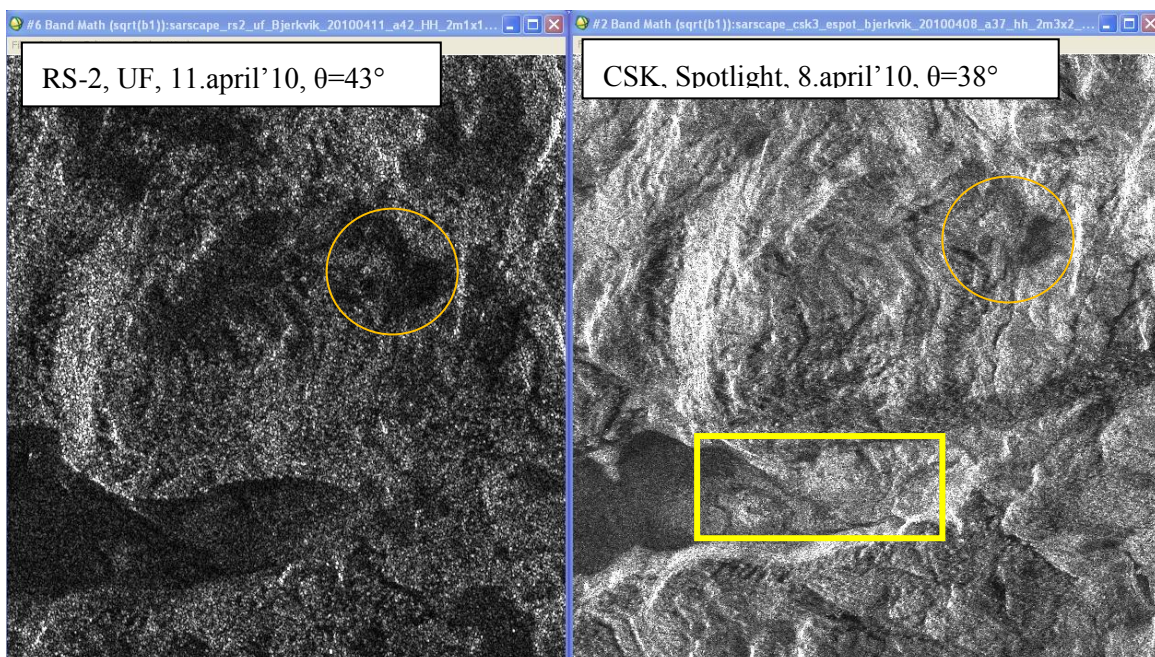


Figur 5.40 Flyfoto nordøst for Fiskelausvatnet. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

Det er ikke lett å si at det er en hytte mellom de to små vatna ved å studere Radarsat-2 bildet, se venstre bilde i Figur 5.41. I CSK-bildet derimot, er det 2-3 lyse, små punkt (kommer ikke helt tydelig fram i utskriften som vises i Figur 5.41) som kan skrive seg fra en hytte eller menneskelagde objekter plassert ved hytta.

Den sikreste måten å finne ut om slike lyse punkt stammer fra menneskelagd aktivitet, er å gjøre gjentatte opptak fra noen utvalgte vinkler, og så undersøke om punktene varierer i styrke etter naturlige årstids- og vegetasjonsvariasjoner. Dette kan bli svært ressurskrevende dersom man må gjøre opptak med *mange* høyoppløsnings satellitt SAR-bilder.

Det er interessant å legge merke til at Fiskelausvatnet er sterkt nedtappet ved dette tidspunktet i begynnelsen av april 2010. Vi kan se en god del fjellpartier komme til syne i CSK bildet,- se firkant markert inn i bildet i Figur 5.41. Dette er tydeligere i CSK sin X-bånd radar (3 cm bølgelengde) enn i Radarsat-2 sin C-bånd radar (6 cm bølgelengde). Denne nedtappingen av dammen er kommentert ytterligere i kapittel 5.13.



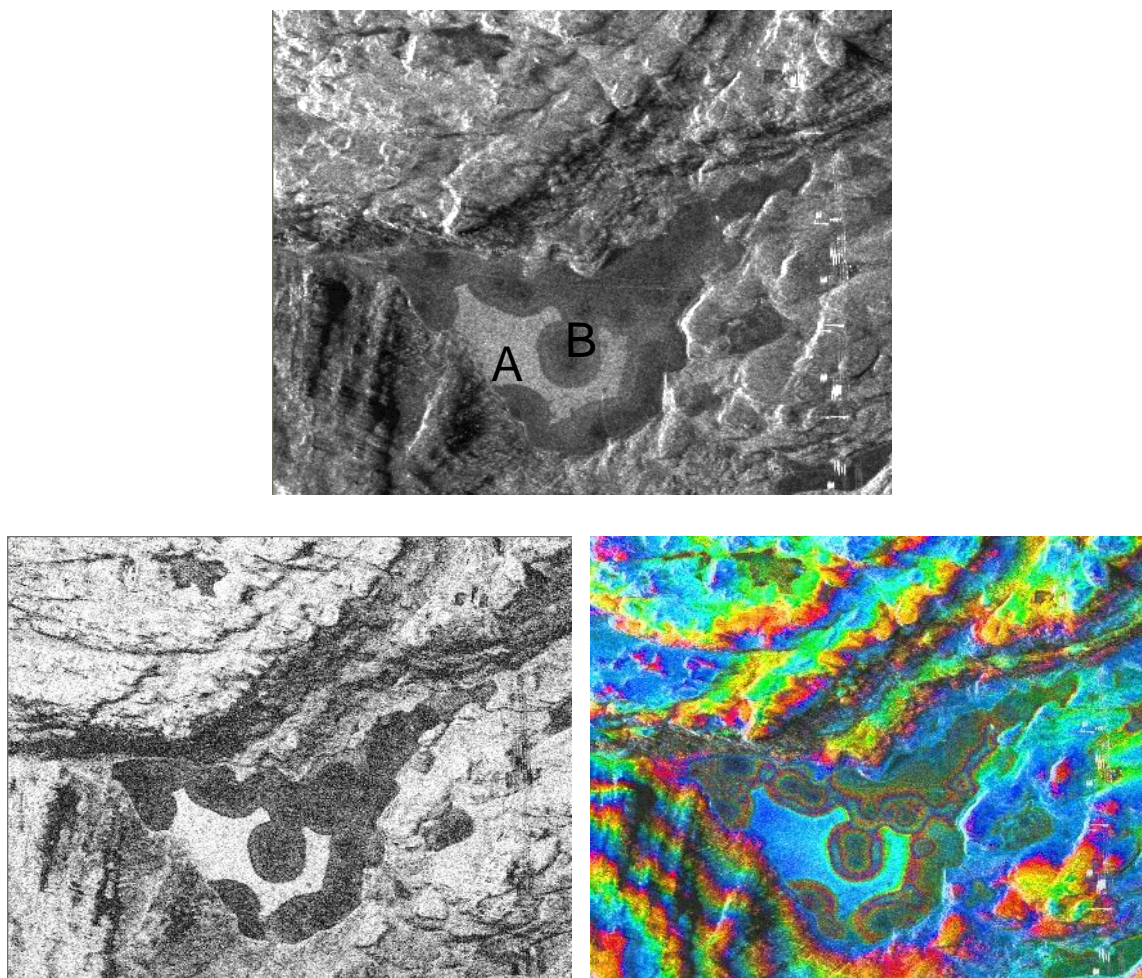
Figur 5.41 SAR-bilder over et fjellparti med vatn og ei hytte (området som er markert med sirkel). Fjellparti kommer til syne (markert med firkant) som et resultat av lavere vannstand i den regulerte dammen. SAR-bildene er tatt i april 2010. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010. CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

5.12 Sirkler på islagt vatn

Vi har registrert et merkelig fenomen på Høgvatnet. Det fremkommer noen sirkelformede strukturer i CSK SAR-bildene tatt både den 7. og 8. april 2010.

SAR amplitudebildet fra den 7. april er vist fram øverst i Figur 5.42. Som beskrevet i kapittel 2.4, så kan den relativt *høye tilbakespredningen* fra deler av vatnet bety at området (markert med 'A' i figuren) har en mer ujevn overflate eller tørr og kompleks volumstruktur, enn området rundt ('B') som her gir en *lavere tilbakespredning*.

Disse strukturene viser seg også å ha høy SAR koherens (et snitt på > 0.55) og lav koherens (et snitt på < 0.25 , som da antyder store endringer i den interferometriske fasen) over henholdsvis 'A' og 'B', se nedre venstre bilde i Figur 5.42.



Figur 5.42 Sirkelformede strukturer detektert i CSK SAR opptak over Høgvatnet i april 2010. Midten øverst: SAR amplitude bilde. Venstre nede: SAR koherensbilde. Høyre nede: SAR interferogram iblandet informasjon fra amplitude- og koherensbilde. Bildene ligger i sin opprinnelige radar opptaksgeometri. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

Det er uvisst hva disse sirkelformede strukturene (synlig i amplitude- og koherens-bildene) skyldes, men det er nærliggende å tro at det er knyttet opp mot naturlige fryse/tine prosesser over tid på det islagte vannet. Slike prosesser kan ha gjort strukturen grovere der det er høy tilbakespredning sammenlignet med overflaten rundt.

Vi spekulerer da på om isen er bunnfast der hvor det er en høyere tilbakespredning, også fordi koherensen er såpass god (altså: lite endring) mellom de to CSK SAR opptaksdatoene. Strukturen som kommer frem i bildene kan dermed muligens gjenspeile en grunnere bunntopografi i dette område av dammen.

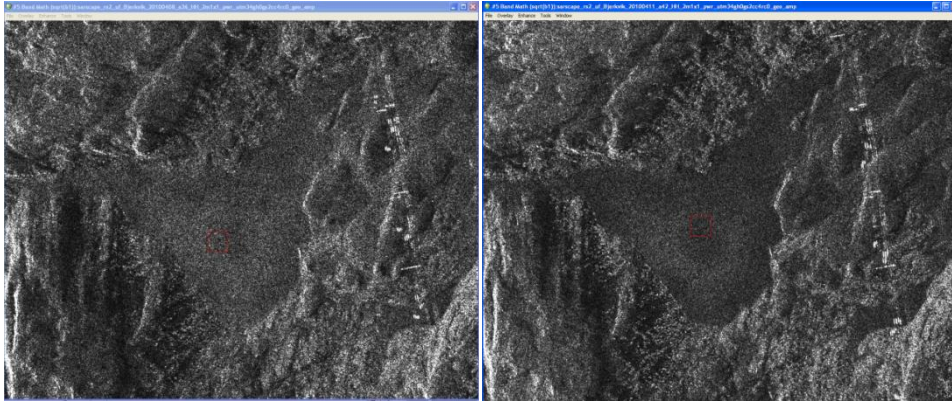
Disse antagelsene styrkes gjennom analysen av det tilhørende SAR interferogrammet:

- Det er intet fringe-mønster der det er høy koherens ('A'), men fase-fringene holder en jevn, blå fargetone. Dette betyr at topografien er nærmest flat, og at det er ingen bevegelse i underlaget i løpet av ett døgn.
- Vi observerer derimot et fringe-mønster ute på vannoverflaten i de områdene som har relativt lav koherens ('B'). Det er da nærliggende å tro at disse SAR fase-fringene skyldes millimeter (eller cm) endringer i høyden på overflaten.

Dette gir oss en mistanke om at dammen er tappet ned, kanskje et par cm, mellom CSK opptaket den 7. og 8. april 2010, og at dette er merkbart i den "mørke" delen av vatnet.

Når vi så studerer Radarsat-2 SAR-bildene som er tatt den 8. april og 11. april 2010 (se Figur 5.43), ser vi at sirklene så og si er fraværende – men, med litt godvilje, så *kan* vi faktisk også her se antydning til en sirkulær, litt mørkere struktur der hvor den største, mørke sirkelen fremkommer i CSK-bildet.

Det virker altså som om det er forskjellig struktur på is/snø overflaten (eller is/snø pakka) på vannet, men at dette fremkommer best ved CSK sin 3 cm radar bølgelengde sammenlignet mot Radarsat-2 sin 6 cm bølgelengde.



Figur 5.43 Radarsat-2 SAR amplitude bilder fra Høgvatnet tatt den 8. april (venstre) og den 11. april (høyre) 2010. Disse SAR-bildene er geokodet til UTM projeksjon og lagt ut på et 2x2 meter grid. (Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010.)

5.13 Nedtapping av damanlegg

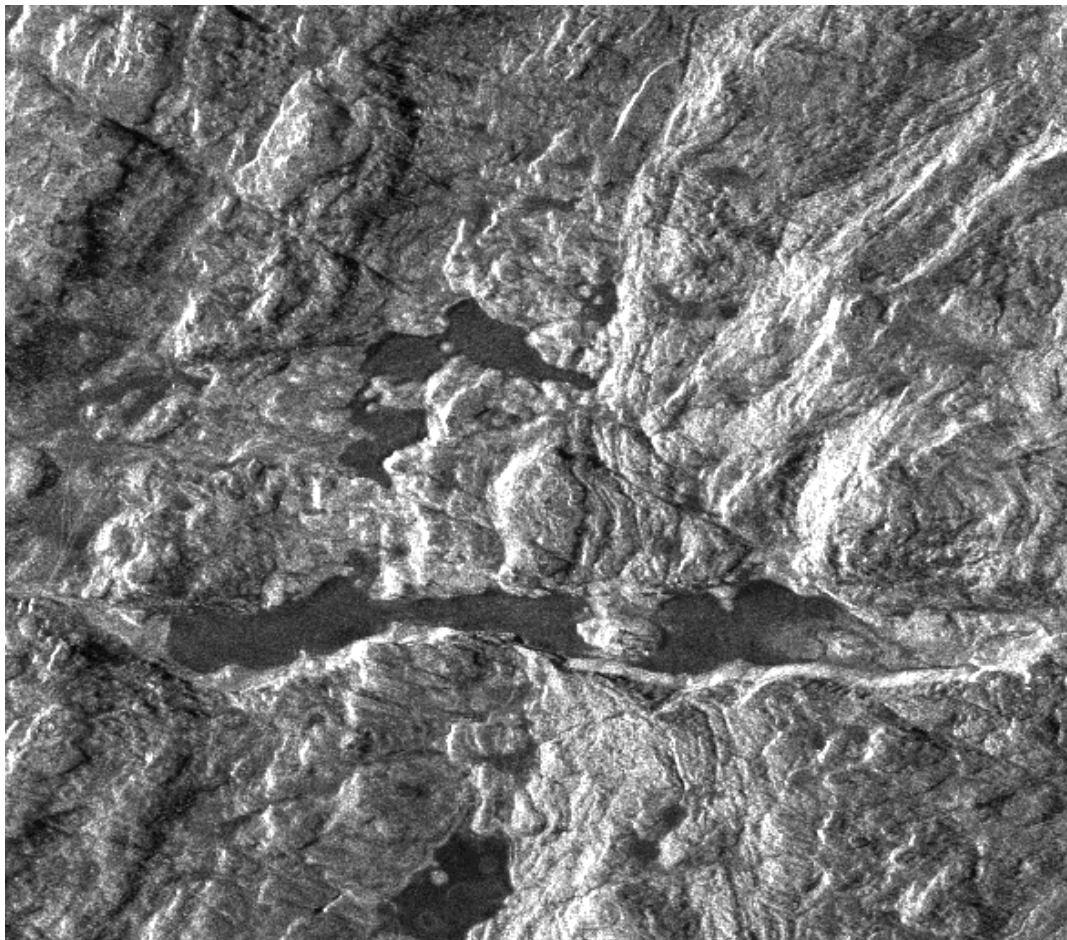
Fiskelausvatnet er et regulert damanlegg. Fra 1:50 000 topografisk kartserie er det antydnet at vannstanden kan varierer fra 346 til 325 m o h. Flyfoto over området er vist i Figur 5.44.

Fra CSK SAR amplitudebildet ser vi at den forventede jevne gråtonen og teksturen for en vann/is flate er brutt opp av andre partier som kan ligne på småkupert terreng, se Figur 5.45. Det synes å være et faktum at dammen er tappet sterkt ned, sammenlignet med flyfotoet.

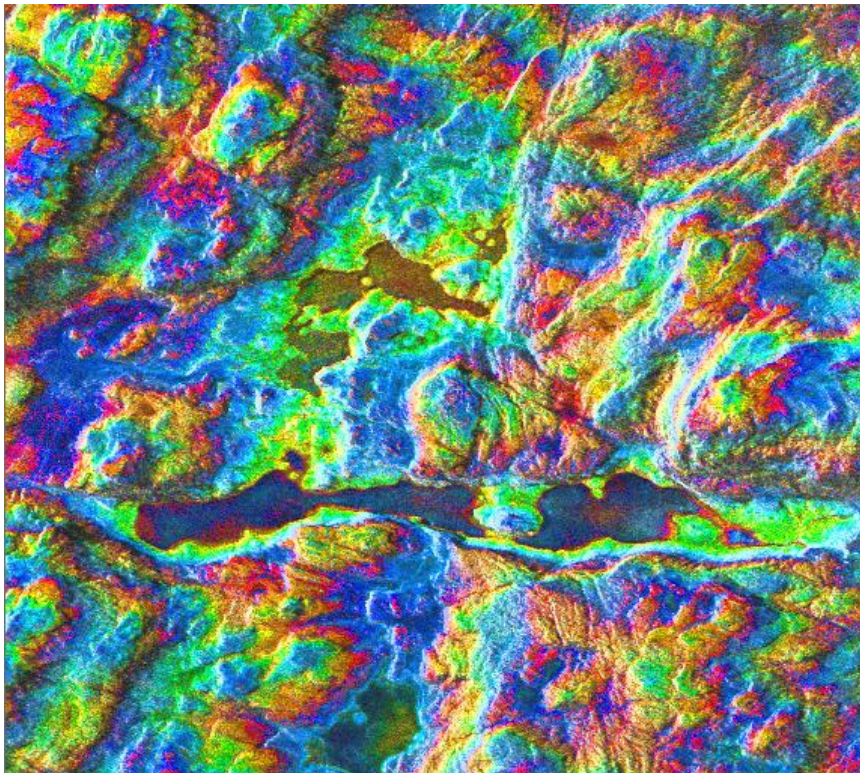
SAR koherensen er relativt god i de oppstikkende fjellknausene, se bildet i Figur 5.46. Kanskje kan det da være mulig å beregne topografien til fjellet som stikker opp over vannflatens nåværende tappnivå, og så videre beregne hvor mange kubikk-meter med vann som er tappet ut sammenlignet med maksimal fyllingsgrad?



Figur 5.44 Flyfoto over Fiskelausvatnet. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.



Figur 5.45 CSK SAR amplitudebilde over Fiskelausvatnet tatt den 7. april 2010. Bildet ligger i sin opprinnelige radar opptaksgeometri. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)



Figur 5.46 CSK SAR koherens (øverst) og SAR interferogram (nederst) over Fiskelausvatnet, april 2010. Bildene ligger i sin opprinnelige radar opptaksgeometri. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

6 Høydekart fra stereo SAR opptak

Det er en kjent sak at det er mulig å lage topografiske kart ved hjelp av fotogrammetriske stereo-opptak fra fly. Man kan benytte noen av de samme prinsippene til også å gjøre stereo SAR-opptak fra satellitt, om enn ikke til samme detaljgrad som når man bruker flyfoto.

Ettersom satellitt SAR instrumentet ser ut til siden for seg, bestiller man to SAR opptak som er gjort ned på bakken fra samme nordgående eller sydgående satellittpassering (se illustrasjon i kapittel 2.2), men med *forskjellig* radar innfallsvinkel. Det blir normalt best stereo-match mellom de to SAR-bildene dersom de tas tett etter hverandre i tid (det er færrest forandringer på bakken dersom det bare er noen få dager mellom opptakene) og med en stor innfallsvinkelforskjell (gjerne mer enn 10°).

6.1 Stereo SAR anaglyf

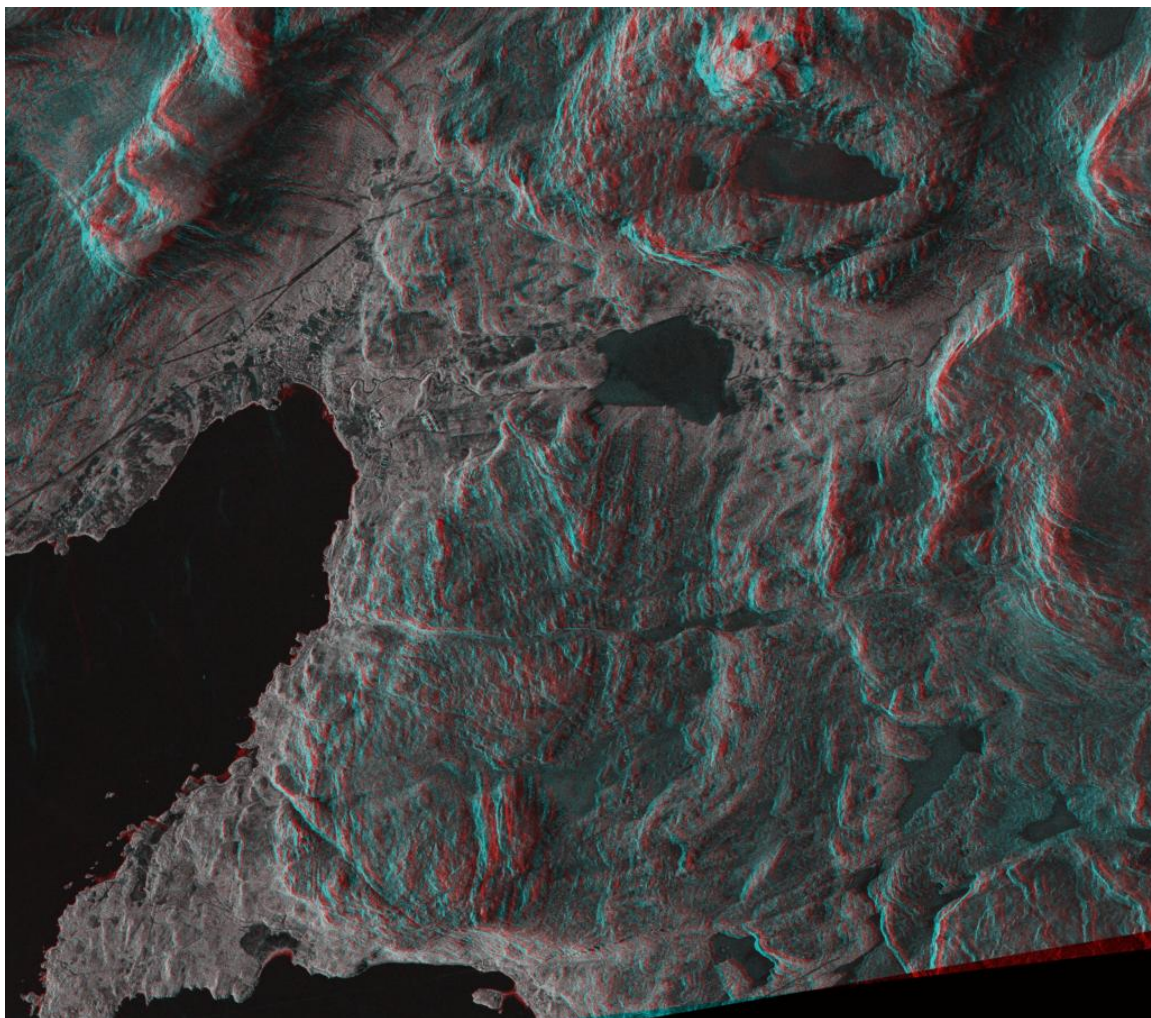
Man får et fint første inntrykk av et område dersom man kombinerer to slike opptak i en *stereo SAR anaglyf*.

Et slikt *anaglyf-bilde* består altså av to nesten like bilder (opptakene er bare gjort med litt forskjellig geometri) som trykkes eller vises fram med hver sin farge på en bestemt måte i forhold til hverandre. Ved å se på det fargekombinerte bildet gjennom noen spesielle briller, får du ikke inntrykk av å se på et flatt foto, men det er akkurat som om du selv sitter i et fly og ser at trærne og husene strekker seg oppover mot deg. Høydene frembringes med andre ord *visuelt* ved å bruke de spesielle anaglyf-brillene som gjerne har rødt farget venstre brilleglass og cyan (eller blått) farget høyre brilleglass.

Figur 6.1 viser en stereo SAR anaglyf over Bjerkvik i Nord-Norge lagd ved å kombinere to nordgående ("ascending") Radarsat-2 UltraFine opptak tatt den 8. og 11. april 2010 med henholdsvis 36° og 43° radar innfallsvinkel. Selv om den geometriske opptaks-forskjellen er på bare rundt 7° , vil den høye bildeoppløsningen (ca. 2 meter) likevel gi en merkbar forskjell i forflytning av de samme høydestrukturene. Det er denne range-avhengige forflytningen i bildeplanet som øyet tolker som en høyde i anaglyf-bildet.

Metoden som er brukt her for å lage denne anaglyfen er som følger:

- 1) Geocode hvert SAR-bilde til UTM 33 projeksjon ved å bruke WGS84 ellipsoiden med en angitt referanse høyde på null meter, og et raster grid på 2m x 2m.
- 2) Sam-registrere bildene (dvs. forskyve det ene bildet i forhold til det andre) ved å bruke ett felles punkt på land i nærheten av Bjerkvik
- 3) Fargekombinere SAR-bildene inn i Rød-Grønn-Blå kanelene på dataskjermen:
 - **Rød** = bildet fra den 11. april som har 43° innfallsvinkel
 - **Grønn** = bildet fra den 8. april som har 36° innfallsvinkel
 - **Blå** = bildet fra den 8. april som har 36° innfallsvinkel



Figur 6.1 Stereo SAR anaglyf-bilde lagd fra to Radarsat-2 UltraFine opptak tatt den 8. og 11. april 2010 over Bjerkvik med henholdsvis 36° og 43° radar innfallsvinkel.
(Radarsat-2 SAR data: © raw data CSA, 2010, provided by NSC/KSAT 2010.)

6.2 Beregne DEM fra stereo SAR opptak

Det er også mulig å beregne høyder direkte fra det sam-registrerte stereo SAR bilde-paret. Man lar da en lokal maske vandre suksessivt over begge bildene og registrerer så den lokale relative forskyvningen ("foldover") til bildene. Denne forskyvningen kan så oversettes til en høyde ut i fra rene geometribetraktninger for den side-seende SAR'en.

Det finnes kommersielle software-pakker som kan gjøre dette (PCI, ERDAS), men ofte krever disse metodene en god del interaksjon med bruker i form av å finne og registrere mange felles kontrollpunkter spredt rundt i scenen. Dette er tidkrevende for en operatør.

Etter vår oppfatning burde det være mulig å samle inn kontrollpunkter automatisk, og da generere en stereo DEM uten nevneverdig interaksjon fra en operatør. For å demonstrere en slik metodikk, kreves mer software utvikling og testing ved FFI.

7 Høydekart fra interferometriske SAR-opptak

7.1 Litt bakgrunn om SAR-opptakene

Det er fullt mulig å utlede en DEM fra to SAR-opptak som er gjort med tilnærmet samme opptaksgeometri. En teknikk for å gjøre dette kalles interferometrisk SAR (InSAR). Det er en fordel om disse opptakene gjøres med kortest mulig tidsintervall. Ved satellittopptak benytter man seg av ”repeat-pass” (se forklaring i kapittel 2.2).

Radarsat-2 har en ”repeat-pass” på 24 dager. Dette er altfor lang tid til å skulle gi gode høydekart ettersom endringer på bakken (fuktighet, vekst i vegetasjonen, frost/tinging) høyst sannsynlig har funnet sted mellom opptakene. Slike endringer gir ekstra ”støy”, som igjen vil føre til feil i høydeberegningen.

Man kan gjøre opptak over det samme området med bare én dags forskjell ved å bruke to av COSMO-SkyMed™ satellittene. Dette gir interferometriske SAR (InSAR) opptak som tilsvarer 1-dags ”repeat-pass”. Dette er mye gunstigere enn Radarsat-2 sine 24 dager, og kan gi relativt gode høydekart i områder som ikke er for sterkt preget av tett og grovvokst vegetasjon.

7.2 Hva påvirker høydenøyaktigheten når DEM lages fra InSAR data?

Romfartsmyndighetene i Italia (”ASI”) opplyser følgende om de Italiensk-bygde COSMO-SkyMed™ satellittene: I områder med meget god SAR koherens (> 0.8), så vil *den relative høydenøyaktigheten kunne være < 3.8 meter* ved bruk av interferometriske opptak. ASI opplyser videre at den relative *horisontale* nøyaktigheten i slike områder typisk vil kunne være < 2.9 meter. Disse tallene er under forutsetning av at avstanden mellom satellittantennene (Baselinja \perp) bare er rundt 100 meter, og at dataene er lagt ut på et 3 meters grid.

Det er flere faktorer som påvirker den interferometriske høydenøyaktigheten, (σ_h). De viktigste er:

- Koherensen til det interferometriske SAR-opptaket. Dette er igjen påvirket av naturlige endringer mellom opptakene (nedbør, avsmelting, vind i trekronene).
- Radar bølgelengden, (λ). Lengre bølgelengder påvirkes mindre av høy/tett vegetasjon, og kan i tillegg trenge lengre ned i tørt materiale (bakke eller snø).
- Radarens se-vinkel ned på terrenget, (θ_{look}).
- Radarstålens avstand fra satellitten og ned til bakken, (R_0).
- Den interferometriske baselinja (B), som er den fysiske avstanden (i meter) mellom de to SAR antenneposisjonene.

En formel som sammenfatter dette er gitt som [1]:

$$\sigma_h = \frac{\lambda R_0 \tan \theta_{look}}{4\pi B} \sigma_\phi \quad (7.1)$$

I formel (7.1) er σ_ϕ og σ_h henholdsvis standardavviket for den interferometriske fasen og høyden i terrenget. I denne formelen er høydeusikkerheten en funksjon av usikkerhet i fasestøy. De andre parametrene er da antatt helt nøyaktige. Vi vil her kort bemerke at dersom det er usikkerhet i for eksempel baselinja (B), så vil dette påvirke både relativ og absolutt usikkerhet. Hvis det da ikke velges kontrollpunkter på bakken som er nøyaktige, vil høydeestimatet følgelig kunne bli svært følsomt for usikkerheter i baselinja.

Det er en vanlig fremgangsmåte å slå sammen nabopiksler under interferometri- beregningen for bl.a. å få ned den tilfeldige støyen i SAR-dataene. Dette kalles blokk-midling eller ”multi-looking” (se også forklaring i kapittel 4). Det er ikke uvanlig å operere med multi-looking av 8, 16, 32 eller 64 nabopiksler.

Tabell 7.1 viser hvordan fasefeilen blir mindre med økende antall multi-looks. Fra tabellen leser vi også ut at fasefeilen generelt sett blir mindre når koherensen blir større (når koherensen nærmer seg maksimum på 1.0). Disse tallverdiene er hentet ut fra figurer som er publisert internasjonalt av forskere innenfor fagfeltet [1], [2], [3].

Koherens	1-look	2-look	4-look	8-look	16-look	32-look	64-look
0.8	53	34	21	13	8	5	3
0.6	70	55	37	25	17	10	6
0.4	83	70	58	43	28	18	11
0.2	95	87	82	72	60	48	32

Tabell 7.1 Fasefeil σ_ϕ (i grader) som en funksjon av InSAR koherens (i intervaller fra 0.2 til 0.8) og multi-looking (fra 1 til 64 piksler). Vi ser at fasefeilen (støyen) generelt sett går ned når vi blokk-midler/multi-looker flere piksler.

Høydenøyaktigheten blir altså *bedre* hvis vi kan få fasefeilen til å gå *ned*. En liten fasefeil får man gjerne i områder med høy koherens (som jo betyr at vi har et *godt samsvar* mellom SAR-opptakene). Da blir spørsmålet: hvordan kan jeg oppnå god koherens? Koherensen kan man til en viss grad påvirke gjennom selve opptakssituasjonen:

- Repeat-pass SAR-opptak tatt tett på hverandre i tid (helst bare 1 dag mellom opptakene).
- SAR-opptak gjort på dager med liten avsmelting/frysing.
- SAR-opptak som gjøres på dager med lite eller ingen nedbør (og helst liten eller ingen nedbør mellom opptakene også).

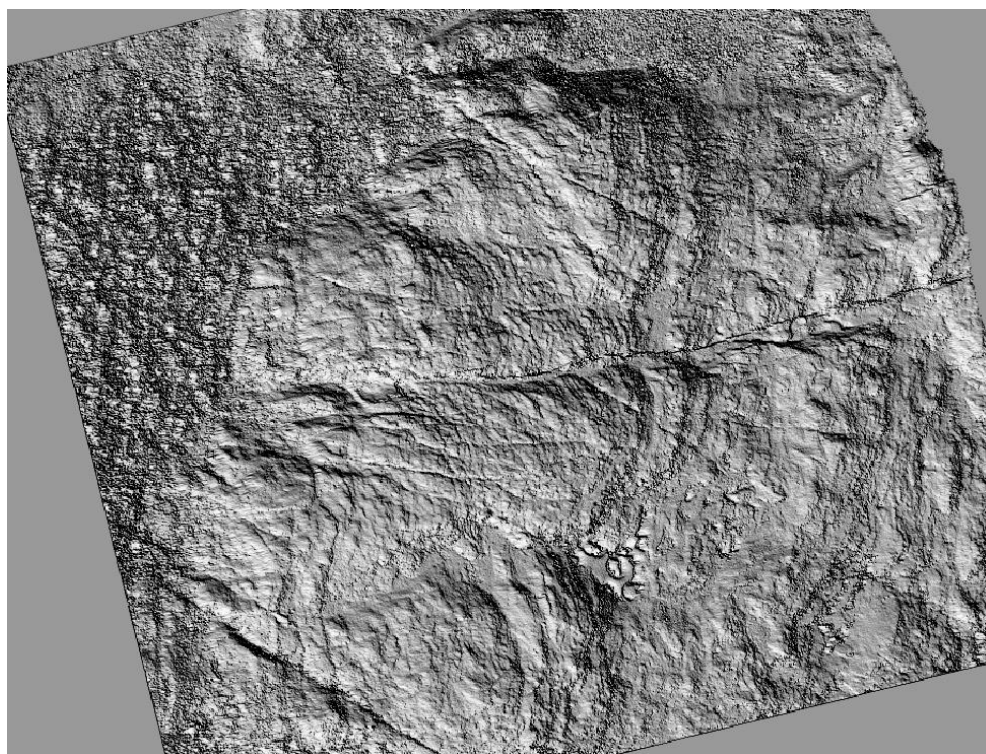
Generelt sett, så vil det også bli høyere koherens i områder med kortvokst eller svært lite/ingen vegetasjon.

7.3 Hvordan vi lager en DEM fra InSAR dataene over Bjerkvik

Vi har brukt ERDAS/IMAGINE software til å lage en interferometrisk SAR (InSAR) DEM ved å bruke den interferometriske faseforskjellen mellom de to COSMO-SkyMed™ SAR opptakene som ble tatt over Bjerkvik den 7. og 8. april 2010. Det viste seg at prosessen kan kjøres ganske automatisk i ERDAS. Vi valgte å bruke en 8x8 piksel multi-looking i interferogram-genereringen for å redusere den tilfeldige fasestøyen.

Sluttresultatet av en slik InSAR DEM generering over fjellpartiet øst-sydøst for Bjerkvik er vist som ”shaded relief” i Figur 7.1. Denne DEM’en ser ut til å ha mange detaljer i seg som det er verdt å skulle undersøke videre (se resultater i de neste kapitlene).

Det kan nevnes her at det også finnes andre kommersielle software-pakker tilgjengelig som kan generere DEM fra interferometriske satellitt SAR data: ENVI/SARscape, PCI, Gamma. Det er dessuten en anerkjent ”open-source” pakke kalt STAMPS. Vi har ikke egen erfaring fra alle disse andre pakkene,- men flere av dem sies å være gode,- ja, kanskje bedre enn ERDAS sin modul.



Figur 7.1 DEM utledet fra interferogrammet til de to CSK SAR-bildene. Det er brukt ERDAS/IMAGINE software, og DEM’en er vist fram med standard skyggelegging (”shaded relief”). DEM’en er her projisert inn i kartriktige koordinater.

7.4 Resultater – sammenligning av InSAR DEM mot kartverkets 1:50 000 DEM

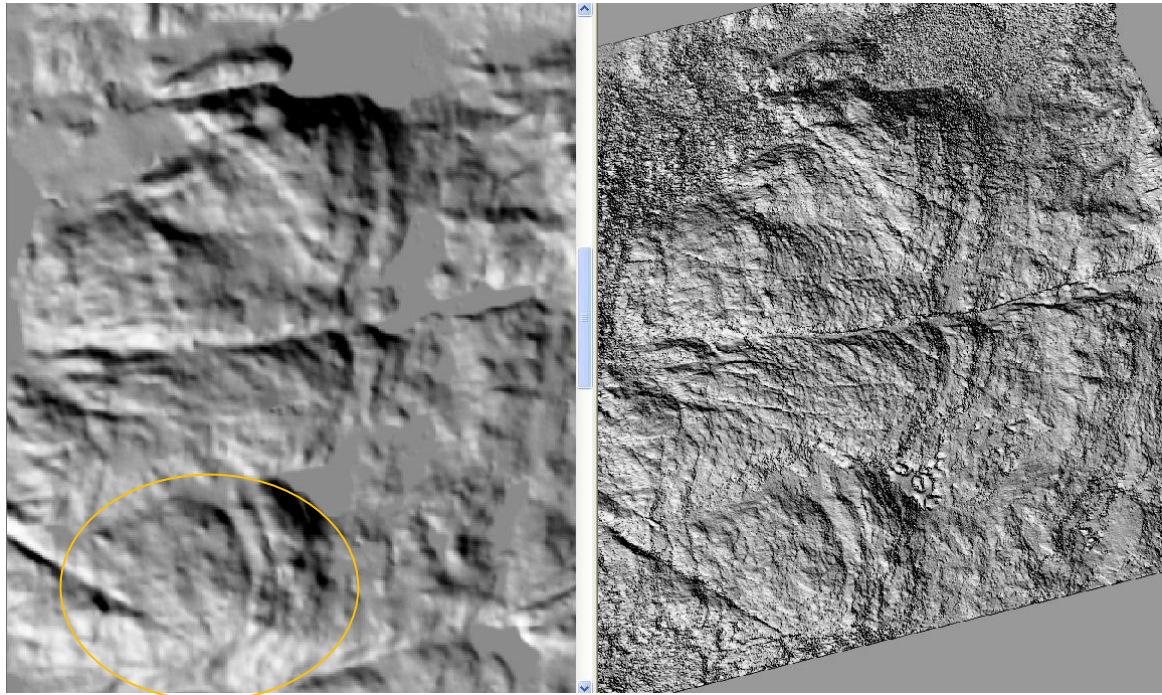
Det kan være verdifullt å sammenligne den interferometriske SAR høydemodellen (InSAR DEM) mot det som er tilgjengelig av DEM fra Statens Kartverk. Vi har da brukt landsdekkende 1:50 000 topografisk DEM som har en oppløsning (grid) på 25 meter. Nøyaktigheten (1σ) til høydemodellen oppgis av Statens Kartverk til rundt 4-6 meter, men grovere høydefeil er kjent å forekomme.

Vi har nedenfor plukket ut et fjellparti ved Daltinden syd-øst for Bjerkvik. Dette er et fjellområde med kortvokst vegetasjon og mange bare fjellpartier. Se flyfoto fra Norgebilder, Figur 7.2.

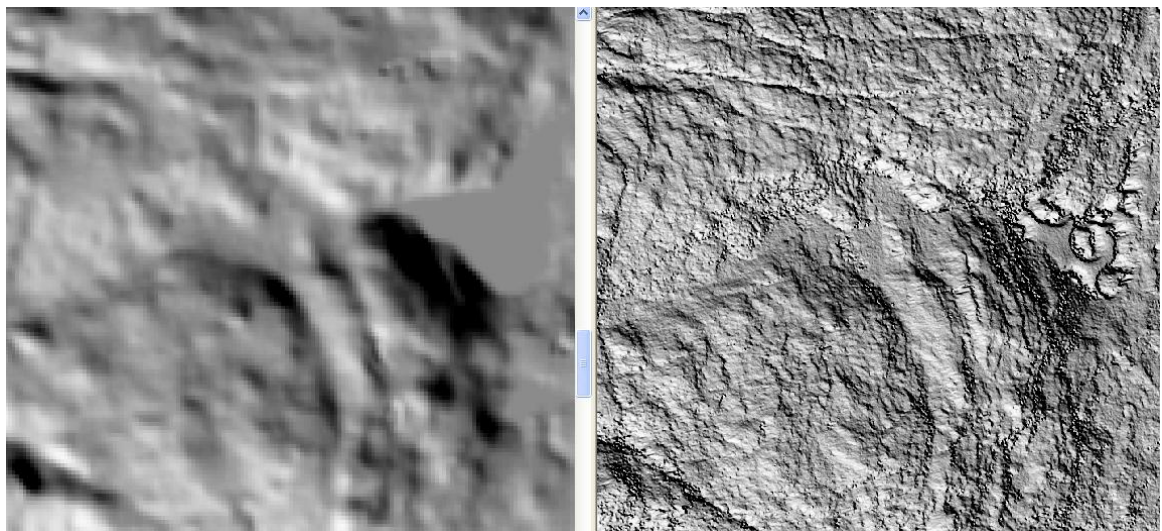
Figur 7.3, Figur 7.4 og Figur 7.5 viser skjermdump av Statens Kartverk DEM mot CSK InSAR DEM for målestokker i henholdsvis 1:50 000, 1:24 000 og 1:15 000.



Figur 7.2 Flyfoto over Daltinden fjellparti. Skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

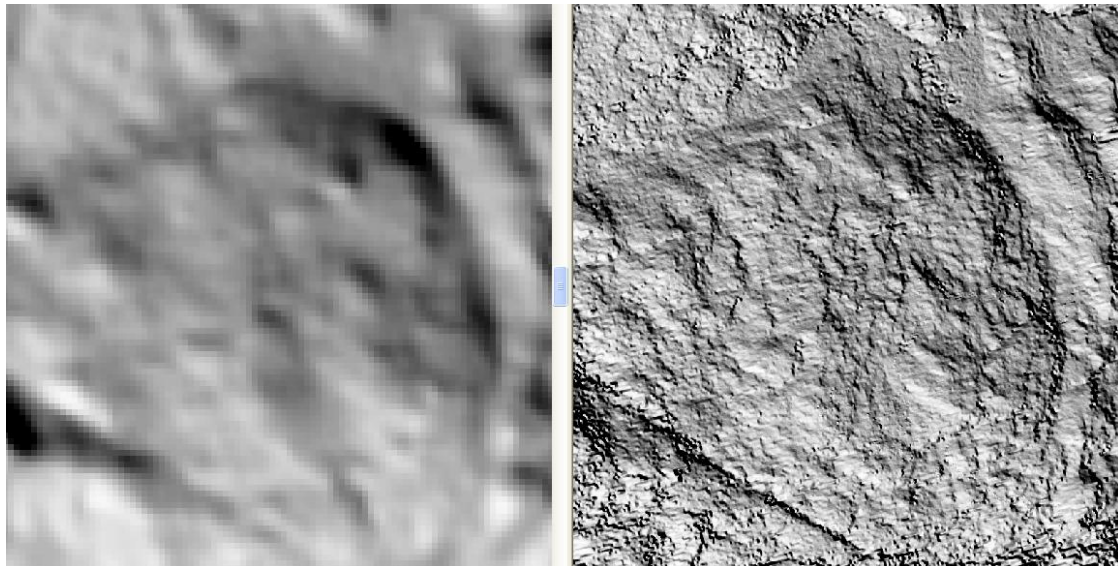


Figur 7.3 Et fjellparti ved Bjerkvik vist fram i målestokk 1:50 000 i ERDAS IMAGINE. Området med Daltinden markert med sirkel i nedre del av bildet. Venstre: Utsnitt hentet fra standard topografisk DEM i Norge. Høyre: InSAR DEM utledet fra CSK SAR-bilder.



Figur 7.4 En del av Daltinden fjellparti vist fram i målestokk 1:24 000 i ERDAS IMAGINE. Venstre: Utsnitt hentet fra standard topografisk DEM i Norge, og zoomet opp. Høyre: InSAR DEM utledet fra CSK SAR-bilder.

Fra en visuell sammenligning, så er det mye som tyder på at DEM'en fra SAR dataene viser detaljer som stammer fra mindre skrenter og knauser som ikke blir registrert i 1:50000 topografisk kartserie fra Statens Kartverk.



Figur 7.5 En del av Daltinden fjellparti zoomet opp og vist fram i målestokk 1:15 000 gjennom ERDAS IMAGINE. Venstre oppe: Utsnitt hentet fra standard topografisk DEM i Norge. Høyre oppe: InSAR DEM utledet fra CSK SAR-bilder. Midten nederst: Flyfoto over Daltinden, skjermdump tatt i mai 2010 fra www.Norgebilder.no.

7.5 Resultater – høydenøyaktigheten for InSAR DEM'en over Bjerkvik

Hva er egentlig *høydenøyaktigheten* på InSAR DEM'en vi har lagd fra området ved Bjerkvik? Dette er et viktig spørsmål som det er vanskelig å gi et entydig svar på. Som allerede nevnt i kapittel 7.2, så vil høydenøyaktigheten være avhengig av bl.a. fasefeilen mellom de to SAR-opptakene.

Et mål på denne fasefeilen er SAR koherens-bildet, se

Figur 7.6 nedenfor. Lav koherens (mørke partier) gir større usikkerhet enn høy koherens (lyse partier). Vi ser da umiddelbart at høyde-estimatet vil være bedre på høydedrag med lite vegetasjon enn nede i dalbunnen og i fjellsidene med tettere/høyere vegetasjonsdekke, og hvor det kanskje til og med foregikk en snøsmelting disse opptaksdagene tidlig i april 2010.

Vi kan nå forsøke å tallfeste høydenøyaktigheten ved å kombinere formel (7.1) og Tabell 7.1. For InSAR konfigurasjonen over Bjerkvik har vi følgende parameter-settinger for midten av scenen: InSAR baselinja er på rundt 214 meter, radar se-vinkelen er ca. 42° , range-avstanden er på ca 823.8 km og radar bølgelengden er på 3 cm. Innsatt i formel (7.1) gir dette oss:

$$\sigma_h = 7.05 \sigma_\phi \quad [\text{meter}] \quad (7.2)$$

Husk at fasefeilen, σ_ϕ , må oppgis i *radianer* når formel (7.2) skal brukes i en videre utregning.



Figur 7.6 CSK koherens-bilde fra fjellområdet ved Bjerkvik. Bildet ligger i sin opprinnelige radar opptaksgeometri. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

For å beregne høydeusikkerheten, trenger vi nå fasefeilen. Fra Tabell 7.1, så vi at fasefeilen kunne knyttes opp mot antall looks og koherensen i bildet. Når vi lagde interferogrammet i ERDAS, ble det brukt en multi-looking på 8x8 piksler. Vi må derfor lese ut fasefeilen fra siste kolonne (64-look) i Tabell 7.1 til bruk i vår utregning. (En multi-looking på 64 kan høres mye ut, men det gir fremdeles mulighet for å legge ut DEM'en i et 8x8 m grid på bakken ettersom CSK "Enhanced Spotlight" originalt opererer med en oppløsning på rundt 1 meter.) Resultatet fra utregningen, hvor vi bruker formel (7.2) sammen med Tabell 7.1, er gjengitt i Tabell 7.2 nedenfor.

InSAR koherens	InSAR fasefeil [grader]	InSAR høydefeil (1σ) beregnet for CSK konfigurasjonen over Bjerkvik [m]
0.8	3	0.4
0.6	6	0.7
0.4	11	1.4
0.2	32	3.9

Tabell 7.2 InSAR høydefeil beregnet for CSK InSAR konfigurasjonen som ble gjort over Bjerkvik i april 2010. Høydefeilen varierer som en funksjon av InSAR koherens med tilhørende InSAR fasefeil.

Når vi, generelt sett, undersøker koherensen i vårt CSK bilde fra Bjerkvik, ser vi at koherensen ligger så høyt som 0.5 til 0.7 for en god del fjellpartier. På den andre siden ligger koherensen nede i skogsområdene så lavt som ned mot 0.2. Ut fra dette, så kan vi si at det er et *potensiale* til å kunne få en høydenøyaktighet (1σ) på bedre enn 1 meter i de høyreliggende fjellpartiene dersom ikke terrenget heller så mye på seg at det blir vanskelig å utlede høydeinformasjon fra InSAR fringe-mønsteret. I skogsområder derimot, vil høydenøyaktigheten neppe kunne bli bedre enn 4 meter.

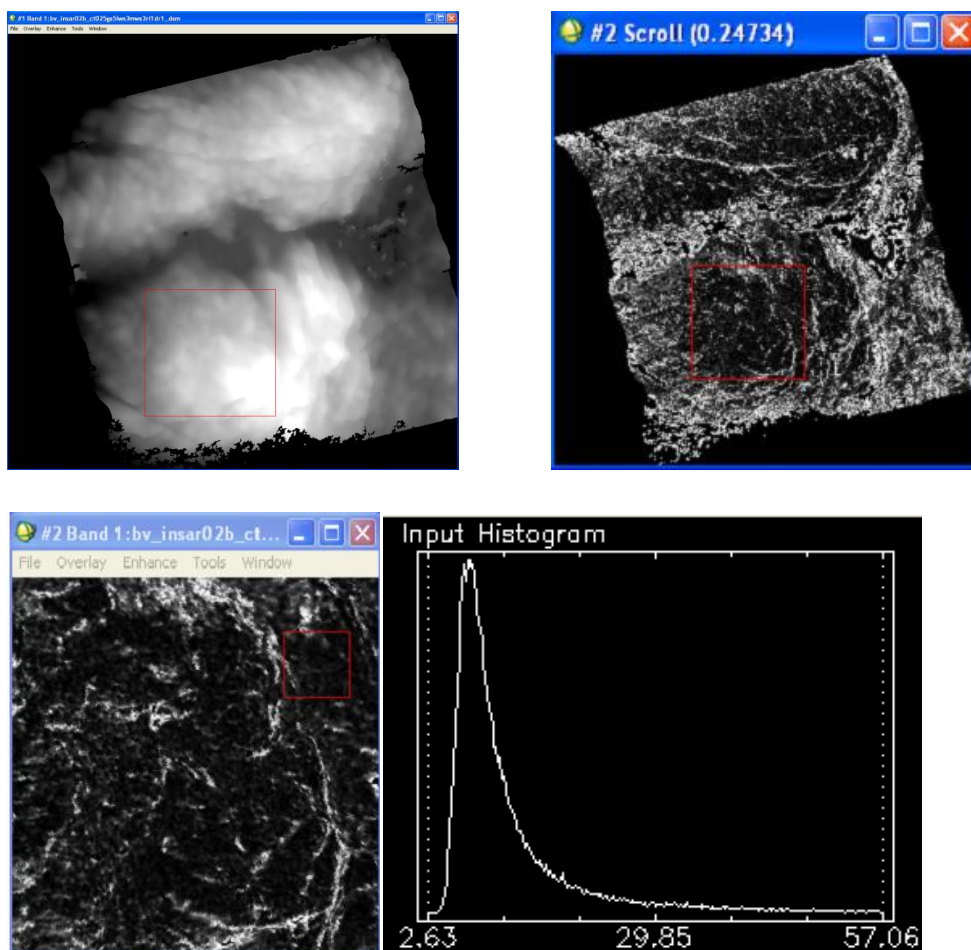
Vi vil her også bemerke at InSAR høyder i skogsområder ofte stammer fra en høyde litt oppunder tretoppene (og ikke nødvendigvis fra terrenget selv) - avhengig av radar bølgelengda og tettheten på skogen: kortere bølgelengder trenger dårligere ned igjennom et tett kronetak. Se for øvrig illustrasjon i Figur 2.6. Vi skal derfor være klar over at InSAR høyder delvis vil representere en *overflate* høydemodell [4].

For akkurat *dette* fjellpartiet og med *dette* COSMO-SkyMed™ datasettet kan man med andre ord lage en InSAR DEM med 8 meters grid som har en høydenøyaktighet (1σ) helt ned mot 1 meter enkelte steder.

Nå tilbake til Daltinden fjellparti hvor InSAR DEM'en ble sammenlignet med Statens Kartverk sin DEM i Figur 7.5. I dette fjellpartiet ligger SAR koherensen med verdier i området fra 0.4 til 0.6. Lest ut av Tabell 7.2 skulle dette da tilsvare en InSAR DEM høydenøyaktighet på mellom 0.7 m og 1.4 m.

Vi har også lagd en InSAR DEM ved å kjøre programmet ENVI/SARscape. Resultatet vises i Figur 7.7 som en DEM for hele fjellpartiet. ENVI/SARscape lager et tilleggsprodukt som angir *presisjonen* til den produserte InSAR DEM'en. Presisjonsbildet skal da gjenspeile høydenøyaktigheten i de forskjellige områdene (gitt i meter). En mørk gråtone viser da en liten feil (på bare noen få meter), mens de lyse partiene (typisk i områder med fjellskrenter) kan ha en beregnet DEM feil på flere titalls meter.

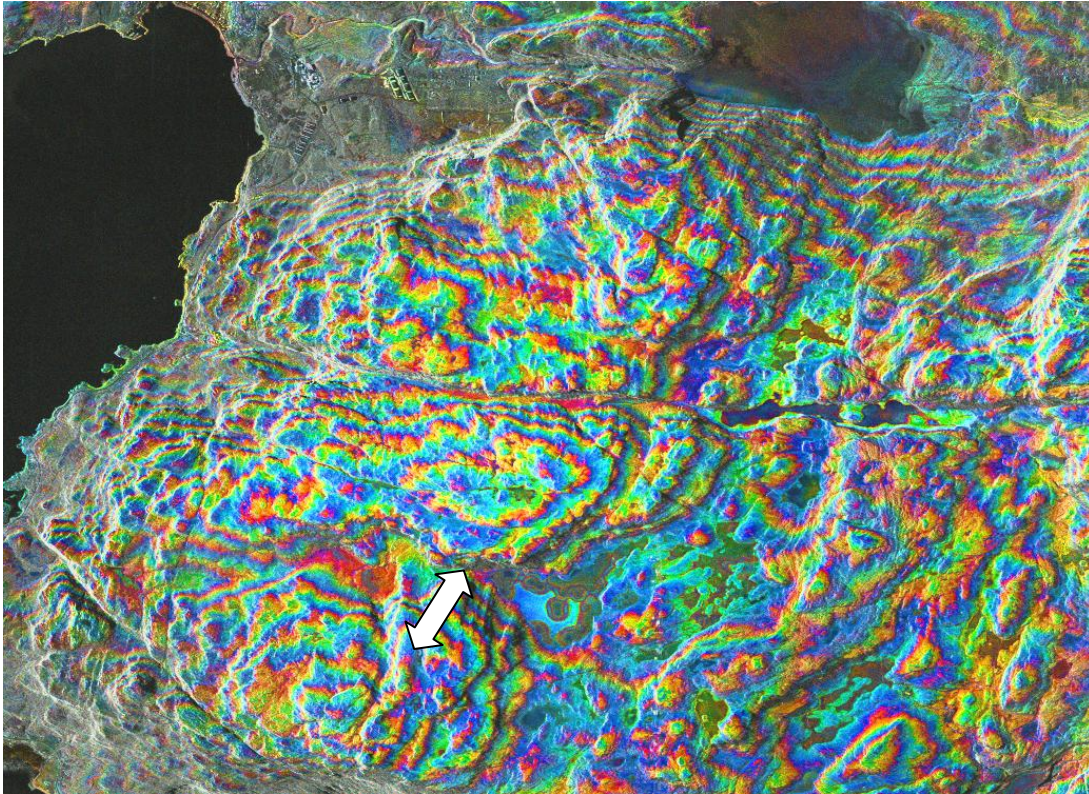
Man vil da kanskje bemerke at et SAR-system gir store feil innimellom, og ikke er til å stole på. Det er riktig at man kan få feil i høydene, men fordelene er at SAR-systemet *selv* er i stand til å si noe om målenøyaktigheten der og da. Man får da muligheten til å skille ut spesielle problemområder. I en praktisk kartleggingssituasjon hvor man ønsker å produsere nye DEM i et område, vil man da kunne angi hvilke områder som kanskje bør måles på nytt med et annet instrument, eller med et SAR-system som for eksempel bruker andre geometrier eller radar bølgelengder.



Figur 7.7 InSAR DEM fra fjellområdet ved Bjerkvik produsert fra programmet ENVI/SARscape (øverst venstre). Presisjonsbilde (øverst høyre). Utsnitt av presisjonsbildet fra avmerket fjellparti (nederst venstre) med tilhørende histogram (nederst høyre). (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

7.6 Resultater – SAR interferogrammet

COSMO-SkyMed™ (CSK) SAR interferogrammet, som ble lagd gjennom ERDAS IMAGINE programmet, er vist i Figur 7.8.



Figur 7.8 CSK interferogram fra fjellområdet ved Bjerkvik. Interferogrammet er her lagt inn i SAR amplitudebildet. Bildet ligger i sin opprinnelige radar opptaksgeometri. Pilen markerer overgangen for 5 "fringer" som for denne opptaksconfigurasjonen tilsvarer ca 235 høydemetre i terrenget. (CSK SAR data: © COSMO-SkyMed™ Product -ASI 2010, distributed by e-GEOS.)

Det karakteristiske "fringe"-mønsteret kommer klart til syne der hvor det er topografiske effekter. Hver slik "fringe" utgjør et visst antall høydemetre. For CSK sin opptaksconfigurasjon over Bjerkvik vil hver "fringe" utgjøre ca. 48 høydemetre. Dette kan vi kontrollere ved å sammenligne interferogrammet mot høyder vi leser ut fra et kart, se også pil markert inn i Figur 7.8:

- Høgvatnet ligger på 383 m o h.
- En topp sydvest for dette vatnet har oppgitt en høyde på 615 m o h.
- Dette gir en differanse på 232 m.
- Fra dette vatnet og opp til toppen kan vi, grovt sett, telle ca 5 SAR interferometri-fringer (se blåfargede overganger ved markert hvit pil i Figur 7.8). Dette blir da:
 $5\text{fringer} \cdot 48\text{m/fringe} = 240\text{ m høydedifferanse.}$

Dette er i riktig størrelsesorden. Ved å lese ut tallverdier direkte fra interferogrammet, vil man få et resultat som samsvarer enda litt bedre med den sanne verdien på 232 m.

Vi vil her bemerke at denne InSAR målingen ved Høgvatnet er en *relativ* høydeforskjell mellom to steder i interferogrammet, og at den målte *horisontale* avstanden ikke er så stor i vårt tilfelle her. Hvis det nå skulle være feil i baselinja, så vil høydefeilen bli større jo større avstand det er mellom de to målestedene. Dette må man være klar over ved andre sammenligninger/målinger utført i det samme datasettet.

8 Konklusjon

De nye høyoppløsnings SAR-satellittene med en oppløsning helt ned mot 1 meter gir meget god deteksjonsevne for en del terreng- og menneskelagde strukturer:

- Vi kan oppdage snøscooterspor over myrdrag og på islagte vatn.
- Vi kan beregne hvor mye damanlegg er nedtappet, og avgjøre om det foregår nedtapping på centimeter-nivå dersom dammen er islagt.
- SAR interferogrammet og koherensbildet kan brukes til å si noe om tilstanden av isen på vatn og i elvedrag.
- Store kraftgater kan oppdages, både som mørke striper i skogsterreng, og i form av å detektere master og kraftlinjer.
- Myrdrag som har mye høy vegetasjon skiller seg til en viss grad fra åpne myrer.
- Man kan lett finne ut hvor det er våt snø i smeltesesongen.

Det er vanskelig å skulle bestemme tettheten på skogen ved bare å bruke én kanal av høyoppløsnings SAR data. Bruk av polarimetriske SAR data kan bedre denne situasjonen, men ved slike opptak vil den romlige oppløsningen være noe dårligere (bare 8 m i stedet for 1-2 m).

Stereo SAR-opptak kan fint brukes til å generere anaglyf-bilder. Slike bilder gir et godt første inntrykk av hvordan topografien i et område varierer. Med denne teknikken er det også mulig å antyde om en bygning er høy eller lav.

Det er tydelig at interferometriske SAR-opptak med COSMO-SkyMed™ satellittene har et potensiale i seg til å lage en DEM som har en betydelig større detaljeringsgrad enn det som finnes i eksisterende 1:50 000 topografisk kartserie over Norge. Foreløpige resultater antyder en høydenøyaktighet (1σ) helt ned mot 1 meter for enkelte fjellpartier hvor det er liten eller ingen endringer nede på bakken mellom de to SAR-opptakene.

Referanser

- [1] H. A. Zebker og J. Villasenor (1992): Decorrelation in Interferometric Radar Echoes, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30 (5), September 1992.
- [2] R. Bamler og D. Just (1993): Phase statistics and decorrelation in SAR interferograms, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 980-984, 1993.
- [3] J. S. Lee, K. P. Papathanassiou, T. L. Ainsworth, M. R. Grunes og A. Reigber (1997): A new technique for noise filtering of SAR interferogram phase images, Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1716-1718, 1997.
- [4] D. J. Weydahl, J. Sagstuen, Ø. B. Dick og H. Rønning (2007): SRTM DEM accuracy assessment over vegetated areas in Norway, International Journal of Remote Sensing, Vol. 28, No. 15-16, August 2007, 3513-3527.
- [5] NASA (1989): Instrument Panel Report. *SAR: Synthetic Aperture Radar (Earth Observing System, Vol. IIf)*, Earth Science and Applications Division, NASA Headquarters, Washington DC, 233p.