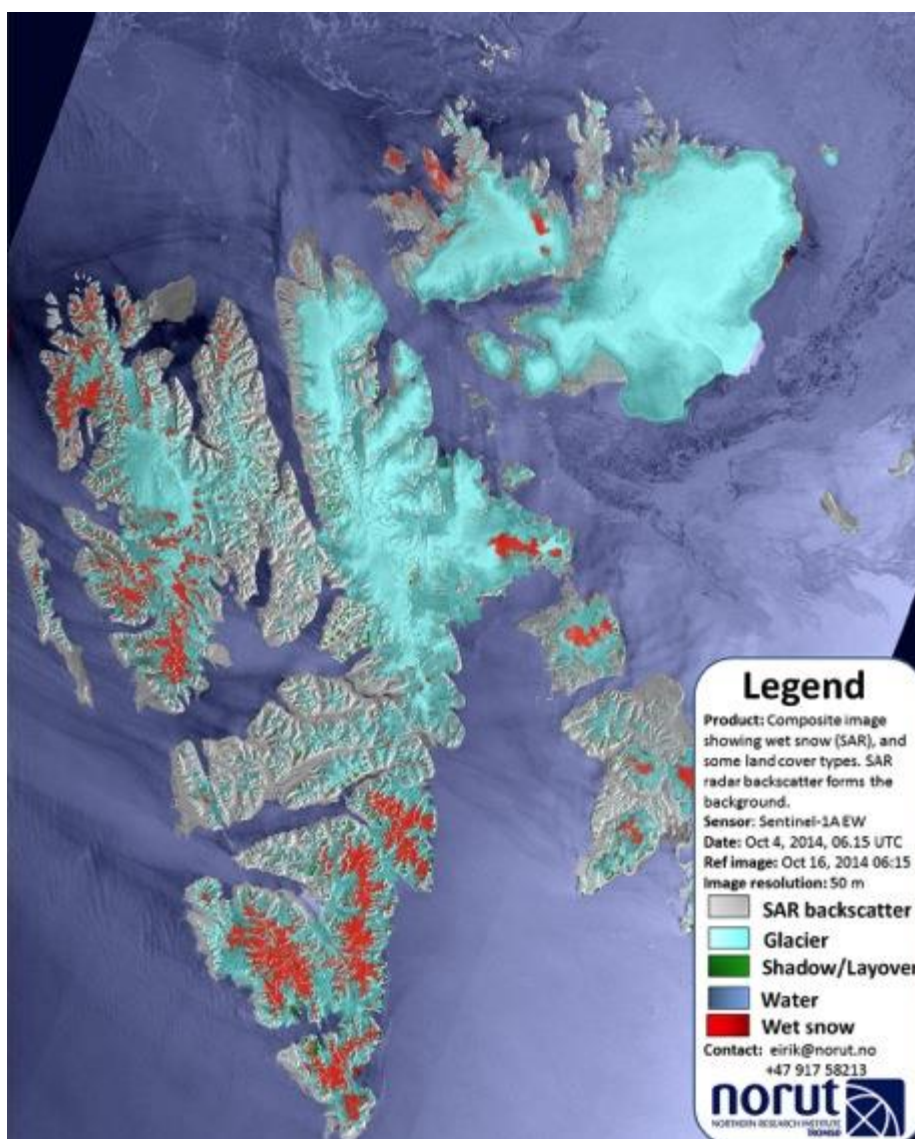


RAPPORT

3/2016
ISBN 978-82-7492-325-6
ISSN 1890-5226

Fjordis - muligheter for overvåkning av is i fjordene rundt Svalbard



Forfattere: Eirik Malnes og Hannah Vickers

PROSJEKTNAVN: Fjordis

Prosjektnr.: 606

OPPDRAGSGIVER(E): Norsk Polarinstitut

Oppdragsgivers ref.:

Dokumentnr.: 3/2016

Dokumenttype:

Status: Åpen

ISBN: **978-82-7492-325-6**

ISSN: **1890-5226**

Ant. Sider: 50

Prosjektleder: Eirik Malnes

Dato: 22.01.2016

FORFATTERE: Eirik Malnes, Hannah Vickers

TITTEL: Fjordis - muligheter for overvåkning av is i fjordene rundt Svalbard

Resymé:

Rapporten er leveranse i prosjektet Fjordis til Norsk Polarinstitut. Rapporten gir en oversikt over aktuelle sensorer for overvåkning av isen i Fjordene på Svalbard med tanke på et framtidig overvåkningssystem for fjordis. Alle aktuelle sensorer beskrives, og det konkluderes med at C-bånd SAR og spesielt Sentinel-1A/B sensorene synes å være høyaktuelle for oppgaven. Disse leverer data flere ganger daglig i tilstrekkelig høy oppløsning til å kunne både klassifisere is fra åpent vann og skille mellom ulike istyper. Når det gjelder måling av flere parametere som istykkelse og snømengde gjenstår det en del arbeid for å kunne operasjonalisere metoder for å måle disse. Istykkelse kan ikke direkte måles fra SAR, men ved å kombinere data fra andre sensorer (altimetre) er det visse muligheter dersom det er ønskelig å utvikle systemer for dette. Det pekes også på at det er forholdsmessig lettere å skaffe valideringsmålinger på fjordene på Svalbard enn det ellers er i Arktis. En utvikling av et avansert og høyoppløselig fjordis overvåkningssystem kan dermed på sikt også forbedre metodene som brukes i Arktis.

Emneord: Fjordis, Svalbard, SAR, klassifisering, istype, istykkelse

Noter:

UTGIVER: Norut, P.O. BOX 6434, N-9294 Tromsø, Norway

Innhold

1	INNLEDNING	2
1.1	Isen er i endring	2
1.2	Avgrensing av arbeidsoppgaver	2
2	KRAV TIL SATELLITTDATA.....	3
2.1	Dekningsgrad	3
2.2	Oppløsning.....	3
2.3	Datakostnader	4
2.4	Prosesserings-kostnader	4
3	OVERSIKT OVER DATA SOM KAN BRUKES TIL FJORDISOVERVÅKNING	5
3.1	SAR data	5
3.1.1	Egenskaper ved SAR data.....	5
3.2	Historiske SAR-sensorer	10
3.2.1	ERS-1/-2	10
3.2.2	Radarsat-1	10
3.2.3	Envisat ASAR.....	10
3.3	Operasjonelle C-bånd SAR sensorer	11
3.3.1	Radarsat-2	11
3.3.2	Sentinel-1	12
3.4	Kontinuitet for C-bånd SAR	13
3.4.1	Sentinel-1 C/D	13
3.4.2	Radarsat Constellation	14
3.5	Andre mulige SAR sensorer	14
3.5.1	Terrasar-X.....	14
3.5.2	Cosmo Skymed	14
3.5.3	ALOS-2.....	14
3.5.4	RISAT, m.fl.	14
3.6	Scatterometer	15
3.6.1	Oppsummering Scatterometer	16
3.7	Optiske satellitter	16
3.7.1	Optiske satellitter med grov oppløsning	16
3.7.2	Optiske satellitter med middels oppløsning.....	17
3.7.3	Høyoppløste optiske satellitter.....	18
3.7.4	Oppsummering optiske satellitter	18
3.8	Radiometere	19
3.9	Radar- og laser altimetre.....	19
3.9.1	Laser altimeter	19

3.9.2	Radar altimeter	20
3.9.3	Oppsummering Altimeter	21
3.10	Multisensor	21
3.11	Andre data typer (Ikke satelitt)	22
3.11.1	Web-cam	22
3.11.2	Bøyer/flytende måleinstrumenter	23
3.11.3	UAV	23
3.11.4	Dornier på Svalbard	24
3.11.5	Oppsummering –andre data typer	24
3.12	Oppsummering	24
4	OPERASJONELLE ISTJENESTER	25
4.1	Meteorologisk institutt	25
4.1.1	Status for automatisk prosessering av iskart	26
4.2	DMI	27
4.3	FMI	28
4.4	SMHI	28
4.5	Environment Canada	28
5	METODER FOR ISOVERVÅKNING	30
5.1	Segmentering og klassifisering	30
5.2	Klassifisering av is og åpent vann	30
5.2.1	Manuell og semi-automatisk deteksjon av havis	30
5.2.2	Automatisk deteksjon av havis	32
5.2.3	Sentinel-1	32
5.2.4	Oppsummering	33
5.3	Klassifisering av istyper	33
5.3.1	Automatisk istype klassifisering	37
5.3.2	Sentinel-1	37
5.4	Måling av istykkelse og snødekke	38
5.4.1	Istykkelse målt med SAR	38
5.4.2	Istykkelse målt med altimeter	39
5.4.3	Snødekke	41
5.5	Oppsummering Istykkelse/Snødekke	45
6	OPPSUMMERING OG KONKLUSJON	46
7	REFERANSER	48

1 INNLEDNING

Rapporten er leveranse fra Norut i prosjektet Fjordis som er en bestilling fra Norsk Polarintstitutt. Polarinstituttet har fått i oppgave å utrede overvåking av fjordis på Svalbard av forvaltninga (SMS, KLD, Mdir). Isen på fjordene er habitat for isavhengige arter på Svalbard, og dermed viktig å overvåke. Hittil har ikke metodikken gjort det mulig å drive en overvåking i den skala og med de hensyn som forvaltninga etterspør. NPI er bedt om å utrede dette, og har satt ut deler av denne jobben til Norut.

Prosjektet skal utrede mulighetene for langsiktig overvåking av sjøisdekket i fjordene på Svalbard, med spesiell vekt på parametere av betydning for isens egnethet som habitat. Oppdragsgiverne ønsker å utrede muligheter med både satellittbårne og landbaserte instrumenter.

Prosjektet vil gå gjennom aktuelle datakilder og metodiske utfordringer, beskrive de kvalitative begrensingene ved de tidsseriene det eventuelt er mulig å etablere med dagens datatilfang, og identifisere behov for videre forskning.

1.1 ISEN ER I ENDRING

Havisen i hele Arktisk er i endring. I perioden 1978-2013 har utstrekninga av is i Arktis (september minimum) avtatt fra 8 million km² til 5 million km², dvs en reduksjon på ca. 40%. Isen på fjordene rundt Svalbard har også avtatt dramatisk. Muckenhuber (2015) oppgir en nedgang i perioden 2000-2014 på fra 50 til 22 døgn per år med fast-is for Isfjorden og 56 til 34 døgn per år med is i Hornsund.

Meier et al. (2014) gir en god oversikt over hvordan endringer i arktisk is påvirker økologi og menneskelig aktivitet. Så vel pattedyr (Isbjørn, sel m.fl) som laverestående arter blir sterkt påvirket av endringene. Også menneskelig aktivitet som fiske, transport, oljeaktivitet og turisme.

1.2 AVGRENSING AV ARBEIDOPPGAVER

Norut har ansvar for å utrede to deloppgaver som er beskrevet slik:

Deloppgave 3. En oversikt over hvilke typer SAR-data og andre data som vil være tilgjengelige for fjordisovervåking på kort og lengre sikt og en vurdering av hvordan/i hvilken grad disse datatypene er egnet for formålet:

- informasjon om aktuelle instrumenter (frekvensbånd, polarisasjoner, romlig oppløsning), dekningsgrad, langsiktig leveringssikkerhet (operasjonelle eller eksperimentelle satellitter) og kostnader (datatilgang på kommersielle eller åpne vilkår; prosesseringskostnader).

Deloppgave 4. En oversikt over hvilke metoder som er tilgjengelige for å klassifisere ishabetatene med utgangspunkt i de langsiktig tilgjengelige datasettene. Oversikten må legge vekt på metoder som tillater automatisert eller halv-automatisert kartlegging og overvåking av egenskaper ved isen som kan være bestemmende for egnetheten som habitat, inkludert:

- å skille havis fra åpent vann
- klassifisering av istype
- istykkelse og snødekke

Denne rapporten svarer på disse deloppgavene i kapitlene 3, 4 og 5. I kapittel 2 er det i samråd med Norsk Polarinstitutt gjort noen begrensninger av hvilke datatyper og modi som er mest aktuell, for å oppnå en best mulig spissing av rapporten. Kapittel 6 gir en oppsummering og anbefalinger til videre arbeid.

2 KRAV TIL SATELLITDATA

I et møte mellom Norut (E.Malnes) og NPI (Stein Tronstad, Max König) ble brukerkrav diskutert. Det var enighet om at det ikke bør stilles rigide krav, men heller ha en pragmatisk innfallsvinkel med størst fokus på hvilke metoder som styrer hvilke krav. Behov for hyppig dekning vil i praksis tilsi grovere oppløsning. Behov for høy oppløsning vil i praksis innebære økte kostnader og sjeldnere dekning. Siden Sentinel-1 data vil være gratis vil i praksis mye styres av hva som er mulig å oppnå med denne sensoren.

NPI signaliserte videre at det viktigste var å få frem i rapporten hvilke ulike metoder som brukes i praksis av de ulike iskartleggingstjenestene. Hva er likheter, hva er forskjeller, hvordan klassifiseres SAR bilder.

2.1 DEKNINGSGRAD

Dekningsgraden, dvs. hvor hyppig vi har satellittdata fra de enkelte fjordene er viktig. Det er ønskelig med data så hyppig som mulig. Dette oppnås i iallfall med datatypen ScanSAR (en scene er typisk 450km x 450 km) som i praksis kan gi dekning flere ganger per dag med en satellitt.

2.2 OPPLØSNING

Oppløsningen til satellittdata bør være gode nok til at det er mulig å skille is, land og åpent vann. For å kunne oppnå dette er det vår vurdering at oppløsningen ikke bør være dårligere enn ca. 100 m. En bør ha «noen piksler» på tvers av en fjord for i praksis å kunne oppløse fjordisen. Dette vil i praksis eliminere en del aktuelle sensorer.

2.3 DATAKOSTNADER

Kostnader ved innkjøp av satellittdata bør være så små som mulig. Sentinel-1 data er gratis, mens data fra kommersielle satellitter TerraSAR X har en betydelig kostnad (typisk flere 1000 kr per bilde).

2.4 PROSESSERINGS-KOSTNADER

For å kunne oppnå en operasjonell fjordis-overvåkning må det også utvikles satellittbilde prosessering som gjør at man kan konvertere satellittbildene til egnede iskart. Det vil sannsynligvis påløpe kostnader ved utvikling av prosesserings programvare.

3 OVERSIKT OVER DATA SOM KAN BRUKES TIL FJORDISOVERVÅKNING

Dette kapittelet gir en oversikt over hvilke data som er aktuelle å bruke til overvåkning av fjordis.

3.1 SAR DATA

Syntetisk Aperture Radar (SAR) er en radarteknikk som brukes på en rekke jordobservasjonssatellitter. SAR er vær- og lysuavhengig i motsetning til optiske satellitter, og er dermed svært godt egnet til å kunne brukes til overvåkning av Svalbard hvor mørketida varer i 4 måneder. I tillegg er Svalbard dekt av skyer i ca. 80% av tiden.

I de neste underavsnittene vil vi gå igjennom aktuelle SAR satellitter, og hvilke modus som er mest aktuelle å bruke. Vi nevner også historiske sensorer som kan være aktuelle å bruke dersom det er ønskelig å få fram en historisk tidsserie med fjordisdata.

3.1.1 EGENSKAPER VED SAR DATA

SAR sensoren på de ulike SAR-satellittene har ulike egenskaper, som gir ulike egenskaper/kvaliteter på satellittbildene.

Frekvens

Radarens senderfrekvens har betydning for evnen til å skille is ifra vann, samt til å kunne studere forskjeller på tykk og tynn is. De ulike frekvensbåndene som per nå brukes på SAR-satellitter er L-bånd (2 GHz), C-bånd (5 GHz) og X-bånd (10 GHz). Det finnes også planer om både høyere frekvenser (Ku-bånd) og lavere frekvenser (P-bånd). De mest aktuelle frekvensbånd for operasjonell overvåkning er C og X-bånd siden det her finnes operasjonelle satellitter. L-bånd satellitter er fortsatt av mer eksperimentell art (JERS, ALOS, ALOS-2).

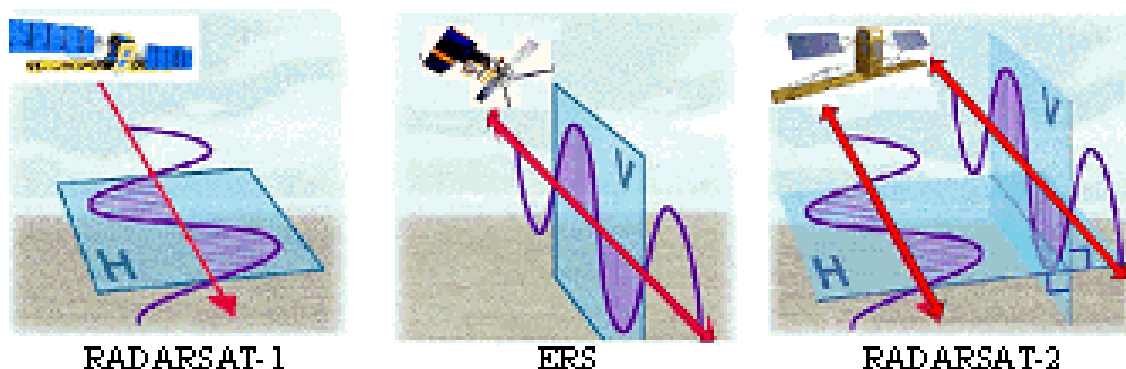
Grovt sett kan en si at forskjellen på X- og C-bånd ligger i sensitivitet i forhold til istykkelse/snømengde. X-bånd vil gi en sterkere økning i radar tilbakespredning enn C-bånd når istykkelsen eller snødybden øker. På den annen side er X-bånd data stort sett kommersiell og gir dermed økte kostnader til operasjonell overvåkning sammenlignet med C-bånd data, som for Sentinel-1 er gratis. X-bånd kan ha visse fordeler sammenlignet med C-bånd når en skal skille ulike istyper. L-bånd SAR kan også ha fordeler i forhold til C-bånd på klassifisering av deformasjonsstrukturer, klassifisering i smeltesesongen i tillegg til å være mer robust i deler av issesongen.

Polarisasjon

Polarisasjon er definert som retningen til det elektromagnetiske feltet til den utsendte og mottatte radarbølgen i forhold til orienteringa av radaren. Det finnes flere muligheter,

men for satellitt brukes for det meste lineær polarisasjon; enten vertikalt (V) eller horisontalt (H) i forhold til radaren. De første SAR satellittene brukte enkel co-polarisasjon, dvs. at de sender og mottar med samme polarisasjon. ERS-1/2 hadde VV-polarisasjon og Radarsat-1 HH.

Ved å endre på polarisasjon på utsendelse av radarbølge og mottak kan en også måle krysspolarisasjon (VH og HV). Kryss-polarisasjon kan i noen tilfeller være bedre egnet enn co-polarisasjon.



Figur 3.1 Polarisasjon til radarbølger for Radarsat-1, ERS og Radarsat-2. Radarsat-2 har mulighet til dual-polarisasjon, dvs. sende horisontalt, og motta både horisontalt og vertikalt.

De nyeste satellittene (Radarsat-2, Sentinel-1, TerraSAR-X m.fl.) har mulighet til å sende ut en polarisasjon og motta samtidig co- og kryss-polarisasjon. Dette kalles dual-polarisasjon. Dette er i praksis den modus som brukes for de fleste satellittene for overvåking i Arktis. Fordelen er at en får to statistisk uavhengige bilder med visse forskjeller. Spesielt synes kryss-polarisasjon å ha gode egenskaper for å kunne detektere kontrast mellom bølger på havet og is. De mest vanlige modi på Sentinel-1 og Radarsat-2 er S1A_EW-mode og RS-2 SCAW mode. Disse er ganske like i dekningsområde og oppløsning.

I tillegg til dual-polarimetri bør også full-polarimetrisk måling nevnes. Dette er en modus som flere av de nye satellittene har (RS-2, TSX, CSM), men som brukes stort sett til forskningsformål siden dekningsområdet er forholdsvis lite (25x25 km) i sammenligning med det store området ScanSAR dual-pol kan gi (500x500km). Full-polarimetri kan gi tilleggsinformasjon som kan utnyttes til klassifisering av is. I tillegg til full-polarimetri er det i dag også sterke krefter som ser på muligheten til å bruke kompakt polarimetri. Ved kompakt polarimetri sender radaren ut en sirkulært polarimetrisk bølge, og så mottar den på to ortogonale polarisasjoner (lineært eller sirkulært). Slike radarer finnes fortsatt ikke på satellitt, men vil når det blir skutt opp kunne gi større dekningsområde en full-polarimetri. Samtidig kan kompakt polarimetri brukes omtrent på samme måte som full-polarimetri til å rekonstruere den komplette Stokes-matrissa som gir en fullstendig beskrivelse av radarmålet.

Dekningsområde vs. Oppløsning

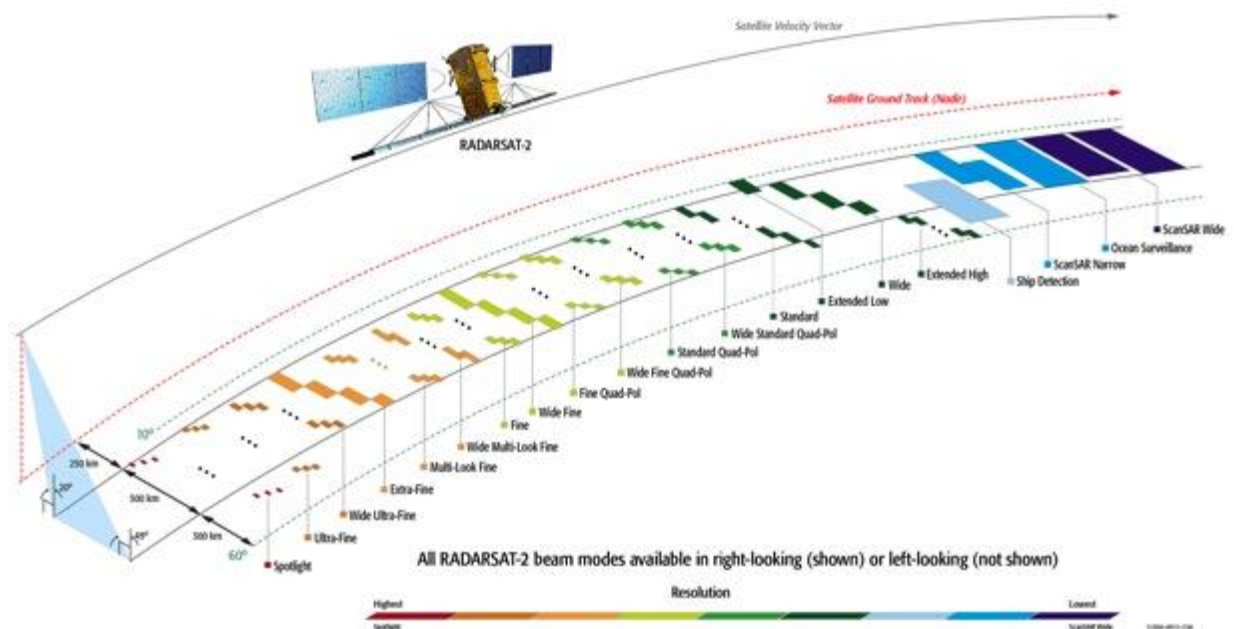
SAR avbildning er en krevende operasjon. Radaren kan ikke stå på hele tiden pga. energibegrensninger samt begrensninger i data-rate ved nedlastning til bakke-stasjon. De fleste nyere sensorer har en rekke forskjellige avbildningsmodus der man veier behov for stort dekningsområde opp mot behovet for høy oppløsning på data eller evt. behov for flere polarisasjoner.

I områdene rundt Arktis og Svalbard har de fleste brukere og operatører valgt å bruke ScanSAR modus de senere årene som gir satellittspor med ca 400-500 km bredde og 40-150m oppløsning. Med en slik modus kan man i praksis oppnå dekning over Svalbard minst to ganger i døgnet, og dette brukes i dag aktivt av istjenesten til f.eks Met.no for å kartlegge isen i norske territorier.

I figur 1 vises den komplette oversikten over Radarsat-2 sine avbildnings modus, fra høy oppløsning og små scener til grov oppløsning og store scener.

Innfallsvinkel

Vinkelen mellom vertikalen og radarens siktelinje kalles innfallsvinkel. For de fleste radarmål vil radar tilbakespredning avta som funksjon av økende innfallsvinkel siden mer av energien blir reflektert av overflata bort fra radaren (speil-effekt) enn det som blir spredt tilbake. Overflateruhet er i stor grad bestemmende for hvor mye energi som spres tilbake. Røye overflater (f.eks havbølger eller deformert is) sprer mer tilbake enn glatte overflater (blank is eller rolig sjø). I ScanSAR bilder som spenner over et stort innfallsvinkelintervall (ofte 20° til 45 °), kan vi oppleve at is og vann bytter mellom å være den sterkeste og den svakeste sprederen. Dette kan skape problemer med automatisert klassifisering. Dette problemet er betydelig mindre på kryss-polarisasjon, der vann nesten alltid har lavere tilbakespredning enn is (Ochilov og Clausi, 2012)

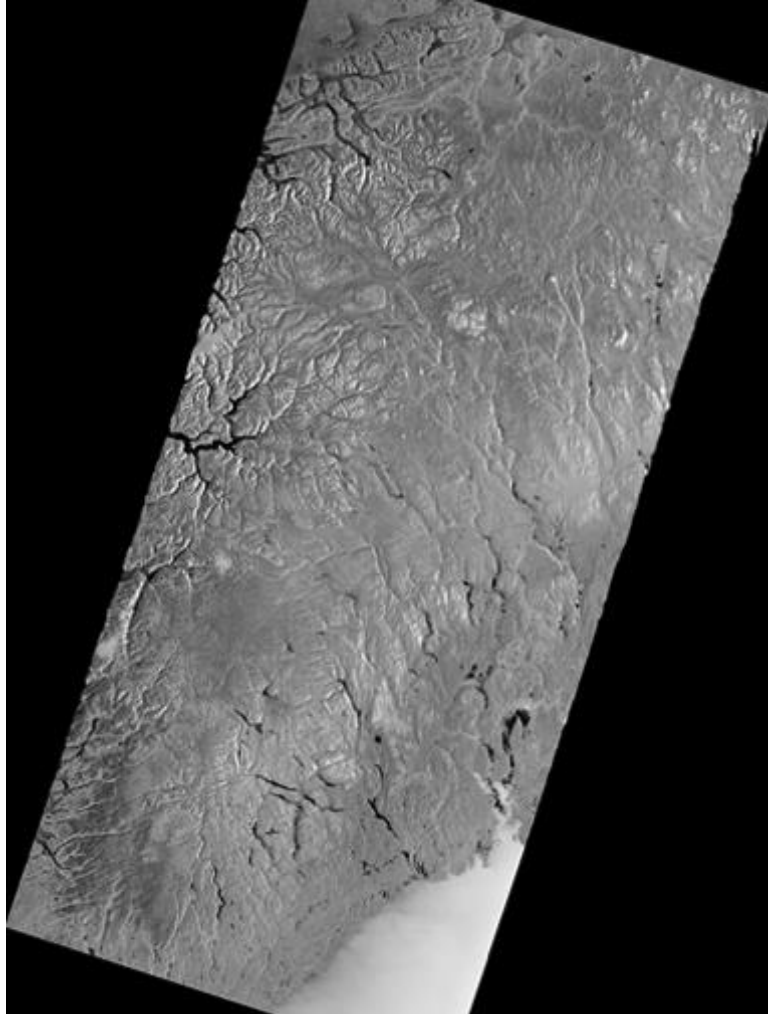


Figur 3.2 Radarsat-2 modi.

Diskusjon av aktuelle SAR modi

Sett i lys av at det finnes tilgjengelig daglige data fra Sentinel-1 og Radarsat-2 med relativt god oppløsning (40m) synes det ganske opplagt at dette er det mest aktuelle modus for kartlegging av fjordis på Svalbard. Med 40 m oppløsning bør man være i stand til å kartlegge fjordis med svært god oppløsning tilnærmet daglig. Bedre oppløsning gir trolig ikke betydelig bedre resultat, og vil medføre betydelige kostnader. Under den norske Radarsat-2 avtalen er det til en viss grad mulig å anskaffe en del RS-2 data i høyere oppløsning (f eks Standard mode 30 m eller Fine mode 10m) men det ville forde et stort antall scener per år som ville hatt en betydelig pris. Et grovt prisanslag vil være flere hundre tusen kroner per år for ukentlig overvåkning av Svalbard.

Selv om X-bånd sensorer også har dekning på Svalbard, vil slike data ha en kostnad siden de kommer fra kommersielle leverandører. Kostnaden for å drive en operasjonell tjeneste vil være betydelig større enn med C-bånd data som i dag er gratis. En modi som kunne vært interessant er TerraSAR-X sin nye ScanSAR wide modi (250 km sporbredde; 40 m oppløsning). Denne kan tenkes å gi komplementær informasjon til C-bånd overvåkning. I tillegg har modien også interessante egenskaper på land, siden den kan brukes til å måle vannekvivalent. Norut gjennomfører nå et prosjekt (SWEX) i lag med Globesar der TerraSAR X ScanSAR wide benyttes til å estimere vannekvivalenten i Sør- Norge. Vannekvivalenten er relatert til økning i radar backscatter mellom to scener hvorav den ene representerer snøfrie forhold.



Figur 3.3 TerraSAR-X Scansar wide dekning over Sør-Norge 23.12.2014. Tilnærmet full dekning oppnås med 3 etterfølgende scener.

Konklusjon SAR modi

Sentinel-1A/B EW mode synes som den åpenbart mest aktuelle moden for operasjonell overvåkning av fjordis på Svalbard. Moden har forholdsvis høy oppløsning (40m), god dekning (hver dag) og leverer dual-pol data (HH, HV). Radarsat-2 SCWA mode leveres også hyppig gjennom den norske RS-2 avtalen og kan brukes som supplement eller backup system. Det viktigste argumentet for denne moden er at den er gratis for Sentinel-1, og allerede finansiert av den norske stat for RS-2. I tillegg er det veletablerte metoder for klassifisering av havis som kan overføres til klassifisering av fjordis.

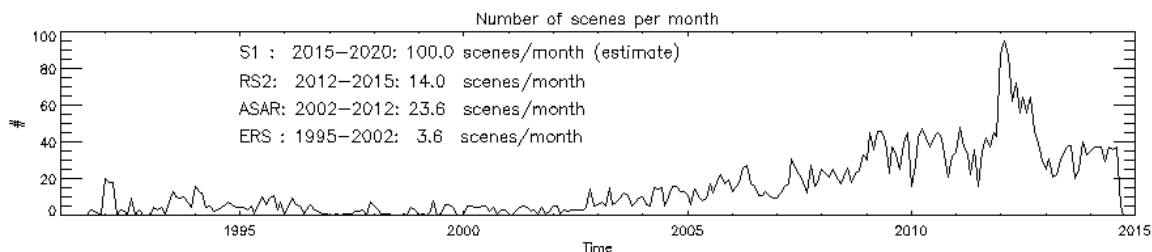
Dersom en dimensjonerer for et utvidet system som skal kunne måle flere egenskaper ved is som tykkelse og snødybde kunne det vært interessant å vurdere parallelt opptak med TerraSAR X ScanSAR wide over Svalbard. Denne moden gir dual-frekvens egenskap når den kombineres med C-bånd, og gir derfor en mer komplett beskrivelse av vekselvirkninga mellom mediet (is) og radarbølger. I tillegg har X-bånd SAR data flere interessante egenskaper på land som kan gi utnyttelse av data der også (f eks til overvåkning av snø, isbre og permafrost).

3.2 HISTORISKE SAR-SENSORER

I dette avsnittet diskuteres kort sensorene ERS, Radarsat-1 og Envisat ASAR. Disse sensorene dekker tidsrommet 1991-2012. Hvis det skulle være ønskelig å etablere en historisk tidsserie over iskart for fjorder på Svalbard ville det mest sannsynlig være data fra disse sensorene som er mest aktuelt å bruke.

3.2.1 ERS-1/-2

ERS-1 var ESA's første SAR satellitt og leverte data i perioden 1992-2000. ERS-2 som er lik ERS-1 ble skutt opp i 1995 og var operativ til 2010. Satellittene har 35 dagers repetisjons-sykel, dvs. at satellitten går i samme bane hver 35 dag. Siden Svalbard er langt mot nord der de polare banene som satellittene følger samler seg, er det i praksis dekning oftere enn en gang per repetisjons sykel der. Ved å studere ESA's arkiv ser vi at det er data for enkeltområder på Svalbard er ukentlig dekning på Svalbard i perioden 1995-2002 (se figur 3.4).



Figur 3.4. ERS-sensoren opererer på C-bånd og anvender VV-polarisasjon. Oppløsning på produktene PRI produktene er ca. 30 m, med sporbredde 100km

Dersom det er interessant å studere klimaendringene på Svalbard, er ERS-1/2 data et godt utgangspunkt for å få fram en tidsserie i perioden 1991-2003 og vil dermed kunne brukes i tillegg til Envisat-ASAR og Radarsat-2 til å konstruere en tidsserie med iskart.

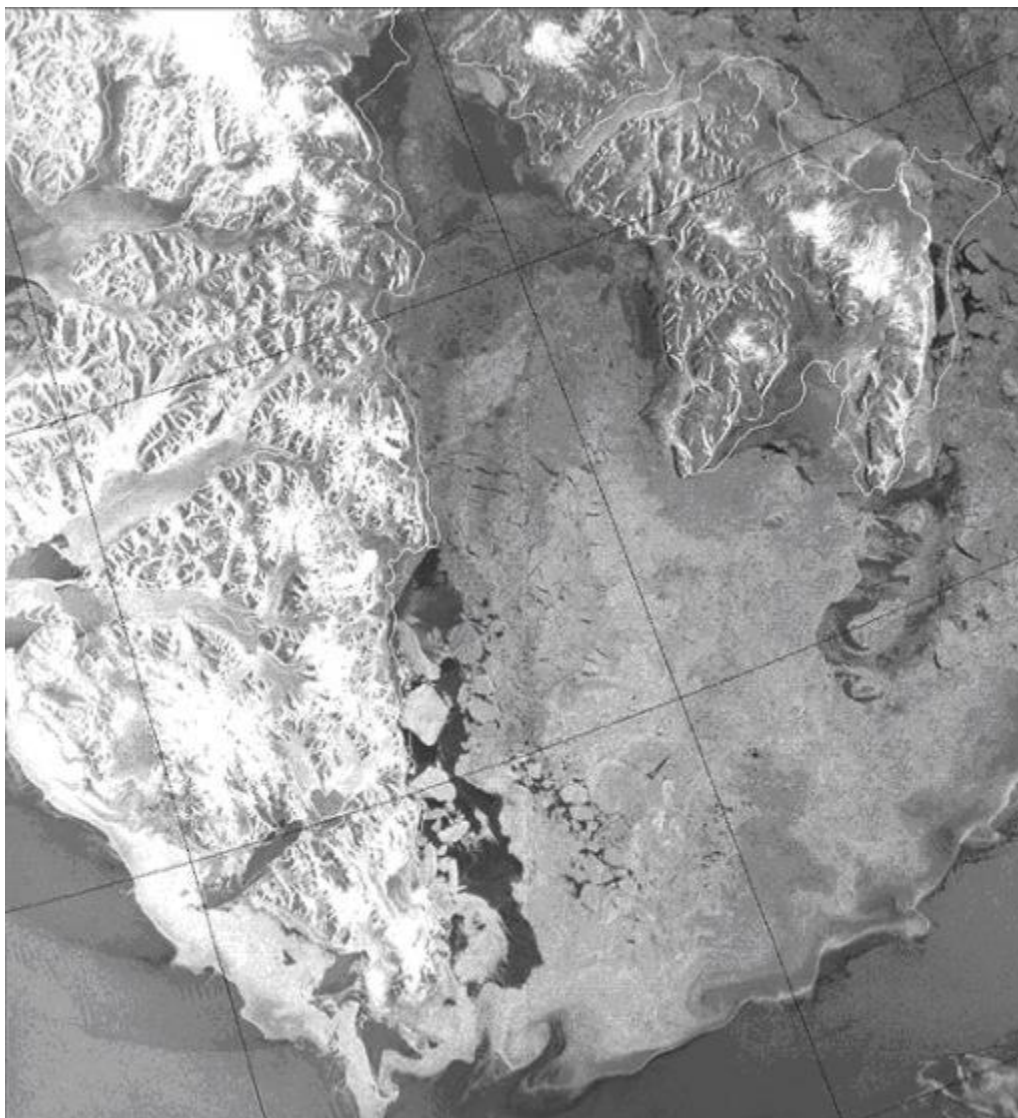
3.2.2 RADARSAT-1

Radarsat-1 ble skutt opp i 1995 og var operativ til 2013. satellitten var eid av Canadian Space Agency i samarbeid med MDA. SAR sensoren opererer på C-bånd og bruker HH-polarisasjon. Sensoren har flere avbildnings modi, bl.a. Fine mode med 10m oppløsning/100 km sporbredde og ScanSAR med 100m oppløsning /500km sporbredde.

3.2.3 ENVISAT ASAR

Envisat ASAR ble skutt opp av ESA høsten 2002 og var operativ til April 2012. ASAR hadde en rekke operasjonelle modi, men den mest aktuelle for overvåkning av fjordis på Svalbard er wide-swath moden med 450 km sporbredde og 150m oppløsning. For Svalbard er det mulig å rekonstruere en tilnærmet daglig tidsserie over øygruppa i perioden 2003 -2012. Den er dermed svært interessant som historisk sensor dersom det skulle være interessant å rekonstruere en tidsserie. Som vist i figur 3.4 øker antall

månedlige bilder for Svalbard til ca. 24 bilder per måned i tidsrommet 2002-2012. Mot slutten av perioden har vi tilnærmet daglig dekning over øygruppa.



Figur 3.5 Envisat ASAR WSM bilde over Svalbard 4.april 2004 (ESA).

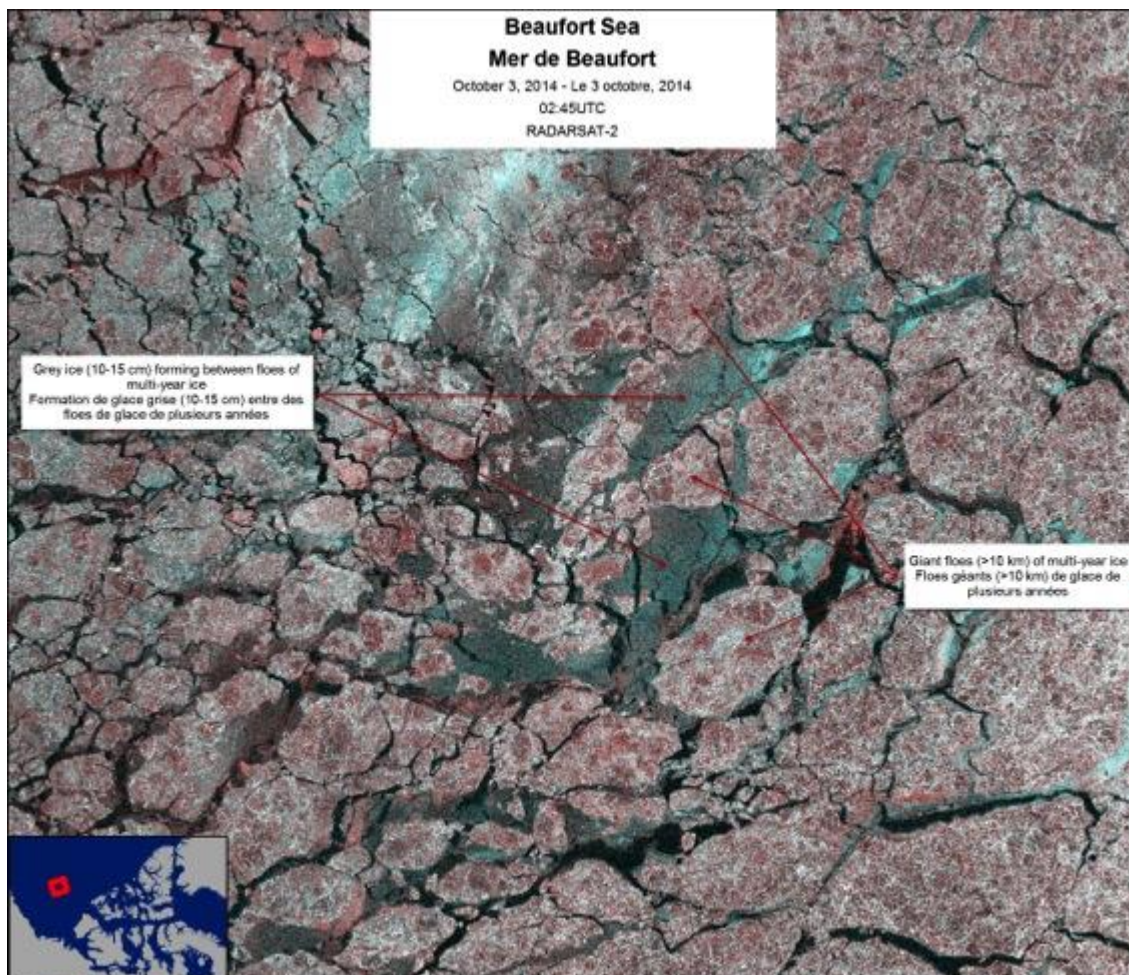
3.3 OPERASJONELLE C-BÅND SAR SENSORER

Dette avsnittet går igjennom de to aktuelle C-band sensorene Radarsat-2 og Sentinel-1 som i dag gir bra tilgang på SAR data over fjorder på Svalbard

3.3.1 RADARSAT-2

Radarsat-2 ble skutt opp i april 2008 og er operert av MDA (MacDonald, Dettwiler and Associates). SAR sensoren er en C-bånd sensor og har svært mange operasjons-modi. Den kan levere alt fra full-polarimetriske målinger, til enkelt polarisasjoner. Den høyest oppløste moden er spot light SAR med 1 m oppløsning, mens ScanSAR wide A moden gir best dekning (500km) med 100m oppløsning.

Den Norske Radarsat-2 avtalen (som har vart siden 2010) sikrer norske offentlige brukere god tilgang på Radarsat-2 data. I perioden etter at Envisat ASAR sluttet å virke i 2012 til Sentinel-1 startet nominell drift i 2014 var RS-2 data svært viktig. Det er en løpende vurdering om RS-2 avtalen skal videreføres. Gjeldende avtale varer fram til 2018 (Guro Dahle Strøm, Norsk Romsenter, personlig kommunikasjon). I dagens situasjon med god tilgang på data fra Sentinel-1 i EW moden, som har bedre oppløsning enn SCWA moden fra RS-2 synes ikke disse data like viktig, men Norsk Romsenter vil utrede behovet for Radarsat i 2016.

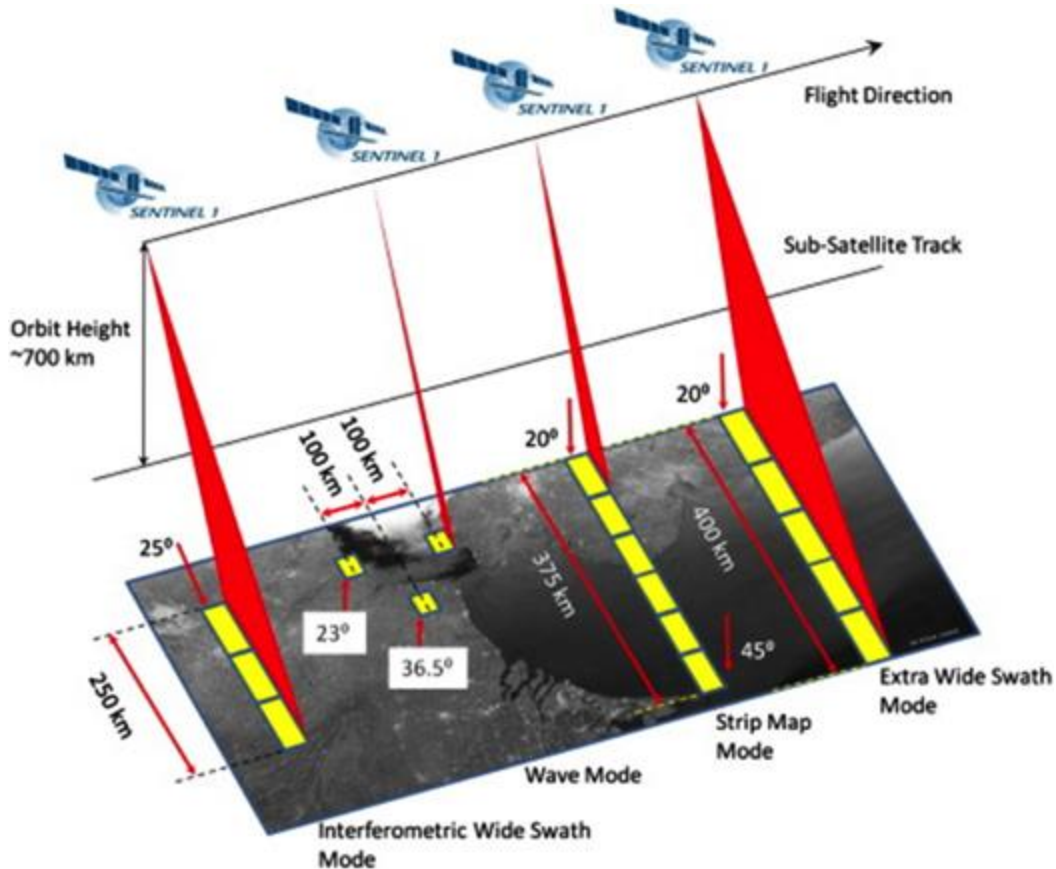


Figur 3.6 Radarsat-2 bilde av havis i Baufort havet nord for Canada med ekspert tolkning av ulike istyper.

3.3.2 SENTINEL-1

Sentinel-1A er eid av EU gjennom Copernicus programmet og ble skutt opp i April 2014. Den startet å levere data i Oktober 2014. Sentinel-1B, som er en helt lik sensor, vil bli skutt opp i 2016. Til sammen vil disse to satellitter levere formidabelt mye data (potensielt mer enn 4 bilder per dag over Svalbard). Satellitten har to aktuelle avbildningsmodus for Svalbard. Etter anbefaling fra blant andre istjenester prioriterer Copernicus Extra wideswath moden (EW) med 450 km sporbredde, 40 m oppløsning og dual-polarisasjon (HH,VH) over Svalbard. Interferometric Wideswath moden (IW) har bedre oppløsning (10m) men mindre sporbredde (250km). Det gjøres kampanjebaserte

opptak ca 1 gang per måned med denne moden, hovedsakelig rettet mot landbasert overvåkning (isbre, permafrost).



Figur 3.7 Avbildningsmodus for Sentinel-1.

3.4 KONTINUITET FOR C-BÅND SAR

Både MDA og Copernicus har langtidsplaner for å sikre kontinuiteten i opptak av C-bånd SAR data.

3.4.1 SENTINEL-1 C/D

Etter oppskytningen av Sentinel-1B i 2016 planlegger Copernicus å bygge Sentinel-1C og 1D. Copernicus har allerede utlyst anbudskonkurranser for å bygge disse, og vil mest sannsynlig skyte opp nye når Sentinel-1A/B begynner å bli «gamle». Nominell levetid for Sentinel-1 er 7 år.

3.4.2 RADARSAT CONSTELLATION

MDA er i ferd med å bygge oppfølgeren til Radarsat-2. De planlegger å skyte opp Radarsat Constellation Mission (RCM) fra 2018. Dette vil være en konstellasjon av 3 C-band SAR satellitter (sannsynligvis en noe forenklet versjon av Radarsat-2) som vil være spesielt designet for overvåkning av is og skipstrafikk i Arktis.

3.5 ANDRE MULIGE SAR SENSORER

3.5.1 TERRASAR-X

TerraSAR-X ble skutt opp i 2008, mens TanDEM-X ble skutt opp i 2010. De er eid i fellesskap av DLR og Airbus Defence and Space. Sensoren på de to satellittene er like, og er en X-bånd SAR med svært mange opptaksmodus. Det høyest oppløste produktet (Staring spotlight) har 25 cm oppløsning og har dekningsområde på 4x4km. Wide ScanSAR moden har 40m oppløsning om dekker 270 km sporbredde. I Norge har KSAT lisenser for videresalg av produkter.

3.5.2 COSMO SKYMED

Cosmo SkyMed er eid av det italienske forsknings og forsvars departement. Cosmo består av 4 satellitter med X-bånd SAR og har dermed en formidabel dekningsgrad med god oppløsning. I Norge har KSAT lisenser for videresalg av produkter. På samme måte som for TerraSAR-X blir kontinuerlig overvåkning over hele Svalbard forholdsvis dyrt. Cosmo har en ScanSAR mode med 200km sporbredde, og 100m oppløsning. Dette er m.a.o. noe dårligere enn tilsvarende for TerraSAR-X.

3.5.3 ALOS-2

Den Japanske satellitten ALOS-2 (Advanced Land Observing Satellite -2) ble skutt opp i 2014 og anvender L-bånd (1.2 GHz). ALOS-2 er som forgjengerne JERS og ALOS PALSAR-1 eksperimentelle sensorer, som neppe i denne vil få operasjonell status, men det er en del planer om mere operasjonelle satellitter som Brasil's SAOCOM samt ESA's snyltesatellitt (TANGOSat) som er en passiv sensor som kan komme til å fly i formasjon med SAOCOM.

Dierking og Busche (2006) påviser at L-band SAR kan være komplementær til C-bånd for isklassifisering i enkelte tilfeller. De påviser ved å sammenligne JERS og ERS (L og C-bånd) at JERS kan detektere skrugarder, «rubble fields» og «brash ice» bedre enn C-bånd SAR.

3.5.4 RISAT, M.FL.

RISAT-1 ble skutt opp i 2012 av det Indiske rominstituttet (ISRO). Den har en C-band SAR som er en kopi av ERS. KSAT leverer RISAT-1 data. RISAT ansees ikke som et

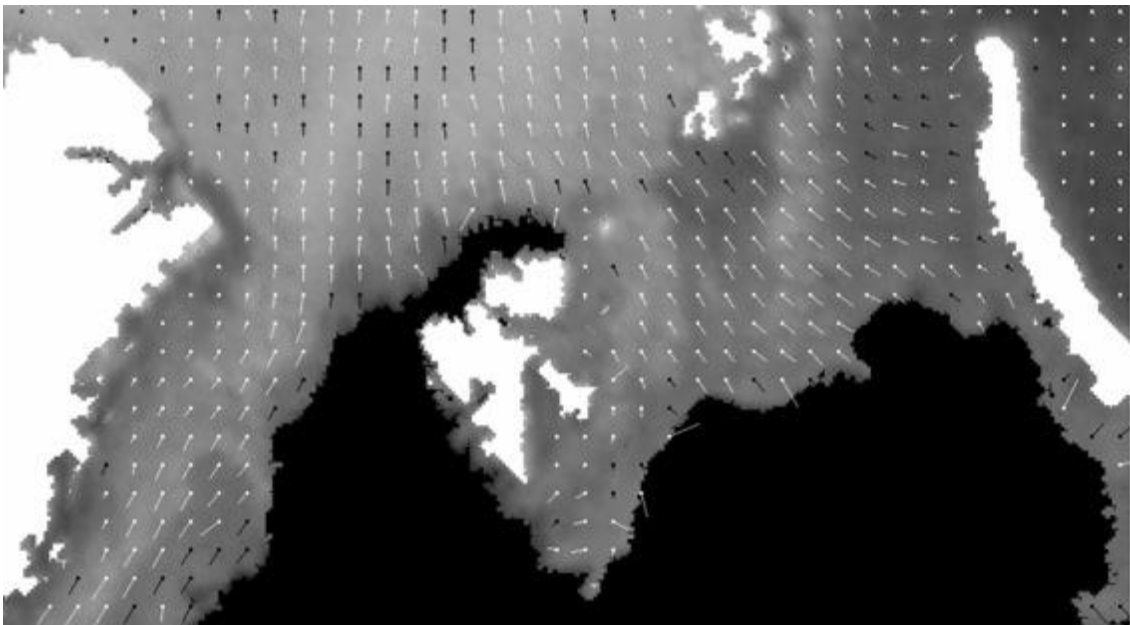
godt alternativ i forhold til f eks Sentinel-1, men kan i visse katastrofale scenarier ha en gap-filler rolle.

3.6 SCATTEROMETER

Scatterometer er også radarer, men bruker i motsetning til SAR en reell antenne for å avbilde overflaten. Dette gir i praksis en ganske mye dårligere oppløsning (5-10 km) enn SAR. Scatterometer skanner et stort område (typisk 1500 km sporbredde) som gir daglig dekning i polområdene. En rekke satellitter har scatterometer (ERS-1/2, Envisat, METOP-A). Scatterometer brukes først og fremst til å måle storskala maritime fenomener som vindhastighet, vindretning og bølger. Scatterometer kan også brukes til å måle havis på global skala.

METOP-A satellitten har C-bånd scatterometeret ASCAT som samlet på et 12.5km grid. ASCAT brukes aktivt til klassifisering av havis i OSISAF tjenesten for global havis.

Ku-bånd (15GHz) scatterometer som Quikscat (1999-2009) og Oceansat-2 sitt scatterometer OSCAT (2009-) har noe bedre oppløsning enn C-bånd scatterometer. Haarpaintner et al. (2004) har demonstrert måling av isdrift i Arktis med Quikscat. Quikscat har også blitt brukt til iskant, istype og iskonsentrasjon (Haarpaintner and Spreen, 2007)



Figur 3.8 Isdrift rundt Svalbard 11-13 mars 2003 basert på Quikscat data. Pilene viser retning og hastighet på is-driften.

Historiske data fra Quikscat kan være aktuelle for å rekonstruere historiske tidsserier for Fjordis, spesielt i perioder der det er dårlig dekning med SAR, dvs. før 2002.

3.6.1 OPPSUMMERING SCATTEROMETER

Scatterometer-data er i praksis uegnet til fjordisovervåkning pga dårlig oppløsning. Kubånd Scatterometer kan muligens være interessant i «store» fjorder der man kan leve med oppløsning på ca 2.5 km dersom denne frekvensen gir bedre egenskaper i forhold til f eks måling av istykkelse.

3.7 OPTISKE SATELLITTER

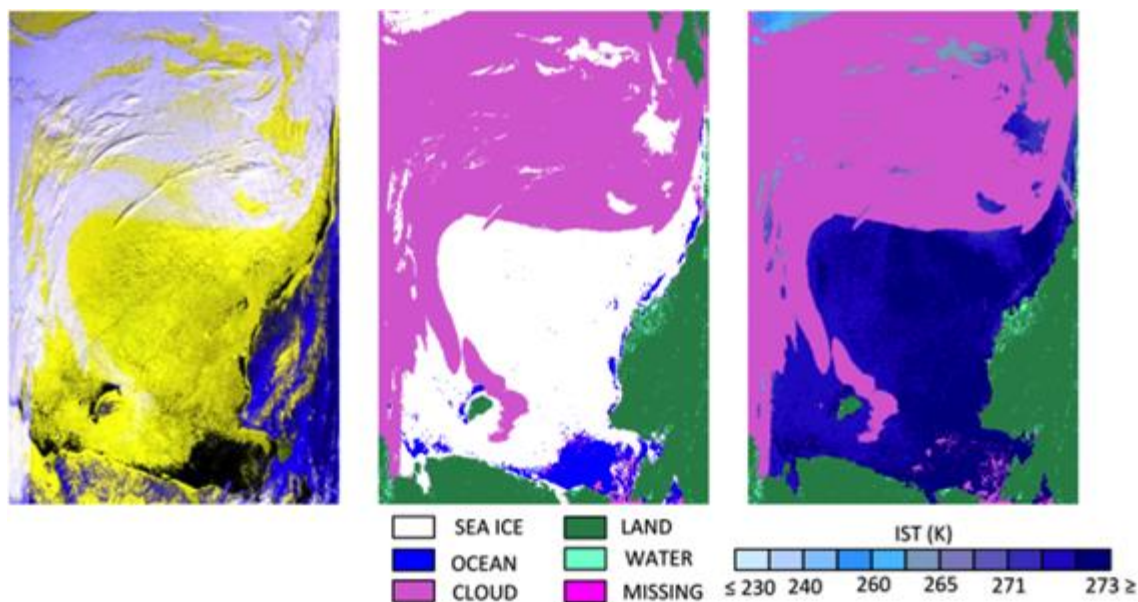
Optiske satellitter er i stand til å observere is på fjorder under gode lys og værforhold. Dette gjør dem i praksis uegnet til operasjonell bruk på Svalbard med 4 måneder mørketid og mer enn 80% skydekke. Ikke desto mindre gir vi i dette avsnittet en kort oversikt over aktuelle sensorer, som kan brukes som supplement til SAR for overvåkning. Optiske satellitter kan grovt inndeles i tre hovedkategorier basert på oppløsning: Grov oppløsning (>250m), middels oppløsning (10-250m) og høy oppløsning (<10m).

3.7.1 OPTISKE SATELLITTER MED GROV OPPLØSNING

I denne kategorien havner en lang rekke sensorer. Disse kan være viktige dersom en ønsker å rekonstruere tidsserier så langt tilbake i tid som mulig.

AVHRR sensoren har vært i drift på en rekke satellitter siden 1978. I starten var disse drevet av amerikanske NOAA, men de siste 10 årene har også Europeiske Meteosat benyttet dette instrumentet på METOPS-satellittene som benyttes av de europeiske meteorologiske organisasjoner inkludert Meteorologisk institutt i Norge. AVHRR har en nominell oppløsning på omkring 1 km.

MODIS-sensoren (2000-) har mange likhetstrekk med AVHRR, men har 250m oppløsning. Sensoren måler synlig lys i en rekke frekvensbånd. NASA har utviklet et operasjonelt havis produkt (MOD29) som leveres i nær sanntid for polområdene med 1 km oppløsning. Produktet viser både is-utstrekning og isens overflate temperatur.



Figur 3.9 MODIS havisprodukt for polhavet nord for Sibir og Alaska 12 mai 2002. Venstre: Synlig lys. Midt: Isklasser. Høyre: Overflatetemperatur.

NASA har allerede skutt opp etterfølgeren VIIRS, som skuffende nok har noe dårligere oppløsning enn MODIS. NASA leverer også her et operasjonelt isprodukt som inneholder informasjonslagene overflatetemperatur, havis konsentrasjon og havis klassifisering (Key et al., 2013).

Sentinel-3 skal skytes opp i 2016 og blir Copernicus' havovervåkningssatellitt. Sentinel-3 vil kunne brukes på samme måte som AVHRR, MODIS og VIIRS til å klassifisere is og måle overflate temperatur.

3.7.2 OPTISKE SATELLITTER MED MIDDELS OPPLØSNIG

Optiske satellitter med middels høy oppløsning brukes til en rekke anvendelser, men først og fremst over land. USGS (US Geological Survey) har arkivert Landsat siden 1972. Dagens sensor Landsat-8 er et meget godt instrument som leverer data svært regulert og svært brukervennlig. Landsat-8 måler multi-spektralt i 11 bånd med 30 m oppløsning (synlig) og 100m (infrarødt).

Copernicus' Sentinel-2A satellitten med 10m oppløsning ble skutt opp i 2015, og leverer data hyppig. Kvaliteten er minst like god som Landsat-8. For Svalbard vil satellitten i praksis kunne brukes tilnærmet daglig så lenge det ikke er mørketid eller skydekke. Denne sensoren vil dermed være svært godt egnet til validering av SAR data, samt til multi-sensor målinger.



Figur 3.10 Landsat-8 bilde fra Nordenskjöldland, Svalbard 29 april 2015. Isen på Van Mijenfjorden (nederst til høyre) vises tydelig.

3.7.3 HØYOPPLØSTE OPTISKE SATELLITTER

I denne kategorien havner de aller høyest oppløste satellitter med bedre enn 10m oppløsning. I dagens satellittmarked opereres disse stort sett utelukkende av kommersielle aktører. Vi ser bort ifra militære satellitter, som uansett ikke er tilgjengelige. De beste produktene i dag leveres med oppløsning på under 0.5m og vil kunne brukes til å skille mellom is og vann uten problemer. Det er også fullt mulig å skille mellom snødekt is og bar is. Høyoppløste optiske satellitter har like store problemer som andre optiske satellitter med mørke og skydekke.

3.7.4 OPPSUMMERING OPTISKE SATELLITTER

Optiske instrument synes uegnet til overvåking av fjordis på grunn av begrensninger i mørketida og pga skydekket rundt Svalbard som gir få observasjoner. Enkelte datatyper som MOD29 is-produkt samt Landsat-8/Sentinel-2-data kan være aktuelle som tilleggsdata (f eks gap-filler for å dekke hull i datatidsserier) eller for å klassifisere data på en annen måte enn hoveddata-kilden (SAR). Landsat-8 og Sentinel-2 er også godt egnet til uavhengig testing og validering av SAR produkter.

Optiske satellitter kan i tillegg til å kunne klassifisere is/åpent hav kan de også i noen grad brukes til å bestemme is-type, om isen er snødekt eller snøfri samt å gi nøyaktig måling av overflate-temperatur.

3.8 RADIOMETERE

Radiometere måler stråling i mikrobølgeområdet passivt. Radiometer har blitt benyttet siden 1978 for å måle storskala is-konsentrasjon i polområdene. Sensorer som SMMR, SSM/I, AMSR-E m.fl måler termisk stråling fra overflaten i frekvensområdet 20-85 GHz med oppløsning av størrelsesorden 10-20km. Disse sensorene er i noen grad i stand til å måle istykkelse, men på grunn av den svært dårlige oppløsningen er de helt uegnet til å skille mellom is, åpent vann og land i fjordene på Svalbard.

ESA's SMOS satellitt som har et L-band radiometer (1.4 GHz) som kan brukes til å måle tykkelse på tynn havis opptil 50 cm med en oppløsning på ca 35km x35 km (Mass, 2013; Kaleschke et al., 2012). De testet metoden på data over Karahavet, Russland under ideelle forhold sent på høsten 2010. Ved å sammenligne med målinger med MODIS (se avsnitt 3.7.2) får de en usikkerhet på 10 cm (RMSE).

3.9 RADAR- OG LASER ALTIMETRE

Altimetere måler avstand mellom satellitt og overflaten, og kan dermed i prinsippet brukes til å måle free-board, dvs tykkelse på isen/snøen som er over havoverflata. Det finnes gode metoder til også å beregne istykkelsen. Det finnes to hovedtyper av altimetre: Laser og radar altimeter.

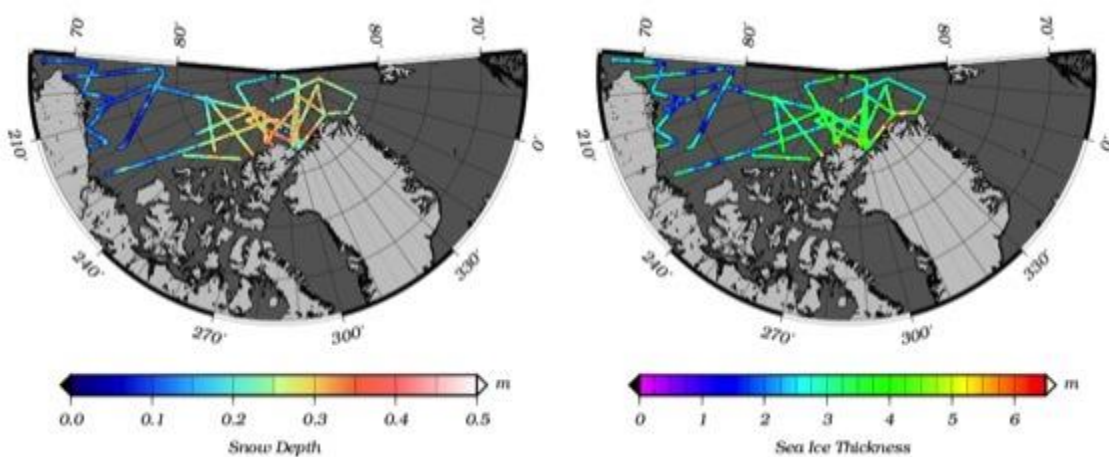
3.9.1 LASER ALTIMETER

Laseraltimeter virker bare under skyfrie forhold. I motsetning til passive instrumenter virker også laser i mørke så lenge det er skyfritt. Icesat-1 (2003-2009) leverte svært nøyaktige data. Laser-beamen er svært fokusert slik at fotavtrykket på bakken er ca 70m. Et lite fotavtrykk er svært avgjørende for å kunne måle istykkelsen nøyaktig. Høydenøyaktigheten er ca 14 cm (Shuman et al., 2006).

Det er ca. 170m mellom hver altimetermåling på bakken. Satellitten gjentar målingen over tilnærmet samme sted (innenfor 1km) i løpet av 91 dager. Det siste faktum er et stort problem dersom en skulle brukt laser til Fjordis overvåkning. Selv om polområdene blir dekt hyppigere pga polarbanen, vil det likevel være relativt sjeldent at målingene gjentas over samme fjord.

Icesat-1 hadde også store problemer med laser-instrumentet. Selv om de hadde tre selvstendige lasere ble de to første brent opp svært raskt. Den siste laseren ble brukt svært forsiktig, slik at instrumentet varte lengere, men tok opp desto mindre data.

Icesat-2 (<http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat2/>) er planlagt skutt opp i 2017. Instrumentet på Icesat-2 vil være en forbedret versjon av Icesat, med noe høyere oppløsning. I perioden 2009-2015 har NASA kjørt kampanjen IceBridge der de overvåker isen i Arktis og Antarktis årlig med luftbåren laser skanner årlig samt ulike feltmålinger.



Figur 3.11 Top: Bilde fra NASA's flykampanje IceBridge over frossen fjord på Nord-Øst Grønland (NASA). Bunn: Produkter som viser snødybde og havistykkelse for IceBridge kampanje i Arktis.

3.9.2 RADAR ALTIMETER

Radar-altimeter virker under alle værforhold. Det har vært radaraltimeter på en rekke satellitter siden 1970-tallet. Radaraltimeter brukes til å måle vannstanden i hav på stor skala. Disse målingene er av stor betydning for å kunne måle endringer i vannstand pga klimaendringer. Oppløsninga til instrumentet er bestemt av størrelsen fotavtrykket på bakken/havet, som for de fleste radar-altimeter er i størrelsesorden 20km. Dette blir altfor grovt til å kunne måle istykkelse i fjorder.

CryoSat-2 har bedre oppløsning enn konvensjonelle radar-altimeter siden den bruker SAR og Insar-prosessering til å fokusere beamen langs satellittbanen (along-track). Slik SAR fokusering forutsetter imidlertid at radar-fotavtrykket ikke «forurenses» av signal fra omkringliggende terreng. For is i Arktis, hvor terreng-forurensning ikke er et problem, er nøyaktigheten for Cryosat-2 ca 10cm for måling av istykkelse (Laxon, 2013). For is i fjorder er det ikke publisert tilsvarende resultat, men problemstillingen er nokså lik problemstillingen med å måle vannstand i relativt små innsjøer. Kleinenherenbrink et al (2014) har studert nøyaktigheten som er mulig å oppnå på Nassersjøen i Egypt når signalet som skal måles er «forurenset» av signal fra omkringliggende terreng. De finner at unøyaktigheten kan være opp mot 75cm for CryoSat-2 standard produktet fra ESA, mens deres retracking-metode reduserer feilen til omkring 20 cm. Tilsvarende metodikk kan muligens også utvikles for fjordis, men her vil enda flere faktorer som f eks snødybde på land og is tas med i feil-budsjettet og vil redusere nøyaktigheten ytterligere. Det synes å være en lang vei fram til en operativ metode for å måle istykkelse nøyaktig med SAR altimeter.

ESA prosjektet CryoTop (<http://www.stse-cryotop.org/>) ser på muligheter for å forbedre standardprosesseringen av Cryosat-produkter på isbreer, men det er uklart om dette er overførbart til fjordis. Her anvendes såkalt swath-prosessering av CryoSat-2's SARIn produktet til å lage en høydemodell over isbreen. Gray et al (2013) anvender samme metode på Peterman isbreen på Grønland.

Sentinel-3 som planlegges skutt opp av Copernicus/ESA i 2015 vil også ha et SAR-altimeter likt Cryosat-2 instrumentet og sikrer dermed kontinuitet i overvåkingen. Det vil ha en oppløsning på ca 300m along-track.

3.9.3 OPPSUMMERING ALTIMETER

SAR altimeter er i praksis uegnet til overvåking av istykkelse på fjordis. Laser altimeteret på Icesat-2 kan gi målinger av snø-fribord som kan relateres til istykkelse. Målingene vil imidlertid ikke være hyppige pga lav repetisjons-syklus og hyppig skydekke på Svalbard.

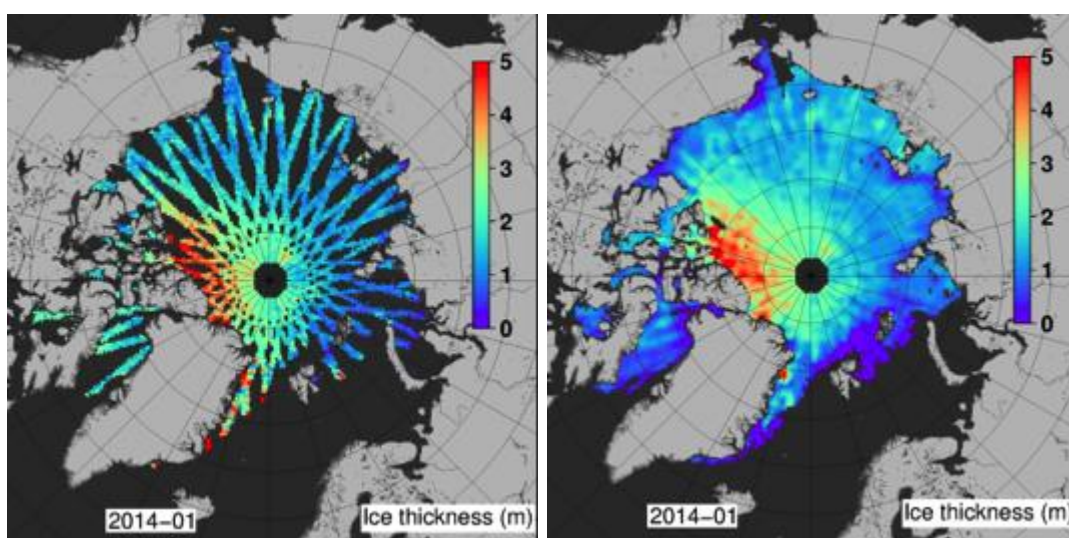
3.10 MULTISENSOR

I tillegg til de ulike sensorene nevnt ovenfor er det også mulig å kombinere ulike sensorer for å forbedre klassifisering av havis. Yu et al. (2009) viser at en kan oppnå signifikant bedre klassifisering av istype ved å kombinere AMSR-E og Quikscat slik at en har til sammen 10 bånd. Brown et al. (2014) beskriver det Canadiske IMS systemet som benytter en rekke sensorer (scatterometer, SAR, optiske spektrometre og passive radiometre) for å forbedre klassifisering av is. På tilsvarende måte kombineres ASCAT data og SSMIS passiv mikrobølge til global iskartlegging i EUMETSAT's OSISAF tjeneste (Aabø et al., 2015) som opereres av Meteorologisk institutt i Norge. Tjenesten leverer to produkter:

- Iskant-produktet: Skiller mellom ingen is, åpen is og lukket is
- Istype-produktet: Skiller mellom ingen is, første års is, flerårs is og tvetydig is

Yu and Rothrock (1996) har påvist en metode for å estimere tykkelse på tynn havis (<50cm) ved å benytte termiske kanaler hos optiske sensorer. MODIS eller Sentinel-3. Ved å koblinere MODIS og AMSR-E data har Rudjord et al. (2011) demonstrert tilsvarende metode i Laptev-havet. De påpeker imidlertid at metoden ikke fungerer i nærheten av land.

Kaleschke (2015) har brukt SMOS og Cryosat-2 data synergistisk til å forbedre måling av istykkelse i Arkis (Figur 3.12). Metoden bruker optimal interpolasjon for å kombinere de to datasettene. Ved å sammenligne med data fra NASA Icebrigde finner de at RMS feilen reduseres fra 76cm til 66 cm.



Figur 3.12 Venstre: Ukentlig Cryosat-2 estimat av istykkelse. Høyre: Kombinert Cryosat-2/SMOS ukentlig istykkelse

3.11 ANDRE DATA TYPER (IKKE SATELITT)

I tillegg til satellitt finnes det også en del andre data typer som kanskje kan være interessante i forhold til overvåkning av Fjordis på Svalbard. I de følgende del-avsnitt gjennomgås noen instrument-typer. Felles for alle disse instrument-typene er at de er plassert på bakken, havet, eller nær bakken (UAV) og dermed fordrer en kommunikasjonsløsning dersom de skal være operative. På Svalbard er bredbånd-kommunikasjon svært problematisk utenfor bosetningene og det eneste som fungerer er Iridium.

3.11.1 WEB-CAM

Viltkamera har de siste årene blitt svært robuste, billige og enkle å utplassere. Det finnes også kommunikasjonsløsninger til disse, men ofte plasseres kameraene bare ut i naturen for å ta bilde ved bevegelse eller ved faste intervaller. Dersom vilt-kamera skal fungere

for fjordis på Svalbard vil det måtte gjøres grundige studier av hvordan disse kan utplasseres for å gi best dekning. I tillegg må en sannsynligvis bruke kamera med infrarød eller nær-infrarød sensor for å kunne fungere i mørketida.

I Ny-Ålesund er det et avansert kamera på Zeppelin fjellet som delvis dekker Kongsfjorden. Siden data fra kameraet arkiveres systematisk, kan det ha en viktig rolle til validering av en framtidig fjordistjeneste.



Figur 3.13 Bilde fra Zeppelin Webcam2, 23 november, 2015 .

3.11.2 BØYER/FLYTENDE MÅLEINSTRUMENTER

Utplassering av bøyer med ulike måleinstrument kan tenkes å være en aktuell teknologi for fjordis. I Arktis finnes en del instrumenttyper (se <http://imb.erd.c.dren.mil/>) som Ismassebøyer, is-profilerings sonarer etc. som kan tenkes brukt. I Arktis driver disse med pakkisen og måler is-parametere som rapporteres med satellittkommunikasjon. Sett fra et litt overflatisk perspektiv kan nok slike sensorer være nyttige som validerings-data gitt at det ble utviklet satellittbaserte metoder for f for eksempel måling av istykkelse som trenger validering/kalibrering.

3.11.3 UAV

UAV kan neppe brukes til operasjonell overvåking av fjorder på Svalbard innenfor en rimelig kostnadsramme. UAV kan imidlertid være nyttig til valideringsformål siden de kan framskaffe bildedata av høy kvalitet (oppløsning). Ved bruk av SfM-prosessering kan også istykkelse måles. Norut har også demonstrert potensiale for måling av isdrift.

3.11.4 DORNIER PÅ SVALBARD

I et pågående prosjekt, kompetansesenter for luftfartbaserte tjenester finansiert av Troms fylke, jobbes det med å utstyre Lufttransport sitt Dornier Do-228 på Svalbard med en utstyrs-pod for fjernmåling. Planen er at poden skal inneholde en X-band syntetisk aperture radar, et avbildende spektrometer i området 400-1000 nm, et høyoppløselig fire kanals kamera og en bredbåndslinke. Breddbåndslinken har en kapasitet på 5Mbit og en rekkevidde på 200 km. Den kan fungere både som punkt til punkt kommunikasjon og som en relestasjon. Planen er at utstyret skal henge på flyet mer eller mindre permanent og kunne ta opp data under normale turer. Lufttransport flyr flere ganger i uken til Ny-Ålesund og Svea, i tillegg til at de har 20+ turer til en stasjon nord på Grønland. Plattformen vil da kunne bidra med høy oppløselig data over interessante områder regelmessig. Lufttransport ser også på muligheten for å kunne leie ut flyet til dedikerte overvåkningsoppdrag, der overvåking av fjordis kan være en applikasjon.

3.11.5 OPPSUMMERING – ANDRE DATA TYPER

Andre data-typer vil ikke kunne brukes til operasjonell (tilnærmet daglig) overvåking av fjordis på Svalbard dels pga krav til bred-båndskommunikasjon, dels pga behov for å plassere ut relativt mange sensorer for å dekke de fleste fjorder.

Web-cam kan kanskje være aktuelle til validering av isovervåking i nærheten av bosetninger med en viss kapasitet til dataoverføring. På tilsvarende måte kan en med UAV-kampanjer innhente ulike valideringsdata (istype, istykkelse).

3.12 OPPSUMMERING

I dette kapittelet har vi gått igjennom mange aktuelle sensorer for overvåking av is på fjordene på Svalbard. Siden Svalbard har mørketid store deler av året, og i tillegg er dekt av skyer svært ofte, anser vi at SAR generelt vil være den beste sensoren. Optiske sensorer gir dekning sjeldent, mens radiometer og scatterometer har for dårlig oppløsning til å kunne brukes i fjorder.

Copernicus programmet som benytter Sentinel-1 A/B over Svalbard med extra wide moden gir i praksis dekning over Svalbard minst en gang per dag. Denne moden har 40m oppløsning, og vil være godt egnet til i alle fall å skille mellom is og åpent vann. I tillegg er det også mulig at Sentinel-1 kan brukes til å klassifisere istype. Når det gjelder måling av istykkelse og snømengde på isen er det noe mer usikkert om SAR kan brukes. I kapittel 5 vil vi gå igjennom en del metoder som har sett på dette.

Dersom det er ønskelig å rekonstruere tidsserier for fjordis, finnes det SAR sensorer som kan gi en god tidsserie tilbake til 1992. Før denne tid finnes det ikke SAR data, og andre sensorer som AVHRR (optisk) vil da måtte brukes. Disse vil ha sjeldnere dekning.

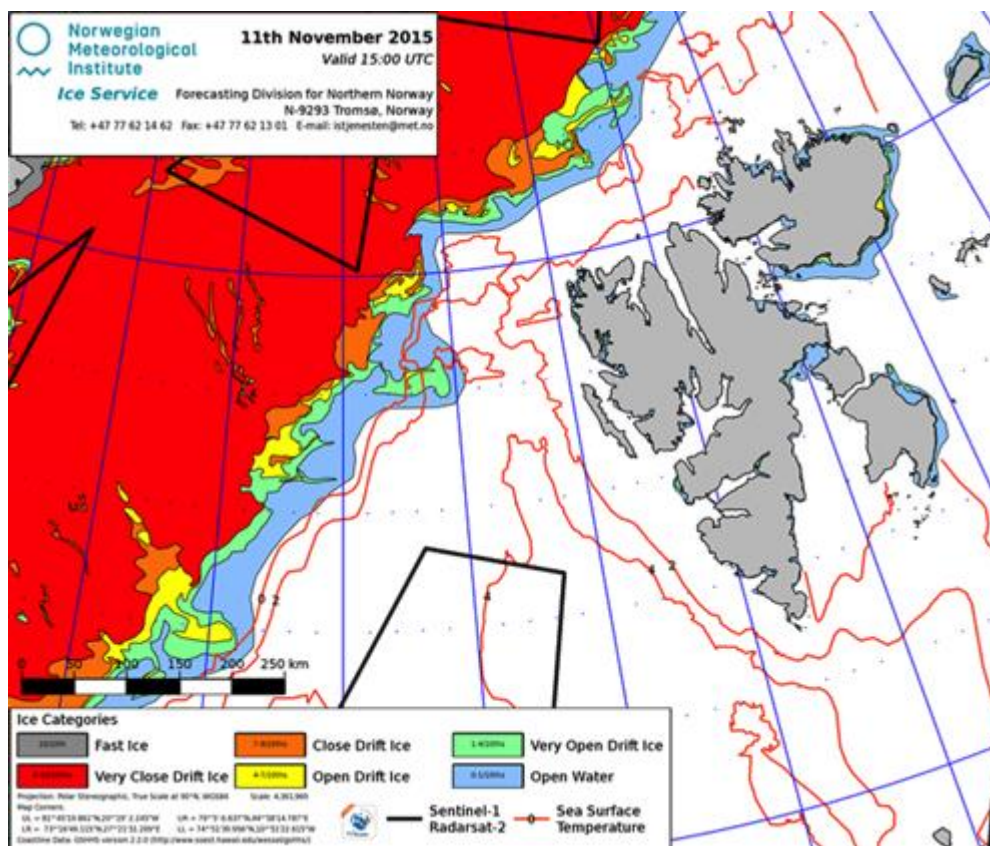
4 OPERASJONELLE ISTJENESTER

I dette kapittelet gis en kort oversikt over noen operasjonelle istjenester, hvilke produkter de leverer, hva som gjøres av automatisk prosessering og hvordan en Fjordis overvåkingstjeneste evt. vil «henge sammen» med Met's tjeneste.

4.1 METEOROLOGISK INSTITUTT

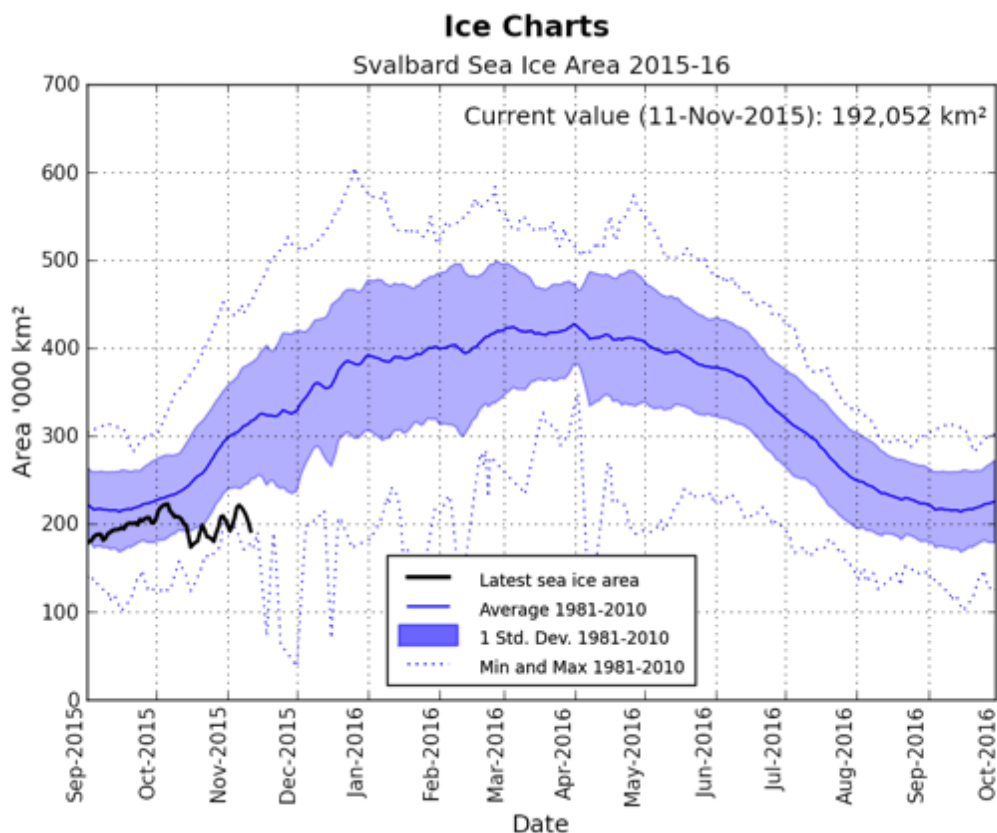
Meteorologisk institutt sin Istjeneste utarbeider hver virkedag iskart over den norske delen av Arktis, og ved behov også for Norskekysten, f.eks. Oslofjorden. Kartene viser iskonsentrasjon, og er basert på en manuell tolkning av ulike satellittdata.

Web: <http://wms.met.no/icechart/>



Figur 4.1 Iskart for Svalbard 11.11.2015 basert på S1 og RS2.

For OSI SAF leveres også ulike statistiske analyser der bl.a. arealet for siste isseong sammenlignes med gjennomsnitt og standardavvik for perioden 1980-2010.

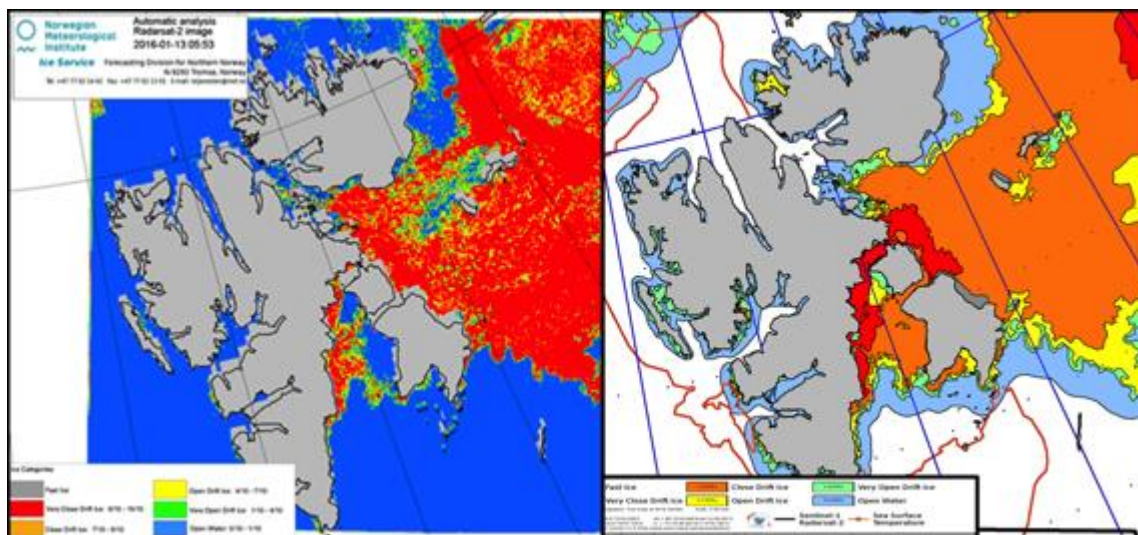


Figur 4.2 Analyse av isdekt areal rundt Svalbard for 2015, sammenlignet med gjennomsnitt og standardavvik for perioden 1981-2010.

4.1.1 STATUS FOR AUTOMATISK PROSESSERING AV ISKART

Basert på innspill fra Norsk Polarinstittutt ble Frode Dinessen ved Vervarslinga i Tromsø kontaktet for å skaffe oppdatert informasjon om Meteorologisk Institutt sin nåværende status med hensyn til automatisk prosesseringa av SAR data, og hvilke planer de har for å automatisere Sentinel-1 data.

Dinesen opplyser at de offisielle iskartene fra Istjenesten er basert på manuell tolkning, men at det også finnes iskart basert på automatisk prosessering av Radarsat-2 data. Disse kartene publiseres på <http://polarview.met.no/> under «Latest automatic analysed SAR image». Etter at Sentinel-1 data ble tilgjengelig i 2015 er tilgangen på Radarsat-2 data blitt redusert og dermed også oppdateringsfrekvensen av de automatiske analysene. I tillegg synes det å være en del forskjell i hvilke klasser som presenteres og kontinuiteten i de ulike klassene. Dinessen oppgir at det i iskartleggingen hovedsakelig brukes SAR data med to polarisasjoner (HH/HV) der HV polarisasjon gir større kontrast mellom havis og åpent vann i de fleste tilfeller.



Figur 4.3 Iskart fra Svalbard produsert av Meteorologisk Institutt. Vestre: Automatisk iskart for Svalbard basert på Radarsat-2 data fra 2016-01-13. Høyre: Manuelt tolket iskart basert på siste Radarsat2 og Sentinel-1 bilde (2016-01-13).

Sentinel-1a EW mode er innfaset i den manuelle iskartproduksjon ved Istjenesten, og Sentinel-1b er forventet å bli inkludert i løpet av 2016. Det finnes foreløpig ikke noen automatisk algoritme for isklassifisering av S1 data som kan brukes operasjonelt. Innledende analyser tilsier at det er en del uløste problemer relatert til radiometri-forskjeller mellom ScanSAR (RS2) og TOPS-mode (S1) som gjør det noe vanskeligere med automatisk analyse. Bl.a. er beam-skjøtene mellom de ulike TOPS-swathene mer tydelig i S1 enn i RS2. Det er også gjentakende mønster i asimut retning (langs satellittbanen) som kan være relatert til at multi-looking og dekorrelasjon av TOPS-mode burst vs. ScanSAR mode burst (TOPS har lengere burst repetisjons intervall, færre look). Meteorologisk arbeider for tiden intensivt med å utvikle automatisk klassifikasjon av Sentinel.1 data, bl.a. i samarbeid med UiT gjennom CIRFA og i forbindelse med Hav-is prosjektet, finansiert av NRS.

For iskartlegging i fjordene rundt Svalbard har de automatiske rutinene også en utfordring knyttet til å korrigere for omkringliggende landmasser (f eks layover/skygge). Landmasker er ikke tilstrekkelig nøyaktige, og presisjons-geokoding gjøres heller ikke. Det kan dermed være posisjonsunøyaktighet i backscatter produktet som kan forårsake feil i isklassifiseringa i trange fjorder. I de manuelle utarbeidet iskartene klarer man i større grad å ta hensyn til denne unøyaktigheten og iskart anses derfor å være mer pålitelige i fjordene.

4.2 DMI

Dansk meteorologisk institutt har en istjeneste for Grønland. Her leveres iskart (egg-chart) 2 ganger per uke. Disse er i stor grad basert på SAR.

Web: <http://www.dmi.dk/en/groenland/hav/ice-charts/>

4.3 FMI

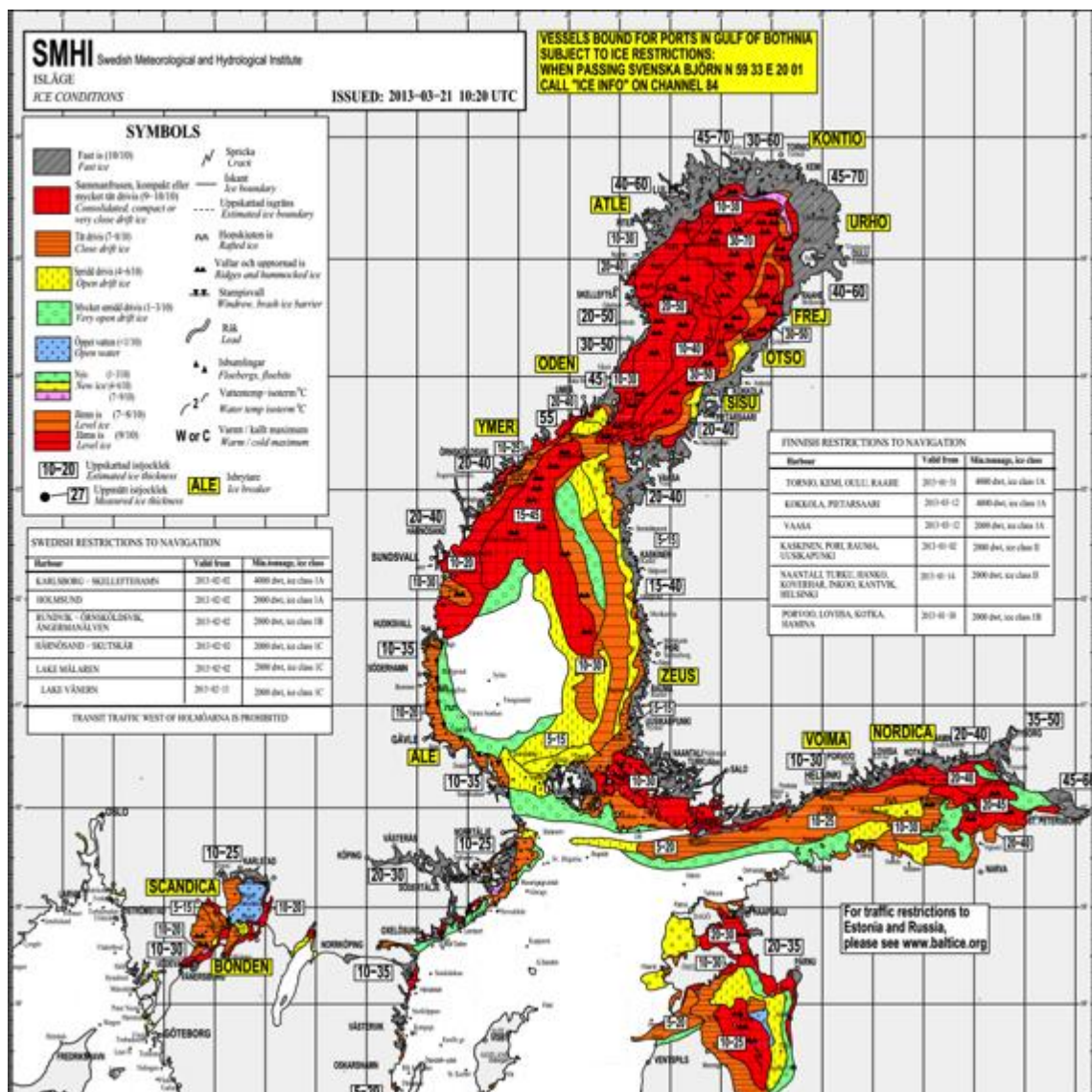
Det finske meteorologiske institutt (FMI) leverer iskart for Østersjøen.

Web: <http://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-conditions>

4.4 SMHI

Svenske SMHI leverer også iskart for Østersjøområdet.

Web: http://www.smhi.se/oceanografi/istjanst/havsis_en.php



Figur 4.4 Iskart over Østersjøen levert av SMHI. Ulike istyper kartlegges detaljert vha fargekoder.

4.5 ENVIRONMENT CANADA

EC leverer istjenester rundt Canada.

Web: <http://www.ec.gc.ca/glaces-ice/>

5 METODER FOR ISOVERVÅKNING

I dette kapittelet gjennomgås en rekke metoder for klassifisering av is. I dette arbeidet har Norut lagt vekt på en systematisk gjennomgang av litteratur som er tilgjengelig gjennom vitenskapelige publikasjoner.

5.1 SEGMENTERING OG KLASSIFISERING

Termene segmentering og klassifisering brukes ofte om hverandre, men i sammenheng med havis er det nyttig å gjøre en distinksjon. Segmentering av satellitt-bilder betyr her at bildet deles inn i ulike ikke-sammenhengende områder med lik statistisk signatur. Klassifisering er mer omfattende siden en her også tilordner klassenavn (labelling) til hvert segment eller piksel.

5.2 KLASSIFISERING AV IS OG ÅPENT VANN

Kartlegging av is og åpent vann er viktig innenfor en rekke fagfelt, blant annet skipnavigasjon, miljøovervåkning og klima-relaterte studier. I forhold til is på fjordene rundt Svalbard kan iskart være viktige i forhold til overvåkning av økologi for havpattedyr. En framtidig operasjonell fjordis-tjeneste kan i tillegg bli viktig for Sysselmannen på Svalbard i forhold til sikkerhet når det gjelder ferdsel med snøskuter og båt.

5.2.1 MANUELL OG SEMI-AUTOMATISK DETEKSJON AV HAVIS

Som vist i kapittel 4 brukes SAR data i dag av flere meteorologiske organisasjoner til iskartlegging. Dette gjøres i praksis manuelt av eksperter på tolkning av SAR bilder, og kan variere en del fra ekspert til ekspert (Falkingham, 2014). Med økende datamengder har det blitt stadig mer tidkrevende å utføre kartlegginga manuelt. Den kanadiske istjenesten (CIS) prosesserer for eksempel ca. 3500-4500 Radarsat-2 SAR bilder årlig (Leigh et al., 2014).

Muckenhuber et al. (2015) fra NERSC har etablert en database for isen i Isfjord og Hornsund for perioden 2000-2014. Denne databasen er basert på 16555 satellittbilder (6571 SAR og 9123 optiske bilder). I tillegg til Envisat ASAR og Radasat-2 bruker Nansensenteret MODIS, MERIS, ASTER og Landsat-bilder. De benytter en prosesseringskjede for pre-prosessering av Level-1 bilder til et format som kan tolkes i ArcGIS. 3319 bilder er manuelt tolkede bilder hvor is-eksperter har tolket bildene i klassene «fast is», «driv is» og «åpent vann». De påviser også en signifikant nedgang i isdekket når de sammenligner perioden 2000-2005 med perioden 2006-2014. Antall dager med fast-is gikk ned fra 50 til 22 DFI for Isfjorden, og 56 til 34 DFI for Hornsund.

Det er ønskelig å utvikle hel-automatiske metoder for klassifisering av is og åpent vann som kan håndtere så store mengder data med god konsistens og detaljeringsgrad. Dessuten skal det utvikles en operasjonell tjeneste som er robust mot varierende

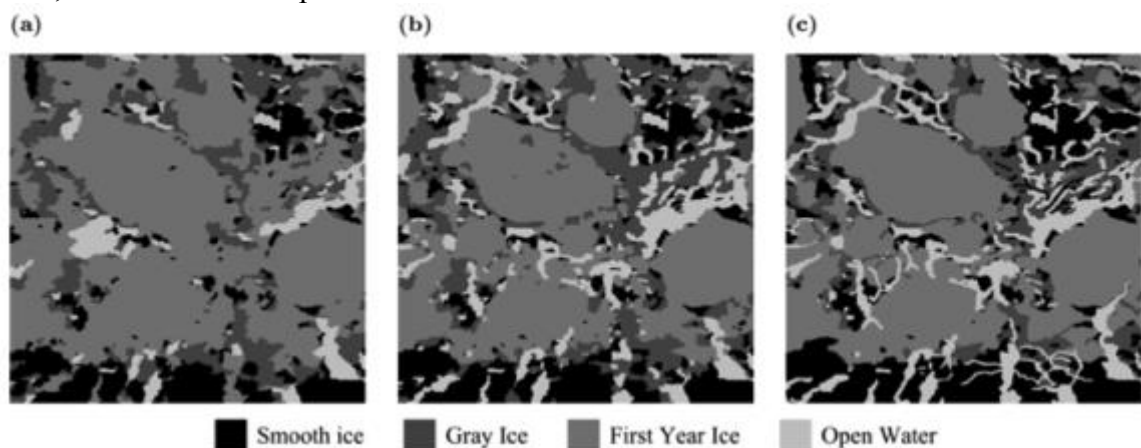
geofysiske og instrumentgeometri. Mye arbeid har vært gjennomført innenfor dette fagfeltet og ulike tilnærminger har blitt brukt på å utvikle algoritmer som kan prosessere SAR-bilder og kartlegge havis automatisk, dvs. med minst mulig eller uten menneskelig input.

Etter at Radarsat-2 data ble tilgjengelig fra 2007 har dual-pol ScanSAR data (HH og HV) blitt en standard for SAR avbildning i polområdene. Disse dataene gir hyppig dekning i tillegg til at dual-pol har flere fordeler enn single-pol-data når det gjelder klassifisering av is. RGB-kompositte bilder med HH og HV kan også brukes til å signifikant forbedre visuell diskriminering av vann og is (De Abreu et al., 2003).

Haarpaintner (2009) og Haarpaintner (2010) har studert bruk av Radarsat-2 dual-pol data til is-hav klassifisering. Metoden tar også hensyn til den store variasjonen i innfallsvinkler over ScanSAR bilder som påvirker statistikken ved å dele inn bildet i innfallsvinkel intervall før klassifisering.

I Yu (2009) vises det hvordan kombinasjonen av HV og HH kan utnyttes til å forbedre segmentering av havis. Generelt er HV kanalen bedre enn HH til å skille mellom havis og åpent vann. Grunnen til dette er at HV kanalen er mindre sensitiv enn HH i forhold til innfallsvinkel-problemet som oppstår når vi har store bølger. For HH kanalen vil tilbakespredning for is gå fra å være sterkere enn tilbakespredning fra vann for lave innfallsvinkler, til det motsatte for høye innfallsvinkler. Det blir i praksis umulig å skille mellom vann og is i overgangsområdet. For HV polarisasjonen skjer dette i langt mindre grad. Vann har nesten alltid større tilbakespredning enn is.

Yu et al. (2015) gir en svært grundig sammenligning av en rekke metoder segmenteringa av dual-pol RS-2 data. De finner at MIRGS-metoden (en multi-variat utvidelse av IRGS, se avsnitt 5.1.2) gir best resultat. MIRGS benytter en «region-basert» segmenteringsmetode med fokus på kant-effekter på u-transformerte SAR backscatter data. Ulike transformasjoner basert på PCI, Wavelets e.l. ga ingen signifikant forbedring. Klassifiseringsnøyaktigheten på et syntetisk SAR datasett er 98%, mens den er 85% på reelle data.



Figur 5.1 Sammenligning av isklassifisering for HH-alene (a), HH&HV med MIRGS-metoden (b) og manuelt klassifisert iskart (c).

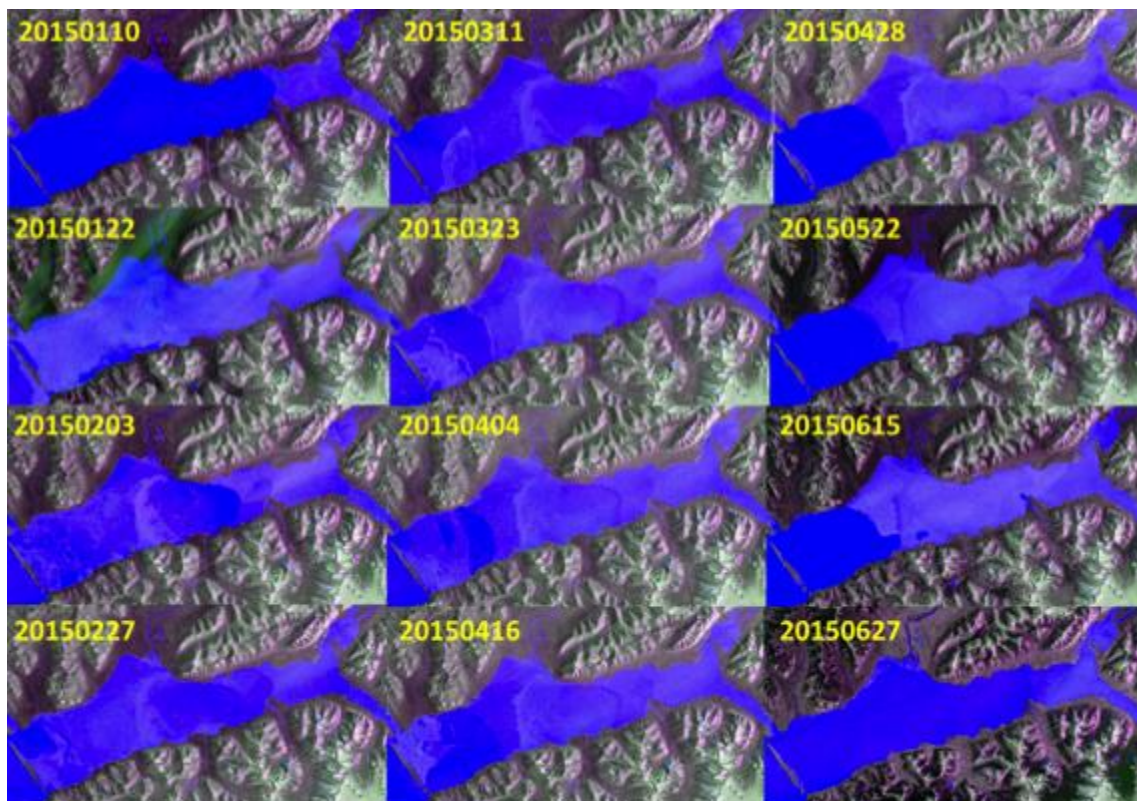
5.2.2 AUTOMATISK DETEKSJON AV HAVIS

MMap-Guided Ice Classification (MAGIC) er en av de nyeste metoder for klassifisering av kun havis og åpent vann og er fullstendig automatisk. Denne metoden var først beskrevet av Clausi et al. [2010] da den opprinnelige versjonen bestod av en segmenteringsmodul som viste seg å være robust over mange forskjellige SAR-bilder. Siden da har algoritmen blitt utvidet til å være kompatibel med de nyere dual-pol Radarsat-2 SAR data, og for å overkomme begrensninger som opplevdes med tidligere utgaver av algoritmen [Leigh et al., 2014]. Den nåværende versjonen av MAGIC bygger på IRGS-metoden (Iterative Region Growing Semantics), og kombinerer to komplementære teknikker for bildeklassifisering for å oppnå enda bedre nøyaktighet. Det første trinn som kalles for "glocal", kjøres for å segmentere SAR-bildet i mindre regioner hvor klassestatistikken skal være konstant. Dette tilsvarer region-basert ikke-styrt klassifisering mens det andre trinn bruker piksel-basert Support Vector Machine (SVM) for å tildele is/vann klasser til de segmenterte regionene (labeling). Ved å kombinere begge klassifiseringsprosedyrer i et siste trinn oppnås en klassifikasjonsnøyaktighet på >90% for begge klasser (is/vann) når metoden ble testet på 20 Radarsat-2 bilder fra April til Desember. Systemet har fungert bra nok til at det vurderes om å brukes operasjonelt av CIS.

5.2.3 SENTINEL-1

Det har foreløpig ikke blitt publisert noe omfattende arbeid om is/vann klassifisering med bruk av Sentinel-1. Korosov et al. (2015) presenterte på EGU-2015 en semi-automatisk metode for klassifisering av is og åpent vann (2 vannklasser, rolig/opprørt) for Sentinel-1A HH og HV bilder. De bruker en kombinasjon av ikke-styrt og styrt klassifisering. SAR-bildene pre-prosesserer automatisk og glattes med ulike filter. De konverteres først til en gray level co-occurrence matrise (GLCM) for så å beregne tekstur egenskaper. Deretter gjøres prinsipal komponent analyse (PCA) på teksturvektoren. De normaliserte tekstur egenskapene kan så klassifiseres med en K-means algoritme, og det klassifiserte bildet brukes videre til å lage treningsdata som blir input til en support vektor maskin (SVM). Sluttproduktet er et 1km iskart med en isklasse og to vannklasser.

Norut har gjort en enkel studie av isen på vanMijen-fjorden på sør-vest Svalbard ved å lage RGB-komposittbilder av HH og VH polarisasjonen til Sentinel-1 moden for is sesongen 2014/2014. Tidsserien (figur 5.2) viser et troverdig tidsforløp og det bør være fullt mulig med denne datatypen å utvikle et operasjonelt overvåkningssystem.



Figur 5.2 Tidsserie fra Sentinel-1 av RBG-backscatter bilder over isen i van Mijenfjorden (dato angitt med gult). Isdekket i lyse lilla-toner er fullt mulig å skille ifra åpent hav (blått). I perioder er det også mulig å skille ulike stadier fra hverandre.

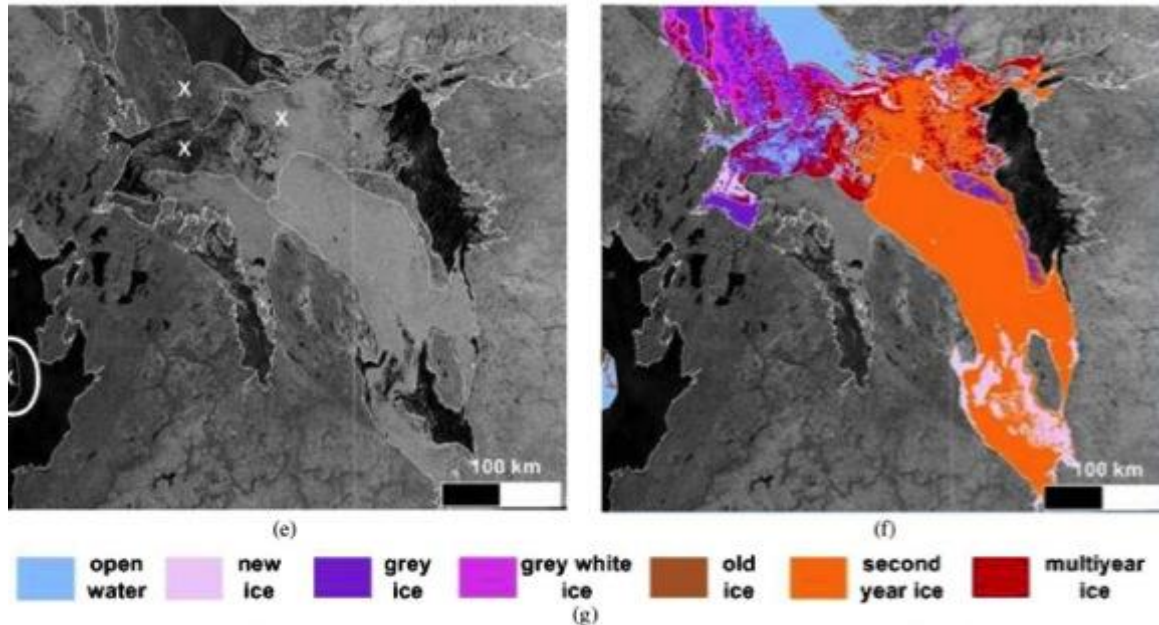
5.2.4 OPPSUMMERING

Selv om det foreløpig ikke er publisert omfattende arbeider på Sentinel-1, synes det åpenbart at denne sensoren brukt i Extra Wide mode (EW) med dual-polarimetriske data vil være den sterkeste kandidaten som sensor for en automatisert fjordistjeneste på Svalbard. S1-EW mode har god oppløsning (40m) og det er publisert såpass mye overbevisende arbeider på hel-automatisk klassifisering av RS2-ScanSAR wide dual-pol data (Clausi et al., 2010) at det bør være fullt mulig å etablere en slik tjeneste med relativt begrensede midler.

5.3 KLASSIFISERING AV ISTYPER

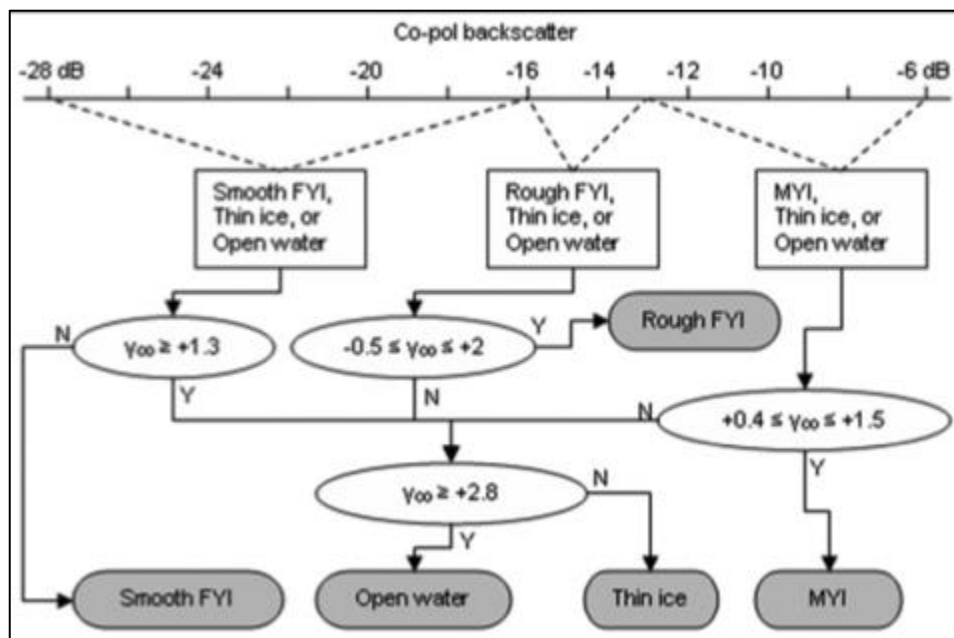
Havis utvikler seg på ulike tidsskalaer og er påvirket av meteorologiske og geofysiske prosesser som fører til mange ulike istyper. Det finnes en rekke typer og måter å kategorisere havis på. For fjordis er det viktig å skille mellom fast-is (landfast is) og driv-is. I tillegg har alderen på isen mye å si. Ny-is brukes om nylig froset havvann, og kan deles ytterligere opp i frazil-is, sørpeis, gråis og pannekake-is. Neste stadium er Nilas (istykkelse < 10cm), deretter ung-is (10-30cm). Første års is er tykkere en ung is men ikke eldre enn 1 år. Flerårsis er is som overlever en sommer, noe som neppe er aktuelt på Svalbard. Flere studier har vist resultater som tyder til at det er blitt mindre flerårs is og mer førsteårs is i polområder de siste årene (Meier et al., 2014).

Kartlegging og identifisering av forskjellige istyper er av interesse både vitenskapelig og fordi den har implikasjoner for fartøy som ferdes på havet. Iskart som skiller mellom istyper kan dermed brukes til å vurdere sikkerhet for ferdsel på fjorder, samt sikkert være av betydning i økologiske studier. Her skal vi gi en beskrivelse av utvalgte teknikker for istype-klassifisering med SAR.



Figur 5.3 Klassifisert SAR bilde med istyper i hht til WMO sine farge koder (Ochilov and Clausi, 2012).

Ulike typer is har ulike ruhet- og kjemiske egenskaper og disse kan føre til unike signaturer når isen observeres med SAR. Noen SAR-sensorer måler tilbakespredning i enkel polarisasjon, enten fra horisontalt- eller vertikalt-polariserte bølger mens multi-polariserte sensorer får tilbakespredning i begge polarisasjoner. Siden ulike istyper påvirker polariserte bølger på ulike måter er det derfor gunstig å bruke flere polarisasjoner for å skille de ulike istyper. Geldsetzer og Yackel (2009) beskriver en novel metode som benytter ENVISAT ASAR data i VV- og HH-polarisasjon for å identifisere åpent vann, glatt- og grov- førsteårs is, flerårs og tynn is. Til klassifiseringen benyttes et beslutnings-tre (se figur 5.3) som baseres på statistikk og tersking av backscatterverdi og polarisasjondifferansen utvikles. Denne klassifikatoren vurderes å fungere bra på å klassifisere åpent vann, flerårs is og glatt førsteårs is. Grov førsteårs og tynn is ble oftest feilklassifisert, enten på grunn av egenskaper som var lik andre istyper eller variabilitet i egenskapene som gjorde tersklingsprosedyren utfordrende.

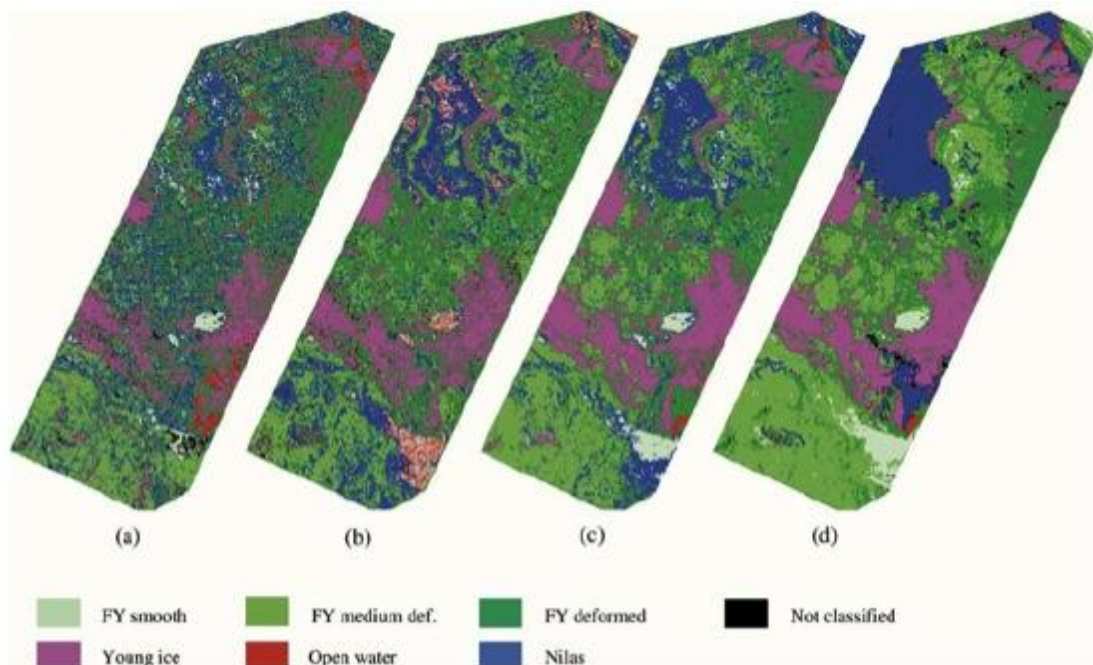


Figur 5.4 Beslutnings-tre klassifisering av dual-pol C-bånd SAR data (Geldsetzer og Yackel, 2009)

Klassifisering av istyper med Envisat WSM bilder (C-band, HH-polarisasjon) har også vært gjennomført av Zakhvatkina et al. (2013) ved å benytte to ulike klassifiseringsalgoritmer, en som er basert på nevrale nett (NN) og en som baseres på en Bayesiansk metode. I det første tilfelle konkluderte forfatterne med at klassifisering av kun radar-backscatter ikke var bra nok til å skille ulike istyper da det er overlapp i fordeling av radar tilbakespredning mellom de ulike typene. De oppnår en forbedring i nøyaktigheten av klassifiseringa ved å beregne flere teksturegenskaper som kan inkluderes i klassifiseringsalgoritmen. I den Bayesianske algoritmen brukes a priori informasjon som gjør det mulig å klassifisere kun med bruk av radar tilbakespredning. Begge metoder viste seg å være godt egnet til klassifisering av istyper i det sentrale Arktis hvor flerårsis dominerer over andre istyper. Algoritmene fungerer imidlertid ikke like bra i den marginale issonen, hvor det finnes en blanding av mange forskjellige istyper. Det er også usikkert om metodene vil kunne fungere for klassifisering av fjordis siden istypene her ligner mer på marginal issoner, enn på flerårsis.

En studie av Bogdanov et al. (2005) beskriver om en lignende metode som (Zakhvatkina et al., 2013) der fler-lags nevrale nett brukes i kombinasjon med flere datakilder for å øke nøyaktigheten av istype-klassifisering. Studien viser at bruk av å kombinere ERS og Radarsat-1 data med hhv. VV og HH-polarisasjon kan gi en betydelig forbedring (ca.15%) i klassifikasjonsnøyaktighet sammenlignet med å bruke bare ERS eller Radarsat data alene. Dessuten kunne nøyaktigheten økes ytterligere ved å inkludere lav-oppløste optiske bilder (Meteor-3/5 TV-kamera) i klassifiseringsprosessen. Det ble også undersøkt om bruk av teksturegenskaper kunne ha en gunstig effekt på nøyaktigheten og tre typer (image moments, GLCM-basert features, ACF-basert features) var beregnet og inkludert i klassifiseringsalgoritmen. Denne tilleggsinformasjonen viste seg å ha en positiv effekt på klassifiseringen, men det ble konkludert med at den positive effekten var mindre når flere datakilder ble inkludert. Det ble også understreket at beregning av disse teksturegenskapene var tidkrevende, men

det kunne likevel lønne seg å beregne teksturegenskaper når visuelle bilder ikke er tilgjengelige.



Figur 5.5 Illustrasjon på kartlegging av ulike istyper ved å bruk av flere datakilder a) ERS, b) Envisat, c) Radarsat, d) ERS, Radarsat og Meteor bilder sammen.

Gill et al. (2012) bruker Radarsat-2 bilder for å beregne og teste 20 polarimetriske parametre som kan være aktuelle for klassifisering av ulike typer førsteårs is under ulike geofysiske forhold. Metoden benytter en K-means algoritme for å klassifisere bildene. Poenget med studien var å sjekke hvilke parametre gir høyest nøyaktighet (og derfor best klassifiseringspotensial) og konsistens i istype-signaturen. Forfatterne konkluderer med at det finnes to typer parametre som kunne gi enten høy nøyaktighet og høy konsistens (entropi og dominant egenverdi) eller høy nøyaktighet og lav konsistens (krysspør backscatter og volume scatter component).

Moen et al. (2013) utførte en lignende studie der de har testet seks polarimetriske og statistiske parametre for å segmentere Radarsat-2 quad-pol bilder. De valgte parametrene etter evne til å skille ulike typer is siden de ulike fysiske egenskapene kan føre til ulike statistiske signaturer i den tilbakespredte SAR-signalen. En Gaussian Mixtures modell ble tatt med i en algoritme som maksimerer forventningsverdien for å segmentere den endelige features-vektoren i fem klasser. Selv om teknikken var testet på bare ett Radarsat-2 bilde, ble det konstatert at uoverensstemmelsen mellom det manuelt-segmenterte og automatisk-segmenterte bildet var en konsekvens av at antall klasser ikke var det samme i begge metoder. Dessuten konkluderte forfatterne med at tolkning av de polarimetriske parametre ikke kunne overføres til SAR bilder fra ulike årstider da disse egenskapene ikke er konstante fra sesong til sesong.

Som nevnt i 5.1.2 har det blitt utviklet en algoritme (MAGIC) som består av flertrinns klassifisering for å oppnå best mulig nøyaktighet i klassifisering av is/vann. På samme måte har Kwon et al. (2013) har også utviklet en metode for klassifisering av istyper i

en algoritme som deles opp i to hovedfaser. I denne studien er det tatt hensyn til støy som kan gjøre det spesielt vanskelig å skille statistisk de ulike klassetyper. I den første er det kjørt en iterativ optimalisering prosedyre som vekter utfra romlig avstand og gradient (romlig endring) for så å utvikle et endelig klassebilde med minst mulig påvirkning av støy. På samme måte som Moen et al. (2013) er en Gaussian Mixture modell brukt for å fastslå isklasser og statistiske parametre knyttet til disse klassene. Metoden er testet på både syntetiske data og Radarsat-2 ScanSAR bilder i HH-polarisasjon og sammenlignet med tilsvarende resultater fra bruk av andre kjente segmenteringsmetoder som baseres på globale egenskaper (som f.eks GMM, K-means). Den flertrinns-metoden viste seg å utkonkurrere alle andre algoritmer i tilfeller hvor SAR-bildet var preget av mye støy og dette ble bevist både kvalitativt og kvantitativt.

I tillegg har Moen et al. (2015) tatt i bruk en flertrinns-prosedyre som kombinerer (ikke-styrt) segmentering og styrt klassifisering for å utvikle en algoritme som skal skille flere typer is og vann under varierende geofysiske forhold. Her ble algoritmen kjørt på en mindre datasett som kun bestod av 3 full-polarimetriske Radarsat-2 SAR bilder. Forfatterne konkluderte med at det var innfartsvinkelen som viste seg å være den største utfordring for algoritmen, siden den kunne påvirke klasseegenskaper observert mellom bildene fra ulike tidspunkter. Dessverre ble det ikke oppgitt et kvantitativt estimat på nøyaktigheten av denne metoden, så det er noe vanskelig å vurdere hva og hvor mye skal til for å gjøre den klar for operasjonelt bruk. Metoden ansees ikke å ha et operativt potensiale siden den er basert på full-polarimetriske data som ikke er tilgjengelig daglig.

5.3.1 AUTOMATISK ISTYPE KLASSIFISERING

Alle studiene som er beskrevet i dette avsnittet kan benyttes til istype-klassifisering, men dessverre er ikke disse metodene fullstendig automatiske og derfor ikke egnet til langsiktig overvåkning av hav- eller fjordis i et operasjonelt sammenheng. Ochilov og Clausi (2012) gjorde et forsøk på å utvikle et automatisk system ved bruk av både ikke-styrt klassifisering/merking av havis type med oppløsning på piksel-nivå. Dette er ikke mulig med tradisjonell, manuell klassifisering av havis der grensene tegnes inn manuelt på kartet basert på visuell tolkning. I denne metoden er Radarsat-1 ScanSAR-bildene først delt opp i mindre områder, eller polygoner og så etterfulgt av automatisk segmentering og klassifisering. Metoden er basert på et energi-minimerings skjema som består av maksimum a priori (MAP) estimering og feature komponenter for å kunne reflektere romlige og statiske forhold mellom de ulike regionene. Man oppnår da en optimal labelling-konfigurasjon. I tillegg til klassifiseringsalgoritmen er det gjennomført kvalitetskontroll på de klassifiserte bildene og dette gjøres ved å inkludere et siste trinn der iseksperter har anledning til å sjekke resultatene og justere manuelt.

5.3.2 SENTINEL-1

Det har foreløpig ikke blitt publisert noe omfattende arbeid om istype-klassifisering med bruk av Sentinel-1. Korosov et al. (2015) har testet en semi-automatisk metode for klassifisering av is og åpent vann i Sentinel-1A HH og HV bilder. De bruker en

kombinasjon av ikke-styrt og styrt klassifisering. SAR-bildene konverteres først til en gray level coherence matrix (GLCM) for så å beregne 13 tekstur egenskaper. Deretter gjøres prinsipal komponent analyse (PCA) på tekstur-vektoren. De normaliserte tekstur egenskapene kan så klassifiseres med en K-means algoritme, og det klassifiserte bildet brukes videre til å lage treningsdata som blir input til en support vector machine (SVM). Denne kjøres som et siste trinn for å avgrense klassifiseringen.

Pedersen et al. (2015) har også publisert foreløpige resultat med S1 EW moden fra vest-Grønland brukt i DMI sin istjeneste. De bruker Sentinel-1 data på tradisjonell måte til å lage standard iskart. I tillegg demonstreres hvordan isfjell deteksjon kan gjøres.

5.4 MÅLING AV ISTYKKELSE OG SNØDEKKE

Måling av istykkelse og snødekke er krevende for fjordis. For havis i Arktis og Antarktis kan man bruke flere typer instrumenter (aktiv/passiv radar, infrarød-sensor i kombinasjon med passiv radar og altimetre). Som vist i avsnitt 3.4-3.6 er flere av disse ikke aktuelle for fjordis-anvendelser pga for dårlig oppløsning. Vi står da i praksis igjen med bruk av SAR eller altimeter siden dette er de sensorene som har god nok oppløsning, og i tillegg kan brukes også i mørketida.

5.4.1 ISTYKKELSE MÅLT MED SAR

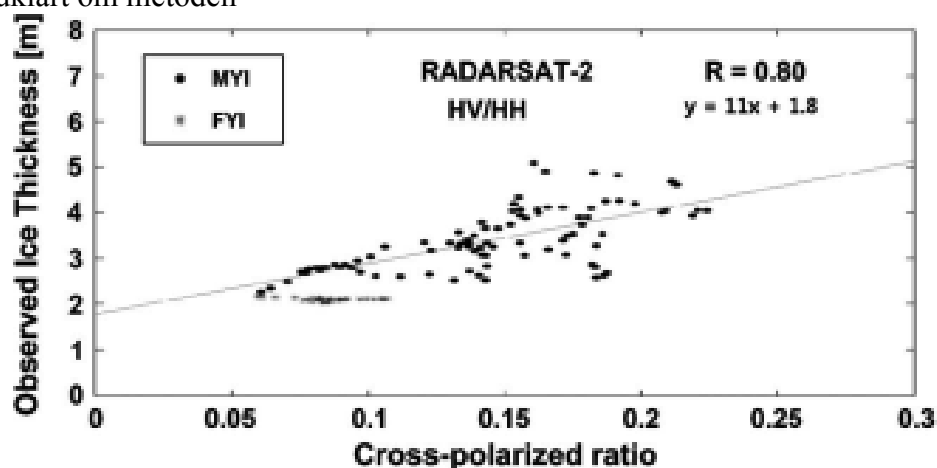
Istykkelse er en av flere parametere som gir temporale endringer i radar-tilbakespredning. Flere forfattere har prøvd å utnytte dette til å måle istykkelse. Problemet er imidlertid at det også er en rekke andre forhold som kan endre radar-tilbakespredning bl.a. varierende innfallsvinkel, varierende ru-het på overflata, variasjon i snødekke og tykkelse, variasjon i saltinnhold is isen (spesielt for flerårsis kontra førsteårs-is). En gjennomgang av litteraturen på dette området tilsier ikke at det finnes en veletablert standardmetode for å måle istykkelse med SAR. Det finnes en del arbeider der forskere har sammenlignet in situ målinger av istykkelse med SAR parametere. I noen tilfeller finner man regresjoner som tilsynelatende gir akseptable resultater, men det er ofte begrensninger i metodene som gjør at disse ikke er like enkle å tilpasse for bruk på fjordis rundt Svalbard. I det videre gjennomgås en del arbeider som kan ha relevans.

Nakamura et al. (2005) har påvist en metode for å måle istykkelse vha fler-frekvens full-polarimetrisk. De testet ut metoden med bruk av den flybårne sensoren Pi-SAR (X&L-bånd) over Okotsk havet. Ved å bruke forholdet mellom VV og HH-backscatter fant de en lineær sammenheng mellom istykkelse og VV/HH. Nakamura et al. (2009) har også testet ut metoden med å bruke Envisat ASAR VV og HH mode i Antarktis. Metoden ga gode resultater (korrelasjon 0.9, RMSE=8cm) i sammenligning med in situ målinger for landfast-is. Liu et al. (2015) har også undersøkt bruk av VV/HH-forholdet med Envisat ASAR i Bohai bukta i Kina, og sammenlignet resultatene med bruk av hyperspektrale optiske bilder fra den kinesiske HJ-1 satellitten som har en infrarød sensor. De finner at IR gir bedre resultat for is med glatt overflate, mens VV/HH er bedre for ru is. Selv om denne metoden påviser et potensiale, er det imidlertid et

problem at den betinger data som i dag ikke leveres av operasjonelle sensorer. Hverken Sentinel-1 eller Radarsat-2 har VV/HH modi.

Shi et al. (2014) har utviklet en metode for å måle istykkelse vha HH-polarisasjon. Metoden assimilerer SAR data sammen med en termodynamisk model for istykkelse basert på ECWMF-modellen. Metoden ga RMSE=6 cm når de sammenligner med in situ målinger av istykkelse.

Kim et al (2012) har brukt RS-2 og Terrasar-X til å studere depolariserings-effekter i arktisk havis. De finner en sterk korrelasjon (hhv. 0.76 og 0.88) mellom is tykkelse og depolarisering for TerraSAR-X og Radarsat-2. Korrelasjonen er sterkest for fler-årsis. Det er uklart om metoden



Figur 5.6 Relasjon mellom HV/HH og istykkelse for Terrasar-X og Radarsat-2

En oppsummering av dette avsnittet blir at det finnes en del eksperimentelle metoder som relaterer radar tilbakespredning til istykkelse. De fleste av disse metodene synes foreløpig ikke å være tilstrekkelig robuste til å kunne brukes operasjonelt på nåværende tidspunkt.

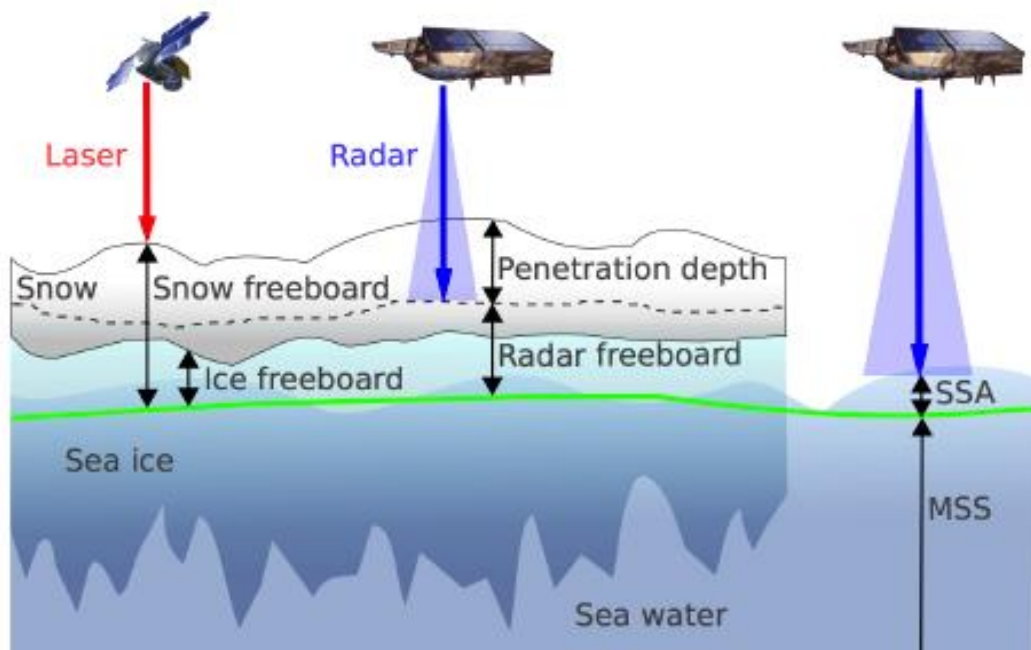
På noe sikt er det en del interessante muligheter ved å teste ut måling av istykkelse sammenlignet med istykkelse-målinger på fjorder på Svalbard. Med infrastrukturen som finnes i Ny Ålesund burde det være mulig å gjøre hyppige målinger av is på fjorden samtidig med satellitt-pass. Siden isen ikke er konstant i drift, er det svært mye enklere å få til systematiske målinger, enn tilsvarende i polhavet.

5.4.2 ISTYKKELSE MÅLT MED ALTIMETER

Laser og radar-altimeter måler i utgangspunktet avstanden mellom satellitt og isoverflaten. Som redegjort for i avsnitt 3.9, har radaraltimetre visse problemer med snødekket, siden det er en del usikkerhet knyttet til om en detekterer overflaten av snøen. I tillegg forutsettes det at en bruker altimetre av type Cryosat-2 e.l. med SAR-egenskaper.

Fjernmåling av istykkelse ved bruk av satellittsensorer benytter en parameter som kalles for freeboard siden disse sensorene får tilbakespredning kun fra is- eller snøoverflaten og ikke fra den nederste siden av isen. Freeboard er høyden av den is/snøoverflaten over det lokale havnivået som selv er variabelt. I de siste 10-20 årene har laser og radar altimeter vært populære sensorer som kan brukes til måling av freeboard. Snødekket må tas i betraktning på ulike måter siden laserbølgen spres fra snøoverflaten mens radarbølgen kan penetrere snøen til en viss grad. Fig.1 fra Ricker et al. (2014) illustrerer problemstilling med å bruke SAR-altimetri til å måle isoverflaten sammenlignet med for eksempel laser altimeter.

Satellitten CryoSat-2 ble lansert i 2010 og er utstyrt med Ku-band SAR altimeter som gjør mulig måling av høyden av isoverflaten over havnivå med et relativt lite fotavtrykk på 0.3x1.5km. Noen av de tidligste resultater med Cryosat-2 som rapporterer om målinger og endringer i istykkelse, er beskrevet av Laxon et al. (2013). Prosessering av SAR-dataen innebærer bruk av to parametre, nemlig ”pulse peakiness” og ”stack standard deviation” som terskles for å skille isoverflaten fra havoverflaten. Parameteren ”pulse peakiness” relateres til usikkerheten knyttet til hvor den kraftigste tilbakespredning kommer fra pga snødekke på isen som radarbølgen kan påvirkes av.



Figur 5.7 Måling av fribord og istykkelse med Cryosat-2.

I deres studie har Ricker et al. (2014) utredet hvordan ulike terskler som settes på forkanten av bølgeformen som kommer tilbake til radaren, kan påvirke den endelige istykkelsen som estimeres fra høydemålingene gjort med CryoSat-2. Mens Laxon et al. (2013) bruker en fast terskel på 50% av den første maximum i den tilbakespredte bølgeformen for å kunne hente ut freeboard-estimer, har Ricker et al. (2014) undersøkt hvordan tre ulike terskler på 40%, 50% og 80% kan føre til ulike estimer av freeboard.

Disse tersklene var satt på dataen fra to perioder for å fastslå hvor langt ned (under snøoverflaten disse tersklene tilsvarte. Det ble sammenlignet med tilleggsinformasjon om snødybde for å kunne si om terskelvalget tilsvarte et punkt i nærheten av den snø/isovergangen eller ikke. Forfatterne konkluderte med at både 40% og 50%-terskel var for liten for å nå helt til isen mens 80% var for høy og derfor tilsvarte et punkt under isoverflaten. Denne terskelen var selv vurdert å være for lav i et tilfelle der istykkelsen i flerårs is fra mars 2013 var lavere enn i november når det forventes at isen skal være på sin tynneste, noe som kan tenkes å ha oppstått som følge av begrenset penetrasjon av radarbølgen gjennom snødekket. Derfor ble det anbefalt at en sesongavhengig "tracker" (dvs. terskel) bør utvikles for å ta i betraktning variasjonene i snøegenskaper som kan påvirke radarsignalen og dermed freeboard- og istykkelseestimerer.

Systematiske feil som oppstår pga usikkerheten rundt terskelvalget var vurdert å være av størrelsesorden 0.06-0.12 m for hhv. førsteårs is og flerårs is men disse systematiske feilene ble ti ganger større etter konvertering fra freeboardmålinger til istykkelse, noe som skyldes bruk av tilleggsdataen (snødybde, snø- og istetthet osv) for å beregne istykkelse fra freeboardmålinger.

5.4.3 SNØDEKKE

I dette avsnittet ser vi først på hvilke metoder som brukes for å måle snø på is i polområdene (dvs. store homogene områder som tillater bruk av lav-oppløste data). Deretter diskuterer vi hvilke av metodene som kan ha et potensiale til måling av snødybde på fjordis.

Overvåkning av snødekke på is er viktig siden snødekket har stor betydning for energiutvekslinga av mellom havet og atmosfæren i polområder, og derfor påvirker utvikling og vekst av havisen. I tillegg må snødybden fastslås for å kunne estimere istykkelse nøyaktig med satellittaltimeter.

Foreløpig er det noen få måter å måle eller estimere snødybden på. Noen av de mest brukte inkluderer in-situ feltmålinger, snø-radar, passive målinger med mikrobølgeradiometer og kombinasjon av nedbørmålinger med isbevegelse. Foreløpig er det bare satellitt-baserte metoder, f.eks mikrobølgeradiometer som har evne til å måle snødekke på en operasjonell basis, men siden oppløsninga til AMSR-E og SSM/I er 10-20km vil det ikke være brukbart i fjordområder.

5.4.3.1 Bruk av passiv radiometer i polområdene (snødybde)

Som nevnte tidligere er det som regel kun satellitt-baserte metoder som kan utføre observasjoner av snødekke over store områder. Advanced Microwave Scanning Radiometer for Earth Observing System (AMSR-E) er et eksempel på dette. Snødybden kan estimeres ved bruk av en algoritme som beregner ratio eller differansen i parameteren "brightness temperature" som måles av instrumentet i to ulike frekvenskanaler på 18,7 og 37 GHz (Markus og Cavalieri, 1998). Flere studier har forsøkt å validere målingene og kvantifisere usikkerheten som knyttes til AMSR-E data, blant

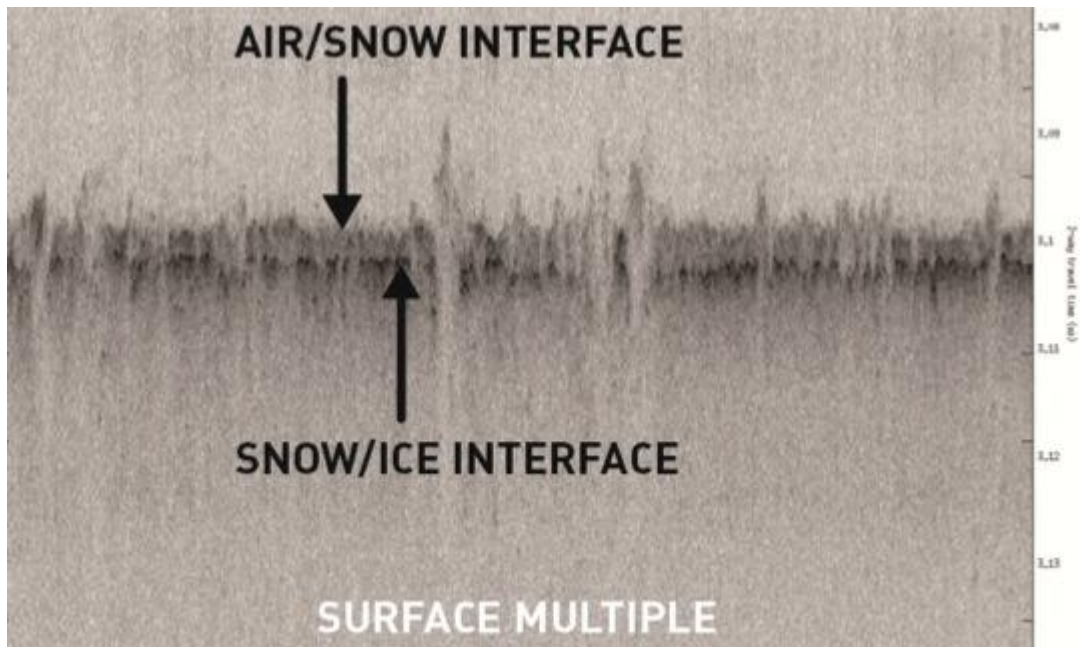
annet har en rekke datakilder som ICESat laser altimeter (Zygmuntowska et al., 2014) og Operation IceBridge snøradar (Brucker og Markus, 2013) blitt benyttet for å vurdere AMSR-E produkter. Det påvises at AMSR-E metoden fungerte bra på 64% av datasettet, i tilfeller der iskonsentrasjonen var >90%, snøoverflaten var glatt og jevn og snødekket var relativt tynt (< 0.2m). Større usikkerhet knyttes til områder dekt av flerårs is (økt ruhet), tykkere snødekke eller lav iskonsentrasjon (Brucker og Markus, 2013).

Radiometer er ikke aktuell til måling av snødybde for fjorder pga den grove oppløsninga.

5.4.3.2 Snøradar

IceBridge's snøradar er en luftbåren, Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) radar i frekvensbåndet 2-8GHz. Den har vertikal oppløsning på ca. 3cm, noe som tilsvarer ca. 5cm i oppløsning i målt snødybde. Radaren har blitt benyttet til å gjøre snømålinger de siste årene. Kurtz og Farrell (2011) rapporterer om resultater fra en feltkampanje med IceBridge-radaren i April 2009 der 4 flyvninger ble gjennomført for å observere snødekket over ulike Arktiske områder. Det er tidsforsinkelsen mellom radarsignalet fra luft/snø-overflata og snø/is-overgangen som benyttes for å estimere snødybden. Her er det den første lokale maksimum som antas å komme fra den luft/snø grensen mens den største maksimum i den tilbakespredte signalet antas å tilsvare snø/is grensen. Kwok et al. (2011) har også benyttet IceBridge snøradar og Airborne Topographic Mapper (ATM lidar) med en tersklingmetode for å skille grensene (luft/snø og snø/is). I dette tilfelle ble det konkludert med at den minste snødybden som kunne detekteres var 8cm på grunn av radaroppløsningen og differansen i tilbakespredning mellom de to ulike lagene. Dessuten var et tynnere snødekke mindre detekterbart.

En annen algoritme for å beregne snødybde beskrives i studien av Newman et al. (2014). Her ble data fra IceBridge FMCW radar og ATM også kombinert for å utvikle en wavelet-basert algoritme som kunne brukes til både beregning av snødybde og karakterisering av terrenget under snødekket. Denne algoritmen skal kunne måle snødybden automatisk selv i tilfeller når det oppstår endringer i radarsystemet. Ved å definere en terrengparameter kunne de feilaktige estimatene knyttet til høy topografiske variabilitet (for eksempel deformert førsteårs is og flerårs is) forkastes fra den endelige datasettet. Det ble vist at de beste estimater hentes ut når estimater beregnes for snødekket som ligger på udeformerte førsteårs is, noe som i utgangspunkt er begrensende i områder hvor det forventes variasjoner i istyper og ruhet.



Figur 5.8 Signal fra snøradar (NASA Icebridge). Grensesjiktene mellom snø-luft og is-snø kan detekteres med brukbar oppløsning. Samme prinsipp brukes fra Cryosat-2/Sentinel-3, men for fjordis vil det vanskelig kunne virke pga. kontaminasjon av signal fra omkringliggende terreng.

I forhold til de klimatologiske resultatene av Warren et al. (1999) (heretter W99) som konstrueres ved å bruke systematiske feltmålinger gjort på en rekke Sovjetiske stasjoner mellom 1954-1991, har studien av Kurtz og Farrell (2011) vist at den gjennomsnittlige snødybden på flerårs is stemmer godt med W99-modellen over store områder, men på regionale skala varierer snødekket mer enn hva W99 tilsier. I tillegg ble det påvist at snødybden på førstårs is er kun 52% av den som W99 tyder på, noe som har også vært påvist av flere studier med bruk av andre tilnærminger (for eksempel Zygmuntowska et al. 2014). I begge studier spekuleres det at dette forårsakes av mindre snøfall nå enn før eller fordi det er blitt en nedgang i flerårs is, og et mer sesongmessig isdekke. Store deler av den årlige snøakkumulasjonen forsvinner derfor på åpent hav istedenfor å akkumuleres på is. Observasjonene av endringer i snødekket som oppstår som følger av klimatologiske faktorer gir enda sterkere grunn til å overvåke polområder systematisk på lang sikt.

5.4.3.3 Snødybde målt med CryoSat-2 og/eller Icesat

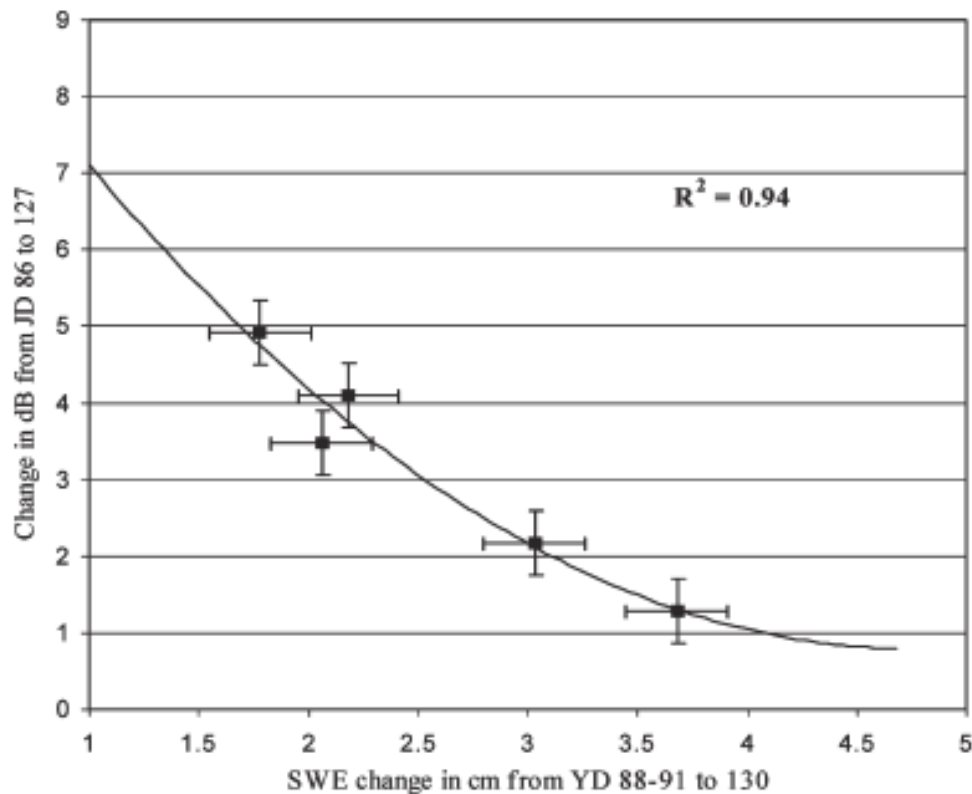
CryoSat-2 er utstyrt med Ku-bånd SAR altimeter, som i prinsippet skal kunne måle høyden på isoverflaten over havnivået (fribord) siden det antas at radarsignalet skal kunne penetrere evt. snødekke på isen, mens IceSat måler høyden på snøoverflaten. I utgangspunktet skal det da være mulig å estimere snødybden ved å kombinere de to målingene (radar + laser altimeter) siden det er høydedifferansen mellom de to overflatene som tilsvarer denne parameteren. Det har imidlertid blitt påvist at snødekket kan påvirke den tilbakespredte radarsignalet i varierende grad når snøen ikke er kald, tørr og homogen (Kwok et al., 2014). Dessuten kan tykkere snødekke (> 0.2 m) føre til utvidelse av radarbackscatter da begge overflater (luft/snø, snø/is) bidrar til den totale tilbakespredte signalet og dermed økt usikkerhet i hvor signalet kommer fra. I tillegg er

det viktig å ta i betraktning at begge satellittbanene ikke skal falle sammen over et gitt område ofte nok til å gi hyppig dekning. Det kan derfor tenkes at det blir vanskelig å kombinere både Cryosat-2 og IceSat data for å overvåke snødekket i fjordområder.

5.4.3.4 Måling av snøens vannekvivalent med SAR

Yackel og Barber (2007) har sett på sammenhengen mellom radar tilbakespredning og SWE for landfast første-års havis med Radarsat-1 nord for Canada. De påviser at god korrelasjon mellom endring i SWE (målt på faste in situ stasjoner) og endring i tilbakespredning i den kalde perioden. Fig 5.9 viser hvordan $\Delta\sigma$ avtar med økende SWE. Yackel og Barber har brukt C-bånd HH-polarisasjon med og finner denne sammenhengen:

$$\Delta\text{SWE (cm)} = 0.106 * \Delta\sigma^2 - 1.169 * \Delta\sigma + 5.015 \quad (1)$$



Figur 5.9 Endring i radar tilbakespredning for varierende vannekvivalent for valideringsmålinger i Wellington kanalen, Canada (Yackel&Barber, 2007).

5.5 OPPSUMMERING ISTYKKELSE/SNØDEKKE

For fjordis er det krevende å gjøre målinger av snødybde og istykkelse med satellitt. De eneste instrumentene som har høy nok oppløsning til å kunne måle disse parameterene med tilstrekkelig nøyaktighet synes å være laser-altimeter og til en viss grad C-bånd SAR. Laser altimeter måler snø-fribord, mens C-bånd SAR har visse muligheter til å estimere snøens vannekvivalent i kalde perioder.

Laser altimeter vil kunne gjøre relativt få målinger per år pga. begrensninger med skydekke samt lav repetisjons-syklus. I tillegg er måling av snø-fribord kun et indirekte mål for istykkelse og snødybde.

Måling av snømengde med C-bånd SAR har også store begrensninger, men her er det også synergi-muligheter siden det er de samme data som også brukes til måling av isdekke og is-type. Det vil dessuten kreves utvikling av en operativ metode til dette, med tilhørende in situ valideringsmåling. Valideringsmålinger for dette er imidlertid relativt ganske mye enklere å gjøre enn for polisen siden de kan gjøres hyppig fra nærliggende landinstallasjoner i stedet for fra isbryter. En kan med en viss satsning på dette feltet få fram en svært interessant algoritme utvikling som kan vise veien framover til måling av snødybde i marginal issone i Arktis. Dette er en viktig klimaparameter.

6 OPPSUMMERING OG KONKLUSJON

Rapporten er leveranse i prosjektet Fjordis som er en bestilling fra Norsk Polarinstitutt. Prosjektet Fjordis utreder mulighetene for langsiktig overvåkning av sjøisdekket på fjordene rundt Svalbard. Norut har hatt ansvar for to deloppgaver i dette prosjektet. Deloppgave 3 som skal gi oversikt over egnete data typer for overvåkning av fjordis og Deloppgave 4 som skal gi oversikt over aktuelle metoder for å klassifisere fjordis.

Deloppgave 3 er besvart i kapittel 3 i denne rapporten. Kapittel 3 gir en gjennomgang av en rekke sensorer som kan være aktuelle for å måle havis. Det listes opp en rekke sensorer som er aktuelle, deriblant SAR (avbildende radar), optiske satellitter, radiometer, scatterometer, radar og laser altimeter og multi-sensor kombinasjoner av flere satellitt-målinger. I tillegg nevnes også noen sensorer som er bakkebaserte, bøyer eller opereres fra UAV eller fly. Sensorer som ikke opereres fra satellitt kan neppe brukes til langtidsovervåkning av større områder, men kan spille en viktig rolle i validering av en framtidig fjordistjeneste. For de satellittbaserte instrumentene er det gjort litteratursøk for å finne ut hvilke som har et potensiale til overvåkning av is. Det meste av litteraturgrunlaget er relatert til overvåkning av isen i Arktis, og det fleste sensorene har visse fordeler og visse ulemper. Til stor-skala overvåkning er de grovere sensorene som radiometer og scatterometer nyttige, men de kan neppe brukes til overvåkning av fjordis siden deres oppløsning er for dårlig. Optiske sensorer har også et visst potensiale, men faller i praksis igjennom dersom de skulle brukes som eneste sensor siden de ikke kan brukes ved skydekke eller i mørke. Svalbard er dekt av skyer ca 80% av tiden. I tillegg kommer at mørketida utelukker bruk av optisk i 4-5 måneder per år.

Det som står igjen som den mest aktuelle sensoren til overvåkning av fjordis er SAR. Copernicus programmet med Sentinel-1A/B gir i praksis en svært god dekning med radar over Svalbard. Sentinel-1 sensoren bruker stort sett Extra Wide moden i området rundt Svalbard. Den avbilder Svalbard i praksis minst to ganger per døgn (morgen/kveld). Det er gjort betydelig arbeid i Arktis på hvordan SAR data (og spesielt de siste årene med dual-polarimetrisk data) kan benyttes til automatisk klassifisering av is/åpent vann og til klassifisering av istyper.

De meteorologiske instituttene i Norge, Sverige, Finland, Danmark og Canada bruker i dag SAR daglig til produksjon av iskart for politen. Disse kartene lages manuelt av isekspertene. Det gis en kort gjennomgang av de ulike tjenestene i kapittel 4.

Deloppgave 4 er besvart i kapittel 5. Her gjennomgås metoder for a) Klassifisering av is/åpent vann, b) klassifisering av istyper og c) metoder for måling av istykkelse og snømengde på is. Siden det meste av vitenskapelig litteratur på området er relatert til is i Arktis og Antarktis, blir de fleste aktuelle metoder referert. Metoder som baserer seg på sensorer med for grov oppløsning til å være aktuelle for fjordis blir gjennomgått overflatisk.

Automatisk isdeteksjon er foreløpig ikke tatt i bruk operativt av istjenestene. Ved en gjennomgang av litteraturen synes det som de Canadiske forskningsmiljøene (Clausi et al.)har kommet lengst i retning av å lage automatiserte tjenester for is/vann klassifisering og istype-klassifisering. Det antas at det vil være mulig å bygge videre på disse metodene ved en eventuell operasjonalisering av fjordisovervåkning. Sentinel-1 vil i lang tid framover være sensoren som kan føde systemet med høykvalitets data.

Måling av istykkelse og snømengde på fjordis synes å være krevende med de aktuelle sensorene i dag. Her vil det være behov for betydelig forsknings og utviklingsinnsats for å drive fram et operativt system. De mest aktuelle sensorer for dette formålet synes å være en kombinasjon av altimeter (laser og eller radar altimeter) samt tidsserie analyse av C-bånd SAR data (for snømengde). Med en overkommelig innsats burde det være mulig å få fram et godt system for overvåkning av istykkelse rundt Svalbard. Fordelen med en slik innsats er at det, men eksisterende infrastruktur på Svalbard, er forholdsmessig enklere å validere istykkelse og snødybder på fjordene rundt Svalbard enn det er i Arktis. Et framtidig system for fjernmåling av istykkelse og snømengde vil dermed kunne peke framover mot et mer globalt system for nøyaktig måling av disse parametere med god kvalitet på valideringen av slike produkter.

7 REFERANSER

- Bogdanov, A., S. Sandven, O. M. Johannessen, V. Alexandrov and L. Bobylev (2005), Multisensor approach to automated classification of sea ice, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 43, 7,1648–1664
- Brown, L. C., Howell, S. E., Mortin, J., & Derksen, C. Evaluation of the Interactive Multisensor Snow and Ice Mapping System (IMS) for monitoring sea ice phenology. *Remote Sensing of Environment*, 147, 65-78, 2014.
- Clausi, D. A., A. K. Qin, M. S. Chowdhury, P. Yu and P. Maillard (2010), MAGIC: Map-Guided Ice Classification system, *Can. J. Remote Sens.*, 36, 1, 13-25
- De Abreu, R., Flett, D. ,Scheuchl, B. , Ramsay, B., "Operational sea ice monitoring with RADARSAT-2-a glimpse into the future." *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS'03. Proceedings. 2003 IEEE International. Vol. 2. IEEE, 2003.*
- Falkingham. J. C. Global satellite observation requirements for floating ice: Focusing on synthetic aperture radar. <http://nsidc.org/noaa/iicwg/docs/IICWG-2014/Global-Satellite-Observation-Requirements-for-Floating-Ice-Final.pdf>. last visited in october 2014., Contract report for Environment Canada, March 2014.
- Geldsetzer, T. and J.J.Yackel (2009), Sea ice type and open water discrimination using dual co-polarized C-band SAR, *Can. J. Rem. Sens.*, 35(1), 73-84
- Gill, J.P.S., J.J. Yackel and T. Geldsetzer (2013), Analysis of consistency in first-year sea ice classification potential of C-band SAR polarimetric parameters, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 39:2, 101-117, doi:10.5589/m13-016
- Gray, L., Burgess, D., Copland, L., Cullen, R., Galin, N., Hawley, R., & Helm, V. (2013). Interferometric swath processing of Cryosat data for glacial ice topography. *The Cryosphere*, 7(6), 1857-1867.
- Haarpaintner, J., Tonboe, R. T., Long, D. G., & Van Woert, M. L. Automatic detection and validity of the sea-ice edge: an application of enhanced-resolution QuikScat/SeaWinds data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 42(7), 1433-1443, 2004.
- Haarpaintner, J., and G. Spreen, Use of enhanced-resolution QuikSCAT/SeaWinds data for operational ice services and climate research: sea ice edge, type, concentration, and drift. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing.*, 45(10), 3131-3137, 2007.
- Haarpaintner, J., Adapting the ice-ocean SAR discrimination algorithm to dual-polarized Radarsat-2 imagery. *NORUT Report 06-2009*, 55 p., ISSN 1890-5226, ISBN 978-82-7492-214-3, Northern Research Institute, Tromsø, Norway, March 2009.

Haarpaintner, J., An ice-ocean discrimination algorithm for dual-polarized synthetic aperture radar imagery. *Proc. 'ESA Living Planet Symposium', Bergen, Norway 28 June – 2 July 2010*, ESA SP-686, Dec. 2010.

Kaleschke, L., X. Tian-Kunze, N. Maaß, M. Mäkynen, and M. Drusch. «Sea ice thickness retrieval from SMOS brightness temperatures during the Arctic freeze-up period», *Geophys. Res. Lett.*, 39, 2012.

Kaleschke, L., Tian-Kunze, X., Maas, N., Ricker, R., Hendricks, S., & Drusch, M. (2015, July). Improved retrieval of sea ice thickness from SMOS and CryoSat-2. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International* (pp. 5232-5235). IEEE

Key, J. R., Mahoney, R., Liu, Y., Romanov, P., Tschudi, M., Appel, I. & Meade, P. Snow and ice products from Suomi NPP VIIRS. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(23), 12-816, 2013.

Kleinherenbrink, M., Ditmar, P. G., & Lindenbergh, R. C. (2014). Retracking Cryosat data in the SARIn mode and robust lake level extraction. *Remote Sensing of Environment*, 152, 38-50.

Korosov, A., N. Zakhvathina and S. Muckenhuber (2015), “Ice/water Classification of Sentinel-1 Images”, EGU General Assembly 2015

Kwok, R., B. Panzer, C. Leuschen, S. Pang, T. Markus, B. Holt, and S. Gogineni (2011), Airborne surveys of snow depth over Arctic sea ice, *J. Geophys. Res.*, 116, C11018, doi:10.1029/2011JC007371

Kwon, T.-J., J. Li and A. Wong (2013), ETVOS: An Enhanced Total Variation Optimization Segmentation Approach for SAR Sea-Ice Image Segmentation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 2, 925-934, doi:10.1109/TGRS.2012.2205259

Laxon, S. W., Giles, K. A., Ridout, A. L., Wingham, D. J., Willatt, R., Cullen, R., Kwok, A. Schweiger, J. Zhang, C. Haas, S. Hendricks, R. Krishfield, N. Kurtz, S. Farrell and R., Davidson, M. (2013). CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume. *Geophysical Research Letters*, 40(4), 732-737.

Leigh, S., Z. Wang and D.A. Clausi (2014), Automated ice-water classification using dual-polarization SAR satellite imagery, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52, 9, 5529-5539, doi:10.1109/TGRS.2013.2290231

Liu, C., Chao, J., Gu, W., Xu, Y., & Xie, F. (2015). Estimation of sea ice thickness in the Bohai Sea using a combination of VIS/NIR and SAR images. *GIScience & Remote Sensing*, 52(2), 115-130.

Mass N., “Remote sensing of sea ice thickness using SMOS data”, Dr.avhandling ved Max-Planck institute für Meteorologie, Tyskland, 2013.

- Meier, W. N., Hovelsrud, G. K., Oort, B. E., Key, J. R. Kovacs, K..M. Michel, C.Haas, M. A. Granskog, S. Gerland, D K. Perovich, A. Makshtas, & Reist, J. D. (2014). Arctic sea ice in transformation: A review of recent observed changes and impacts on biology and human activity. *Reviews of Geophysics*, 52(3), 185-217.
- Moen, M.-A. N., A. P. Doulgeris, S. N. Anfinsen, A. H. H. Renner, N. Hughes, S. Gerland and T. Eltoft (2013), Comparison of feature based segmentation of full polarimetric SAR satellite sea ice images with manually drawn ice charts, *The Cryosphere*, 7, 1693-1705, doi:10.5194/tc-7-1693/2013
- Moen, M-A. N., S. N. Anfinsen, A. P. Doulgeris, A. H. H. Renner, S. Gerland (2015), Assessing polarimetric SAR sea-ice classifications using consecutive day images, *Ann. Glaciol.*, 56(69), 285-294, doi:10.3189/2015AoG69A802
- Muckenhuber, S., Nilsen, F., Korosov, A., & Sandven, S. (2015). Sea ice cover in Isfjorden and Hornsund 2000–2014 by using remote sensing. *Sea*, 9, 4043-4066.
- Nakamura, K., Wakabayashi, H., Naoki, K., Nishio, F., Moriyama, T., & Uratsuka, S. (2005). Observation of sea-ice thickness in the Sea of Okhotsk by using dual-frequency and fully polarimetric airborne SAR (Pi-SAR) data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 43(11), 2460-2469.
- Nakamura, K., Wakabayashi, H., Uto, S., Ushio, S., & Nishio, F. (2009). Observation of sea-ice thickness using ENVISAT data from Lützow-Holm Bay, East Antarctica. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 6(2), 277-281.
- Newman, T., S. L. Farrell, J. Richter-Menge, L. N. Connor, N. T. Kurtz, B. C. Elder, and D. McAdoo (2014), Assessment of radar-derived snow depth over Arctic sea ice, *J. Geophys. Res. Oceans*, 119, 8578–8602, doi:10.1002/2014JC010284
- Ochilov, S. and D. A. Clausi (2012), Operational SAR Sea-Ice image Classification, *IEEE Trans Geosci. & Remote Sens.*, 50,11, 4397-4408
- Pedersen, L. T., Saldo, R., & Fenger-Nielsen, R. (2015, July). Sentinel-1 results: Sea ice operational monitoring. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International* (pp. 2828-2831). IEEE.
- Ricker, R., S. Hendricks, V. Helm, H. Skourup and M. Davidson (2014), Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation, *The Cryosphere*, 8, 1607–1622, doi: 10.5194/tc-8-1607-2014
- Rudjord Ø., Ø.D.Trier and R. Solberg, “Retrieval of thin sea ice thickness from thermal optical data”, Report 27/11 Norsk Regnesentral, 2011.
- Shi, L., Karvonen, J., Cheng, B., Vihma, T., Lin, M., Liu, Y., Wang Q. & Jia, Y. (2014, July). Sea ice thickness retrieval from SAR imagery over Bohai sea. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2014 IEEE International* (pp. 4864-4867). IEEE.

Shuman, C. A., Zwally, H. J., Schutz, B. E., Brenner, A. C., DiMarzio, J. P., Suchdeo, V. P., & Fricker, H. A. (2006). ICESat Antarctic elevation data: Preliminary precision and accuracy assessment. *Geophysical Research Letters*, 33(7).

Yackel J.J and Barber D-G-, «Observations of snow water equivalent change on landfast first-year-sea ice in winter using Synthetic aperture radar data”, *IEEE Trans Geosci. & Remote Sens.*, 45, 1005-1015, 2007.

Zakhvatkina, N. Y., V. Y. Alexandrov, O. M. Johannessen, S. Sandven and I. Y. Frolov (2013), Classification of Sea Ice Types in ENVISAT Synthetic Aperture Radar Images, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 51, 5, 2587-2600

Yu, P., Qin, A. K., & Claudi, D. A. (2012). Feature extraction of dual-pol SAR imagery for sea ice image segmentation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38(3), 352-366.

Yu, P. (2009). Segmentation of RADARSAT-2 dual-polarization sea ice imagery. PhD. Thesis, Univ. Waterloo, Canada. www.uwspace.uwaterloo.ca

Yu, P., Claudi, D., & Howell, S. E., Fusing AMSR-E and QuikSCAT imagery for improved sea ice recognition. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 47(7), 1980-1989, 2009.

Aaboe S., L-A. Breivik, A. Sørensen, S. Eastwood and T. Lavergne, “OSISAF: Global Sea Ice Edge and Type Product User's Manual”, EUMETSAT report SAF/OSI/CDOP2/MET-Norway/TEC/MA/205, 2015.