

# Integrasjon av satellittbasert snøkartlegging og hydrologisk modellering

Rune Solberg (NR), Sjur Kolberg (SINTEF BM) og Ole Martin Halck (NR)

Norsk Regnesentral, Postboks 114 Blindern, 0314 Oslo

Tlf. 22 85 25 00, Fax. 22 69 76 60, E-mail: rune.solberg@nr.no

## Sammendrag

Hydrologiske modeller er av stor betydning for driftsplanleggingen ved norske vannkraftverk. Enkelte kraftverk benytter snødekningsinformasjon fra satellittbilder som tilleggsmasjon i hydrologiske modeller, og brukspotensialet er trolig stort hos langt flere kraftverk på sikt. Imidlertid finnes det i dag ingen god løsning på det å integrere satellittbildeavledede snødekningsdata i en hydrologisk modell (f.eks. HBV). Dette prosjektet forsøker å løse dette problemet.

Det er en del forutsetninger til satellittdataene for at man skal kunne oppnå gode resultater med hydrologisk modellering. For det første må satellittbildet kunne georefereres nøyaktig slik at beregnet snødekning for hvert piksel lokaliseres til riktig geografisk område. Videre ønsker man så nøyaktige snødekningsberegninger som mulig, og det forutsetter at man korrigerer for topografiske effekter i satellittbildet og at man tar hensyn til årstidsvariasjoner i snøens egenskaper. Det er også nødvendig å finne en god metode som fordeler snødekningsverdiene knyttet til hvert enkelt piksel til de riktige høydesonene. Dessuten er det behov for automatiske rutiner for de nevnte korreksjonene slik at spesialkompetanse ikke er nødvendig for å bruke satellittdata. Dette prosjektet forsøker å løse alle disse problemene så langt det er nødvendig for å oppnå praktisk nytte av snødekningsdata i hydrologisk modellering.

I 1995 er det meste av arbeidet som trengs for å oppnå en nøyaktig og automatisk georeferering av NOAA AVHRR satellittbilder, utført. Videre er basiskorreksjon for topografiske effekter implementert, det er utført et arbeid som indikerer at det er mulig å korrigere for årstidsvariasjoner i snø og det er foreslått løsninger på snødekningsfordeling mellom høydesoner på en tilfredsstillende måte. Det er også tatt initiativ til implementasjon av innlesningsrutiner for snødekningsdata i den nye versjonen av ID-HBV-modellen som kommer ut våren 1996. Dette er aktiviteter som man vil gå videre med og fullføre i 1996.

## 1 Innledning

### 1.1 Bakgrunn

Hydrologiske modeller er av stor betydning for driftsplanleggingen ved norske vannkraftverk. En analyse utført i Arendalsvassdraget viser at det er store gevinster å hente dersom en har en godt tilpasset hydrologisk modell og de meteorologiske varslene er gode.

Satellittbilder representerer en effektiv kilde til snødekningsdata i smeltesesongen [12]. Integrasjon av snødekningsberegninger fra satellittbilder og en hydrologisk modell forutsetter imidlertid at bilder og snødekningsberegninger er korrigert for større feilkilder. De viktigste feilkildene er geometriske feil, radiometriske terrengeffekter og feilklassifikasjon av snø (vi begrenser oss her til effekter i optiske bilder; mikrobølgeobservasjoner kan imidlertid også være aktuelt [11]). Dessuten er det en forutsetning at man har en god metode for å fordele målte snødekningsverdier over flere høydesoner i den hydrologiske modellen.

Korreksjon for radiometriske feil og fordeling av snødekning i høydesoner forutsetter en nøyaktig, romlig samregistrering mellom bildet og topografiske data fra en digital terrengmodell (DTM). Dette kan gjøres ved presis modellering (rekonstruksjon) av opptakssituasjonen.

Radiometriske terreng effekter er variasjoner i reflektert solstråling som skyldes avvik fra flatt terreng. F.eks. vil en sydvendt dalside midt på dagen reflektere mer lys enn en nordvendt dalside. For å kunne sammenligne beregnede snødekningsverdier fra flere typer terreng, må verdiene normaliseres under hensyntagen til terrengets form.

Snøens reflektans kan variere mye med snøens beskaffenhet. F.eks. reflekterer nysnø generelt betydelig mer lys enn gammel, grovkornet snø eller våt snø. En konsekvens av reflektansvariasjonene er at det kan være vanskelig å skille mellom bar mark og snø. Spesielt vanskelig er dette sent på våren og om sommeren når snøen er gammel og våt. Dersom effekten ikke korrigeres, kan det skje en betydelig underestimerting av snødekningsgraden.

Etter de nevnte korreksjonene kan snødekningsberegningene anvendes i en hydrologisk modell. Dette prosjektet anvender HBV-modellen. HBV kan nyttiggjøre seg snødekningsverdier angitt for høydesoner. En DTM kan benyttes til å bestemme hvilken høydesone hvert enkelt piksel tilhører. Et spesielt problem oppstår når ett piksel dekker to eller flere høydesoner. Et piksel i bildene fra NOAA AVHRR dekker et område på  $1,1 \text{ km} \times 1,1 \text{ km}$ . I kupert terreng vil pikselet ofte dekke flere soner.

Hovedformålet med prosjektet er å lage bedre tilsigsprognoser for drift av kraftverk gjennom forbedret modellering ved å integrere satellittbasert snøkartlegging og hydrologisk modellering. For å nå dette målet er det bl.a. nødvendig å løse nevnte problemer tilknyttet geometriske feil, radiometriske terreng effekter og feilklassifikasjon av snø.

Prosjektet går over en periode på to år (1995-1996). Denne artikkelen presenterer resultater fra aktivitetene i 1995.

## 2 Automatisk presisjonsgeokoding

Som nevnt forutsetter radiometrisk terrengnormalisering og korrekt snøfordeling i høydesoner en nøyaktig geometrisk samregistrering av satellittbildet og terrengdata. Slik geokoding skjer normalt manuelt gjennom samregistrering basert på kontrollpunktpar med kjente koordinater i henholdsvis bildet og kartet. Kontrollpunktkoordinatbestemmelse er en tidkrevende prosess som også forutsetter en del erfaring hos operatøren for å gi godt resultat. I operativ snøkartlegging vil det derfor være svært fordelaktig om satellittbildene geokodes automatisk. Videre vil det være fordelaktig om man kan utnytte en modell for opptakssituasjonen da dette normalt sikrer et bedre opprettingsresultat. En slik korreksjonsmetode er blitt implementert basert på et arbeid av Moreno og Meliá [8] av NR for Statkraft. Metoden er blitt forbedret og uttestet videre i dette prosjektet.

### 2.1 Geokoding ved banemodelleringen

I korte trekk kan den implementerte korreksjonsmetoden beskrives som følger:

Satellittbildet inneholder tilleggsinformasjon som beskriver satellittens bane i et tidspunkt noen tid før bildeopptaket. Disse dataene ekstrapoleres, slik at de mer eller mindre nøyaktig beskriver satellittens oppførsel i løpet av opptakstiden. Parametrene i denne banemodellen kan så forbedres, slik at de passer best mulig til kontrollpunktobservasjoner. Avvikene i satellittens orientering (sensorens pekeretning) estimeres også utfra kontrollpunktene. Modellen gir nå et godt estimat av opptakssituasjonen, og et korrigert bilde kan konstrueres utfra det ubehandlede.

For beskrivelse av satellittbaner er ikke-kartesiske posisjons- og hastighetskoordinater de mest velegnede. Seks såkalte *banelementer* brukes til å beskrive slike (nær) elliptiske baner. Kort sagt angir to av disse formen på ellipsen (størrelse og eksentrisitet), to angir planet banen ligger i i rommet, én bestemmer ellipsens orientering i dette planet, og den siste angir hvor på ellipsen

satellitten befinner seg. Denne mengden av seks elementer kan enentydig overføres til de seks kartesiske vektorene  $\{x, y, z, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}\}$  og vice versa.

For oppdateringen av elementene benyttes et sett av differensialligninger. I tillegg til Keplers lover tar dette også hensyn til de lavere ordens perturbasjoner som skyldes at Jorden ikke er en perfekt kule. Høyere ordens perturbasjoner (som Jordens avvik fra aksesymmetri og gravitasjonseffekter fra andre himmellegemer) tas her ikke hensyn til; disse må følgelig kontrollpunktene ta seg av. På dette stadiet regner man videre med at satellittens orientering er den nominelle: det vil si med sensorsystemets  $x$ -akse i fartsretningen og  $z$ -aksen pekende mot Jordens sentrum.

## 2.2 Kontrollpunkter

Etter at man har benyttet den nevnte mengden av *a priori* informasjon har man oppnådd en tilstrekkelig nøyaktig rekonstruksjon av opptakssituasjonen til at kontrollpunktene kan trekkes inn i behandlingen. I dette tilfellet er referansekoordinatene lengde- og breddegrad, og videre kan punktenes høyde over havet spesifiseres.

Først brukes kontrollpunktene til å redusere uoverensstemmelsen mellom satellittens interne klokke og den faktiske tiden som korresponderer med banebevegelsen. Et kontrollpunkts linjekoordinat angir (på grunn av måten bildet bygges opp) når punktet ble “sett” av satellitten ifølge dens egen klokke. Dette sammenlignes med tidspunktet da satellitten virkelig passerte punktet, og uoverensstemmelsen korrigeres ved midling over samtlige kontrollpunkter.

Som nevnt er det foreløpig antatt at satellittens pekeretning er som den skal være, men dette er selvfølgelig ikke tilfelle i den faktiske, fysiske situasjonen. Orienteringens variasjon gjennom bildeopptaket blir derfor modellert ved hjelp av kontrollpunktene.

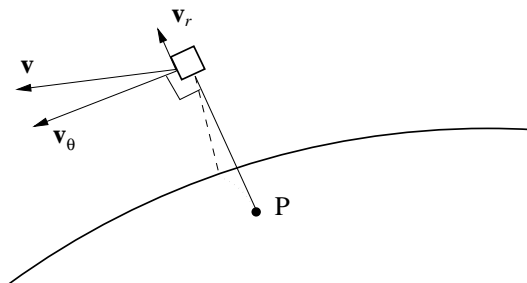
Resultatene fra denne rekken av kontrollpunktkorreksjoner blir så plassert i en oppslagstabell som benyttes i selve bildetransformasjonen. Tabellen inneholder en rad for hver linje i inputbildet (hver rad tilsvarer altså ett tidspunkt), og hver rad består av tre vektorer – dvs ni tall. Disse vektorene er:

1. Satellittens posisjon i et koordinatsystem med Jordens sentrum som origo
2. En enhetsvektor som står normalt på sensorens sveipeplan, altså noenlunde i samme retning som fartsvektoren
3. En enhetsvektor som peker mot første piksel i den aktuelle bildelinjen

## 2.3 Selve opprettingen

Alt dette leder frem til opprettingsrutinen, som er en prosedyre som ut fra et punkts geografiske koordinater (lengde- og breddegrad) beregner hvor i det ubehandlede bildet dette punktet befinner seg. Beregningen foregår som følger:

Man finner ut når punktet ble sett av satellitten ved å løse vektorligningen  $\vec{v}_\theta(t) \cdot \vec{r}_{SP}(t) = 0$  (se figur 1), der  $\vec{v}_\theta(t)$  er vektor nr 2 nevnt ovenfor og  $\vec{r}_{SP}$  er vektoren fra satellitten til punktet på bakken (denne er kjent siden vektor nr 3 ovenfor, samt punktets posisjon i forhold til Jordens sentrum, er kjent). Løsningen av denne ligningen finnes ved en biseksjonsmetode brukt på linjene i tabellen: først finner man ut mellom hvilke to linjer uttrykket  $\vec{v}_\theta(t) \cdot \vec{r}_{SP}(t)$  skifter tegn; deretter interpolerer man mellom disse linjene for større nøyaktighet. Dermed er punktets  $y$ -koordinat kjent, og geometriske forhold bestemmer deretter  $x$ -koordinaten.



Figur 1: Øyeblikket da punkt  $P$  blir sett av satellitten

Når man ønsker å transformere bildet over til en gitt geometri (f.eks. slik at det konformerer med et referansebilde), blir følgelig de geografiske koordinatene til hvert punkt i det som skal bli output-bildet, gitt som input til denne korreksjonsprosedyren. Prosedyren regner ut hvor hvert punkt befinner seg i det ubehandlede bildet, og resampling foretas.

## 2.4 Automatisk kontrollpunktdeleksjon

Som man forstår av beskrivelsen ovenfor er det viktig å foreta en nøyaktig lokalisering av kontrollpunktene i det ubehandlede bildet. Ved manuell lokalisering er det vanskelig å bestemme et punkts beliggenhet bedre enn til nærmeste hele piksel. Dessuten er dette en tidkrevende (og temmelig kjedelig) prosess. Idéen om en automatisk lokaliseringsrutine er derfor nærliggende.

For å foreta automatisk kontrollpunktdeleksjon må man ha et referansebilde på digital form – vi har brukt et satellittbilde med samme oppløsning som det ubehandlede ( $1,1 \text{ km} \times 1,1 \text{ km}$ ) som “fasit” (avledet fra Landsat MSS-bilder og rettet opp til UTM-prosjeksjon). Siden de to bildene i utgangspunktet har forskjellig geometri, er de ikke direkte sammenlignbare. Det må derfor foretas en foreløpig korreksjon av input-bildet for at de to skal ligne noenlunde på hverandre.

Den foreløpige korreksjonen utføres ved hjelp av en del av korreksjonsrutinen ovenfor; siden vi ennå ikke har noen kontrollpunkter, hopper programmet rett fra elementekstrapolasjonen til å lage tabellen som er nevnt i avsnitt 2.2. Denne tabellen lagres, og korreksjonsrutinen avsluttes.

Fra referansebildet plukker man så ut en del kontrollpunkter man vil finne i input-bildet, og for hvert av dem lages et kvadratisk utsnitt (hos oss på  $21 \text{ km} \times 21 \text{ km}$ ) der kontrollpunktet er i midten. Punktens geografiske koordinater registreres også. (I praksis vil man operere med et fast “bibliotek” av slike kontrollpunkt-chips.)

Ved å bruke tilstandstabellen fra grovkorreksjonen som nettopp er gjort, lages et korrigeret utsnitt av input-bildet som er sentrert rundt lokasjonen der rutinen venter å finne kontrollpunktet. Sistnevnte utsnitt traverseres så av det førstnevnte for å finne det punktet hvor de ligner mest på hverandre. Sammenligningen foregår ved å regne ut

$$\sum_{(x,y) \in C} |[c(x,y) - \bar{c}] - [s(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{s}]|$$

for hvert punkt  $(\Delta x, \Delta y)$  med  $x$ - og  $y$ -koordinater innen 30 km fra lokasjonen der punktet ventes funnet. I uttrykket er  $C$  kontrollpunktchip'en,  $c(x,y)$  angir pikselverdier i denne, og  $\bar{c}$  er gjennomsnittsverdien for pikslene i chip'en. Likeledes er  $s(x,y)$  verdiene i søkeområdet og  $\bar{s}$  disses gjennomsnitt.

Når punktet med størst likhet er funnet, kan man gå videre med interpolasjon og forstørre et lite område rundt dette og en tilsvarende omegn rundt sentrum av kontrollpunktchip'en. Et tilsvarende søk gjøres, og man finner den riktige lokasjonen med nøyaktighet på en brøkdel av en piksel. Denne lokasjonens plass i det opprinnelige bildet regnes så ut med tilstandstabellen.

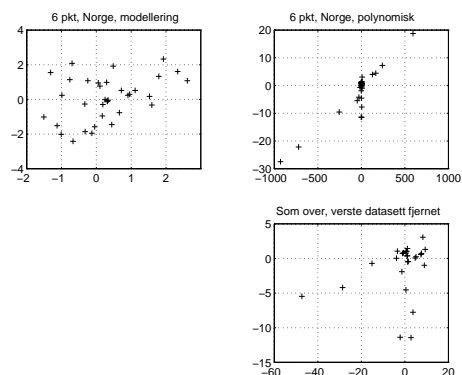
## 2.5 Resultater

### 2.5.1 Sammenligning med polynomkorreksjon

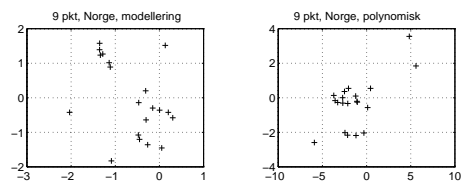
Korreksjonsprosedyren ble testet på et NOAA AVHRR-bilde over Norden. Forskjellige antall og fordelinger av kontrollpunkter ble benyttet, og resultatene ble i hvert tilfelle sammenlignet med utfallet av en annengrads polynomkorreksjon med de samme kontrollpunktene. Kontrollpunktene var detektert manuelt inntil nærmeste hele piksel.

Av de tretten punktene i dette området ble henholdsvis seks, ni og elleve brukt i prosesserin-gen. Resultatene presenteres i figurene 2–4 og i følgende tabell.

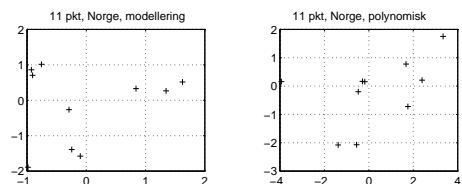
| Ant. punkter | rms<br>(modellering) | rms<br>(polynomkorr.) |
|--------------|----------------------|-----------------------|
| 6            | 1,62                 | (236,98)              |
| 9            | 1,40                 | 3,27                  |
| 11           | 1,39                 | 2,32                  |



Figur 2: 6 av 13 punkter



Figur 3: 9 av 13 punkter

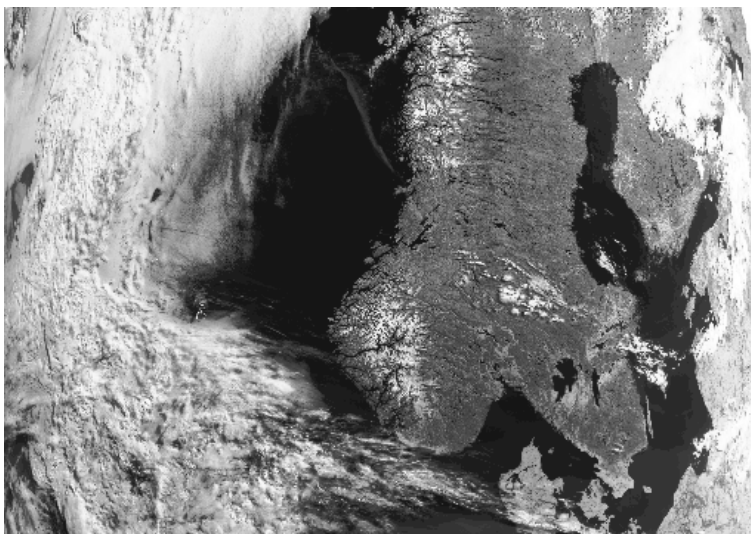


Figur 4: 11 av 13 punkter

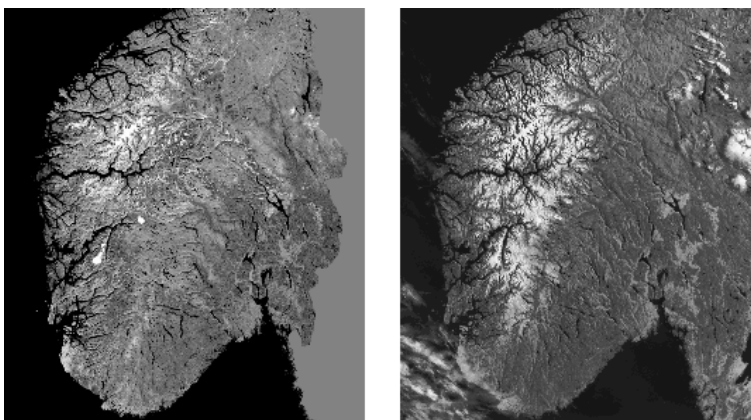
### 2.5.2 Automatisk kontrollpunkt-deteksjon

Det ble også gjort en test der kontrollpunktene ble lokalisert automatisk i det ubehandlede bildet. I dette tilfellet var referansebildet ikke et kart, men et satellittbilde over Sør-Norge som konformerer til UTM-projeksjonen. Åtte kontrollpunktchips ble “klippet ut” av dette, og deres UTM-koordinater (som lot seg regne ut fra deres posisjon i referansebildet) ble transformert til lengde- og breddegrad, slik at de kunne brukes av korreksjonsprosedyren. (Kontrollpunktene var ikke de samme som i den manuelle deteksjonen.)

Av disse åtte punktene ble diverse delmengder à seks punkter valgt, og evaluering foretatt som i testene over. Ved automatisk kontrollpunkt-deteksjon til nærmeste hele piksel var rms-feilen 1,24, og ved deteksjon inntil 1/10 piksel var den nede i 1,09. Figur 6 viser referansebildet, samt den korrigerte versjonen av bildet i figur 5.



*Figur 5: Det ubehandlede bildet*



*Figur 6: Referansebildet (til venstre) og det ferdig korrigerte bildet*

Hele rutinen — kontrollpunktsdeteksjon og korreksjon — ble også utprøvd på et annet bilde hvor Sør-Norge ligger i utkanten, men hvor hele dette området er skyfritt. Visuell inspeksjon viste at den automatiske kontrollpunktsdeteksjonen her ga meget troverdige resultater. For korreksjonsprosedyren ble samme evalueringsmetode som tidligere brukt: delmengder av kontrollpunktene

tok del i prosesseringen, mens de resterende fungerte som en “fasit” som resultatene kunne sjekkes mot. To serier med tester ble foretatt; en der 7 (av 13) punkter ble brukt i korreksjonen, og en med 11. I hver serie ble rutinen kjørt fem ganger; i hver kjøring ble en tilfeldig mengde med 7 eller 11 punkter valgt ut. For henholdsvis 7 og 11 punkter ble rms-feilene 1,35 og 0,97.

### 3 Radiometrisk korreksjon for terrengeffekter

Terrengets topografi innvirker på mengden av elektromagnetisk stråling som reflekteres fra et punkt på bakken og registreres av satellittens sensor. Dersom terrenget heller i retning bort fra Solen, vil intensiteten av reflektert stråling pr. arealenheter være mindre enn for flatt terreng. Årsaken er selvfølgelig at terrenget mottar mindre stråling pr. arealenheter. I et terreng som heller mot Solen, vil det være omvendt, og mer stråling reflekteres mot sensoren enn for flatt terreng. Effekten av dette er at en og samme overflatetype på bakken (f.eks. snø) kan reflektere ulike mengder stråling, alt avhengig av terrengets form.

I snøkartlegging vil avvik fra flatt terreng gi feil i beregnet snødekningsgrad. Ved bruk av NOAA AVHRR til snøkartlegging er den romlige oppløsning såpass lav at man normalt beregner snødekningsgrad innenfor arealet av hvert piksel (slik det f.eks. gjøres i snøkartleggingssystemet SnowSat [12]). Man klassifiserer derfor ikke pikslene i arealtypene slik man normalt ville gjøre ved f.eks. 10 m oppløsning (et piksel klassifiseres da i f.eks. snø eller ikke-snø). Man bestemmer i stedet andelen av arealtypene på subpikselnivå (prosent snø og prosent ikke-snø innenfor pikselet). Med en slik klassifikasjonsmetode vil avvik fra flatt terreng kunne gi ekstra store utslag. Hvis Solen stod i syd da bildet ble tatt, vil klassifikasjon av et piksel i en nordvendt helning gi lavere snødekningsgrad enn for et piksel i en sydvendt helning.

Ved såkalt radiometrisk terrengnormalisering forsøker man å korrigere for effekten av topografien. I det terrengnormaliserte bildet skal pikselverdiene korrigeres til det de skulle være dersom terrenget hadde vært flatt. Ved klassifikasjon av et slikt bilde skal det i prinsippet la seg gjøre å oppnå snødekningsgrad som er uavhengig av topografien.

I 1995 har dette prosjektet utviklet et programsystem for korreksjon av 1. ordens terrengeffekter, dvs. korreksjon for den dominerende (primære) effekten. Programsystemet er dels omfattende ved at det også er tilrettelagt for korreksjon av sensoreffekter og atmosfæriske effekter, og det er lagt vekt på å oppnå 100% automatikk slik at det er egnet i en praktisk brukssituasjon der det ikke kan forventes at brukeren skal ha spesialkunnskap om satellittfjernmåling eller ha tilgang på andre spesialprogrammer. Systemet inkluderer derfor full integrasjon mot en digital terrengmodell, f.eks. NR-Triang [7], og inkluderer beregninger av Jordens bane og rotasjon slik at Solens posisjon på himmelen kan bestemmes nøyaktig for opptakstidspunktet som normalt finnes i tilleggsdata tilknyttet satellittbildet. Programsystemet er altså i stand til å rekonstruere alle de aktuelle opptaksbetingelser. De begrensede effektene vil ligge i nøyaktigheten i den digitale terrengmodellen og hvor godt man klarer å samregistrere satellittbilde og terreng. Dette er spørsmål som vi vil få svar på i fortsettelsen av prosjektet i 1996. Da vil det også bli lagt inn korreksjoner for de viktigste 2. ordens terrengeffekter, muligens terrengskygging, redusert himmelhvelving (på grunn av topografien) og refleksjon fra omkringliggende terreng. Nedenfor skal vi kort gjennomgå algoritmen for korreksjon av 1. ordens effekter.

For flatt terreng kan vi sette opp følgende uttrykk for strålingen terrengoverflaten mottar fra Solen (direkte innstråling) når vi ser bort fra atmosfæriske effekter:

$$E_{OS}(\lambda) = E(\lambda) \cos \theta.$$

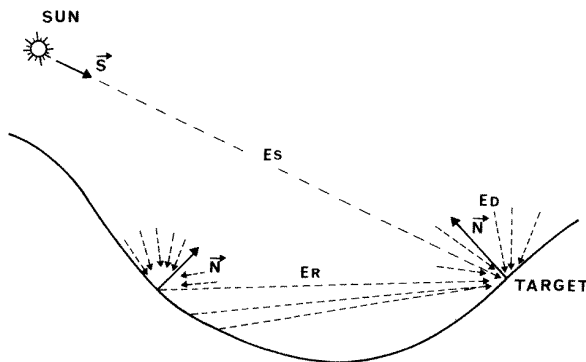
Her er  $E(\lambda)$  den innkommende strålingen fra Solen (solar spectral irradiance),  $\theta$  er Solens sentivinkel og  $E_{OS}$  er netto stråling som når terrengoverflaten (surface irradiance) og  $\theta$  er Solens

senitvinkel. Dersom vi antar at terrenget virker som en total diffus reflektor (lambert-refleksjon), kan strålingen som reflekteres fra terrenget, uttrykkes som følger:

$$L_{OS}(\lambda) = E(\lambda) \cos \theta R_S(\lambda) / \pi,$$

hvor  $R_S(\lambda)$  er terrengoverflatens reflektans, dvs. evne til å reflektere stråling på en gitt bølgelengde. Den regnes som forholdet mellom reflektert og innkommet stråling (“prosentvis refleksjon”).

I snøkartlegging må vi regne reflektansen fra snø og ikke-snø som kjent for å kunne bestemme deres innslag på subpikselnivå [1]. Reflektansen bestemmes indirekte ved at snøklassifikasjonen kalibreres mot kjente terrengoverflater med og uten snø. Dette representerer imidlertid en grov tilnærming siden refleksjonsegenskapene i både snø og ikke-snø varierer mye.



Figur 7: Geometrien i belysningssituasjonen i kupert terreng. Både direkte belysning fra Solen og indirekte fra omgivelsene er vist. (Hentet fra Proy 1989.)

Det er også en grov tilnærming å anta at terrengoverflaten virker som en total diffus reflektor. Å foreta en korrekt modellering er imidlertid umulig i praksis. Enkelte publiserte terrengnormaliseringsmetoder kompenserer til en viss grad for avviket uten å modellere situasjonen fysisk.

I likningene ovenfor inngår Solens senitvinkel,  $\theta$ . For ikke-flatt terreng vil retningen til en normalvektor på terrenget og senitvektoren avvike fra hverandre. Den effektive vinkelen i uttrykkene ovenfor vil da være vinkelen mellom retningsvektoren til Solen og den lokale terrengnormalen (se fig. 7). Når vinkelen er større enn  $90^\circ$ , vil ingen direkte solstråling nå overflaten (slagskygge).

For å korrigere for terrengets orientering, kan dermed følgende uttrykk benyttes:

$$E_{TO}(\lambda) = E(\lambda) \cos(\vec{N}, \vec{S})$$

når  $\cos(\vec{N}, \vec{S}) > 0$  og

$$E_{TO}(\lambda) = 0$$

når  $\cos(\vec{N}, \vec{S}) < 0$ . Her er  $\vec{N}$  normalvektoren på terrenget and  $\vec{S}$  er retningsvektoren mot Solen.

Som nevnt ovenfor bestemmes retningsvektoren til Solen fra et program som modellerer Jordens bane og rotasjon, samt til en viss grad tar hensyn til variasjoner i jordaksens retning over tid (presesjon og nutasjon). Dersom man benytter et bilde som dekker et stort geografisk område, må  $\vec{S}$  oppdateres etter posisjon i bildet (posisjon på jordkloden). Dette er tilfellet for AVHRR-bilder når man benytter store deler av en scene (en full scene er på  $2048 \text{ km} \times 1440 \text{ km}$ ).

## 4 Beregning av snødekket areal

For NOAA AVHRR er den romlige oppløsning såpass grov at pikslene ikke kan klassifiseres som enten snødekte eller snøfrie. Snødekningsgrad må beregnes for hvert enkelt piksel, slik det f.eks.



gjøres i snøkartleggingssystemet SnowSat [12]. Kanal 1 (synlig) og kanal 2 (nær-infrarødt) i AVHRR er godt korrelert, og viser ofte noenlunde like bilder. Fordi det er vanskelig å skille snø fra skyer i kanal 1, er måling av snødekning ofte basert på kanal 2. Våt snø kan imidlertid gi så lav refleksjon i kanal 2 at den er vanskelig å skille fra bar mark. Ved kartlegging av snødekket areal er en spesielt interessert i utkanten av det snødekte området, hvor snøen ofte vil være våt.

For Landsat TM har Winther [13] vist at kanalene 2 og 5 (synlig og midlere infrarød) skiller bedre mellom bar mark og snø enn en kanal alene. Muligens kan tilsvarende kombinasjon av kanaler fra NOAA AVHRR gi et bedre anslag for snødekket areal enn kanal 2 alene. Vi vet følgende om forskjellen mellom kanal 1 og 2:

- Tørr snø gir høyere refleksjon enn bar mark og vegetasjon i begge kanaler.
- Refleksjonen minker med økende kornstørrelse, endringen er sterkest i kanal 2.
- Forurensninger reduserer også refleksjonen, mer i kanal 1 enn i kanal 2.
- Snø har lavere albedo i kanal 2 enn i kanal 1, i særdeleshet gjelder dette våt snø.
- Refleksjon fra grønn vegetasjon er høyere i kanal 2 enn i kanal 1.

Det er altså grunnlag for å anta at forskjellen mellom de to kanalene vil skille bedre mellom snø og bar mark enn hver kanal alene. En enkel differanse er imidlertid bare en av mange muligheter for kombinerings, eksempelvis har en lineær regresjon noe større fleksibilitet. Et annet alternativ er Normalisert Differanse-VegetasjonsIndeks (NDVI).

Verifiseringsdata ble samlet inn i Veo og Tesses nedslagsfelt i Jotunheimen 18. til 20. juni 1995, med vertikalfotografering 19. juni. En del skyer nødvendiggjorde ny fotografering 26. juni. Digitale høydedata fra Statens Kartverk er komplette, men har de samme feil som er kjent fra tidligere undersøkelser [3]. Det ble utført målinger ved 28 lokaliteter mellom 1300 og 1850 moh., av snødekkets refleksjon, temperatur, tetthet og fuktighet. I tillegg ble posisjon, høyde og skråningens eksposisjon og gradient registrert. Flybilder og feltobservasjoner viser at området hadde mindre snø enn antatt på forhånd, særlig i de østlige delene. Både Veodalen og Smådalen var helt bare, og grovt anslått måtte en opp i 1600-1800 moh for å finne rundt 50 prosent snødekning. Lenger vest var det mer snø, og massivet rundt Glittertind og Veobreen var helt snødekket. Seks flybilder ble valgt ut for scanning og videre behandling; dette arbeidet vil skje i 1996.

## 5 Inndeling i høydesoner og overføring til HBV-modellen

Når snødekning er beregnet fra AVHRR-bildet, skal verdiene tilordnes høydesonene i HBV-modellen, og der fremtre som en del av en modelltilstand. For dette formål trenger en stedfestet høydeinformasjon, i praksis en digital terrengmodell, for å bestemme høydeverdien for hvert piksel. Et AVHRR-piksel dekker 1,2 km<sup>2</sup> og vil i bratt terreng spenne over et stort høydeintervall. En kunne fordele pikslet mellom høydesoner etter en arealnøkkel, men fordi stedfestingen av bildet er usikker, har presis høydeangivelse for hvert piksel liten betydning. I stedet beregnes middelhøyden i pikslet, så pikslene representerer en samling av tallpar med høyde og snødekning. Til denne tilpasses en fordelingskurve, og en får samtidig en mulighet til å vurdere variasjon og usikkerhet.

Beregningen av høyde-snødekkefordelingen må utføres i et bildebehandlings- eller GIS-program fordi den forutsetter stedfesting av både satellittdata og høydeinformasjon. I dette prosjektet gjøres denne operasjonen i Arc/Info, og snødekningsverdien for hver høydesone eksporteres til en enkel ASCII-fil som leses av HBV-modellprogrammet. Alternativt kan en levere sammenhengen

mellom høyde og snødekning som en kontinuerlig funksjon i høyde. Dette er i alle tilfeller et mellomstadium i beregningen av soneverdier, og inneholder dermed all nødvendig informasjon for å beregne høydefordelt snødekning. I dette tilfellet er stedfesting av dataene bortfaldt, ved at verken høydesoneinndeling eller piksel-lokalitet er representert i datasettet.

De observerte snødekningsverdiene for hver høydesone skal leses inn som en del av en tilstand i HBV-modellen. Denne modellen har allerede rutiner for håndtering og lagring av alternative tilstander for et tidspunkt ved at brukeren tillates å simulere flere versjoner med varierende forutsetninger. Dermed krever programmet bare endringer som vedrører merking av hvilke tilstander som representerer målte verdier, samt mulighet for å lese inn data fra ekstern ASCII-fil. I hovedsak er endringene knyttet til brukergrensesnittet og databasen. Arbeidet utføres av Energiforsyningens Forskningsinstitutt (EFI) under prosjektet Integrerte Driftssentraler (ID), og de nødvendige endringer i HBV-programkoden blir med dette realisert i den offisielle ID-HBV-modellen. Funksjonene er operative fra og med den versjonen av ID-HBV som etter planen slippes i mai 1996. Dermed er programvare for å nyttiggjøre satellittinformasjon i operativ drift allerede tilgjengelig for kraftverkene.

## 6 Diskusjon og konklusjoner

I det foregående har vi presentert en fremgangsmåte for automatisk klassifikasjon av snødekning som er egnet for kraftverksbransjen. Resultatene så langt er foreløpige da prosjektet kun er halvveis i sitt arbeid. Vi skal nedenfor fokusere på et par utvalgte spørsmål og utfordringer i arbeidet.

Den geometriske korreksjonen, slik den er beskrevet, er beftet med visse potensielle feil slik den er implementert i dag. F.eks. vil skydekke over kontrollpunktet hindre den automatiske kontrollpunkt-deteksjonsalgoritmen i å finne det riktige stedet, men i stedet returnere et nokså tilfeldig punkt i søkeområdet. Videre er det ikke usannsynlig at chip'en og søkeområdet har forskjellig spredning i sine pikselverdier (middelverdien tas hånd om, men ikke standardavviket), slik at differansemetoden som benyttes ikke gir noe godt resultat. Mulige løsninger på disse problemene er:

- Ved å foreta en skydeteksjon på input-bildet før kontrollpunkt-deteksjonen settes i gang, kan man be prosedyren forkaste søkeområder med for mye skyer, og i stedet gå videre til neste kontrollpunkt.
- Chip'en og søkeutsnittet normaliseres før sammenligning, dvs. gis samme middelverdi og standardavvik.
- Resultatene kan undersøkes av prosedyren etter deteksjonen. Eksempelvis kan vektoren mellom forventet og funnet lokasjon sammenlignes for alle kontrollpunktene; disse bør være noenlunde like, da den innledende grovkorreksjonen tar hånd om de store feilene.

Algoritmen for korreksjon av terrengeffekter er svært avhengig av hvor god representasjon man har av terrenget, altså hvor godt man klarer å bestemme  $\vec{N}$ . Ett AVHRR-piksel dekker i seg selv et stor område, 1,1 km  $\times$  1,1 km. Innenfor ett piksel vil man ofte kunne finne store topografiske variasjoner. Ideelt sett burde man benytte den gjennomsnittlige normalvektor for området. En slik nettonormalvektor kan bestemmes fra en digital terrengmodell som i utgangspunktet har betydelig høyere oppløsning en bildet. For mesteparten av Norge er terrenghøydedata tilgjengelig i et 100 m  $\times$  100 m rutenett. Det er riktignok en del feil knyttet til disse, men i tilfellet AVHRR med så grov romlig oppløsning bør dette være en tilstrekkelig god representasjon.

I løpet av høsten 1996 håper vi å ha implementert alle deler av demonstrasjonssystemet for automatisk snøkartlegging. Systemet vil da bli testet og demonstrert i et kraftverk knyttet til forsøksområdet i Jotunheimen.

## Referanser

- [1] T. Andersen, 1982. "Operational snow mapping by satellites," *Hydrological Aspects of Alpine and High-Mountain Areas*, Proceedings from Exeter Symposium, IAHS Publication no. 138.
- [2] C. Brühl and W.G. Zdunkowski, 1983. "An Approximate Calculation Method for Parallel and Diffuse Solar Irradiances on Inclined Surfaces," *Arch. Met. Geophys. Biol. B*, Vol. 32, pp. 111-129.
- [3] T. Faanes and S. Kolberg, 1995. "Snow cover heterogeneities in mountainous areas," *Proceedings: 5th National Hydrology Symposium*, British Hydrological Society, Edinburgh, september 1995.
- [4] D.S. Kimes and J.A. Kirchner, 1981. "Modelling the Effects of Various Radiant Transfers in Mountainous Terrain on Sensor Response," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 19, No. 2, pp. 100-108.
- [5] K.Ya. Kondratyev, 1977. "Radiation Regime on Inclined Surfaces," *Note Technique 152*, MF No. 79 N 11613, 1977, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- [6] T.M. Lillesand and R. Kiefer, 1987. *Remote sensing and image interpretation*, Second edition, John Wiley & Sons Inc., New York.
- [7] A. Maus, 1984. "Delaunay Triangulation and the Convex Hull of  $n$  Points in Expected Linear Time," *BIT*, Vol. 24, pp. 151-163.
- [8] J.F. Moreno and J. Meliá, 1993. "A Method for Accurate Geometric Correction of NOAA AVHRR HRPT Data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31, No. 1, pp. 204-226.
- [9] C. Proy, D. Tanre and P.Y. Deschamps, 1989. "Evaluation of Topographic Effects in Remotely Sensed Data," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 30, pp. 21-32.
- [10] J.A. Richards, 1986. *Remote Sensing Digital Image Analysis*, Springer-Verlag, pp. 33-42.
- [11] R. Solberg, 1993. "Mapping of Snow Cover by ERS-1 SAR," *Proceedings of IGARSS '93 Symposium*, Tokyo, Japan.
- [12] R. Solberg and T. Andersen, 1994. "An Automatic System for Operational Snow-Cover Monitoring in the Norwegian Mountain Regions," *Proceedings of IGARSS '94 Symposium*, Pasadena, California, USA.
- [13] J.-G. Winther, 1993. *Snow and glacier ice characteristics measured using Landsat TM data*, Dr. Ing. thesis, NTH, Trondheim.
- [14] W.J. Wiscombe and S.G. Warren, 1980. "A model for the spectral albedo of snow. I: Pure snow," *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 37, pp. 2712-2733.