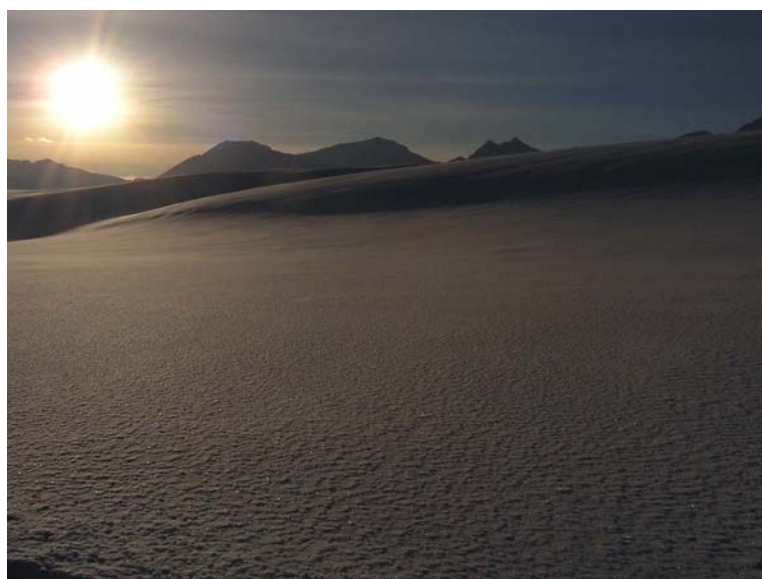


Masteroppgave i geofag

Overflategeometriendringer på Fridtjovbreen, Svalbard

*Bestemt ved digital fotogrammetri med
skråbilder og vertikalbilder*

Erik Scavenius



UNIVERSITETET I OSLO

DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Overflategeometriendringer på Fridtjovbreen, Svalbard

*Bestemt ved digital fotogrammetri med
skråbilder og vertikalbilder*

Erik Scavenius



Masteroppgave i geofag
Studieretning: Naturgeografi, geomatikk

Institutt for geofag
Matematisk-naturvitenskaplig fakultet

UNIVERSITETET I OSLO
November 2005

© Erik Scavenius, 2005

Veiledere: Trond Eiken, senioring. Inst for Geofag, Jon Ove Hagen, prof. Inst for Geofag

Dette eksamensarbeidet er publisert elektronisk i DUO – Digitale Utgivelser ved UiO

<http://www.duo.uio.no>

Det er også katalogisert i BIBSYS (<http://www.bibsys.no/>)

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted, in any form or by any means, without permission.

Denne digitale versjonen av oppgava har følgende forandringer ift: den trykte (og bedømte) versjonen: Lysark fra offentlig presentasjon (211205) av oppgaven inkludert i appendiks, blanke sider fjernet, kjente trykkfeil rettet og figurer redusert i oppløsning/størrelse/flyt. Dette betyr at sidetall fra den trykte og digitale utgaven ikke kan sammenliknes direkte.

Sammendrag

I denne oppgaven brukes digital fotogrammetri til å lage terrengmodeller over Fridtjovbreen på Svalbard. Breen er dekket av flybilder over et tidsspenn fra 1936 til 1990.

Lite er kjent av den indre geometrien i kameraet som tok bildene fra 1936, og det gjøres i oppgaven et forsøk på å gjenskape denne geometrien ved bruk av tilleggsparemetre i blokkutjevning. Forsøket er ikke vellykket, og det foreslås en del grunner til dette.

Det argumenteres for at flybildene fra 1936 kan være et viktig bidrag til å bestemme Svalbards breers endringer etter slutten av lille istid. Det vises imidlertid at det er mange faktorer som kan være med å trekke nøyaktighetspotensialet nedover, og at det er krevende å bruke de gamle bildene i en moderne digital fotogrammetrisk arbeidsflyt.

Fridtjovbreen er, som en stor del av Svalbards breer, av surge-type. Breen gjorde surge-fremstøt i 1858 og i 1995. Terrengmodellene brukes til å visualisere Fridtjovbreens oppbygging til surgen i 1995. Det vises for to profiler hvordan breen fra 1936 til 1990 trakk seg tilbake omlag to kilometer i fronten og bygde seg opp i størrelsesorden 100 meter i den øvre vestre delen. Det vises at hovedtyngden av akkumulasjon har skjedd over 400 moh. Enkle areal- og høydebetraktninger brukes til å beregne endringer i isvolum i perioden.

Forord

Denne oppgaven er en del av Mastergraden i geomatikk ved avdeling for naturgeografi, institutt for Geofag ved Universitetet i Oslo. Oppgaven er gitt av veilederne senioringeniør Trond Eiken og professor Jon Ove Hagen, og har hatt en arbeidsramme på 60 studiepoeng.

Veileder Jon Ove Hagen takkes spesielt for hjelp med litteratursøk, smittende entusiasme i forhold til glasiologi og en flott scootertur til Fridtjovbreen i slutten av mørketida 2005.

Veileder Trond Eiken takkes for en fantastisk åpen-dør-politikk, tålmodig imøtekommenhet ved tekniske problemer og for all inspirasjon og hjelp underveis. Ved teknisk motgang er det godt å vite at det knapt fins problemer DOS VG-K ikke kan løse...

Norsk Polarinstituttt takkes for tilgang på flybilder, kalibreringsrapporter, bildemålinger og kartmateriale.

Svalbard Samfunnsdrift takkes for tilgang til digitalt kartverk for Longyeardalen. Dette kartmaterialet var av avgjørende betydning for arbeidet med ytre orientering av S38-bildene over Longyeardalen.

Takk til Ivar Maalen-Johansen ved Universitet for Miljø- og Biovitenskap for tilrettelegging i forbindelse med at jeg tok kursene GMFO300 og GMFO310.

Takk til medstudenter, venner, Børneblæs og BAUS for studiedigresjoner og faglig — såvel som ikkefaglig — påfyll i løpet av studietida. Takk til familien for støtte underveis. Spesiell takk til samboer Anette for støtte, oppmuntring, overbærenhet og nødvendig spark for å få oppgaven ferdig.

Blindern 1. desember 2005

Erik Scavenius

Innhold

Forord	vii
1 Innledning og problemstilling	1
1.1 Innledning og motivasjon	1
1.2 Problemstilling	3
2 Teori	4
2.1 Fotogrammetri	4
2.1.1 Teknologi og utstyr	5
2.1.2 Arbeidsflyt	7
2.1.3 Digitale bilder — scanning	7
2.1.4 Orientering av bildene	9
2.1.5 Indre orientering	9
2.1.6 Ytre orientering	14
2.1.7 Strålebuntutjevning og aerotriangulering	15
2.1.8 Forskjellige begreper	15
2.1.9 Kamerakalibrering	18
2.1.10 Terrengmodeller fra matching	21
2.1.11 Ortofoto	22
2.2 Glasiologi	24
2.2.1 Massebalanse	26
2.2.2 Bredynamikk og surge	26
2.2.3 Breer som klimatisk arkiv	28
2.2.4 Måling av massebalanse	29
3 Område og data	32
3.1 Fridtjovbreen	32
3.2 Tilgjengelige flybilder	33
4 Gjennomføring og resultater	39
4.1 Kalibrering av kamera P21	39

4.1.1	Bildekoordinatsystem	39
4.1.2	Fortegning	42
4.2	Orientering av bilder	44
4.2.1	S90 Fridtjovbreen	44
4.2.2	S36 Fridtjovbreen	45
4.3	Fremstilling av terrengmodeller	46
4.3.1	Matchingsparametre for fargebildene	46
4.3.2	Terrengmodell S90	47
4.3.3	Terrengmodell S36	49
4.4	Andre høydedata	52
4.5	Areal	52
5	Diskusjon	54
5.1	Nøyaktighet	54
5.1.1	Oppgitte YO-parametre	55
5.1.2	Nøyaktighetsbetraktning S90	56
5.1.3	Nøyaktighetsbetraktning S36	58
5.2	Overflateendring	60
5.3	Volumbetraktning	67
6	Konklusjon	69
	Bibliografi	73
A	Dataprogrammer	74
A.1	ImageStation	74
A.1.1	ISPM — Photogrammetric Manager	74
A.1.2	ISRU — Raster Utilities	75
A.1.3	ISDM — Digital Mensuration	75
A.1.4	ISSD — Stereo Display	75
A.1.5	ISAE — Automatic Elevations	75
A.2	Surfer	75
A.3	VG-land (VG-L)	75
A.4	VG-kart (VG-K)	75
A.5	ArcGIS	76
A.6	Photodeler 5.0	76
A.7	Felles	76
A.8	L ^A T _E X	76
B	Dekningsoversikter	77

C Transformasjon pixel - bildekoordinater	83
D Kamerafil P21	85
E Gittpunkter SV Nordenskiöldland	86
F Ytre orienteringselementer S90	87
G YO-parametre S36 Fridtjovbreen	88
H Presentasjon	90

1 Innledning og problemstilling

1.1 Innledning og motivasjon

Tema for denne oppgaven er fremstilling av digitale terrengmodeller over Fridtjovbreen på Svalbard. Breen er av surge-type, og surget i 1858 og 1995. Det brukes skråbilder fra 1936 og vertikalbilder fra 1990 for å modellere breens oppbygging mot den siste surgen.

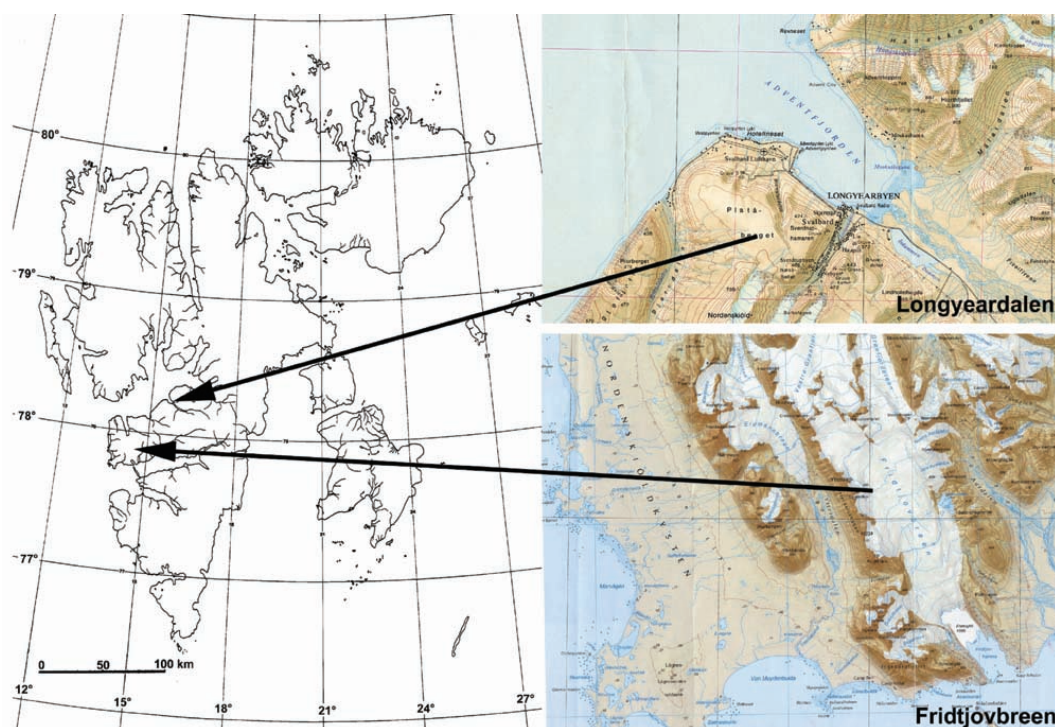
Overvåkning av isbreer kan være aktuelt av flere grunner. Noen isbreer ligger slik til at de er viktige bidrag til vannkraftmagasiner. Andre må overvåkes på grunn av deres potensiale til direkte eller indirekte å utløse naturkatastrofer som flom, jøkulhlaup eller skred. Videre regnes isbreer som gode klimatiske indikatorer, slik at overvåkning av isbreenes endringer kan brukes til å påvise endringer i klimaet.

Slik overvåkning kan gjøres ved direkte målinger på breoverflata. Det kreves imidlertid stor innsats i felt over lang tid for å kunne si noe om breenes respons på klimaet.

Fotogrammetri er en metode for innsamling av terrengkoordinater basert på måling i bilder. For at metoden skal være nøyaktig er det nødvendig med detaljert kjennskap til kameraets indre geometri. Slik detaljert kjennskap mangler for kameraet som tok bildene i 1936. Det er derfor med denne oppgaven et mål å beskrive denne indre geometrien, eller gjøre en invers kalibrering av kameraet på bakgrunn av måling i bilder tatt med kameraet. I kamerakalibreringsforsøket brukes flybilder over Longyeardalen. En oversikt over hvor Longyeardalen og Fridtjovbreen befinner seg på Svalbard er vist i figur 1.1.

De fleste av Svalbards isbreer er flyfotografert jevnlig siden Norsk Polarinstittutt begynte med topografisk kartlegging ved hjelp av flyfotogrammetri på 1930-tallet. På den tiden var det ikke mange breer som ble detaljert undersøkt og målt opp. De gamle flybildene gir derved en mulighet til å gå tilbake og gjøre detaljerte målinger av hvordan forholdene var forholdsvis langt tilbake i tid.

Kapittel 2 gir en oversikt over relevant teori for fotogrammetrisk kartlegging og glasiologi. Kapittel 3 gir en beskrivelse av Fridtjovbreen. Her gis også en



Figur 1.1: Oversikt over områdene som behandles i denne oppgaven, Fridtjovbreen og Longyeardalen på Svalbard. Kartutsnitt © Norsk Polarinstitutt.

oversikt over flybilder som er tatt over Fridtjovbreen. Kapittel 4 beskriver gjennomføringen av oppgaven. Det forklares hvilke metoder som er brukt, og hva som er gjort. Resultatene diskuteres med tanke på nøyaktighet og kvalitet. I kapittel 5 diskuteres resultatene med tanke på å vise endringene i høyde og volum på Fridtjovbreen fra 1936 til 1990. I kapittel 6 sammenfattes oppgavens konklusjon, og i appendiks presenteres forskjellige resultatfiler, bildeplott, koordinatlistor og lignende vedlegg til oppgaven.

1.2 Problemstilling

Målet med denne oppgaven er å beskrive Fritjovbreens endringer fra 1936 til 1990 ved å sammenholde høydemodeller basert på flybilder fra de første bildene tatt i 1936 til de nyeste bildene tatt i 1990.

Høydemodellene skal lages ved hjelp av digital fotogrammetri på en digital fotogrammetrisk arbeidsstasjon (*dfa*) med programvare fra ZI-imaging (ImageStation). I forbindelse med fotogrammetriarbeidet er det ønsket å få svar på

- om det er praktisk gjennomførbart å scanne og bruke flybilder fra 1930-tallet (tatt på skrå, med "ukurant" kamerautstyr sett med dagens øyne) i en moderne fotogrammetrisk prosess.
- om det med det bildematerialet som foreligger er mulig å gjennomføre en invers kamerakalibrering av kameraet som tok bildene i 1936, og hvorvidt en eventuell slik kalibrering er brukbar på andre bilder tatt med dette kameraet i samme periode.
- hvordan matchingsalgoritmene i dfa-programvaren fungerer på "ukurante" bilder, skråbilder og i vanskelig terreng (fjell og is).

2 Teori

I dette kapitlet gis en gjennomgang av relevant teori for problemstillingen i oppgaven. Målet er at lesere uten kjennskap til fotogrammetri skal ha mulighet til å forstå prinsippene for å lage terrengmodeller, og kjenne til begrensninger og muligheter. For lesere med kjennskap til fotogrammetri er målet å etablere et felles begrepsapparat for de grunnleggende emnene, og gå noe mer i dybden på begrensende faktorer i denne oppgaven.

Videre presenteres grunnleggende glasiologisk teori for Svalbards isbreer, for å etablere et grunnlag for å diskutere Fridtjovbreens geometriske endringer fra 1936 til 1990. Bare stoff som anses relevant for diskusjonen er tatt med; derfor er teorier om større iskapper og deres klimatiske respons holdt utenfor.

2.1 Fotogrammetri

Ordet fotogrammetri er sammensatt av de greske ordene for lys, skrifttegn og måling, og er en metode for å måle form, størrelse og beliggenhet for objekter ved hjelp av bilder (Andersen 2003). Når to eller flere bilder dekker samme område fra ulike vinkler, og man kjenner bildenes orientering i rommet kan man fotogrammetrisk bestemme koordinater for alle synlige objekter i området. En tenker seg at det går *stråler* fra alle punkter på bakken opp gjennom brennpunktet på linsa (til vanlig kalt projeksjonssenteret) i kameraet til bildeplanet (filmen). Det *perspektiviske sambandet*, som er det geometriske prinsippet som ligger i bunn, krever at de tre punktene terrengpunkt, projeksjonssenter og bildepunkt skal ligge på ei rett linje. Bildet sies da å være en *sentralprojeksjon*. Prinsippet som ligger til grunn for fotogrammetrien er å gjenskape *strålebunten* som laget bildet, se figur 2.3.

Fremstillingen i dette kapitlet (2.1) er basert på standard lærebøker i grunnleggende fotogrammetri, se for eksempel (Andersen 1985), (Andersen, Brånå & Lønnum 1991), (Andersen 2003), (Mikhail, Bethel & McGlone 2001), der ikke annet er angitt.

Det er vanlig å skille mellom flyfotogrammetri og nærfotogrammetri. I flyfotogrammetri tas det bilder av bakken fra fly med avanserte kamera-

og linsesystemer. Bildene behandles med sofistikerte instrumenter og/eller dataprogrammer for å gi opphav til detaljerte terrengmodeller eller kart med god nøyaktighet. Innenfor nærfotogrammetrien er det mer variasjon i bruk av utstyr, oppnåelige resultater og nøyaktighet. Anvendelser her kan være industrimålinger og dokumentasjon av arkitektur eller trafikkulykker. Denne oppgaven vil dreie seg om flyfotogrammetri, og når begrepet fotogrammetri brukes, er det heretter underforstått at det menes flyfotogrammetri.

2.1.1 Teknologi og utstyr

Kamera

I flyfotogrammetri tas bildene med et kalibrert målekamera. Fram til midten av 90-tallet var de konvensjonelle kameraene med film enerådende, mens fra årtusenskiftet har digitale kamerasystemer begynt å ta over. I denne oppgaven er det brukt bilder tatt i 1936 og 1990 med konvensjonelle filmkameraer.

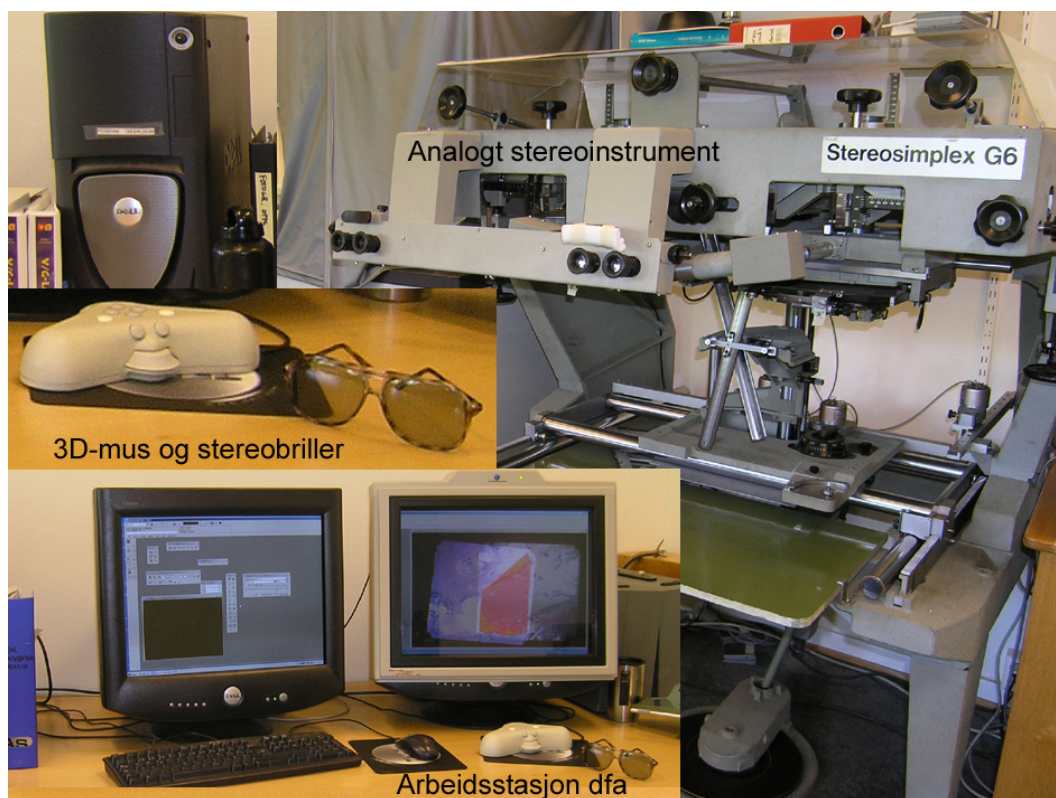
I fotogrammetrien er det målingene i bildene som er grunnlaget for å beregne koordinater for punktene på bakken. Bildene bør derfor ha så god geometrisk og fotografisk kvalitet som mulig. For å sikre kvaliteten kalibreres flykameraer jevnlig, se avsnitt 2.1.9.

Stereoinstrument

Det er vanlig å skille mellom analog, analytisk og digital fotogrammetri, se figur 2.1.

Ved *analog* fotogrammetri forsøker en å gjenskape strålebunten ved å fysisk dreie og flytte bildene slik at de ligger slik i forhold til hverandre som de lå under opptakssituasjonen (da bildene ble tatt). Her er det en *fysisk* kontakt mellom pennen som tegner kartet og bevegelsen av målemerket. Bildene ligger slik at brukeren ser et bilde med hvert øye, og derfor ser stereoskopisk. Med inntoget av analytisk og digital fotogrammetri er analog fotogrammetri blitt historie.

I *analytisk* fotogrammetri er den fysiske kontakten med bildene erstattet av numeriske beregninger. Brukeren ser på de analoge bildene, men i stedet for å fysisk dreie på bildene for å orientere dem, blir orienteringen beregnet numerisk. Prinsippene for beregningene har vært kjent siden 1800-tallet, se for eksempel Arneberg (1924), men på grunn av mangel på regnekraft kunne metoden ikke slå gjennom før datamaskinen kom. På samme måte som ved analog fotogrammetri ser brukeren stereo ved å se et bilde med hvert øye. Det at brukeren ser direkte på de analoge bildene er en fordel ved metoden; det er



Figur 2.1: Analogt (til høyre) og digitalt stereoinstrument (dfa). På det analoge instrumentet er det *fysisk* kontakt mellom bildene og okularene. Alle dreiningene av bildene kan gjenskapes med skruer og ratt. Ser vi på de små bildene av digitalt stereoinstrument (dfa), ser vi nedenfra og opp skjermer for stereovisning av bilder, 3D-mus og stereobrimmer og datamaskinen systemet kjører på (en ordinær pc).

lettere å se små detaljer i et fysisk bilde enn i et digitalt bilde. Til operativ bruk er likevel digital fotogrammetri i ferd med å ta over.

Ved *digital* fotogrammetri er måleprosessen og kartet digitalt. Det betyr at man bruker digitale bilder, enten digitalisert fra film eller tatt med digitalt kamera, og gjør alle målinger og beregninger med datamaskin. Med digitale bilder er det åpnet muligheter for automatisering av deler av arbeidet i kartproduksjonen. Orientering av bilder og fremstilling av digitale terrengmodeller er eksempler på prosesser som i dag gjøres med liten eller ingen brukerintervensjon.

En digital fotogrammetrisk arbeidsstasjon (*dfa*) er en datamaskin som er satt opp med fotogrammetrisk programvare og ekstra utstyr for å se på stereomodeller.

For at brukeren skal se stereoskopisk viser datamaskinen bildene annenhver gang, og så fort at øyet ikke rekker å oppfatte at bildene skifter. Mellom skjermen og øynene sitter det en enhet som sørger for at brukeren ser det

ene bildet med venstre øye og det andre med høyre øye. På dfa'en benyttet i forbindelse med denne oppgaven er det brukt et system der det på skjermen er montert en ekstra skjerm som polariserer lyset fra dataskjermen. Maskinen viser de to bildene annenhver gang og skifter bilde 60 ganger i sekundet. Maskinen og polariseringsskjermen er synkronisert, slik at det ene bildet får horisontal og det andre vertikal polarisering. Brukeren bruker briller med tilsvarende polariserende filtre slik at hvert øye bare ser et bilde. På denne måten ser brukeren ett bilde med hvert øye. Det finnes også flere andre måter å teknisk ordne dette med stereovisning.

En fotogrammetrisk *modell* er det visuelle inntrykk en får ved å se på to bilder med stereovirkning. Stereovirkning får en i *overlappsområdet*, det vil si det området som er felles for to bilder, se figur 2.6. Det er vanlig ved operativ kartlegging å ha minst 60% overlapp i flyretningen og 20% - 60% overlapp mellom flystripene.

2.1.2 Arbeidsflyt

Et fotogrammetrisk prosjekt med tanke på kartlegging innbefatter mange arbeidsprosesser. Et skjematisk overblikk, som vist i figur 2.2, kan være nyttig for forståelsen av de neste sidene.

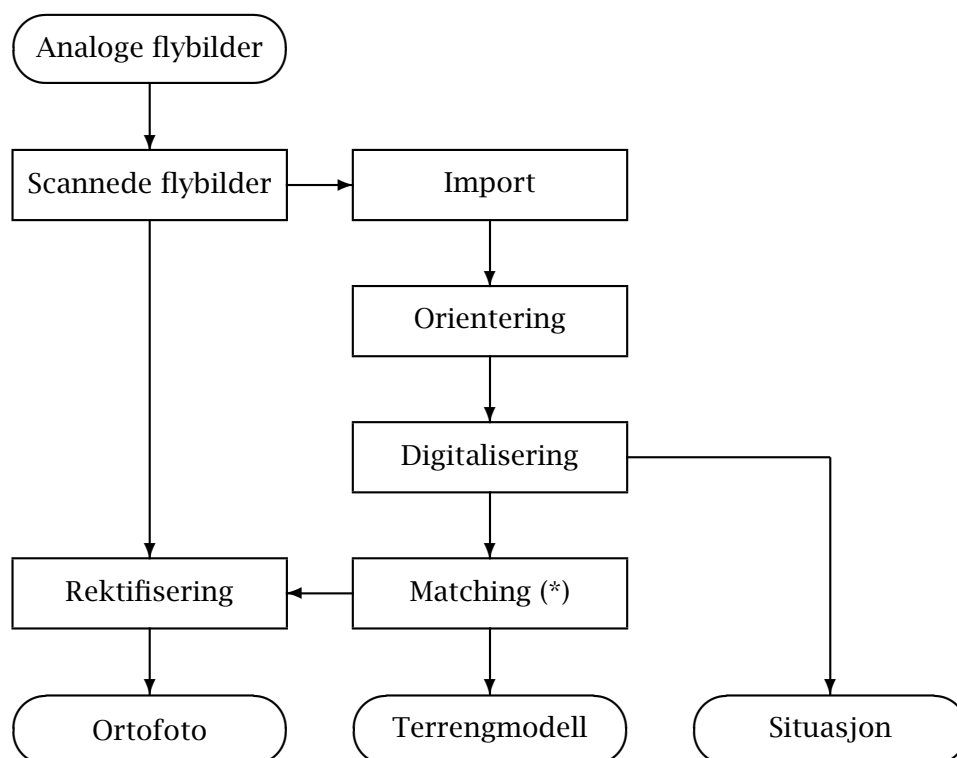
2.1.3 Digitale bilder — scanning

Et digitalt bilde er et grid der hver rute har en verdi som representerer intensiteten i det reflekterte lyset fra bakken til opptakssensoren i et båndområde av det elektromagnetiske spekteret. For pankromatiske bilder er det ett bånd, som representerer stråling i bølgelengdene som tilsvarende synlig lys. Fargebilder vil for hver rute i gridet ha lagret verdien for alle fargebåndene i bildet. Et vanlig fargebilde (RGB, rødt, grønt og blått) har altså tre fargebånd.

Med innføring av digitale kameraer etter årtusenskiftet fotograferes mange prosjekter, spesielt i stor målestokk, i dag digitalt (Hinz, Dörstel & Heier 2000). Bilder som er fotografert på film må *scannes* før de kan brukes på en dfa. I følge Andersen & Johansen (1998) må følgende krav stilles til scanneprosessen:

Geometrisk kvalitet må være god. Bildemålinger kan gjøres med nøyaktighet ned mot $2\mu\text{m}$, så scanningen bør være nøyaktig på det nivået.

Oppløsning Jo større oppløsning, jo flere detaljer er synlig i bildene. Oppløsning på $10\mu\text{m}$ bør være mulig.



Figur 2.2: Arbeidsflyt i et fotogrammetriprosjekt. I digitaliseringsprosessen konstrueres situasjon (veier, hus etc.). (*) Det er ofte nødvendig med kontroll/editering av automatisk genererte terrengmodeller (resultatet av matchinga) før de regnes som ferdige.

Radiometrisk kvalitet Gråtonene eller fargene i bildet må gjengis korrekt, og kontrasten i bildet må bevares.

Datakomprimering Et pankromatisk bilde på 23x23 cm scannet til $7.5\mu\text{m}$ oppløsning i 8 bit (1 byte) vil i utgangspunktet ta $(\frac{2.3 \cdot 10^5}{7.5})^2 \approx 9.4 \cdot 10^8$ bytes, det vil si nesten en gigabyte. Et RGB-fargebilde vil være tre ganger så stort. For effektiv lagring og håndtering er det derfor essensielt med en rimelig komprimering av data.

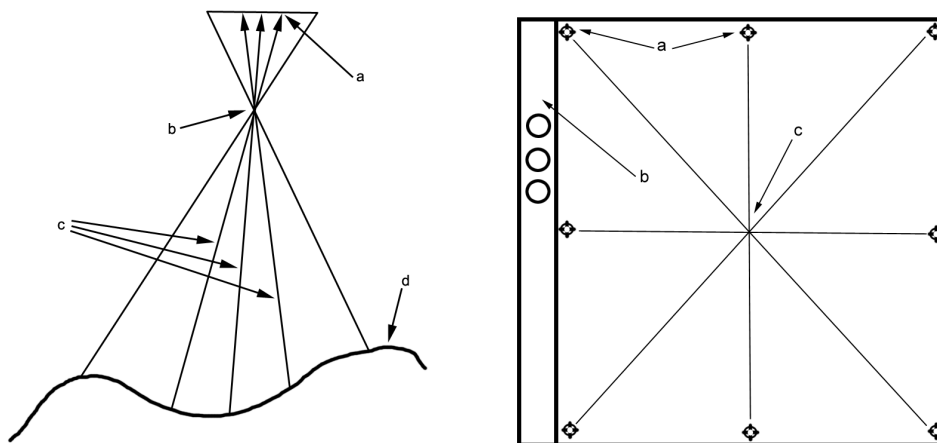
JPEG (Joint Photographers Expert Group) er en metode for komprimering av billededata der gråtonevariasjonen i bildet beskrives med matematiske funksjoner i stedet for at hvert enkelt piksels gråtoneverdi lagres (Lammi & Sarjakoski 1995). Når det gjelder datakomprimering er det i Kiefner & Hahn (2000) referert til forsøk som viser at komprimering opp til 1:10 med JPEG kan gjøres praktisk talt uten tap av presisjon.

2.1.4 Orientering av bildene

Før bildene kan brukes til kartlegging må de refereres til bakken. Denne prosessen kalles orientering. Orienteringsprosessen tar sikte på å gjenskape strålebunten som har skapt bildet.

Det er vanlig å dele denne prosessen i to deler; *indre orientering*, der en ser på hvert bilde for seg, og *ytre orientering*, der en ser på bildet i forhold til bakken og andre bilder. En annen måte å se det på er at i den indre orienteringen gjenskapes strålebuntens form, mens i den ytre orienteringen gjenskapes strålebuntens beliggenhet i rommet.

2.1.5 Indre orientering



(a) Strålebuntens (c) vei fra bakken (d) gjennom linsas projeksjonssenter (b) til bildeplanet (a).

(b) Konvensjonelt analogt flybilde med rammemerker (a) (4-8 stykker) og instrumentrad (b). Rammemerkesenteret (c) (FC) ligger i skjæringspunktet for diagonalene.

Figur 2.3: Oversikt over de viktigste geometriske begrepene i forbindelse med flybilder.

Med indre orientering forstås å bestemme de størrelser vedrørende kamerets indre geometri og annet som må være kjent for at den strålebunten som dannet bildet skal kunne rekonstrueres (Andersen 2003).

I en indre orientering av bilder tatt med film i et konvensjonelt kamera må følgende parametre bestemmes:

- Bildekoordinatsystem og hovedpunktets plassering
- Kamerakonstant

- Linsefortegning
- Bildedeformasjoner
- Transformasjon mellom bildekoordinatsystem og pikselkoordinatsystem

Når det snakkes om å gjennomføre indre orientering kan det siktes til to ting:

Kalibreringsprosessen med å bestemme indre orienteringsparametre for et kamera. Dette er parametre som vil gjelde for alle bilder tatt med kameraet i en periode.

Måleprosessen med å måle rammemerker i bildet som ledd i å etablere transformasjonen mellom bilde- og pixelkoordinatsystem.

Bildekoordinatsystem og hovedpunktets plassering

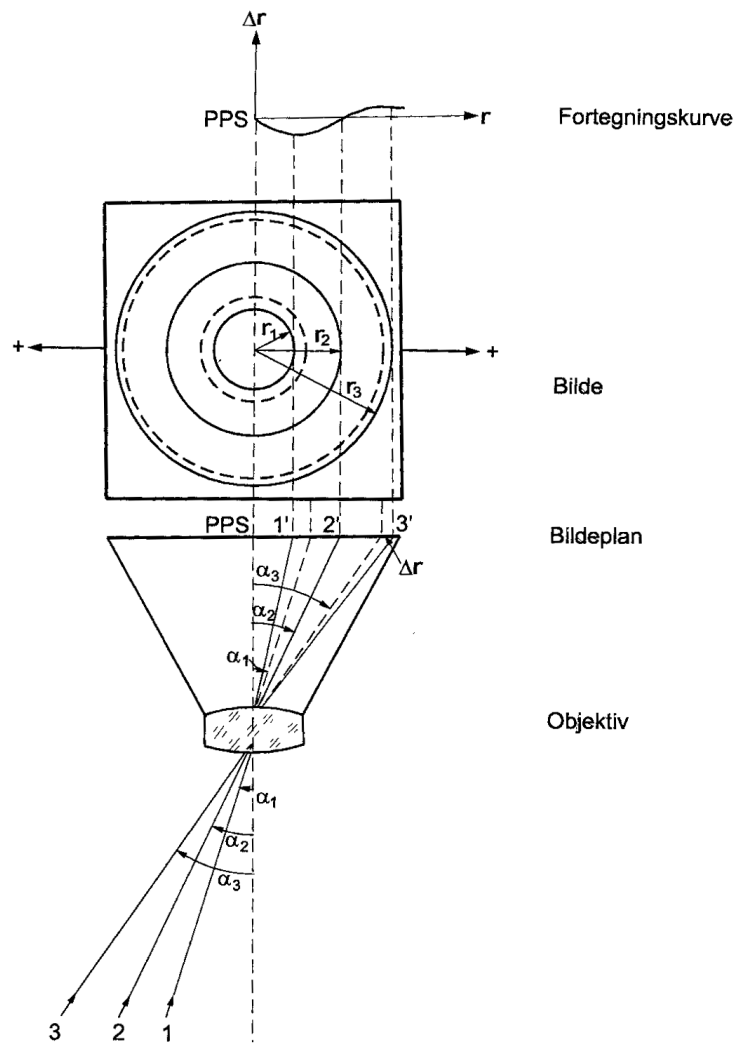
Rammemerkenene er en fysisk del av kamerasystemet, og blir fotografert med på filmen. Ved at de er der kan vi se hvordan filmen har ligget i forhold til linsesystemet. Bildekoordinatsystemet defineres ut fra rammemerkenene, og er et rettvisklet koordinatsystem med aksene x' og y' . Origo legges i sentrum for rammemerkenene, se figur 2.3, og benevnes bildesentrum eller rammemerkesentrum.

Normalen fra linsas projeksjonssenter ned på bildeplanet skjærer bildeplanet i *bildehovedpunktet*. Fordi linsesystemet ikke er feilfritt kan det beregnes flere punkt som kan fortjene tittelen bildehovedpunkt:

PPA *Principal Point of Autocollimation* er det punktet der en stråle trukket gjennom det ytre projeksjonssenteret med retning vinkelrett på bildeplanet treffer bildeplanet etter å ha gjennomgått det som måtte være av feil i linsa. PPA bestemmes direkte i en kamerakalibrering med en autokollimator.

PPS *Principal Point of Symmetry* PPS beregnes i kamerakalibreringen som et punkt med den egenskapen at når det brukes som bildehovedpunkt blir den radielle fortegningen mest mulig rotasjonssymmetrisk (Andersen 2003).

I et flykamera vil rammemerkesentrum, PPA og PPS ligge ganske nærme hverandre; de to store produsentene Leica og Zeiss spesifiserer for eksempel at de tre punktene skal ligge innenfor en toleransesirkel på $20 \mu\text{m}$ i deres moderne kameraer (Andersen 2003). I et feilfritt kamera ville de falle sammen. Som bildehovedpunkt brukes PPS, og i kamerakalibreringen søker en derved å fastlegge bildekoordinatene $(x_{\text{pps}}, y_{\text{pps}})$ til PPS.



Figur 2.4: Radiell fortegning i kameraets linsesystem. Nederst vises veien de innkommende lysstrålene går gjennom linsa. Så vises bildeplanet med "teoretisk riktig" og reell plassering av avbildingene, og øverst ses fortegningskurven dette kunne gitt opphav til. Figuren er hentet fra Andersen (2003).

Kamerakonstant

Avstanden fra linsas projeksjonssenter normalt ned til bildehovedpunktet kalles kamerakonstanten, og betegnes vanligvis med c eller f (begge forekommer). For flykameraer fokusert på ∞ er c lik linsas brennvidde. For kameraer som fokuseres vil kamerakonstanten variere med fokuseringen, og dette utgjør et problem for eksempel i nærfotogrammetri.

Linsefortegning

Alle linsesystemer har fortegning. Vi skiller mellom *radiell* og *tangentiell* fortegning. Radiell fortegning virker ved å trekke avbildningen av punkter utover eller innover radielt fra sentrum. Tangentiell fortegning virker normalt på den radielle fortegningen, se figur 2.4. Tangentiell fortegning skyldes feil og unøyaktigheter i produksjonen av linsa, og er vanligvis liten. Radiell fortegning beregnes i kamerakalibreringen, se 2.1.9.

Transformasjon mellom bilde- og pikselkoordinatsystem

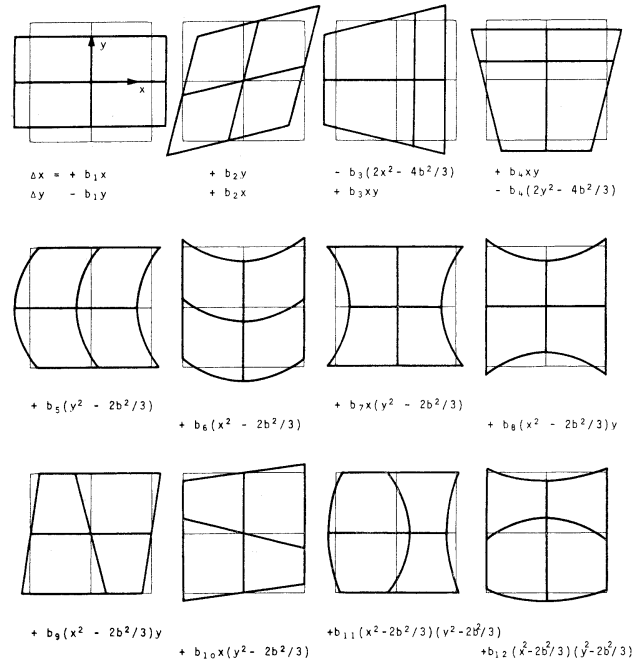
Et digitalt bilde er lagret på datamaskinen som en regelmessig matrise av *bildeelementer* (engelsk *pixel* (Picture Element), fornorsket til *piksel*). For at dfa'en skal kunne kople bildemålingene som gjøres på skjermen i piksel-systemet til det fotogrammetriske formelapparatet i bildekoordinatsystemet, må det etableres en transformasjon mellom de to koordinatsystemene. På dfa'en gjøres dette i forbindelse med målingen av rammemerkene. Når rammemerkene er målt kjenner systemet bildekoordinatene (fra kamerakalibreringsrapporten) og pikselverdiene (fra målingen av rammemerkene), og beregner transformasjonsparameterne etter ønsket transformasjonsmetode, vanligvis konform eller affin.

Transformasjonen kompenserer også for filmkrymping og systematiske feil i scanne-prosessen.

Bildedeformasjoner

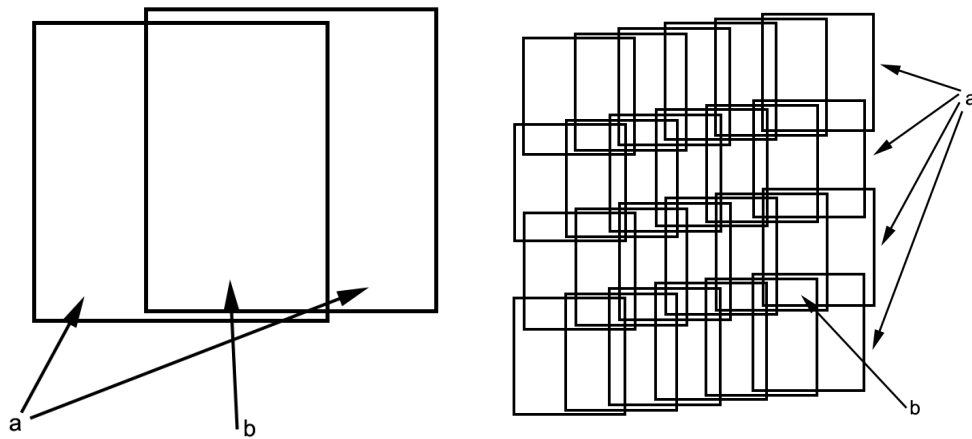
Etter at bildemålingene er kompensert for linsefortegning er det likevel vanligvis noe feil igjen (Andersen, Blankenberg & Maalen 1994). Et bidrag til denne feilen kan være forskjeller mellom fotograferings- og kalibreringssituasjonen; kalibrering skjer innendørs under kontrollerte forhold. Et annet viktig bidrag kan være uregelmessig filmkrymping. Film er ikke et fullstendig dimensjonsstabil materiale, og forandrer størrelse både med temperatur og fuktighet. Lik krymping i x og y er i liten grad noe problem; det kompenseres ved rammemerkemålingene i indre orientering. Verre er det med ulik krymping i x og y, spesielt når det er få rammemerker.

Feilene er knyttet til bildet, og ikke kvaliteten på målinger eller instrument. Ebner (1976) utviklet et sett parametre for å beskrive ulike deformasjoner i bildet, se figur 2.5. Parameterne ble laget slik at de er minst mulig korrelerte med hverandre og orienteringsparameterne for bildet.



Figur 2.5: Bildedeformasjoner og Ebners 12 tilleggsparemetre til blokkutjevninga for å kompensere for deformasjonene. Figuren er hentet fra Ebner (1976)

Det er vanlig å kalle feilen som følge av ulike bildedeformasjoner for systematiske feil. Slike feil kompenseres vanligvis ved å inkludere et sett med tilleggsparemetre i blokkutjevninga, se avsnitt 2.1.9.



(a) To bilder (a) med fellesområde (overlappsområde/modellområde) (b).

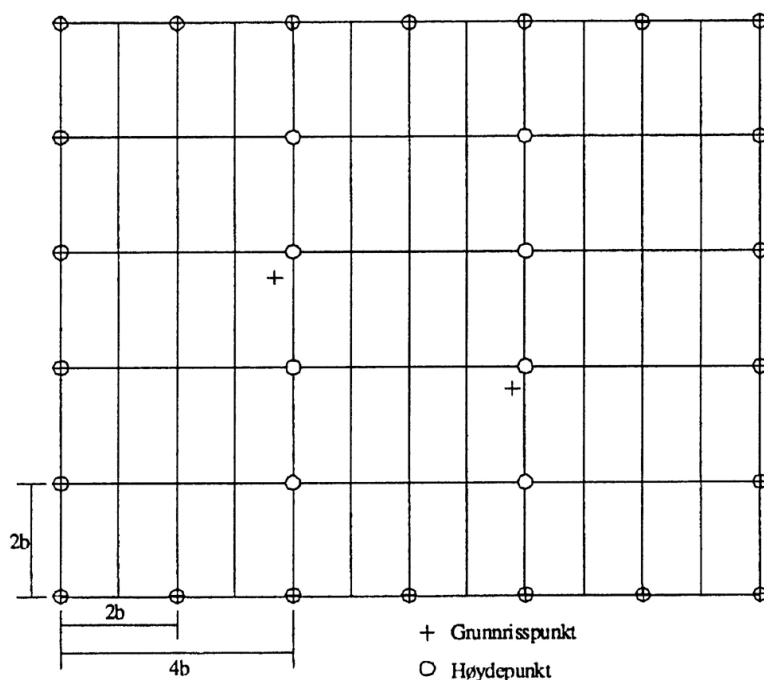
(b) Ei blokk (b) består av striper (a).

Figur 2.6: Flere modeller utgjør striper og blokker

2.1.6 Ytre orientering

Med ytre orientering forstås prosessen med å bestemme strålebuntens plassering i rommet (Andersen 2003). I den ytre orienteringen av bildene bestemmes koordinatene for projeksjonssenteret i linsa (x , y og z) og dreiningen av kameraet (φ , ω , κ). Når disse seks parameterne for hvert bilde er bestemt kan en bestemme koordinater for alle punkter som er synlig i mer enn ett bilde.

Historisk har ytre orientering vært gjort separat for hver modell. Det var da (matematisk) nødvendig å ha minst to punkter kjent i grunnriss og tre punkter kjent i høyde (vanligvis to xyz-punkter og ett z-punkt) i hver modell. For å kunne avsløre feilmålinger og grove feil trengs i praksis enda flere gittpunkt. For større prosjekter med mange bilder blir det svært mange gittpunkt. Gittpunkt på bakken er dyre å etablere og sårbare for feil, derfor har mye av utviklingsarbeidet innen fotogrammetrien dreid seg om å redusere behovet for gittpunkt på bakken.



Figur 2.7: Krav til gittpunkt i tradisjonell blokk. Det skal være fullbestemt perimeterkontroll med avstand ikke større enn $2b$ (b = basislengder), høydepunkt inne i blokka med avstand ikke større enn $4b$ i og $2b$ på tvers av striperetningen og minst to grunnrisspunkt inne i blokka. Figuren er hentet fra Andersen et al. (1994).

2.1.7 Strålebuntutjevning og aerotriangulering

I fotogrammetrien er den grunnleggende enheten målinger i bildene. Disse målingene gir opphav til *stråler* som en kan tenke seg går fra bakkepunktet, gjennom linsas projeksjonssenter til bildeplanet. I den indre orienteringen rekonstrueres strålebuntens form. *Strålebuntutjevningen* bruker strålene i strålebuntene og gittpunkter på bakken til å beregne posisjonen og orienteringen til strålebuntene (Mikhail et al. 2001).

Aerotriangulering er en metode for å orientere mange bilder effektivt og sikkert med redusert behov for gittpunkter på bakken. Som nevnt i avsnitt 2.1.6 er det nødvendig med flere gittpunkt for å absoluttorientere en enkelt modell.

Med aerotriangulering kan man klare seg med gittpunkter langs omkretsen av blokka (perimeterkontroll). Det må være høydepunkter (z) for hver $2b$ (b =basislengde) på tvers av og $4b$ i striperetning og grunnrisspunkter (x,y) hver $2b$ både i striperetning og på tvers av stripene. Det totale antallet gittpunkter for ei blokk skal ikke være mindre enn seks, og blokka skal være mest mulig kvadratisk (Andersen et al. 1994), se figur 2.1.6. Besparelsene i antall gittpunkter er således størst ved større blokker. Tenker man seg ei blokk på 60 modeller (se figur 2.1.6) kan man som eksempel klare seg med 32 gittpunkt ved aerotriangulering, mens det ved tradisjonell orientering modell for modell ville vært nødvendig med minst $(60 \times 3) = 180$ gittpunkt.

Sentralt for aerotriangulering med strålebuntutjevning er at det er overlapp mellom stripene, slik at gittpunktene er synlig i så mange bilder som mulig.

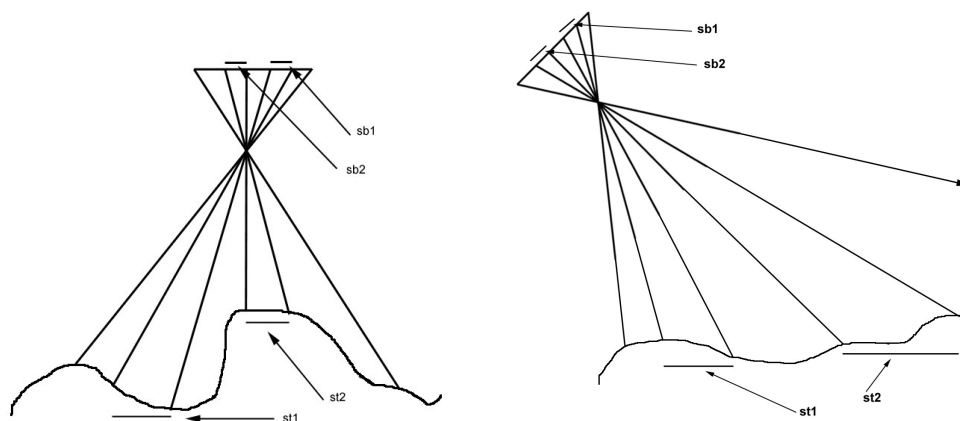
2.1.8 Forskjellige begreper

Høyde — basisforhold: Basis er avstanden mellom to projeksjonssentre, se figur 2.10. Forholdet mellom basis og flyhøyde (basisforholdet) har betydning for oppnåelig høydenøyaktighet i modellen. Vi har

$$m_h = M_b \frac{H}{B} m_{px},$$

der m_h er høydenøyaktighet, M_b er bildemålestokk, $\frac{H}{B}$ er basis-høydeforhold og m_{px} er nøyaktigheten på bildemålingene (Andersen 1985).

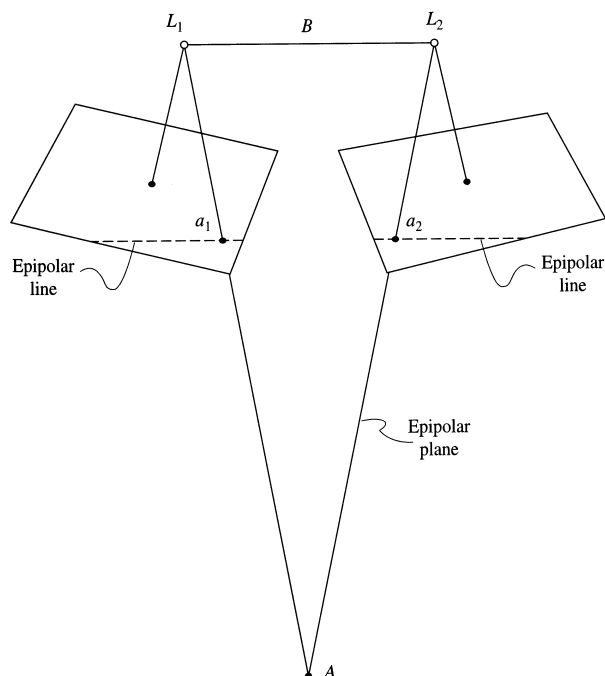
Linsetype og bildeformat: Flybilder tas vanligvis i bildeformat 23×23 cm, men også 18×18 cm har vært i bruk. Linsesystemene betegnes etter åpningsvinkel på objektivet. Linser med åpningsvinkel 70 gon har kamerakonstant 15 cm for 23×23 cm bilder og 21 cm for 18×18 cm bilder, og kalles normalobjektiv. Linser med åpningsvinkel 105 gon har kamerakonstant 15



(a) Vertikalbilde. Målestokken varierer med terreng høyde.

(b) Skråbilde. Målestokken varierer både med høyden i terrenget og avstanden fra der bildet er tatt.

Figur 2.8: Grunnleggende geometriske egenskaper i (a) vertikalbilder og (b) skråbilder. $sb\#$ er målt avstand i bildet og $st\#$ er korresponderende avstand målt i terrenget. Figurene er ment å visualisere hvordan bildemålestokken varierer med terreng høyde og (for skråbilder) avstand utover i terrenget.



Figur 2.9: Epipolar geometri. L_1 og L_2 er projeksjonssentre, A er et punkt på bakken og a_1 og a_2 (homologe punkt) er skjæringspunkt med bildeplanet. Figuren er hentet fra Mikhail et al. (2001)



Figur 2.10: Basis — høydeforhold er forholdet mellom flyhøyde og avstanden mellom eksponeringene.

cm for 23×23 cm bilder, og kalles vidvinkelobjektiv. Med samme bildefor-
mat og dekningsområde på bakken får en lavere flyhøyde og bedre høyde-
basisforhold, og derved bedre høydenøyaktighet ved bruk av vidvinkelob-
jektiv i forhold til normalvinkelobjektiv. Vidvinkelobjektiv er derfor van-
ligst i bruk i Norge i dag.

Bildemålestokk: Bildemålestokk (m) regnes ut som forholdet mellom en
avstand målt i bildet og samme avstand i terrenget $m = \frac{s}{S}$, her er s en
avstand i bildet og S tilsvarende avstand i terrenget. Geometrisk ekvivalent
er $m = \frac{c}{H-h}$, her er c kamerakonstant, H flyhøyde i meter over havet og h
midlere terrenghøyde, se også figur 2.12. Bildemålestokken varierer med
høyden i terrenget fordi bildet er en sentralprojeksjon. For skråbilder er
det også stor forskjell på målestokken nærme og langt unna flyet.

Fotograferingsretning: Bilder tatt rett ned på bakken kalles vertikalbilder. Ver-
tikalfotografering er den langt vanligste måten å ta bilder på i dag. Bilder
tatt på skrå kalles skråbilder, og var vanlig tidligere. Skråfotografering har
den fordel at hvert bilde dekker et mye større område, se figur 2.8, men
ulempen er at bildemålestokken varierer veldig utover i bildet.

DTM — Digital terrengmodell: En numerisk fremstilling av terrenget basert på
punkter bestemt i grunnriss og høyde (x,y,z) . Vanligvis ordnet som et
regulært grid (raster), et sett av trekanter i ulik størrelse der hvert hjørne
representerer en høydeverdi (TIN, Triangulated Irregular Network) eller
høydekurver.

Homologe punkter: Et punkt på bakken kan være synlig i flere bilder. Avbildin-
gen av dette punktet i bildene kalles homologe punkter, se figur 2.9.

Parallakse: Et objekt på bakken vil bli avbildet på forskjellig plass i to flybilder i ei stripe. Denne forskjellen kan måles, og det er forskjellen som er opphavet til alle resultater i fotogrammetrien. En skiller mellom parallakse i x- og y-retning. Y-parallakse elimineres i orienteringen av bildene, og forskjell i x-parallakse mellom to punkter gjør at man kan beregne høydeforskjellen mellom punktene. Det kan vises ved geometriske betraktninger, og med noen forenklinger at

$$\Delta h = \frac{(H - h) \times \Delta p}{b},$$

der Δh er høydeforskjell mellom to punkter, H er flyhøyde over havet, h er terrenghøyde, Δp er parallakseforskjell og b er bildebasis (Mikhail et al. 2001).

Epipolar geometri: Planet som defineres av punktene A , L_1 og L_2 i figur 2.9 kalles et *epipolart plan*. Linja der dette planet skjærer bildeplanene kalles *epipolar linje*. Dette har den viktige egenskapen at hvis en har et punkt i et bilde og ønsker å finne det homologe punktet i det andre bildet vet en at dette punktet vil ligge på den epipolare linja. På denne måten reduseres søket fra å være todimensjonalt til å bli endimensjonalt. I digital fotogrammetri er det derfor vanlig at bildene resamples til epipolar geometri, enten som en egen operasjon i forbindelse med orienteringen eller "on the fly" når det trengs i forbindelse med matching (matching forklares nærmere i avsnitt 2.1.10).

Farger: Konvensjonelle flybilder kan tas pankromatisk (svart-hvitt) eller i farger. Pankromatiske bilder er vanligvis skarpere enn fargebilder. Fargebilder kan være i sanne farger (det vil si at fargene i bildet er de samme som fargene i terrenget) eller de kan ha forskjøvet fargeskala. Forskjøvet fargeskala er vanlig ved infrarøde bilder, der fargene rød, grønn og blå i bildet representerer fargebåndene nærinfrarødt (NIR) (vegetasjon synes godt i NIR), rødt og grønt. Moderne digitale kameraer og fjernmålingssystemer på satellitter kan registrere stråling i mange deler av det elektromagnetiske spekteret.

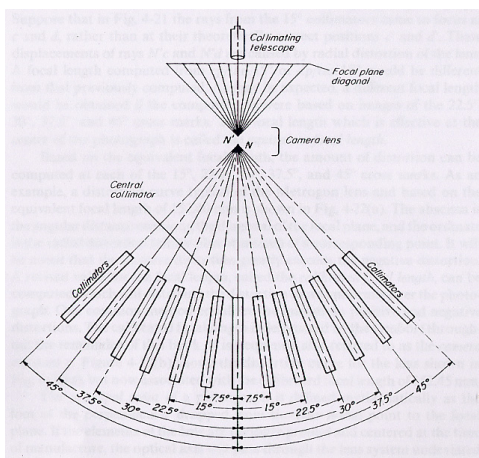
2.1.9 Kamerakalibrering

Kalibrering av kamera kan foregå på laboratorium, ved fotografering over et testfelt eller numerisk ved selvkalibrering i forbindelse med blokkutjevningen. Clarke & Fryer (1998) gjennomgår grundig ulike kalibreringsmetoder og historien bak dem.

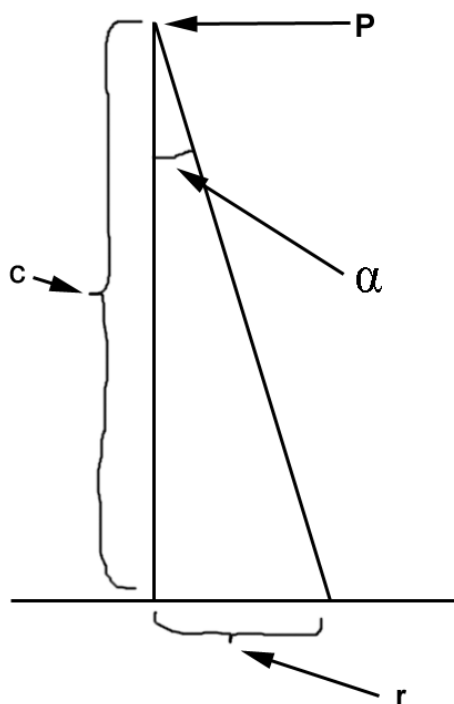
Sammenhengen kamerakonstant — radiell fortegnings

Sammenhengen mellom kamerakonstant c , vinkelen en innfallende stråle danner med normalen fra bildehovedpunktet på bildeplanet α og avstanden fra bildehovedpunktet ut til avbildingen av et punkt r er slik: $r = c \tan \alpha$, se figur 2.11. Den radielle fortegnings kommer i tillegg slik: $r = \Delta r + c \tan \alpha$, eller ekvivalent $r = (c + \Delta c) \tan \alpha$ (Andersen 2003). I en kamerakalibrering kan systematiske observasjoner av variasjonene i α og r brukes til å lage en kurve som beskriver den radielle fortegnings i objektivet.

Laboratoriekalibrering



(a) Skjematisk bilde av en autokollimator, hentet fra (Moffit & Mikhail 1980).



(b) Sammenhengen mellom radiell avstand (r) fra bildehovedpunktet til avbildingen, kamerakonstant (c) og innfallsvinkel (α) på lyset fra kollimatortene. (P) er linsas projeksjonssenter

Figur 2.11: Beregning av radiell fortegnings med autokollimator.

En laboratoriekalibrering av et kamera foregår ved bruk av multikollimator eller goniometer. Virkemåten på disse instrumentene er litt ulik, se for eksempel Moffit & Mikhail (1980) og Mikhail et al. (2001). Dette er avanserte

presisjonsinstrumenter, og det er stort sett kameraprodusentene eller egne sertifiseringsorganer som har slike. Eierne av kameraer sender sine kameraer inn til slik kalibrering annethvert år. Det instrumentene gjør er å stille opp lysstråler (kollimatorer) i kjente vinkler fra normalen fra bildehovedpunktet. Så fotograferes situasjonen, og avstanden fra bildehovedpunktet ut til avbildingen av kollimatoren måles, se figur 2.11. På denne måten får en samholdende verdier for r og α , på dette grunnlaget kan det lages en fortegningskurve for den radielle fortegningen i objektivet.

I laboratoriekalibreringen fastlegges også hovedpunktets plassering og oppløsningen i bildet.

Testfelt

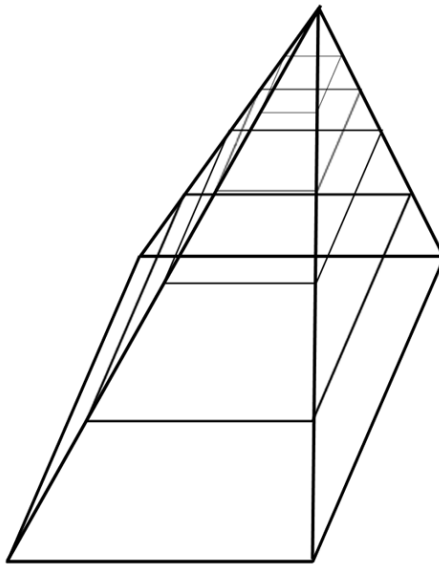
I stedet for å bruke avanserte laboratoriestyr til beregning av fortegning går det an å bruke et testfelt med objekter som har kjente koordinater. Prinsippet er å avbilde objekter med kjente koordinater i stedet for å avbilde kollimatoren i kjente vinkler ut fra normalen på bildehovedpunktet. Større og mindre slike testfelt har vært i bruk, noen har også benyttet bilder tatt av stjernehimmelen. Slik testfeltkalibrering har vært en del benyttet i forbindelse med nærfotogrammetri, men lite i forbindelse med flyfotogrammetri. I dag brukes metoden sjelden.

Selvkalibrering i strålebuntutjevning

Med denne metoden blir det innført parametre for å fange opp ulike deformasjoner av bildet (avsnitt 2.1.5). Beregningen av kalibreringen skjer i forbindelse med blokkutjevningen (Andersen et al. 1994).

Bruk av tilleggsparametre i strålebuntutjevningen innfører flere ukjente i systemet og stiller store krav til geometrien i prosjektet. Ved liten overlapp og få gittpunkter vil det være stor fare for at systemet blir *overparametrisert*, det vil si at geometrien ikke er god nok til å sikkert bestemme alle parametrene. Det samme problemet kan en få dersom tilleggsparametrene er korrelert ved hverandre. For å unngå å innføre for mange ukjente bør det gjøres en test på om inkluderte tilleggsparametre er signifikante.

Det vanlige er at selvkalibrering gjøres *i tillegg* til ordinær laboratoriekalibrering, for å fange opp resterende systematiske feil i bildene.



Figur 2.12: Digitale bilder lagres i bildepyramider for effektiv håndtering i datamaskinen.

2.1.10 Terrengmodeller fra matching

Terrengmodeller er et av hovedproduktene fra fotogrammetrien. Tradisjonelt har det å lage terrengmodellene krevd mye manuelt arbeid (sveiving av koter eller måling av profiler på analogt eller analytisk instrument). Med inntoget av digitale bilder og digital fotogrammetri har denne prosessen i stor grad blitt redusert til en automatisk prosess med minimal brukerintervensjon.

Det er i hovedsak to metoder som brukes for å finne homologe (samhørende) punkter i bildene. Begge baserer de seg på en a priori oppfatning av hvor det er hensiktsmessig å begynne å lete. Det vanligste er at matchingen ikke begynner på full oppløsning i bildet. Bildene lagres i pyramideform, der det nederste nivået er bildet i full oppløsning. For hvert steg oppover i pyramiden slås fire og fire piksler sammen til ett, se figur 2.12. Hvert bilde tar på denne måten større plass, men fordelene er at matchingsprosessen kan begynne på toppen i pyramiden og jobbe seg nedover, i stedet for å måtte gå gjennom hele originalbildet.

Arealbasert matching Tar utgangspunkt i et lite område (*vindu*) i det ene bildet og ser på gråtoneverdien i pikslene der. Så sammenliknes denne verdien med verdien i tilsvarende vinduer innenfor et *søkeområde* i nabobildet. Det vinduet i nabobildet som har høyest korrelasjon (er likest) i forhold til det opprinnelige vinduet er det vinduet det er størst sannsynlighet for at representerer det samme området. Senterpunktene i de to vinduene

bestemmes så som samhørende punkt.

Objektbasert matching (engelsk "feature matching") leter etter objekter, og ikke bare gråtoner. Objektene er valgt ut på forhånd av programmet, og består i tillegg til gråtoneverdiene i bildet også av egenskaper som størrelse, kurvatur og orientering (Barstad 1998). Matchingsprogrammet får på denne måten flere parametre for å vurdere likhetsgrad mellom to punkter, og potensielt sikrere matching blir resultatet.

Arealbasert matching er enkelt å programmere, men prosesseringstiden kan bli lang fordi det er mye data å gå gjennom. Objektbasert matching er noe mer komplisert å programmere, men går raskere fordi den raskere "sjekker ut" uaktuelle kandidater. Nøyaktigheten for matchinga er omlag 0.3-0.4 piksel for objektbasert matching og 0.1-0.2 piksel for arealbasert matching (Ackermann 1996).

Automatisert terrengmodellering med matching er kjennetegnet av at det genereres veldig mange flere punkter enn det som kommer med i den endelige terrengmodellen. Bak hvert gridpunkt i den endelige modellen kan det ligge ti eller flere matchinger. Den store redundante datamengden gir mulighet for utjevning og usikkerhetsestimater knyttet til punktene. Programmet ImageStation Automatic Elevations (ISAE), som er brukt i denne oppgaven, hevder for eksempel å kunne fremstille terrengmodeller med nøyaktighet bedre enn 1/10 000 av flyhøyden (0.1‰) (ZI 2004). Praktisk utprøving av systemene har vist at dette anslaget kan være noe optimistisk i norsk/vanskelig terreng. Nilsen (1997) har gjort undersøkelser som viser at høydenøyaktighet kan være i størrelsesorden 0.06-0.1‰ i flatt og enkelt terreng, 0.2-0.6‰ i moderat kupert terreng og 0.5-0.9‰ i vanskelig/bratt terreng.

2.1.11 Ortofoto

Flybildet er en sentralprojeksjon, så bildemålestokken varierer utover i bildet som funksjon av flyhøyde og dreining av kameraet (se også figur 2.8). Et ortofoto er et flybilde som ved en spesiell transformasjon er omgjort til normalprojeksjon, og altså har samme geometriske egenskaper som et kart. Ortofotoet kan for "folk flest" være enklere å orientere seg i enn et kart (fordi de fleste detaljer i terrenget er avbildet). Ortofotoet kan brukes til konstruksjon av grunnrissdetaljer (hus, veier, markslag...), det kan også brukes som et bakgrunnslag til illustrasjon i GIS (Geografisk Informasjonssystem) eller trykkes som bakgrunn for et kart. Bruk av ortofoto er vist i figur 5.4.

Analog fremstilling av ortofoto er komplisert og kostbart, men digital fremstilling er en enkel sak, og er implementert i de fleste digitale fotogrammetri-systemer. Prinsippene for generering av ortofoto kan, etter Andersen & Johansen (1998), oppsummeres slik:

- Terrengkoordinatene for pikslene i det som skal bli et ortofoto er kjent; de er etter definisjonen i kartgeometri.
- Terrengmodellen gir høyden til punktene.
- Med kjente terrengkoordinater i x,y,z kan bildekoordinater for punktet beregnes — etter formlene for perspektivisk samband — når orienteringsparametrene for bildet er kjent.
- Transformasjon mellom bilde- og pikselkoordinater gir pikselverdien i flybildet.
- Interpolasjon mellom nærliggende piksler dersom prosessen ikke treffer midt i et originalpiksel.
- Tilordning av beregnet pikselverdi til pikselet i ortofotoet.

Feil i ortofotoet vises i grunnriss i fotoet, men disse feilene er vanligvis relatert til mangelfull høydeinformasjon. Oppstikkende objekter (trær, hus) avbildes med toppen og bunnen i forskjellige koordinater, og med mindre objektene er modellert i terrengmodellen, er det ingen måte å unngå slike feil på. Videre vil feil i terrengmodellen føre til at avbildingen i ortofotoet forskyves.

2.2 Glasiologi

En isbre er definert som en mange år gammel masse av snø og is i bevegelse (Liestøl 2000). Breen dannes ved at vinterens snøfall ikke rekker å smelte bort i løpet av sommeren, slik at det den påfølgende vinteren allerede ligger et snølag. Når dette gjentar seg mange år etter hverandre skjer etterhvert en metamorfose av snøen slik at den blir til is. Is er plastisk under høyt trykk, og beveger seg nedover dels ved å gli på underlaget (basal gliding), dels ved deformasjon av underlaget (basal deformasjon) og dels ved indre deformasjon. Hastigheten målt på breoverflata kan deles inn slik:

$$V_0 = V_i + V_b + V_d,$$

der V_0 er hastigheten målt på breoverflata, V_i er hastigheten som følge av indre deformasjon V_b er hastigheten som følge av basal gliding og V_d er hastigheten som følge av basal deformasjon (Liestøl 2000).

Indre deformasjonshastighet er avhengig av skjærspenningen, men noen endelig matematisk modell er ikke etablert. En mye brukt empirisk modell er Glens lov:

$$\dot{\epsilon} = A \tau^n,$$

der $\dot{\epsilon}$ er deformasjonshastigheten, A er en konstant avhengig av temperaturen, n er en empirisk bestemt eksponent med verdi mellom 1.5 og 4.5, vanlig brukt er verdien 3 og τ er skjærspenningen, definert slik:

$$\tau = \rho g h \sin \alpha$$

der ρ er isens tetthet, g er gravitasjonen, h er istykkelsen og α er helningsvinkelen på grunnen under isen (Liestøl 2000).

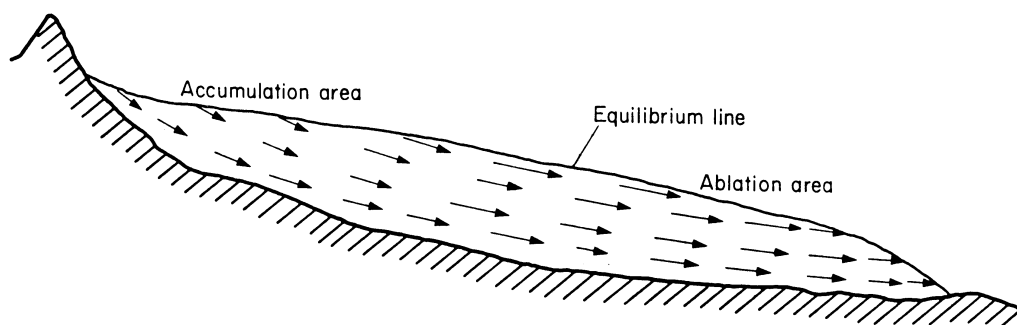
Nederst på en bre vil det typisk på slutten av en smeltesesong være bar is, og øverst lys fin snø. I mellom er det et lag av gammel snø, det vil si snø som ikke har rukket å smelte i løpet av sommeren. Slik (flere-)årgammel snø kalles *firn*. Dette kommer av at om sommeren smelter ikke all snøen på breen. De områdene av breen som fremdeles er dekket av snø (ny eller gammel) når vinteren igjen kommer kalles *akkumulasjonsområdet*, og de områdene der snøen er smeltet vekk og isen er synlig kalles *ablasjonsområdet*. Overgangen mellom de to områdene kalles *likevektslinja*. Likevektslinja beveger seg en del opp og ned fra år til år på grunn av variasjoner i nedbør og avsmelting, men det er vanlig å forholde seg til et 'gjennomsnitt' av disse årlige variasjonene og kalle dette for *ELA (Equilibrium Line Altitude)*. På årsbasis har vi altså nettovest

i akkumulasjonsområdet og netto nedsmelting i ablasjonsområdet. Dette kan også uttrykkes slik:

$$Bal_n = \sum_{i=1}^n Akk_{t_i} - Abl_{t_i},$$

der en har delt opp breen i n intervaller. Dersom $Bal_n > 0$ er det netto akkumulasjon, det vil si at breen vokser, mens $Bal_n < 0$ vil angi netto ablasjon, dvs. breen minker. Når breens akkumulasjon og ablasjon er like sies breen å være i likevekt.

Mønsteret med akkumulasjon i øvre og ablasjon i nedre deler av breen gjør at breens hastighetsvektorer varierer fra punkt til punkt inne i breen, se figur 2.13.



Figur 2.13: Hastighetsvektorer i en idealisert bre. Figuren er hentet fra Paterson (1994).

Temperaturforholdene inne i breen varierer en del fra bre til bre. Smeltepunktet for is varierer med trykket, slik at høyt trykk gir lavere smeltepunkt, og gjør at isen kan smelte ved lavere temperaturer. Dette gir opphav til en klassifisering etter breenes temperaturregime:

Temperert En bre der en overveiende del av ismassen har en temperatur på trykksmeltepunktet betegnes som en temperert bre. Dette er vanlig for breer i Fastlandsnorge, Alpene, mange steder i Sør- og Nordamerika, New Zealand og Himalaya.

Kald En bre der temperaturen i overveiende deler av ismassen er lavere enn trykksmeltepunktet betegnes en kald bre. Slike breer finnes i polare strøk.

Polytermal En bre der temperaturen i deler av ismassen er på og andre deler under trykksmeltepunktet betegnes som en polytermal bre. Slike breer er vanlig på Svalbard (Hagen, Liestøl, Roland & Jørgensen 1993).

2.2.1 Massebalanse

Med en bres massebalanse forstår vi hvordan den vokser (akkumulasjon) eller minker (ablasjon) over tid (Paterson 1994). En bre har vanligvis akkumulasjon om vinteren som følge av snøen som faller og ablasjon om sommeren som følge av smelting, gliding og indre deformasjon av isen. Det er vanlig å måle massebalanse i 'breår' eller hydrologiske år fra høst (september) til høst, altså fra minimum til minimum. En bres massebalanse påvirkes av en rekke klimatiske faktorer, slik at endringer i breens massebalanse indirekte kan indikere endringer i klima (Dowdeswell, Hagen, Björnsson, Glazovsky, Harrison, Holmlund, Jania, Lefauconnier, Ommaney & Thomas 1997).

2.2.2 Bredynamikk og surge

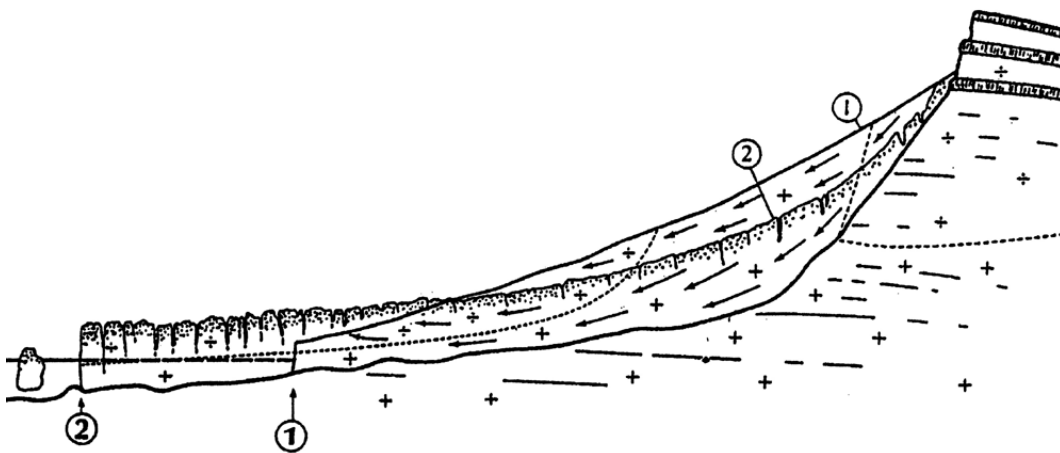
Breen er i konstant bevegelse. Breens bevegelsesmønster gjør at det er lite meningsfylt å diskutere breens massebalanse og dynamikk separat. Breens bevegelse kan måles. Vanligvis er det av interesse å skaffe seg oversikt over isfluksen, det vil si volumet is per tidsenhet som går gjennom et tverrsnitt av breen.

Høydeendring i et punkt på breen kan beskrives slik:

$$\frac{\partial h}{\partial t} = b - \frac{\partial q}{\partial x},$$

der $\frac{\partial h}{\partial t}$ er høydeendring i et punkt over et tidsrom t , b er massebalansen i punktet og $\frac{\partial q}{\partial x}$ er isfluksen i breens bevegelsesretning (Paterson 1994). Av dette følger at en bre i balanse, det vil si $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$, vil i alle punkt ha en isfluks akkurat stor nok til å transportere vekk netto akkumulert masse, det vil si $b = \frac{\partial q}{\partial x}$. Dette definerer begrepet balansefluks som den isfluksen som er nødvendig for at breen skal beholde sitt høydeprofil, eller mer intuitivt: En bre i balanse har en bevegelse slik at like mye masse som akkumuleres i de øvre deler transporteres ned og smelter i de nedre deler når en ser året under ett.

Mange av breene på Svalbard er kjent for å være av surge-typen, se for eksempel (Liestøl 1969) og (Hagen et al. 1993). Det betyr at de dynamisk sett kan sies å være i en av to faser; stille eller aktiv fase (Paterson 1994). I den stille fasen ser breen ut til å stagnere; bresnuta trekker seg tilbake, breen minker i nedre deler og vokser i øvre deler. Den stille fasen kan vare i størrelsesorden 50–150 år. Så kommer den aktive fasen, der breens hastighet øker dramatisk, i størrelsesorden 10–1000 ganger raskere enn den stille fasen. De øvre delene av breen dreneres, de nedre delene øker voldsomt i volum og bresnuta skyter framover. I noen tilfeller synes en surgefront som beveger seg ned breen som en



Figur 2.14: Skjematiske bilder av en polytermal bre før (1) og etter (2) en surge. Figuren er hentet fra Liestøl (2000).

bølge. Den aktive fasen, som også kalles en *surge*, varer fra noen få måneder til noen få år, før breen igjen går inn i den stille fasen.

Mekanismen(e) som utløser et surge, altså svaret på spørsmålet "hvorfor starter surgen i år, og ikke i fjor eller neste år?" er ikke kjent i detalj, men er et emne med mye forskningsaktivitet. Endringer i breens basale dreneringssystem og økt bevegelse som følge av basal deformasjon trekkes fram som viktige forklaringsmodeller (Harrison & Post 2003).

Forsøk har vært gjort på å finne korrelasjon mellom ulike parametre, som foreksempel breens temperaturregime, geologiske forhold under bresåla, massebalanse, og surgeaktivitet. Jiskoot, Murray & Boyle (2000) fant at på Svalbard er det sannsynlig at en lang, bratt bre med polytermalt temperaturregime og finkornede sedimenter i bresåla vil være av surge-type, og konkluderer at temperaturregimet i breen og bunnsedimenttype er sentrale i surge-mekanismene på Svalbard. Dowdeswell, R., Hagen & Hamilton (1995) konkluderer at selv om klimatiske forhold i utgangspunktet ikke er utløsende årsaker til surgeframstøt, påvirker klimaet breens evne til å bygge seg opp til nye framstøt. Melvold & Hagen (1998) beskriver utviklingen til Kongsvegen, nordvest på Spitsbergen, og konkluderer at denne breen bygger seg opp mot et mulig nytt surgeframstøt. Glasser, Huddart & Bennett (1998) beskriver Fridtjovbreens surgeframstøt i 1995. Murray, Luckman, Strozzi & Nuttall (2003) fulgte Fridtjovbreens surgeframstøt med Interferometrisk SAR (radar fra satellitt), og fant ingen indikasjon på noen surgefront som beveget seg nedover breen.

2.2.3 Breer som klimatisk arkiv

Gjennom jordens historie har de klimatiske forholdene variert mye. I moderne tid har mye fokus vært lagt på antropogene (menneskeskapte) bidrag til økte klimavariasjoner, spesielt som følge av økte utslipp av CO₂ til atmosfæren etter den industrielle revolusjon.

Skal en kunne studere endringer må en skaffe seg viten ikke bare om dagens situasjon, men også situasjonen i tidligere tider. Klimatisk overvåkning med moderne meteorologiske målestasjoner og -metoder daterer seg i sentrale strøk tilbake til midten av 1800-tallet. Tettere og mer representative nett av overvåkningsstasjoner har vært på plass siden andre verdenskrig. I fjerntliggende strøk, og spesielt i polområdene er det selv i dag sparsomt med meteorologiske observasjoner, og det er i liten grad tilgang på lengre måleserier.

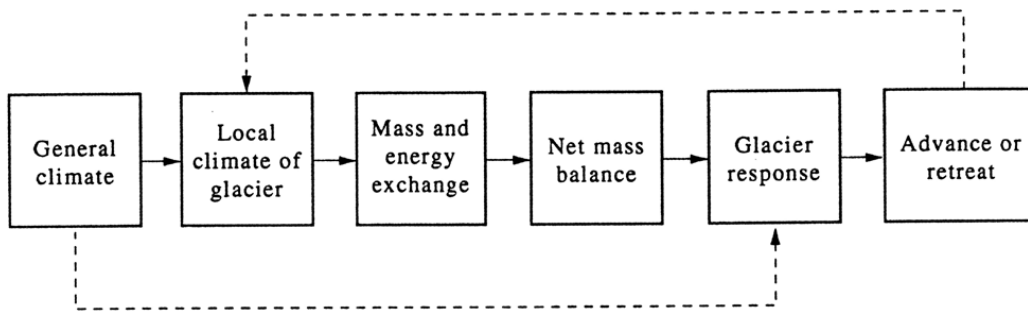
Klimaforskning har derfor i stor grad fokusert på å finne korrelasjoner mellom klimaparametre som temperatur og nedbørsforhold og ulike naturlige strukturer som havbunnavsetninger, isbreer og breavsetninger og myrer. For isbreenes vedkommende har det vært fokusert på (Liestøl 2000):

Analyse av forholdet mellom oksygenisotopene ¹⁶O og ¹⁸O i luftbobler i iskapper. Prøvene tas ut ved kjerneboringer, og ved dybden og posisjonen kan tidspunkt for lufta beregnes. Det er vist at forholdet mellom mengden av de to isotopene er nært korrelert med de klimatiske forholdene. Metoden kan vise temperaturforholdene år for år tilbake til siste ismaksimum.

Endringer i breenes utbredelse og størrelse for endringer i hundreårsperspektivet.

Utbredelsen av isbreer styres sterkt av klimatiske forhold. Endringer i klimaet påvirker isbreene, se figur 2.15. En isbre som utsettes for økende temperaturer vil i de fleste tilfeller reagere med å smelte. Unntaket er hvis temperaturøkningen gjør at det blir mer vinternedbør slik at breen i stedet vokser, slik tilfellet er på kystnære breer på fastlandet i Norge (Dowdeswell et al. 1997).

For surge-type breer kan et varmere klima føre til at den passive fasen forlenges, eller at breen ikke bygger opp nok masse til et nytt surge i det hele tatt (Dowdeswell et al. 1995).



Figur 2.15: Skjematisk oversikt over breens respons på endringer i klimaregimet. Figuren er hentet fra Paterson (1994).

2.2.4 Måling av massebalanse

En bres massebalanse er en god indikator på klimaet i området der breen ligger. Overvåking av massebalanse for breer er derfor av stor betydning for å følge med på klimautviklingen (Dowdeswell et al. 1997). Måling av massebalanse kan gjøres på flere måter. Her følger et sammendrag av de vanligste metodene, etter Liestøl (2000).

Stakemålinger

Massebalanse kan måles ved stakemålinger. Staker bores ned i isen på forskjellige steder av breen. Gjentatt måling av stakenes høyde gir en oversikt over akkumulasjon/ablasjon. Snø varierer i tetthet; det må derfor også måles tetthet i snøpakka, og resultatene av stakemålinger presenteres omregnet til vannekvivalenter.

Hydrologisk metode

Massebalanse kan måles hydrologisk ved at en måler hvor mye nedbør som er falt og om det er falt som snø eller regn (P). I utløpet av nedbørsfeltet måles avrenningen (R). I tillegg er det en faktor for fordamping (E) som ikke uten videre er målbar og derfor må estimeres. Massebalansen blir da $M = P - R - E$. Avrenning til grunnvann kan også tas med som en faktor. Metoden er vanskelig å bruke i praksis fordi den anvendes på et helt nedbørsfelt, og ikke breen alene, og fordi P og E er av helt forskjellig størrelsesorden. Derfor får man ofte som resultat at usikkerheten i anslaget av E er større enn den beregnede massebalansen.

Bresnutebevegelser

Måling av bresnuteposisjonen i slutten av smeltesesongen gir ingen eksakt måling av breens massebalanse, men en forsinket og dempet indikasjon på breens helsetilstand. For breer som er av surge-type må bresnutebevegelserne tolkes med forsiktighet, og ses i sammenheng med hvor i surgesyklusen breen er.

Like fullt er bresnutebevegelser ofte de eneste tilgjengelige observasjonene vi har, spesielt tilbake i tid og i vanskelig tilgjengelige områder. Det er også enkelt å observere disse bevegelsene fra for eksempel satellittbilder, så metoden muliggjør overvåking i stor skala med relativt enkle midler.

Fotogrammetrisk kartlegging

Fotogrammetrisk måling foregår ved at en tar flybilder av breen i slutten av smeltetiden og lager digitale terrengmodeller. Når man har laget terrengmodeller for to tidspunkter kan man kvantifisere endringer i høyde. Dermed kan man altså fastslå om breen har vokst eller avtatt på en mer nøyaktig måte enn ved bare å måle bevegelse i bresnuta.

Metoden kan anvendes for å finne balansen fra et år til det neste. Dette er utprøvd i Alpene med gode resultater, se for eksempel (Kääb, Haeberli & Gudmundsson 1997), (Kääb & Funk 1999) og (Kääb 2000).

Metoden kan også anvendes over lengre tidsserier. Andreassen (1999) har brukt kart over Storbreen (fastlandet i Sørnorge) fra en periode over 40 år og funnet at metoden kan brukes til overvåking og kontroll av andre datainnsamlingsmetoder. Det konkluderes i Andreassen, Elvehøy & Kjølmoen (2002) at mye tidkrevende feltarbeid kan spares ved fotogrammetrisk overvåking, uten vesentlige kvalitetstap i forhold til tradisjonell måling. Østrem & Haakensen (1999) har undersøkt forskjellen mellom volumendringer beregnet med stakemetoden og subtraksjon av terrengmodeller. Konklusjonen i forsøket var at det var såvidt mange ukontrollerbare feil forbundet med stakemålinger, at dersom en hadde gode flybilder og godt geodetisk grunnlag og lagde detaljerte terrengmodeller, er dette en sikrere metode for å bestemme volumendringer på breen.

Hovedproblemet med metoden er at den baserer seg på synlige objekter. Der det er dårlig kontrast, for eksempel i akkumulasjonsområdet på en bre, vil en få upålitelige resultater.

Som alternativ til fotogrammetri kan en benytte laserscanning fra fly som metode for innsamling av høydedata til terrengmodellene. Nøyaktighet ned på

centimeternivå kan oppnås ved metoden (Barstad 2002). Metoden har en stor fordel i at den ikke er avhengig av kontrast i objektet som skal kartlegges, metoden er også uavhengig av sollyset slik at datainnsamling kan gjøres med større frihet med tanke på årstid, dagslys og snøforhold. Det er imidlertid en ganske ny metode, og det finnes ikke historiske datasett over isbreer. Det er også en relativt kostbar metode, og det vil ikke i samme grad som med flybilder være mulig med "flerbruk" av rådata, idet laserdata kun vil samles inn der en oppdragsgiver er villig til å betale.

Fjernmåling fra satellitt er et område i stadig utvikling. utfordringer i forhold til romlig (hvor stort område på bakken hvert piksel dekker) og temporær (hvor ofte et område avbildes) oppløsning er i ferd med å reduseres. SAR (Synthetic Aperture Radar) og interferometri kan brukes til å beregne bevegelse og terrenghøyde, se for eksempel Kwok & Fahnestock (1996) og Gens & van Genderen (1996). Metoden er også anvendt over Fridtjovbreen til å beregne brebevegelsen før og under siste surge der i 1995 (Murray et al. 2003).

Estimering fra meteorologiske data

En kan få et estimat på hvor mye breen har vokst eller avtatt ved å analysere meteorologiske data. Nebørs- og temperaturforhold og andre meteorologiske parametre gir indikasjoner på breens utvikling. Dette er ikke sikre målinger, men det kan gi en pekepinn. Metoden begrenses vanligvis i praksis av nettverket av målestasjoner.

3 Område og data

3.1 Fridtjovbreen

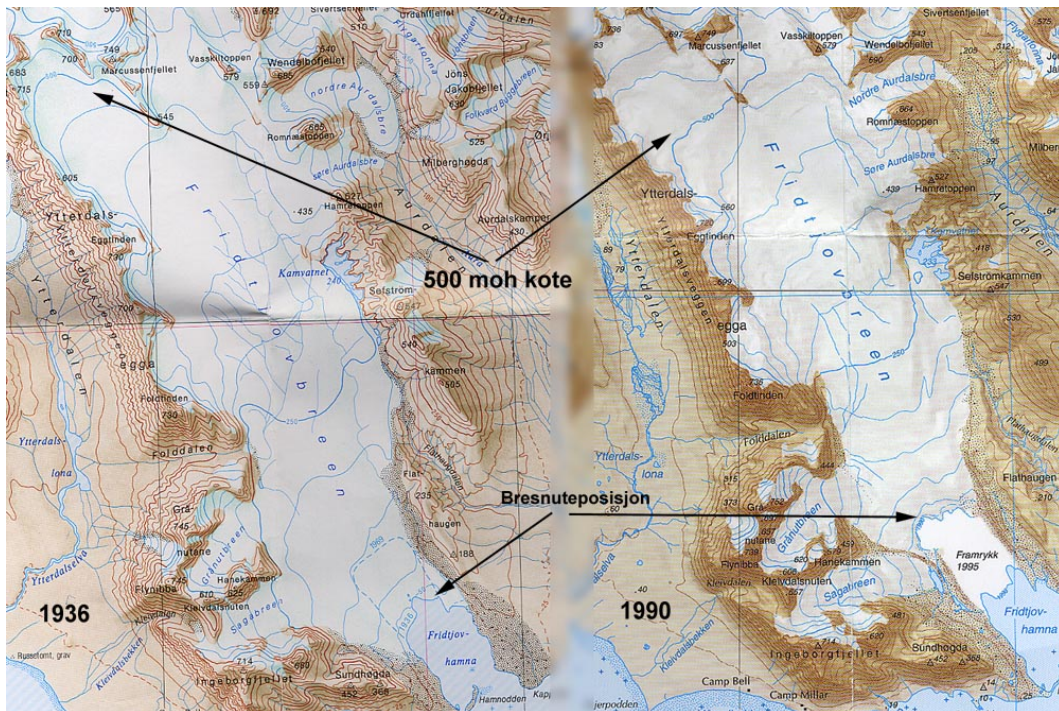
Fridtjovbreen (N 77° 40' E 14° 30', bre nummer 137 08 i Breatlas for Svalbard og Jan Mayen) er en dalbre vest på Nordenskiöldland på Spitsbergen, Svalbard. Den er omlag 13 km lang og 4 km bred på det bredeste. Arealet er 48.7 km², og isvolumet er beregnet til 11 km³. Likevektslinja er beregnet til å ligge 260±(25-50) moh. Breen går i sør-sørøstlig retning fra Grønfjordbreane i nord og ender i sør med kalvingsfront i sjøen i Fridtjovhamna i Van Mijenfjorden rett innenfor Akseløya (Hagen et al. 1993). Breen har fått sitt navn etter fangstbåten 'Frithiof', som brakte Torellekspedisjonen hit i 1858 (*The Place-names of Svalbard* 1991). Fridtjovhamna ved kalvingsfronten er en god havn i le for det meste av vind med god ankringsgrunn på omlag 20 meter (*Arctic Pilot, Bd. 7* 1990). Fra vest munner det ut i breens nedre del ned to mindre breer, Grånutbreen og Sagabreen.

Fridtjovbreen er av surge-typen, og er observert jevnlig siden midten av 1800-tallet. Da Torellekspedisjonen kom hit i 1858 var breen i ferd med å surge. Torell beskriver at han kunne se at sjøbunnen foran breen var begynt å bli skjøvet opp, og han kunne se skjell som ble brakt opp i dagen. I 1861 stod breen helt ut i Van Mijenfjorden, seks kilometer lenger ut, og dekket hele Fridtjovhamna (Liestøl 1969)

Breen var så i ro i omlag 130 år, før den surget på ny i 1995 (Murray et al. 2003) (Glasser et al. 1998). Ved besøk i mars 2005 var denne siste surgen i avslutning, og sprekkene i ferd med å tettes, se figur 3.2.

Sovjetiske forskere har målt med radar i profiler over breen en gang på 1970-tallet. Deres resultater er ikke diskutert i denne oppgaven, men for oversiktens skyld er en illustrasjon fra deres resultater vist i figur 3.3.

Fridtjovbreen er dekket av kart B10 i målestokk 1:100 000 fra Norsk Polarinstitutt. Dette kartet finnes i to utgaver; en fra 1982 konstruert fra flybilder fra 1936/38 og en fra 2004 konstruert fra flybilder fra 1990/95. Fra kartet kan en lett se på høydekurvene og brefrontens plassering at breen har vært utsatt for store endringer, se figur 3.1. På det eldste kartet kan en se at breen er lav i øvre deler, mens på det nye er det mye mer masse i øvre deler, og fronten ligger lenger inne i fjorden.



Figur 3.1: Utsnitt av Norsk Polarinstituttets kart B10 over Fridtjovbreen. Til venstre kartet basert på bildene fra 1936 og til høyre kartet basert på bildene fra 1990. Ved å sammenlikne bresnutas posisjon og kotene (se spes. 500 moh. kote) er det lett å se at breen har vært gjennom store endringer. Utsnitt fra kart B10 Van Mijenfjorden utg. 1982 (venstre) og 2004. © kart: Norsk Polarinstitutt.

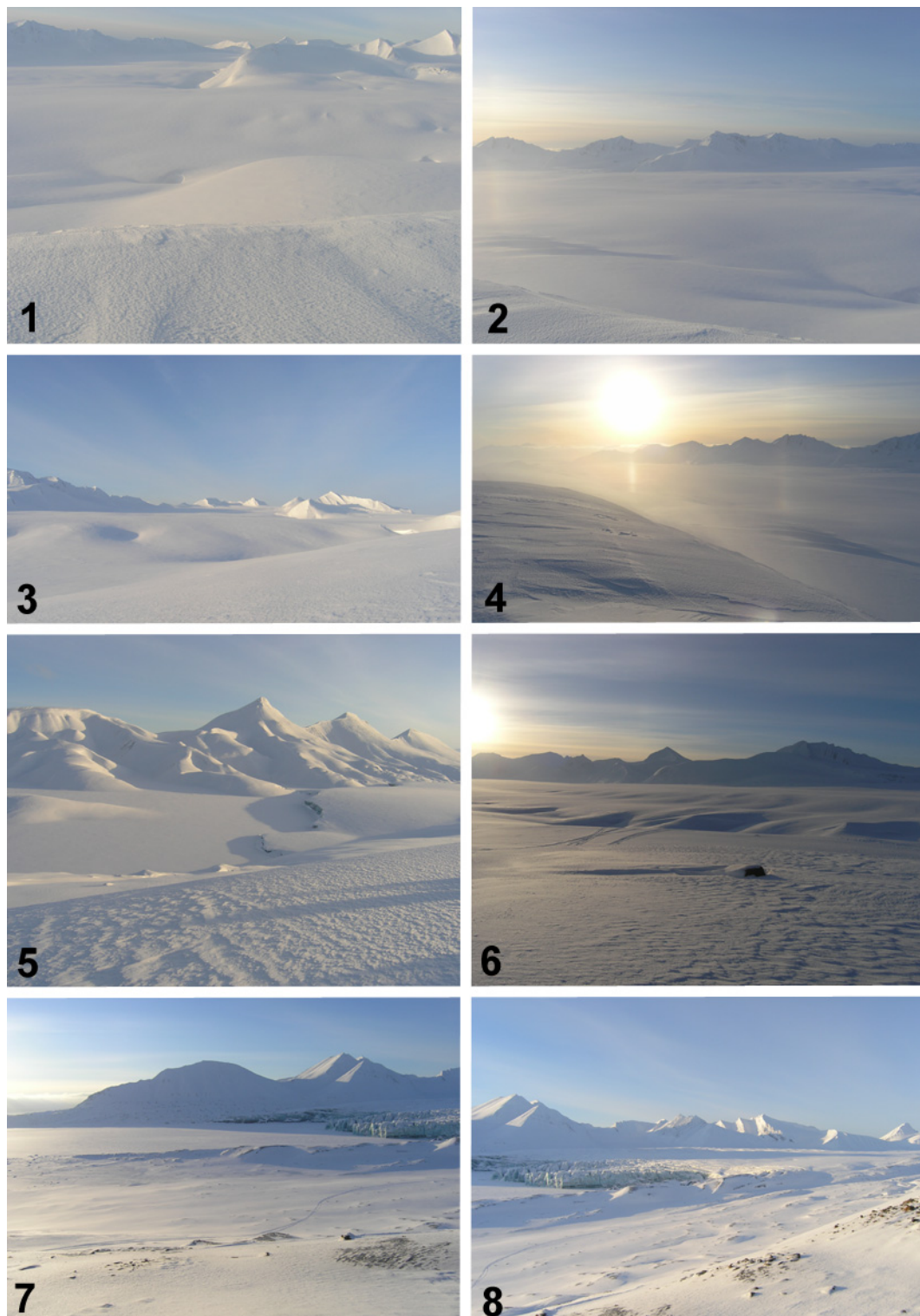
3.2 Tilgjengelige flybilder

I arbeidet med denne oppgaven er det benyttet flybilder over Fridtjovbreen og Longyeardalen.

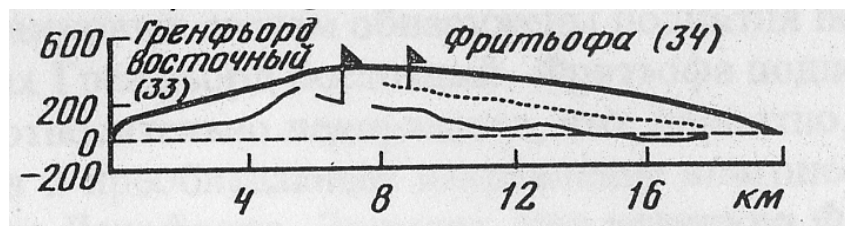
Fridtjovbreen er flyfotografert flere ganger:

- **1936** Skråbilder, flyhøyde omlag 3000 meter. Avstanden fra kameraet til Fridtjovbreen er omlag 7000 meter, og med kamerakonstant 210.71 mm blir bildemålestokk over breen i størrelsesorden 1:30 000.
- **1960** Bildemålestokk 1:50 000, kamerakonstant 15 cm.
- **1969** Bildemålestokk 1:20 000, kamerakonstant 152 mm.
- **1990** Bildemålestokk 1:50 000, kamerakonstant 152.83 mm, farge (infrarød).

For oppgavens problemstilling var det naturlig å ta med S36-bildene. S90-bildene ble også tatt med. Disse bildene gir det lengste tidsspennet det med



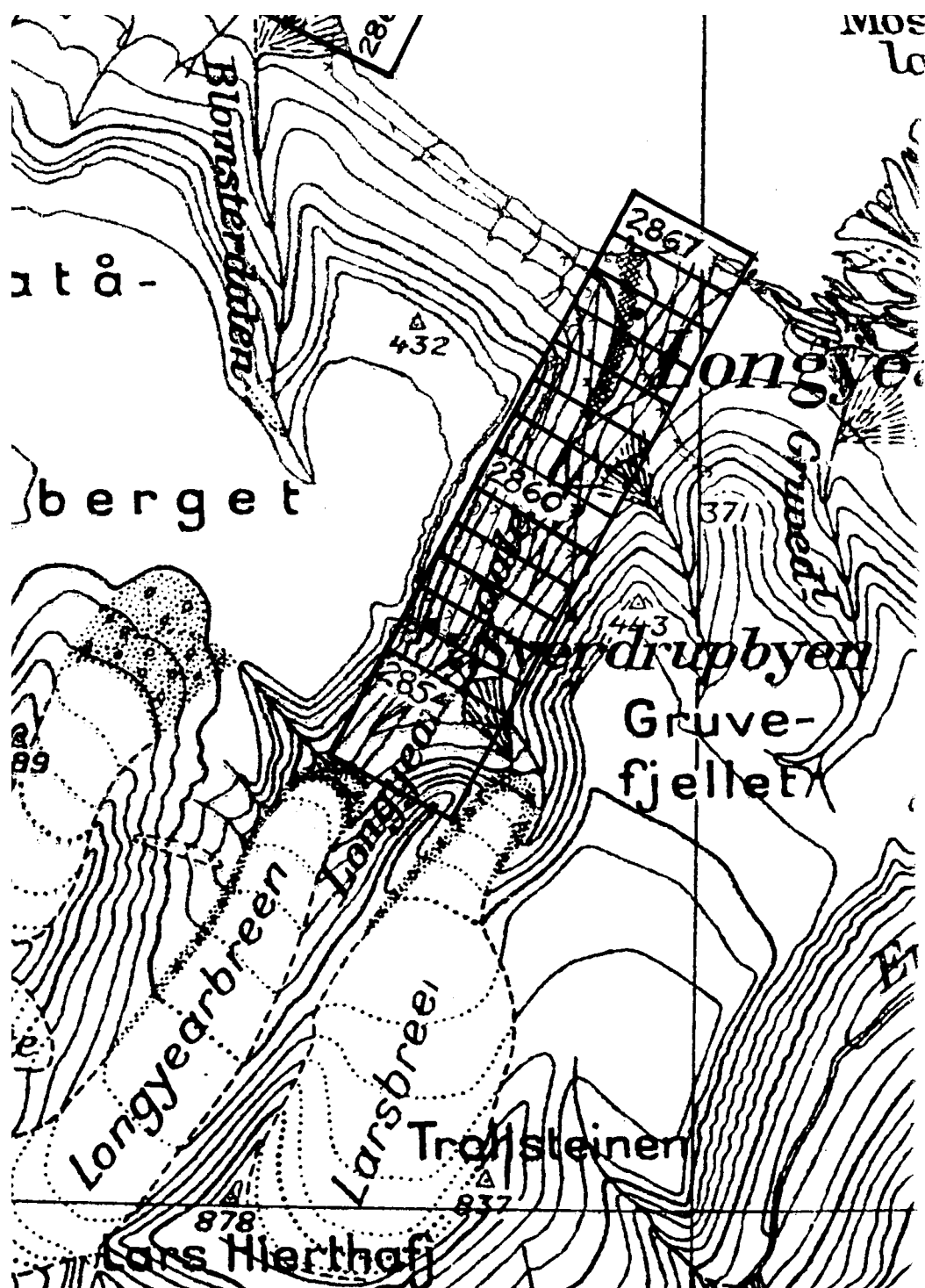
Figur 3.2: Bilder av Fridtjovbreen etter surgen i 2005. 1-2 er tatt fra Vasskiltoppen og dekker hhv øvre og midtre del av breen. 3-5 er tatt NV for Kamvatnet. 1 dekker øvre deler av breen, 4 dekker midtre deler av breen og 5 viser den lille bredemte sjøen Kamvatnet. 6 dekker midtre deler av breen sett fra østsiden av breen. 7 og 8 er tatt fra en høyde øst for brefronten og dekker Fridtjovhamna og brefronten. Bildene er tatt 5. mars 2005 av Erik Scavenius.



Figur 3.3: Radarprofil fra sovjetisk kartlegging i området på 1970-tallet. Profilet begynner til venstre på austre Grøn fjordbreen, og følger fra 8 km omtrent det østre profilet i figur 5.4. Betydning av linjene: Øverste linje representerer breoverflata, den stiplede linja representerer skillet mellom kald og temperert is, heltrukket linje representerer bunntopografien, og den nederste stiplede linja representerer havnivå. Figuren er hentet fra Kotlyakov (1985).

eksisterende bildemateriale er mulig å vise utviklingen til Fridtjovbreen over. Utsnitt av originalbildeplott for S36 er vist i figur 3.4 og for S90 i figur 3.5. I appendiks B vises utsnitt av bildeplott for S60 og S69, samt detaljert dekningsoversikt for bildene fra S36 og S90 som er brukt i denne oppgaven.

I oppgaven inngår også å undersøke mulighetene for å gjennomføre en kalibrering av kameraet P21 som har tatt S36-bildene. For å gjøre dette var det ønskelig med vertikalbilder, for å unngå stor variasjon i bildemålestokk utover i bildene. Det er tatt få vertikalbilder med kameraet, men i området rundt Longyearbyen er det tatt noen bilder. Ei stripe over Longyeardalen ble valgt. Bildeplott er vist i figur 3.6, og dekningsoversikt er vist i appendiks B.



Figur 3.6: Utsnitt av dekningsoversikt for S38 © Norsk Polarinstitt.

4 Gjennomføring og resultater

I dette kapitlet gjøres det rede for den praktiske gjennomføringen av oppgaven. Data, metoder, gjennomføring og resultater presenteres og diskuteres med tanke på kvalitet, nøyaktighet og pålitelighet. Hensikten med kapitlet er å gjøre rede for arbeidet som er gjort i forbindelse med oppgaven og tjene som bakgrunn for diskusjon av oppgavens problemstilling i kapittel 5. Der det henvises til dataprogrammer brukt, brukes stort sett forkortelser av programnavnet. Forkortelsene er forklart, og programmenes bruksområde er beskrevet, i appendiks A.

I avsnitt 4.1 beskrives forsøket på kalibrering av kamera P21 som har tatt S36-bildene. I avsnitt 4.2 beskrives orienteringen av bildene over Fridtjovbreen. I avsnitt 4.3 beskrives arbeidet med å lage terrengmodeller. Høydedata for området er også hentet fra eksisterende kart over området, og dette arbeidet er kort beskrevet i avsnitt 4.4.

4.1 Kalibrering av kamera P21

4.1.1 Bildekoordinatsystem

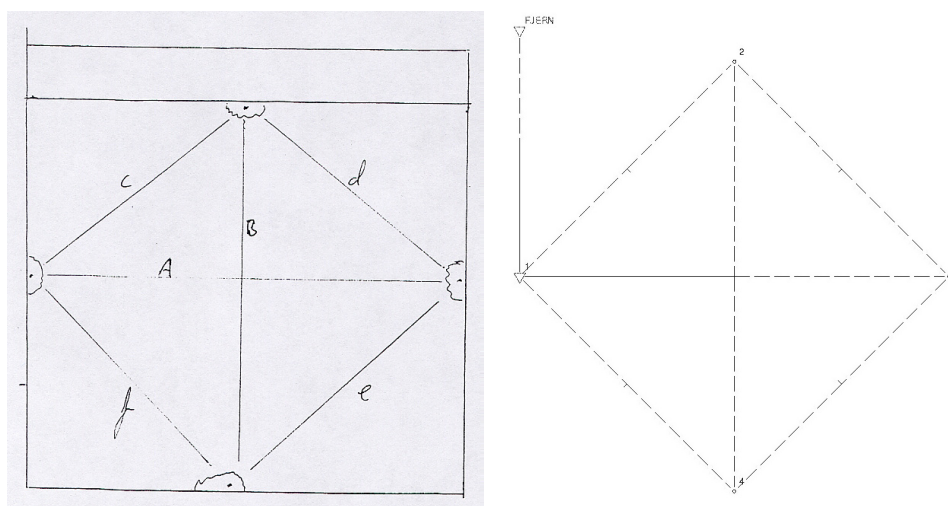
Det foreligger ingen kalibreringsrapport for kamera P21 som har tatt bildene fra 1936. Foreliggende materiale er bildene slik de har ligget i arkivet til Norsk Polarinstitutt (NPI) fram til i dag. På bildene er innfotografert kamerakonstant 210.71 mm. Bildene ble levert ferdig scannet, men Harald F. Aas ved NPI målte diagonalene og sidene i bildene (avstanden mellom rammemerkene), se tabell 4.1.

Før bildene kan brukes til fotogrammetrisk kartlegging må det etableres en oversikt over kameraets indre geometri; det må gjøres indre orientering. Første steg i denne prosessen er å etablere et bildekoordinatsystem, eller komme fra de målte avstandene til bildekoordinatsystem.

De målte avstandene er å anse som lengdeobservasjoner, og ble lest inn i landmålingsprogrammet VG-Land (VG-L) som ferdig korrigerede landmålingsobservasjoner. Rammemerkesentrum (FC) ligger der diagonalene krysser hverandre. I bildekoordinatsystemet er FC definert som $(0, 0)$, og koordinater for ram-

Obs.	Bilde 1	Bilde 2	Bilde 3	Gj.sn.	St.avvik	Spredn.
A	174.50	175.50	174.61	174.54	0.06	0.11
B	174.57	174.59	174.61	174.60	0.04	0.04
c	123.43	123.42	123.49	123.45	0.04	0.07
d	123.40	123.39	123.51	123.43	0.07	0.12
e	123.41	123.45	123.48	123.45	0.04	0.07
f	123.36	123.38	123.40	123.38	0.02	0.04

Tabell 4.1: Måling av diagonaler og sider i S36 bildene utført 22. november 2004 av Harald F. Aas ved Norsk Polarinstitutt. Alle mål er i millimeter, spredning er største minus minste målte verdi. A ... f er definert i figur 4.1.



(a) Målte avstander i 1936-bildene, kfr tabell 4.1.

(b) Plot fra VG-L over rammemerkene i 1936-bildene

Figur 4.1: Oversikt over målte avstander i 1936-bildene (venstre) og plot fra VG-L som viser rammemerkenummerering og "fjernsiktepunkt", se teksten.

memerkene ble regnet ut etter utjevning av observasjonene (lengdemålingene).

Implisitt ligger til grunn for denne operasjonen antagelsen at de utvalgte bildene som er målt er representative for bildene som skal brukes i prosjektet. Som vi ser av tabell 4.1 er det i verste fall over en tidels millimeter ($100\mu\text{m}$) forskjell på samme avstand i de tre målte bildene. Med så stor intern variasjon mellom tre bilder, kan denne antagelsen være noe tvilsom; det kan se ut til å være tildels store variasjoner i krymping fra bilde til bilde.

For denne oppgavens vedkommende foreligger ikke andre målinger enn de som er referert i tabell 4.1. For andre prosjekter kan det imidlertid være aktuelt

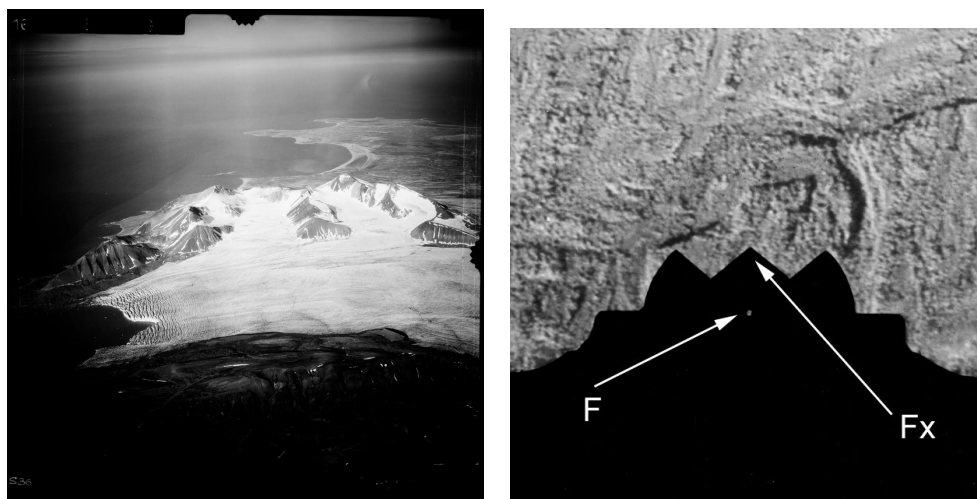
å få målt de bildene som skal brukes i prosjektet, og beregne ut i fra det. En kort gjennomgang av prosessen med å beregne utjevnedde rammemerkekoordinater gis derfor her:

Først leses alle observasjonene, det vil i dette tilfellet si tre observasjoner av hver avstand, inn i VG-L som ferdig korrigerede landmålingsobservasjoner. VG-L er laget for å takle landmålingsprosjekter med en viss utstrekning. For å unngå problemer med avrundingsfeil fordi prosjektet er så lite, multipliseres størrelsene med en passende tierpotens (for eksempel tusen), slik at størrelsene i prosjektet blir mer i størrelsesorden for landmåling. Det er viktig å lese inn observasjonene i programmet som "ferdig korrigeret", for å unngå korreksjon for jordkrumning/refraksjon av observasjonene. Origo defineres til rammemerke 1. For å definere retningen på systemet opprettes et fiktivt sikt ("fjern" i figur 4.1b), og retningen til rammemerke 3 defineres normalt (100 gon) på dette siktet. Deretter utjevnes observasjonene og det beregnes koordinater for rammemerke 2 og 4. I VG-L brukes et koordinatsystem med x positiv opp og y til høyre, som er vanlig i landmåling.

For å komme til et koordinatsystem som kan brukes i ImageStation, og gjøre ferdig definisjonen av bildekoordinatsystemet, defineres rammemerkesentrum til å være (0,0). Rammemerkesenter ligger på linja 1-3, altså x-koordinat 0.000. Y-koordinaten fremkommer ved å ta gjennomsnittet av y-koordinatene for rammemerke 2 og 4 (tilnærmingen er gyldig hvis disse er av samme størrelsesorden). Ved å beholde x-koordinatene som de er og trekke fra 87.245 (gjennomsnittet av y-koordinatene for rammemerke 2 og 4) translateres koordinatsystemet slik at rammemerkesentrum er (0,0), og rammemerke 2 og 4 har fått koordinater.

Rammemerket til P21 er et lite hull (hvit flekk) i en svart flate. Ved orientering av bildene over Fridtjovbreen viste det seg at scanningen av bildene hadde skjedd på en slik måte at disse merkene ikke var synlig i alle bildene. Det ble derfor nødvendig å etablere flere punkter i bildene som kunne tjene som rammemerker. Det svarte feltet rundt rammemerke 2 har noen karakteristiske utspring, og det midterste av disse ble valgt som supplerende rammemerke, se figur 4.2.

I et bilde der alle rammemerke 2 og 4 var synlig ble det målt pixelkoordinater for de opprinnelige rammemerke 1-4 og for de nye rammemerke 5-8. Med de beregnede bildekoordinatene for rammemerke 1-4 ble det så gjort en helmertransformasjon (se foreksempel ??) som gav bildekoordinater for de nye rammemerke 5-8. Koordinatmålinger og utskrift av transformasjonsparameterne er gitt i appendiks C. De nye rammemerke 5-8 er dessverre vesentlig



(a) S36 1689 Fridtjovbreen
© Norsk Polarinstitut

(b) Rammemerke P21. F er rammemerket og Fx er ekstra rammemerke, beskrevet i teksten.

Figur 4.2: Eksempel på bilder tatt med P21 (S36 og S38) S36 1689 og S38 2856 © Norsk Polarinstitut.

dårligere definert i bildet enn de egentlige rammemerkene (se figur 4.2). Dette betyr at punktene er vanskeligere å måle nøyaktig i bildet, og hvis få punkter er målbare i bildet vil man derfor risikere å få en upålitelig indre orientering av bildet.

4.1.2 Fortegning

Deformasjoner i bildene kan bestemmes ved bruk av tilleggsparametre i blokkutjevning (se avsnitt 2.1.9). For at tilleggsparametre skal kunne innføres i blokkutjevninga på en trygg måte (uten fare for overparametrisering) kan det i følge Andersen et al. (1994) stilles opp følgende krav:

- **Overlapp mellom bildene** må være god, minst 60 %, helst opp mot 80 %.
- **Overlapp mellom stripene** i blokka må være god, minst 20 %, helst mer.
- **Gittpunkter** i tilstrekkelig antall og av god kvalitet (se også avsnitt 2.1.7).

For å få minst mulig variasjon i geometrien i bildene var det ønskelig å bruke vertikalbilder. Nesten alle bildene vi kjenner til som er tatt med P21 er skråbilder, men det finnes ei stripe på 14 bilder over Longyeardalen tatt i 1938. Fra denne stripa ble det brukt 12 bilder (S38 2856–2867, bildedekning

vises i figur 3.6 og appendiks B). Bildene ble antatt å oppfylle kravene til tilstrekkelig geometri til at tilleggsparametre kan anvendes forsvarlig. Overlappen i striperetning så i dekningsoversikten ut til å være god; vesentlig bedre enn 60 %. Det dreide seg kun om ei stripe; dermed bortfalt kravet om stripeoverlapp. I Longyeardalen ble det antatt å være mulig å finne mange objekter i bildene som kunne koordinatfestes i terrenget, enten fra kart eller fra aerotriangulering med nyere flybilder, og tjene som gittpunkter av tilstrekkelig kvalitet, slik at kravet om gittpunkter skulle bli godt oppfylt.

Ved orientering av bildene viste faktisk overlapp seg å være i noe liten øverst i dalen, men bedre nedover. Sammenbindingspunkter var lett å finne i tre og tre bilder nedover (tre stråler). Oppover i fjellsiden på NV siden av dalen var høydeforskjellen såvidt stor at det var vanskeligere å få til tre stråler, dessuten var bildene mindre skarpe her. Utover i elveleiet i dalbunnen var det også greit å finne sammenbindingspunkt.

Gittpunkter ble tatt fra digitalt kartverk stilt til rådighet av Svalbard Samfunnsdrift (SSD). Nesten all bebyggelse i Longyeardalen som er synlig på bildene ble brent under andre verdenskrig, og kun tuftene står igjen. På Svalbard råder en særlig streng kulturminnelovgivning, der alle spor etter menneskelig aktivitet før 1945 er fredet. På kartverket fra SSD var alle hustufter og slikt registrert. Bilder og kart ble inspisert og det ble plukket ut punkter som var gjenfinnbare både i kart og bilde.

Det var en del praktiske problemstillinger i dette arbeidet. På Svalbard bygges husene på påler for å unngå problemer med at permafrosten tiner under huset. Kartet var i målestokk slik at alle pålene som er synlig i terrenget er synlig i kartet, men det er ikke nødvendigvis slik at de representerer hushjørnene som de synes i bildet. Bevegelse av punktene som følge av solifluksjon (jordsig) mellom 1938 (da bildene ble tatt) og nittitallet (da kulturminneregistreringen ble foretatt) antas å være liten, og neglisjerbar i forhold til usikkerheten i forbindelse med defineringen av punktene (Jon Tolgensbakk, pers. medd.). Usikkerheten i defineringen av punkt på denne måten gjør at nøyaktigheten på gittpunktene neppe kan sies å være bedre enn en meter. Det vil alltid være en fare for forveksling av punkter (at bildepunkt og registrert detalj i kartet ikke er samme punkt) når punktene defineres på denne måten. For å med rimelig sikkerhet kunne avsløre slike feilaktige punkter ble det valgt ut mange punkt.

Når det gjelder fordelingen av gittpunktene er det et problem at mange ble liggende på ei linje konsentrert rundt veien oppover dalen. Bildene gikk ikke så langt opp i NV fjellside at fundamentene etter kibben (taubanen) der var synlige som forutsatt. I SØ del av bildene ligger elveleiet, som fullstendig forandres

hver vårløsning, og som derved er uegnet til å hente gittpunkt fra. For å bøte på den uheldige plasseringen av gittpunktene fra kartet ble det også etablert noen høydepunkt på antatt stabile flater i kanten av elveleiet og i strandkanten. Høydene ble tatt fra kartet fra SSD.

Orienteringen ble gjort i ISDM (Digital Mensuration). Indre og relativ orientering gikk greit, men en del arbeid var nødvendig for å luke ut feil i gittpunktene før stripa "hang sammen" og gikk igjennom strålebuntutjevninga. Restfeil (sigma) i prosjektet endte på $9.8 \mu\text{m}$.

For å få fram data om bildedeformasjoner ble tilleggsparametre skrudd på i strålebuntutjevninga. ISDM avviste både kamerakonstant og alle 12 Ebnerparametrene (figur 2.5) som insignifikante. Arneberg (1924) hevdet i 1924 at "der utføres nu objektiver praktisk talt absolutt fri for alle arter fortegningsfeil." Grunnen til at prosjektet med stripa i Longyeardalen ble satt i gang var en mistanke om at de over 70 år gamle bildene hadde til dels store deformasjoner som følge av linsefortegning og filmkrymping. Vurderingen må være at selv om ISDM tilsynelatende mener at slike bildefeil ikke er til stede, er faren stor for at de er det likevel.

ISDM inkluderer tilleggsparametre kun under absolutt orientering. Fordi tilleggsparametrene baseres på bildemålinger og ikke mål i terrenget kan tilleggsparametre teoretisk løses ut under relativ orientering. Dette ville vært en fordel for prosjektet fordi den relative orienteringen var god, mens absoluttorienteringen var mer tvilsom på grunn av gittpunktenes kvalitet.

Det er grunn til å spørre seg om geometrien i prosjektet var for dårlig til å gjennomføre en slik kalibrering. I forhold til Andersen et al. (1994) manglet stabiliteten som flere striper ville kunne tilført prosjektet. I forhold til operasjonelle rutiner i nærfotogrammetri manglet dekning av objektet (terrenget) fra flere vinkler og i flere kameraposisjoner (EOS 2003)

Det må konkluderes at det innenfor denne oppgavens tidsbegrensning ikke var praktisk gjennomførbart å få ut data for fortegning/deformasjon fra de foreliggende bildene.

4.2 Orientering av bilder

4.2.1 S90 Fridtjovbreen

S90-bildene er tatt med et RC20 kamera kalibrert 18. januar 1990. Kamerafil fantes allerede klar til bruk. Bildene kom med ferdig ytre orientering (y_0) ($x, y, z, \varphi, \omega, \kappa$) fra Norsk Polarinstitutt (NPI). Bildene som er brukt i denne

oppgaven er kun en liten del av en større blokkutjevning over store deler av Nordenskiöldland, og ytre orienteringsparametre ble lest rett inn og brukt som de var.

Alternativet til dette ville vært å orientere den lille blokka for seg selv basert på gittpunkter i området. Dette ble vurdert som mindre gunstig fordi gittpunktene i området ikke er særlig sikre. Punktene er ikke signalert, slik at det ville bli mye "gjetting og triksing" for få det hele til å henge sammen. Da er det tryggere å bruke parametrene som de er fra en større blokkutjevning.

Faren med å benytte de oppgitte parameterne er at orienteringen hos NPI er gjort på en dfa med programvaren SocetSet fra Leica-Helava. Det er ikke mulig å importere hele orienteringen fra NPI inn i ImageStation; indre orientering (måling av rammemerker) må gjøres på nytt. Små tilfeldige feil er uunngåelig i denne prosessen, og gjør det litt risikabelt å importere ytre-orienteringsparametre direkte.

4.2.2 S36 Fridtjovbreen

Orientering ble gjort med ISDM. Indre orientering (IO) var problematisk fordi scanningen av bildene var gjort slik at rammemerkenes for en stor del ikke var synlige. Det ble derfor etablert ekstra merker, se avsnitt 4.1.1. For et par av bildene var det også vanskelig å se de nyetablerte merkene. Det var ikke tid til å få scannet bildene på nytt da dette ble oppdaget. Resultater fra indre orientering er gitt i tabell 4.2. I bilde 1690 var det kun mulig å måle to rammemerker, og sigma blir følgelig 0. I de øvrige bildene var det mulig å måle flere merker, men sigma blir høy. Til sammenlikning var det ingen av bildene i S38 Longyearbyen som hadde sigma over $23 \mu\text{m}$. Denne IO må sees på som et dårlig utgangspunkt for videre målinger, og vil påvirke resultatet negativt.

Som grunnlag for absolutt orientering ble det brukt punkter fra Norsk Polarinstitutt's punktliste i området. Punktene i denne lista er i hovedsak varder/trigppunkter. Ingen punkter var signalert i bildene. En del av punktene var ikke identifiserbare i bildene, og det ble derfor nødvendig med noen ekstra punkter. Det ble tatt noen høydepunkter i vannkanten i Fridtjovhamna og langs Nordenskiöldkysten, der høyde ble satt til 0 moh. Det ble også tatt noen punkter på fjellet på strekningen Marcussenfjellet - Hanekammen bestemt fra S90-bildene. Liste over de gittpunktene som ble brukt er gitt i vedlegg E. Restfeil (sigma) i prosjektet endte på $95 \mu\text{m}$ og avvik mellom gitte og beregnede koordinater (RMS) i gittpunktene ble 26.89, 52.05 og 13.00 meter i henholdsvis x, y og z, se også utdrag fra absoluttorienteringsrapporten i appendiks G. Dette er store feil. Faktorer som bidrar til et så svekket resultat kan være dårlig indre

Bilde	IO sigma	# F	# F _x
1690	0.0	0	2
1689	28.4	1	2
1688	55.5	2	4
1687	44.5	1	3
1686	30.2	2	3
1685	30.1	2	3
1684	44.6	0	4
1683	35.9	2	4

Tabell 4.2: Resultat av indre orientering av S36 Fridtjovbreen. Sigma i μm . F er ordinære rammemerker, og F_x er ekstra rammemerker.

orientering og dårlig gittpunktgrunnlag. Gittpunktene er dels lite nøyaktige og dels dårlig definert (ikke signalert) i bildene. Dessuten er det stedvis dårlig kontrast i bildene, spesielt på strandflata langs Nordenskiöldkysten, slik at noen punkt der har fått spesielt høy RMS som har bidratt til å svekke resultatet. Det synes vanskelig, til tross for stor innsats, å få det bedre med eksisterende bilder og gittpunkter.

4.3 Fremstilling av terrengmodeller

For at det skal være mulig å bestemme terrengkoordinater ved hjelp av fotogrammetri må det være kontrast nok i bildene til at det er mulig å identifisere homologe punkter. I snødekte områder, som de øvre delene av en bre, er det ofte for dårlig kontrast til å kunne identifisere punkter. Med snølinje menes i denne oppgaven øvre grense for hvor det er rimelig god kontrast. Snølinja for S36 og S90 er vist i figur 5.4.

4.3.1 Matchingsparametre for fargebildene

Automatisk generering av høydemodeller ble gjort med ISAE. Som grunnlag for prosessen trenger ISAE en del parametre. Korrekt valg av parametre er avgjørende for resultatet av prosessen (se for eksempel Nilsen (1997)).

For å avgjøre hvilke parametre som skulle brukes i matchingsprosessen ble det gjort en liten test over et mindre område. I ISAE ble det for disse tre kjøringene brukt terrengtype *hilly* og smoothing filter *medium*. Eneste parameter som ble endret var hvilket fargebånd matchingen skulle skje i. Fra testen ser vi at beregnet intern høydenøyaktighet ikke forandres vesentlig ved

variasjon av fargebånd, se 4.3. Ut fra tidligere erfaringer med øvinger i kurs, der grønt bånd kom best ut, spesielt i skyggeområder, ble det valgt å bruke grønt bånd i matchinga av fargebildene videre.

Fargebildene er falskfargebilder, der rødt i bildet tilsvarer reflektert stråling i det nærinfrarøde båndet, grønt i bildet tilsvarer rødt bånd og blått i bildet tilsvarer grønt bånd.

Farge	Teoretisk h.n.	Beregnet intern h.n.
Rød	3.8010	0.6489
Blå	3.8039	0.6508
Grønn	3.8018	0.6298

Tabell 4.3: Resultater fra test av matchingsparametre. Farge betyr hvilket fargebånd i bildet det er matchet i, beregnet høydenøyaktighet er ISAEs beregning av oppnåelig høydenøyaktighet basert på egenskaper som høyde-basisforhold etc. og beregnet intern høydenøyaktighet er ISAEs vurdering av resultatet.

4.3.2 Terrengmodell S90

Matching

Fridtjovbreen dekkes av tre modeller:

- **Alfa:** bilde 2030 og 2031
- **Beta:** bilde 2066 og 2067
- **Gamma:** bilde 2067 og 2068

Det ble digitalisert "collection boundaries" slik at det ble laget terrengmodeller over breen og litt opp i fjellsida utenfor. ISAE's rapporter over resultatene finnes i tabell 4.4. Gridstørrelse er 40 meter.

I snøområdet (omtrentlig beliggenhet av snølinja er vist i figur 5.4) på breen er bildene bortimot uten kontrast, og matchinga gir derved upålitelige resultater. Variasjon på flere hundre meter i høyde er oppdaget for den midtre delen av øvre del av breen fra kjøring til kjøring av ISAE. Unøyaktigheten i matchinga i dette området vises også i profilet i figur 5.2. Det er en iboende svakhet med fotogrammetri at områder der det er dårlig kontrast blir det upålitelige og til dels gale resultater. Problemet kan reduseres ved å manuelt legge inn høydepunkter i områdene med dårlig kontrast. Problemet med det er at hvis det er for dårlig kontrast til å kjøre matching, vil det også oftest være for

dårlig kontrast til å sikkert sette punkt. Alternativet som gjenstår vil da være å digitalisere punkt eller linjer etter en mer eller mindre kvalifisert gjetning eller antakelse om hvordan terrenget ser ut. Denne fremgangsmåten har da også vært mye brukt i alminnelig topografisk kartlegging av slike områder (Trond Eiken, pers. medd.). I denne oppgaven er det imidlertid ikke satt ut slike punkt, og matchinga har blitt overlatt helt til programmet. Det understrekes derfor at høydedataene over snølinja er å anse som upålitelige.

Modell	Teoretisk h.n.	Beregnet intern h.n.
Alfa	3.87	0.81
Beta	2.79	0.94
Gamma	2.63	0.98

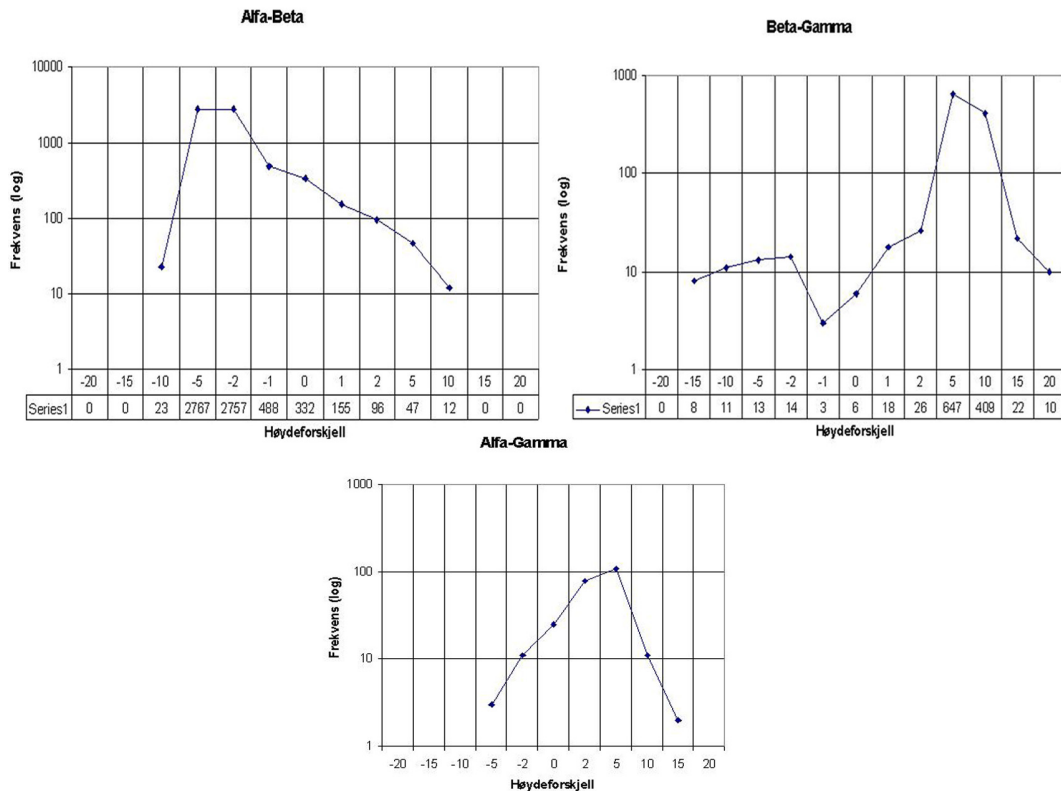
Tabell 4.4: ISAEs nøyaktighetsvurdering av høydenøyaktigheten for S90-modellene.

Indre pålitelighet i matchinga

Områdene Alfa, Beta og Gamma overlapper til dels. Det er størst overlapp mellom Alfa og Beta (6676 pkt), en del overlapp mellom Beta og Gamma (1205 pkt) og litt overlapp mellom Alfa og Gamma (258 pkt), se figur 4.4.

Matchinga over områdene har skjedd som uavhengige prosesser, det vil si at programmet ikke har "visst" noe om resultatet fra tidligere matcher når det har kjørt. Matchingene er døg ikke helt uavhengige; ytre orienteringsparametre for modellene kommer fra samme aerotriangulering. Det er også slik at det bak hvert gridpunkt ligger mange målinger fra ISAE, og at gridpunktene således er fremkommet etter en indre utjevnings- og glattingsprosess. Det er altså ikke slik at ISAE påtvinger modellen et grid, og går til hvert gridpunkt og gjør en enkelt matching i dette punktet. Ser vi bort fra dette, kan vi anta at punktene i overlappssonen utgjør uavhengige målinger av samme punkt.

Med denne bakgrunn ble høydeforskjellen i hvert enkelt punkt som var dekket av overlappende modeller regnet ut. Dette ble gjort med programmet "felles", se A.7. Punktvis høydeforskjell mellom de overlappende matchingsområdene er vist med histogram i figur 4.3, og oppsummerende statistikk i tabell 4.5. Fra histogrammene kan det se ut som om det er en systematisk trend at modellen Beta ligger noe (~2–4 m) høyere enn modellene Alfa og Gamma.



Figur 4.3: Histogramfordeling over høydeforskjeller mellom punktresultatene for overlappende matchingsområder. Overlappen mellom alfa og beta er 6676 punkt, mellom beta og gamma 1205 punkt og mellom alfa og gamma 258 punkt.

Modeller	# overl. pkt	Gj.sn.	St.avvik	Sigma null
Alfa-Beta	6677	-4.2715	2.3981	3.46
Beta-Gamma	1205	4.6203	4.2821	4.45
Alfa-Gamma	238	1.7918	2.3690	2.10

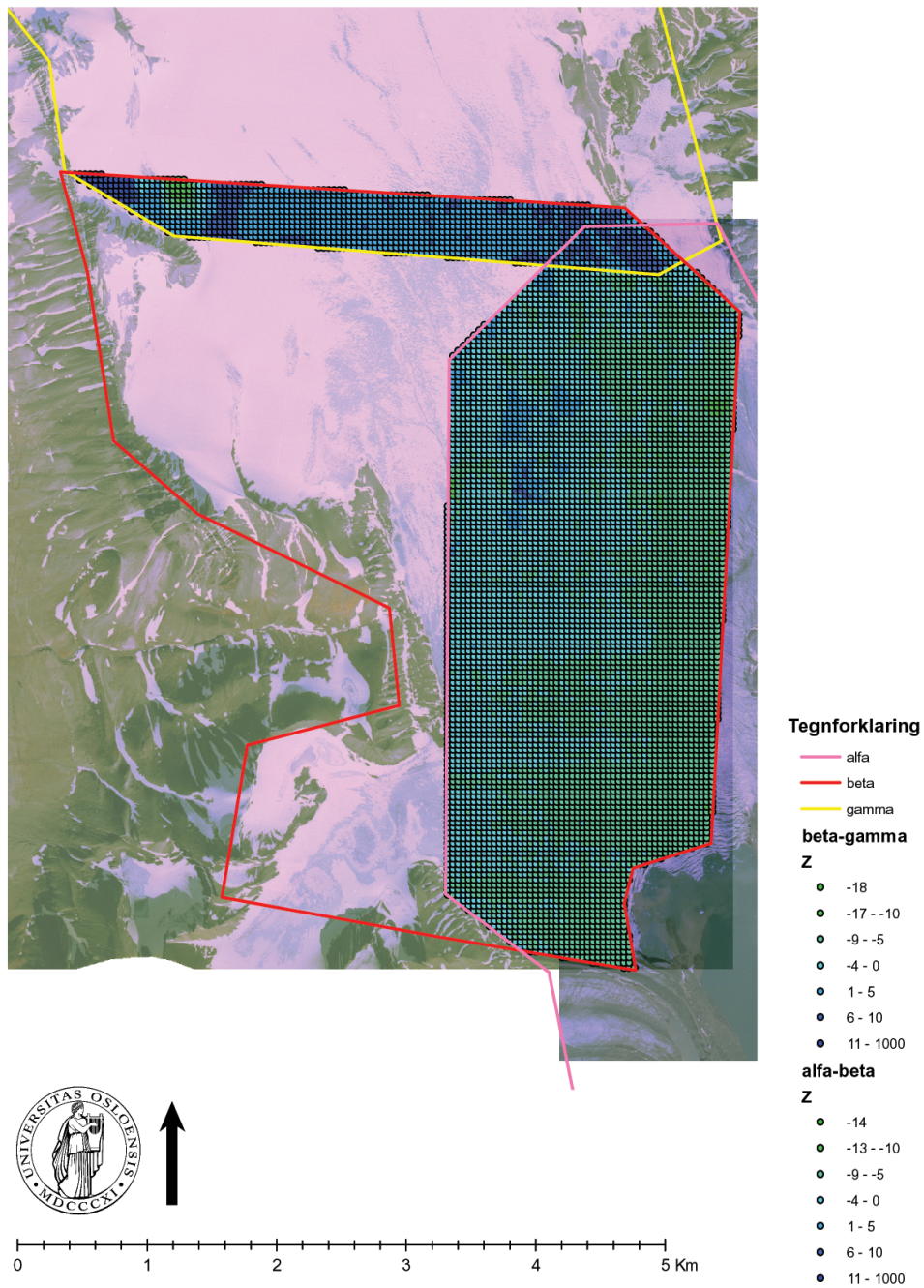
Tabell 4.5: Statistisk representasjon av forskjellene mellom terrengrepresentasjonene fra de ulike modellene

4.3.3 Terrengmodell S36

Matching

Fridtjovbreen dekkes av stripa S36 1690–1683, og alle modellene er nødvendig for å få stereoskopisk dekning over breen. ISAE ville kun gjøre matching i modell 1685–1684 (toppen av breen).

For å gi grunnlag for diskusjon av problemet gis her en kort redegjørelse for bruken av programmet. Brukergrensesnittet i ISAE består av fire faner, se også



Figur 4.4: Høydeforskjellen i matchingsresultatene. Alfa minus Beta og Beta minus Gamma er vist.

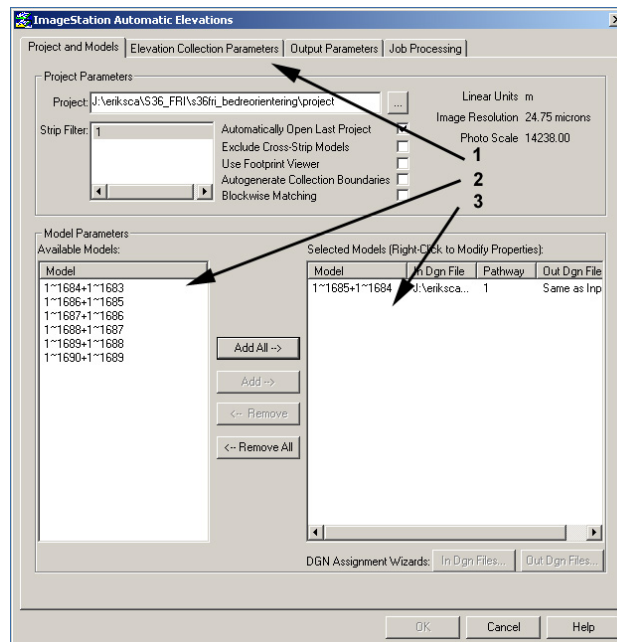
figur 4.5:

Project and Models velger prosjekt og modeller. Bestemmer/velger in- og output .dgn-filer.

elevation Collection Parameters bestemmer parametre, som terrenotype, gridstørrelse og slikt, for matchinga.

Output Parameters bestemmer kataloger for resultatfiler (terrengmodellene og loggfiler) og hva som skal legges ut av resultater.

Job Processing sender matchingsjobbene til eksekvering.



Figur 4.5: Brukergrensesnitt for ISAE. (1) arkfaner, (2) tilgjengelige modeller og (3) valgte modeller.

Etter at modellene er satt opp og orientert skal de når ISAE startes dukke opp i vinduet for tilgjengelige modeller. Det første problemet med S36-bildene var at de ikke dukket opp der. Flere løsninger ble forsøkt: Modellfilene ble undersøkt, men så ut til å være i orden. Det ble undersøkt om det skulle ha noe å si at det var et skråbildeprosjekt, men andre skråbildeprosjekter viste seg å ha fungert tilfredsstillende. Det ble forsøkt resampling til epipolar geometri. Det som til slutt løste problemet var å editere modellfilene slik at de var helt "rene", det vil si inneholdt kun bildenavnene og noen administrative parametre. Etter at modellfilene var editert slik, dukket alle modeller opp som tilgjengelige.

Hovedproblemet oppstod under neste trinn i prosessen, som er å velge hvilke av de tilgjengelige modellene som skal matches. Valget gjøres ved å merke de modellene som skal matches i lista over tilgjengelige modeller, og trykke på en knapp ("Add->") som legger de valgte modellene over i vinduet for valgte modeller. I dette vinduet bestemmes så in- og output .dgn-filer før en går videre i programmet. Problemet var at kun én av modellene (1685-1684, toppen av breen) var mulig å legge over.

Mange forsøk og tester ble gjort for å få modellene over. Det viste seg

ved inspeksjon av ytre orienteringsparametre at κ varierte ganske mye ($>5^\circ$) gjennom stripa. Ved eksperimentering med å editere på κ viste det seg at ISAE aksepterte å velge modellene hvis κ ble satt til $<3^\circ$. Det kan derfor være mulig at ISAE ikke aksepterer modeller med mye variasjon i κ . Dette står det imidlertid ikke noe om i brukerdokumentasjonen eller hjelp-filene til programmet. For å få avklart dette ble brukerstøtte hos leverandøren av programmet kontaktet, men de kunne ikke si noe mer om problemet utover at de ville undersøke videre hos produsenten.

For å holde tidsrammene for oppgaven ble det konkludert med at ISAE ikke ville matche i S36 bildene.

For å få en terrengmodell fra 1936 ble det digitalisert ~ 2000 punkter på breoverflata med ISFC. Hovedtyngden av punktene ligger nedenfor snølinja. Ovenfor snølinja var det for dårlig kontrast til å digitalisere enkeltpunkt.

4.4 Andre høydedata

Norsk Polarinstituttets kart B10 Van Mijenfjorden i skala 1:100 000 som dekker Fridtjovbreen, finnes i to utgaver. Utgave en er fra 1982, basert på flybildene fra 1936 og utgave to er fra 2004, basert på flybildene fra 1990 og satellittbilder fra 1998. Kartene er altså basert på de samme flybildene som er brukt i denne oppgaven, og det er interessant å sammenlikne høydedata lest ut fra disse kartene med resultatene en får ved å gjøre jobben selv.

Utsnitt av kartene er vist i figur 3.1. I alle kart er det elementer av generalisering. Det jevne "pene" kotebildet i kartutsnittene indikerer at kotene er glattet en del, og således representerer en generalisering av terrenget.

Kartene ble scannet med oppløsning på 300 dpi på en Epson GT 12000 scanner, og bildene ble georeferert med VG-Raster. Langs to profiler omtrent langs Fridtjovbrens midtlinje, vist i figur 5.4 ble det med VG-Kart digitalisert punkter der profillinja krysset høydekurvene på kartene. Profilene som ble digitalisert fra kartene er vist sammen med profilene fra terrengmodellene som er laget i forbindelse med denne oppgaven i figur 5.2.

4.5 Areal

Brebegrensning for 1936 og 1990 ble konstruert fotogrammetrisk. Brebegrensning for 1990 er vist i figur 5.4. For å komme fram til et areal å bruke i volumberegningene i avsnitt 5.3 ble det etablert en felles begrensning for de to tidsepokene, tilsvarende den maksimale utbredelsen i begge epoker. Denne ble laget

mest på basis av begrensningen fra 1990. Det ble så laget polygoner for hver kilometer oppover breen, og beregnet areal av polygonene. Arealene beregnet på denne måten er vist i tabell 5.2. Totalt breareal er 48,69 km², og det er konsistent med Hagen et al. (1993).

5 Diskusjon

I dette kapitlet diskuteres nøyaktigheten i terrengmodellene. Videre beregnes endringen i isvolum fra 1936 til 1990. Det diskuteres i hvilken grad høyde- og volumendringene som er beregnet er pålitelige.

5.1 Nøyaktighet

Kartkontroll gjøres gjerne ved at et statistisk tilstrekkelig stort antall objekter i kartet kontrolleres mot punkter som er kartlagt med vesentlig bedre nøyaktighet enn i kartet. Kontrollpunktene kalles gjerne "fasit" (Andersen 1985). Til bruk i denne oppgaven foreligger ingen "fasit". Det som foreligger av materiale er:

- Koordinater for triangelpunktene i området beregnet av Norsk Polarinstitutt.
- Eksisterende kart B10 i to utgaver. Kartene er konstruert fra de samme flybildene som er brukt i denne oppgaven.
- For 36-modellene kan 90-modellen brukes som fasit i ikke brede områder.

For 90-modellene kan triangelpunktene i området brukes som kontroll. De er i all hovedsak ikke brukt i aerotrianguleringa til NPI, og er derved ikke korrelerte med oppgitte yo-parametre (Trond Eiken, pers. medd.). Problemet er at disse punktene i hovedsak ligger på fjelltopper, litt vekk fra breen. Det er ikke generert terrengmodeller for disse områdene, slik at denne kontrollmuligheten ikke kan tas i bruk.

36-modellene er orientert på basis av gittpunktene, så noen ytterligere kontroll (utover dokumentasjonen av orienteringen) mot disse synes lite meningsfull.

De eksisterende kartene er i målestokk 1:100 000, og informasjonen i kartet er generalisert til denne målestokken. Fra kartene er det digitalisert to høydeprofiler, ved at koordinatene for punktene der profillinjene krysser kotene er registrert. En 0.1 mm tykk strek i kartet utgjør i terrenget 10 meter; usikkerheten som følge av generalisering i produksjonen og digitalisering

kommer i tillegg. Det kan derfor diskuteres hvorvidt kartene er "vesentlig bedre" enn de fremstilte modellene.

Nøyaktighetsnivået i modellene diskuteres over de neste sidene her, og det viser seg at det er grunn til å hevde at modellene fra S90 er vesentlig mer pålitelige enn de fra S36, og derfor kan brukes til kontroll i ikke bredekte områder.

5.1.1 Oppgitte YO-parametre

S90-bildene kom med ferdig ytre orientering ($x, y, z, \varphi, \omega, \kappa$) fra blokkutjevning utført av Norsk Polarinstitut (NPI). Bildene som er brukt i denne oppgaven er kun en liten del av en større blokk over store deler av Nordenskiöldland, og ytre orienteringsparametre ble lest rett inn og brukt som de var (se også avsnitt 4.2.1).

For å undersøke nøyaktigheten i de ytre orienteringsparameterne fra NPI ble en del av gittpunktene i området målt, og det ble beregnet koordinater for disse basert på de gitte ytre orienteringsparameterne. Resultatet fra undersøkelsen er gitt i tabell 5.1. Avvikene mellom gitte og beregnede koordinater kan komme enten av feil i ytre orienteringsparametre, feil i gittpunktene eller måling av feil detalj (for eksempel målt stor stein i stedet for varde). Måling av feil detalj kan lett skje når det ikke er signalerte punkt. Av disse feilkildene antas måling av feil detalj å stå for det langt største bidraget, og at tallene derfor ikke påviser feil i oppgitte yo-parametre. Det tallene derimot viser, er hvor vanskelig det kan være å måle et ukjent ikke-signalert objekt.

For å unngå problemet med feilmåling ble det gjort en ny undersøkelse. I ISSD ble det gått til grunnrisskoordinatene i gittpunktlista. Når målemerket stod på riktig plass i grunnriss ble det satt på bakken, og høyden ble avlest. Resultatene vises i tabell 5.1. Alle avlesninger lå godt i nærheten av gitt verdi; vesentlig bedre enn det målingene i avsnittet over skulle tilsi.

Disse to undersøkelsene indikerer at usikkerheten ved innstilling av målemerket på ikke-signalerte punkter kan være stor, og at Polarinstitutets oppgitte ytre orienteringsparametre ser ut til å være gode.

Orienteringen av bildene har avgjørende betydning for resultatet av terrengmodelleringen. Andersen (2002) diskuterer noen feilkilder en løsning med å importere ytre orienteringsparametre medfører. Diskusjonen der går på direkte import av GPS- og INS-data. Grove feil i disse dataene vil ikke oppdages uten gittpunkter. Det er lite sannsynlig med tilsvarende grove feil i resultatene fra en aerotriangulering (en del av jobben med aerotriangulering er jo nettopp å luke ut grove feil). Det er ikke kommet fram noe som med sikkerhet kan påvise feil i

oppgitte ytre orienteringsparametre. Det synes heller ikke å være grunnlag for å hevde at restfeil fra ulik indre orientering, som diskutert i avsnitt 4.2.1, påvirker resultatet vesentlig.

Det ble på grunnlag av det ovenstående vurdert som den beste løsningen å benytte ytre orienteringsparametre fra NPI's aerotriangulering, spesielt på grunn av manglende signalering av, og derved stor usikkerhet knyttet til, gittpunktene.

5.1.2 Nøyaktighetsbetraktning S90

Det er laget terrengmodeller over breen. Et naturlig spørsmål å stille seg er da: "Hvor nøyaktige er de?" Siden det ikke foreligger fasit å kontrollere mot, presenteres her tre tilnærminger til dette spørsmålet:

Teoretisk: En mye brukt tommelfingerregel innen fotogrammetrien er at høyder på klart definerte punkter kan fremstilles med en nøyaktighet på 0.1–0.2‰ av flyhøyden (Andersen 1985). Nøyaktighet til matching på dfa er undersøkt (se avsnitt 2.1.10) til å ligge i området 0.06–0.90 ‰ av flyhøyden, avhengig av terrengets kompleksitet og oppløsning i bildene. Overføres dette til denne oppgaven, vil 1990-bildene tatt i ~8300 meters høyde kunne gi høydenøyaktighet på 0.5–7.5 meter. Programmet som gjør matchingsjobben, ISAE, oppgis å kunne produsere modeller med nøyaktighet bedre enn 0.1‰, altså omlag 0.85 meter i dette prosjektet. Det er i hovedsak to faktorer i tillegg til flyhøyde/bildemålestokk som påvirker resultatet; terrengetype og overflatetekstur. Terrenget på breen er ikke særlig komplekst, det er jevnt og rimelig flatt uten de store høydevariasjonene. Det virker derfor rimelig å anta at oppnåelig nøyaktighet ligger i den bedre delen av intervallet. Teksturen på breen kan imidlertid være dårlig. I is-/sprekkeområder kan det være bra tekstur, men i snøområdene er det vanskeligere. Dessuten kan det oppstå mønstre som repeteres oppover breen, slik at programmet "blir lurt". Teksturforholdene kan derfor være med på å trekke nøyaktigheten nedover. I brefronten er breen svært oppsprukket. ISAE matcher flere punkt for hvert punkt som kommer med i terrengmodellen, se appendiks A.1.5. I sprekkemråder kan punkt bli matchet nede i sprekken. Dette vil i og for seg være riktige matchinger, men i terrengmodellen er vi interessert i høyden på breoverflata, og ikke sprekken. Hvis mange punkt blir liggende nede i sprekken, vil gjennomsnittet av meshet bli liggende for lavt, og dette kan gi en systematisk høydefeil for området.

Indre motsetninger: I avsnitt 4.3.2 ble matching over samme område i flere

Pkt	Beregnet ISDM			Gitt			Avvik ISDM			ISSD	
	x	y	z	x	y	z	Vxy	Vz	Vxyz	z	Vz
1229	489684.630	8640300.235	536.928	489691.19	8640279.94	546.50	21.329	9.572	23.378	543.72	2.78
4594	490643.900	8635047.904	180.441	490655.02	8635044.02	187.90	11.779	7.459	13.942	181.70	6.20
1178	485945.176	8632760.841	710.750	485955.78	8632755.78	713.50	11.750	2.750	12.067	707.15	6.35
1179	480127.666	8638377.903	590.554	480150.62	8638389.38	592.60	25.663	2.046	25.745	592.75	-0.15
1182	486136.327	8645446.747	576.720	486143.76	8645444.37	579.06	7.803	2.340	8.147	586.24	-7.18
1184	483611.308	8645718.261	748.061	483614.18	8645717.29	748.52	3.032	0.459	3.066	746.62	1.90
1183	481219.987	8645493.001	679.073	481242.49	8645493.84	683.40	22.519	4.327	22.930	682.50	0.90
1119	479228.218	8647970.613	654.090	479240.68	8647945.85	664.10	27.722	10.010	29.474	664.58	-0.48
1186	486781.282	8646607.960	654.060	486788.24	8646600.47	691.90	10.223	37.840	39.197	—	—
						gj.sn.	15.758	8.534	19.772	gj.sn	1.29

Tabell 5.1: Forskjeller mellom gitte og beregnede (basert på NPI sin aerotriangulering) koordinater for punkter i S90-prosjektet. I kolonnene for **beregnet ISDM** er antatt riktig detalj målt i ISDM. Det antas at det langt største bidraget til avvikene her er måling av feil detalj. I kolonnene for **ISSD** er det gått til riktig grunnrisskoordinat, målemerket er satt på bakken og høyden lest av.

modeller undersøkt. Et godt resultat betyr at terrenget modelleres likt uavhengig av hvilken modell matchinga er gjort i. I området med størst modelloverlapp (Alfa-Beta) er gjennomsnittlig høydeforskjell på omlag fire meter med et standardavvik på omlag to meter. Dette er godt innenfor det teoretiske estimatet basert på flyhøyde, som gitt ovenfor.

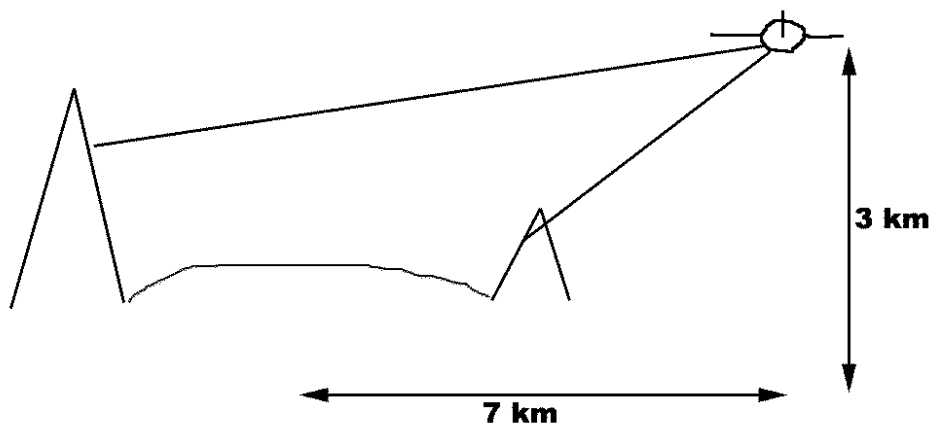
Kontrollpunkt: I S90-prosjektet ble det importert og brukt ytre orienteringsparametre fra en større blokkutjevning. Det betyr at bildene var ferdig orientert, og at det ikke var nødvendig med gittpunkter på bakken. Måling av gittpunkt i området vil gi en pekepinn på hvor gode YO-parameterne er. To strategier ble brukt, en der punktene ble målt i ISDM, og en der grunnrisskoordinatene ble oppsøkt i ISSD og høyden lest av. Det viste seg at usikkerheten i defineringen av punkt ved den første strategien var for stor til å kunne gi noe bidrag til denne diskusjonen. Den andre strategien påviste ikke at det var store feil i orienteringen.

Et endelig svar på spørsmålet om nøyaktighet er vanskelig å gi, men basert på betraktningene over anslås høydenøyaktighet i modellene til å være mellom to og fire meter. Det er da lagt vekt på det at breen utgjør et rimelig enkelt terreng, og resultatet derfor bør ligge i den bedre delen av skalaen for teoretisk oppnåelig nøyaktighet, og videre tallverdien av de indre motsetningene mellom i matchingsresultatene for tre modeller.

5.1.3 Nøyaktighetsbetraktning S36

S36-bildene var vanskelige å orientere, måling av rammemerker gikk dårlig, og det mangler data for linsefortegning. Et interessant spørsmål å stille seg vil være hvor god nøyaktighet som kan forventes i terrengmodellen basert på disse bildene. Noen tilnærminger til spørsmålet presenteres her:

Teoretisk: Dersom en skal ta utgangspunkt i betraktningene rundt høydenøyaktighet som funksjon av flyhøyde må en ta hensyn til at 1936-bildene er tatt på skrå. For å komme fram til tilsvarende tall beregnes avstanden fra en kameraposisjon til et typisk punkt midt på breen slik: $\sqrt{(x_t - x_b)^2 + (y_t - y_b)^2 + (z_t - z_b)^2}$, der $(x, y, z)_t$ er koordinater for et punkt omtrent midt på breen, og $(x, y, z)_b$ er koordinater for kameraet. Beregnet "flyhøyde" blir på denne måten ~7000 meter, og bildemålestokk omtrent 1:30 000. Regner en høydenøyaktighet som 0.06-0.90 ‰ av flyhøyde, gir tallene over potensiell høydenøyaktighet på 0.4-6.3 meter. Avstand mellom projeksjonssentrene er omlag 1800 meter, og avstand til ter-



Figur 5.1: Skisse av geometrien i opptakene av S36-bildene. Siden bildene er tatt på skrå blir avstanden fra flyet til breen riktigere å bruke i betraktningen av teoretisk oppnåelig nøyaktighet enn flyhøyden over bakken.

renget omlag 7000 meter. Regner vi $12\mu\text{m}$ målenøyaktighet i bildet får etter avsnitt 2.1.8 høydenøyaktighet $m_h = 30\,000 \times \frac{7000}{1800} \times 0.012 \approx 1.4\text{meter}$. Å snakke om høydenøyaktighet på denne måten blir imidlertid noe misvisende. I og med at bildene er tatt på skrå blir z i modellen tilsvarende øst i terrenget, y blir nord i terrenget og x blir høyde. Dette illustreres også i figur 5.1.

Sammenlikning med S90: Det er å vente at S90-modellene vil gi vesentlig bedre resultater enn S36-modellene. En sammenlikning av resultatene for S36 mot S90 vil derfor gi en god pekepinn på nøyaktigheten i S36. I ISSD ble terrengpunktene som ble digitalisert fra S36 vist i en S90-modell. Det ble undersøkt et område på en fjellknaus rett sør for Sagabreen (se kart i figur 3.1). Det viste seg at høyden på knausen ble beregnet ~ 20 meter for lavt, ~ 100 meter for langt vest og ~ 150 meter for langt nord. Målinger på østsiden av breen, ved Kamvatnet ga bedre resultater. Høydeavvikene som ble kontrollert der lå alle innenfor 20 meter, de fleste ned på 10 meter. Det ble ikke kontrollert i grunnriss. Undersøkte høyder lå i all hovedsak lavere enn S90.

Tidligere publiserte resultater: I Etzelmüller & Sollid (1996) refereres det til terrenngmodeller fremstilt over Erikbreen nord på Spitsbergen basert på skråbilder fra 1936. Arbeidet ble gjort av Cecilie Rolstad, da tilknyttet Norsk Polarinstitut, og det ble rapportert om nøyaktighet bedre enn to meter.

De dårlige orienteringsresultatene gjør at de teoretiske nøyaktighetsanslagene neppe er oppnåelige. Mest vekt bør derfor legges på sammenlikning med S90, som kan regnes som fasit i ikke brede områder i dette tilfellet. Høydenøyaktighet i S36 anslås derfor til å være i størrelsesorden 15 meter over Fridtjovbreen. At grunnrissnøyaktighet tilsynelatende er vesentlig dårligere er ikke så vesentlig over breen, da denne er relativt flat i stråleretningen (se også figur 5.1).

Det observerte nøyaktighetsnivået er skuffende, spesielt tatt i betraktning resultatene som er rapportert i Etzelmüller & Sollid (1996).

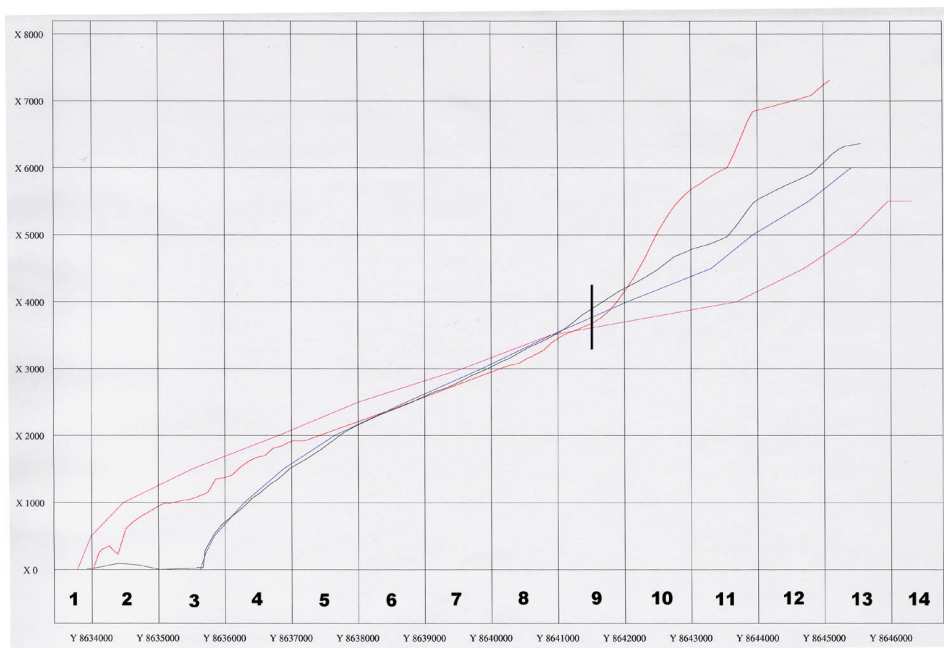
5.2 Overflateendring

To langsgående profiler fra nederst til øverst på breen for de to tidspunktene er vist i figur 5.2. Beliggenheten for profilene er vist i figur 5.4. I tabell 5.2 vises også utdrag av høydeinformasjonen. Profilene fra fotogrammetriresultatene er fremstilt ved "slice" i terrengmodellene med programmet Surfer. Profilene for kartene kommer fra digitalisering av koter med VG-Kart som beskrevet i avsnitt 4.4.

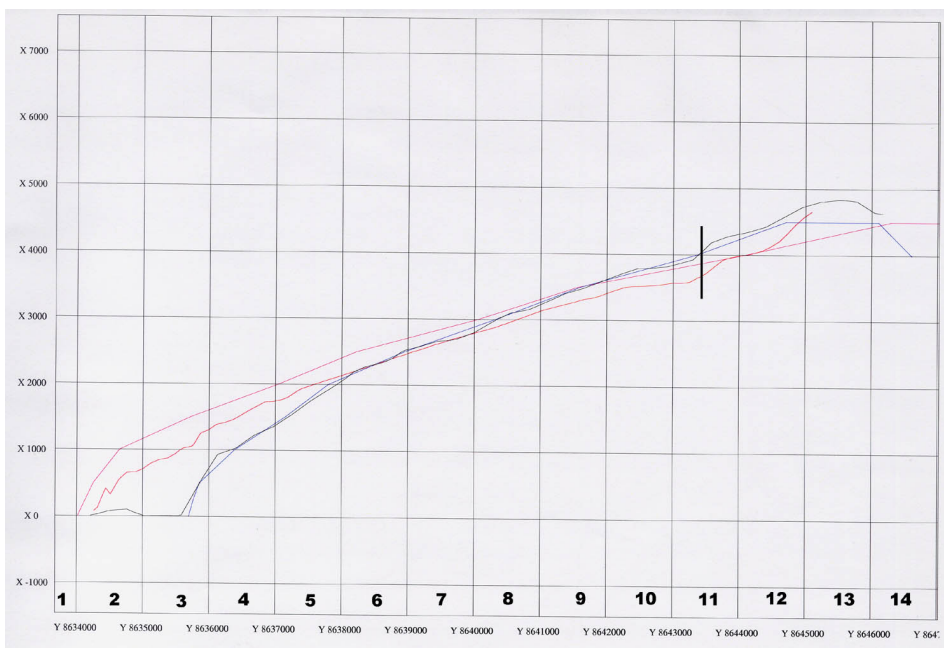
Før en diskuterer de presenterte profilene bør det fastslås at det er noen åpenbare anomalier i fotogrammetriresultatene fra S36. I det vestre profilet er høydene over 400 moh. en slik anomali. Høydedataene her kommer fra automatisk matching, det er dårlig kontrast og programmet har åpenbart ikke klart jobben. Det var imidlertid så dårlig kontrast i området at det ikke syntes formålstjenelig å digitalisere punkt manuelt der heller, og (de feilaktige) resultatene fra matchinga presenteres derfor mest som en advarsel om hvordan det kan gå hvis man uten forbehold stoler på teknologien. Ledwith & Lundén (2001) beskriver en tilsvarende høydeanomali over Blåmannsisen på fastlandet. Fotogrammetri som metode for høydekartlegging har sine begrensninger der det er dårlig kontrast.

Matchinga i S90 og kartet fra 1990 følger hverandre godt i det østre profilet og i nedre halvdel av det vestre. I øvre deler av det vestre profilet skiller det imidlertid i størrelsesorden 50 meter. Her er det dårlig kontrast, så det er ikke uten videre lett å fastslå om kartet eller terrengmodellen er "riktig". En antagelse som kan ha noe for seg er at en profesjonell kartkonstruktør med erfaring fra kartlegging i polare strøk kan ha lykkes bedre med terrengmodelleringen enn den automatiserte matchinga, men det foreligger ikke data som kan avgjøre spørsmålet.

For terrengmodellen fra S36 og kartet basert på 36-bildene skiller det noen

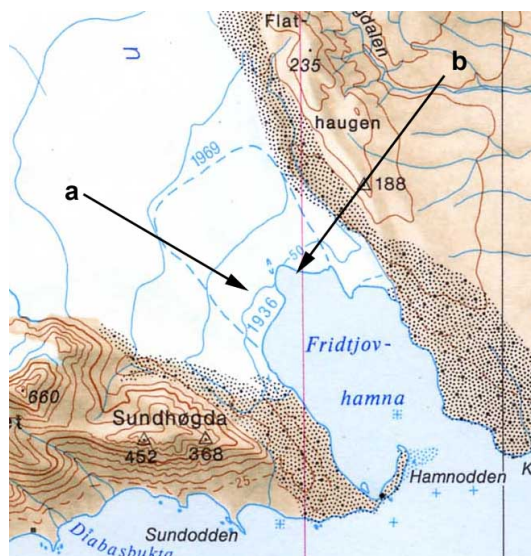


(a) Vestre profil, snølinja går omtrent ved N 8641400.



(b) Østre profil, snølinja går omtrent ved N 8643400

Figur 5.2: Lengdeprofil langs senterlinja av Fridtjovbreen. Vannrett akse er nordkoordinater i UTM 33N ED-50, og loddrett akse er høyde i desimeter. Rosa linje er digitalisert fra kartet fra 1936, blå linje er digitalisert fra kartet fra 1990, rød linje er fra S36 og svart linje er fra S90. Snølinja er markert med en svart vertikal strek. Over snølinja (lenger nord) er fotogrammetriresultatene mer usikre, som diskutert i teksten. Beliggenhet av profil- og snølinjene er vist i figur 5.4.



Figur 5.3: Brefronten i 1936. (a) 50 moh. kote og (b) bukt i isen. Utsnitt fra kart B10 utg 1982 © Norsk Polarinstitut.

titalls meter i begge profilene, og profilene fra kartet ligger konsistent over modellen. Når en ser på formen, virker profilet fra kartet veldig bratt i fronten. Når en ser på plasseringen av kotene i brefronten skulle det tyde på en femti meter høy brefront, noe som ikke er vanlig og neppe er riktig (se figur 5.3. Profilet som er tatt fra terrenngmodellen ser riktigere ut i fronten, hvis en ser bort fra det lille "hakket" noen hundre meter innpå.

Brefronten modelleres fra kartet også til å ligge omlag 500 meter lenger ut i fjorden enn terrenngmodellen skulle tilsi. Dette kan komme av:

- Større feil i orienteringen enn antatt
- Feil i digitalisering fra kartet
- Feil i kartet

Brefronten dekkes i S36 av modellen 1690-1689, og sammenlikning av terrenngpunktene tatt fra denne modellen indikerer ikke vesentlig dårligere orienteringsresultat for denne modellen sammenliknet med de andre S36-modellene. Grunnrissfeilen i digitaliseringen av kartet er kontrollert, og er ikke så stor som 500 meter. I brefronten i 1936 er det et område der isen går en del innover, se figur 5.3, og det er mulig at "slicinga" har truffet inni denne for fotogrammetriresultatet og ikke kartet. Det virker imidlertid rart at begge profilene skulle være utsatt for dette.

På den ene side virker det lite sannsynlig at kartet skal være 500 meter feil, og at feilen derved ligger i den nye terrenngmodellen. På den annen side

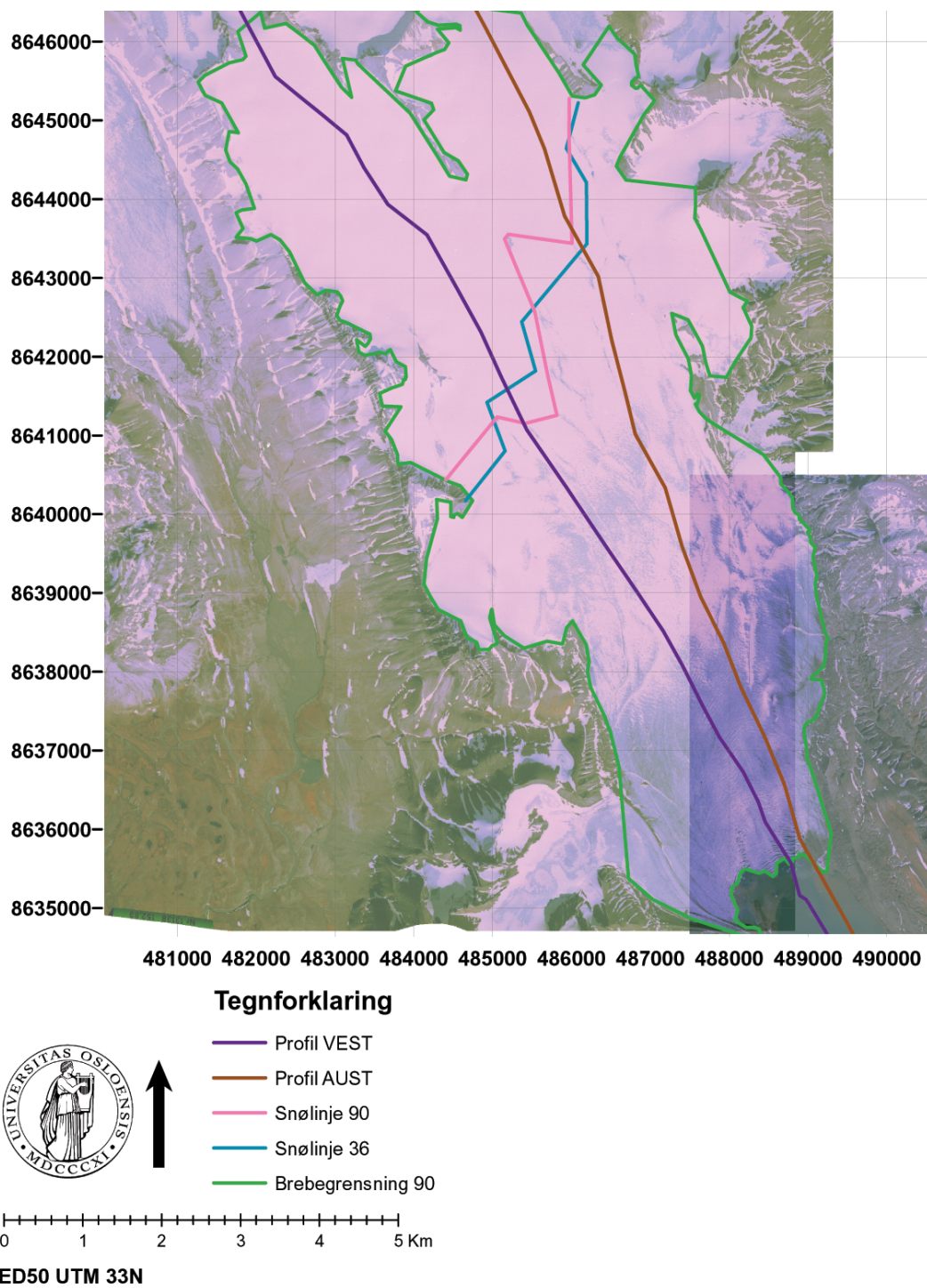
tyder det generaliserte kotebildet over breen, og spesielt i fronten, på at konstruktøren, vel vitende om breens skiftende natur, kan ha tatt seg noen friheter i konstruksjonen.

Når det gjelder høydene innover breen er spørsmålet mer åpent, fordi høydeforskjellene mer er av størrelsesorden det som er antatt usikkerhet i terrengmodellen. Det at kartet ligger så konsistent over peker i retning av en systematisk feil. For eksempel vil en orienteringsfeil på $\sim 0.1^\circ$ kunne produsere en slik høydefeil. Undersøkelsene det er gjort rede for i avsnitt 5.1.3 indikerer at terrengmodellen ligger for lavt.

Problemet reduseres til at det foreligger to beregninger av brefrontens plassering i 1936; en basert på digital fotogrammetri og modellen 1690–1689, og en basert på analog fotogrammetri der det i tillegg mest trolig har vært dekning av fronten også på stripa som er fløyet langs kysten (bildene 2570–2580) og muligens stripa fløyet innover fjorden (1910–1930), se bildeplott i figur 3.4. Gittpunktgrunnlaget har i hovedtrekk vært det samme. Det foreligger ikke data til å trekke noen endelig konklusjon i forhold til hvilken beregning som er mest riktig, men det virker rimelig å anta at begge beregningene er beheftet med feil.

		Vest				Aust			
		VK36	VS36	VK90	VS90	AK36	AS36	AK90	AS90
Omr.	Areal ~m ²	Rosa	Rød	Blå	Svart	Rosa	Rød	Blå	Svart
14	688 144	—	—	—	—	—	—	—	—
13	4 312 948	550	—	600	640	443	—	450	467
12	5 012 546	470	724	567	607	421	459	450	474
11	5 527 298	416	686	505	552	399	399	424	432
10	5 021 831	388	568	438	478	379	357	390	384
9	3 890 756	370	416	398	420	359	341	361	362
8	4 304 129	352	345	354	353	331	314	327	323
7	4 901 965	316	295	307	303	298	279	289	280
6	4 029 400	282	257	262	258	271	248	253	254
5	2 709 229	250	220	215	215	240	214	209	205
4	2 484 710	208	190	158	152	198	174	141	137
3	2 813 739	169	137	68	71	160	131	65	73
2	2 171 209	120	100	0	0	116	71	0	0
1	825 569	50	0	0	0	0	0	0	0
sum	48 693 473								

Tabell 5.2: Fridtjovbreen er delt opp i 14 områder (hver hele kilometer fra N 8 633 000), og kolonnen areal (målt i m²) betegner områdenes areal. Summen av arealkolonnen utgjør breens totale areal. Breoverflatas høyde over havet (målt i meter) i øvre del av hvert område dekker resten av tabellen. Vest og aust betegner profillinjene vist i figur 5.4. For hvert profil er det fire kilder til høydeinformasjon, og fargene henspeiler på fargen på profillinjene. Kart 1936 (K36, rosa), fotogrammetri S36 (S36, rød), kart 1990 (K90 blå) og fotogrammetri S90 (S90, svart). V og A betegner henholdsvis vestre og østre profil.



Figur 5.4: Ovenfor snølinjene er det dårlig kontrast i bildene, og derfor upålitelige resultater i denne oppgaven. Profillinjene viser hvor profilene i figur 5.2 er tatt.

Omr.	Rosa og blå Kart		Rød og svart Fotogrammetri		rød og rosa 1936		svart og blå 1990	
	Vol.	Sum	Vol.	Sum	Vol.	Sum	Vol.	Sum
Profil vest								
14	—		—		—		—	
13	0.2437		1.6325		1.7338		0.1423	
12	0.2907		0.2331		0.2306		0.2932	
11	0.2625		0.5306		0.4035		0.3897	
10	0.1456		0.5273		0.4269		0.2461	
9	0.1206	1.0632	0.2685	(3.1920)	0.1731	(2.9679)	0.2159	
8	0.1786		0.2152		0.1851		0.2088	1.4960
7	0.1936		0.2034		0.1765		0.2206	
6	0.1592		0.1612		0.1390		0.1813	
5	0.1341		0.1260		0.0975		0.1626	
4	0.1603		0.1665		0.1143		0.2124	
3	0.1646		0.1519		0.1210		0.1956	
2	0.0760		0.1086		0.1846		0.0000	
1	0.0206	-1.0870	0.0000	-1.1327	0.0206	-1.0386	0.0000	-0.9725
Profil aust								
14	—		—		—		—	
13	0.0474		1.0049		1.0373		0.0151	
12	0.1203		0.2556		0.2055	1.2428	0.1704	
11	0.1492		0.2487		0.1713		0.2266	
10	0.1230		0.0954		0.0904		0.1281	
9	0.1206	-0.5606	0.1284		0.1070		0.1420	
8	0.1528		0.1679	1.9010	0.1463		0.1743	0.8505
7	0.1544		0.1397		0.1422		0.1520	
6	0.1511		0.1672		0.1310		0.1874	
5	0.1490		0.1463		0.1111		0.1842	
4	0.1416		0.1329		0.1006		0.1739	
3	0.1533		0.1871		0.1463		0.1941	
2	0.1259		0.0771		0.2030		0.0000	
1	0.0000	-1.0282	0.0000	-0.8503	0.0000	-1.3492	0.0000	-0.8916

Tabell 5.3: Beregnet isvolum for profilene vist i figur 5.2. Volumet er beregnet som $V = A \times h$, der A er arealet av hvert område som angitt i tabell 5.2 og h er den gjennomsnittlige høyden i området, også fra tabell 5.2. Alle volum er oppgitt i km³. I sum-kolonnene er det oppsummert positive og negative bidrag. Fargene henspiller på fargene som er brukt i illustrasjonen av profilene i figur 5.2, og område 1 er nederst på breen som vist i figur 5.2. De volumene som er påvirket av høydeanomalien i terrengmodellen fra S36 som er diskutert i avsnitt 5.2 er satt med parentes.

5.3 Volumbetraktning

Å betrakte forskjellene volum vil i denne oppgaven være interessant fra to utgangspunkt:

Glasiologisk Det er interessant å kvantifisere hvor mye is som har bygget seg opp i perioden, og hvor oppbyggingen har skjedd.

Pålitelighet av resultatene Det er flere kilder til høydeinformasjon. Forskjeller i beregnet isvolum fra kilde til kilde gir en pekepinn på nøyaktighetsnivået i volumberegningen.

Det gjøres her ikke noe forsøk på å skille mellom snø og is, noe som på grunn av forskjell i tetthet vil være nødvendig for å beregne vannekvivalenter. Volumendring regnes heretter som endring i isvolum, selv om det ville vært mest korrekt å skille mellom snø og is. Det er ikke samlet inn data for å gjennomføre et slikt skille.

En tabell over beregnede volum presenteres i tabell 5.3. Volumene er beregnet som $V = A \times h$, der A er arealet av hvert område som angitt i tabell 5.2 og h er den gjennomsnittlige høyden i området, også fra tabell 5.2. En slik volumberegning legger til grunn uniform høydeendring innen hvert areal. Med såvidt store arealer som er brukt her, kan denne antakelsen være tvilsom. Dette illustreres av forskjellen i beregnet volum for øvre del av breen avhengig om en bruker høydeverdiene fra østre eller vestre profil.

Når en har to digitale terrengmodeller, kan en også bruke GIS-programvare til å beregne volumforskjeller mellom modellene. Dette er ikke gjort i forbindelse med denne oppgaven, i hovedsak av tidshensyn. Det kan videre argumenteres for at valgt metode for volumberegning i større grad synliggjør, spesielt for lesere med liten kjennskap til volumberegninger, sammenhengen mellom høydeforskjell mellom terrengmodellene og beregnet volum. Men når en har digitale terrengmodeller over området burde en naturlig og interessant utvidelse være å se nærmere på volumendringer for mindre arealer. På denne måten ville en kunne se nærmere på hvor endringene har skjedd, og mer detaljert studere oppbyggingen til surgen i 1995.

Før en diskuterer de beregnede volumene nærmere bør det påpekes at ettersom volumene er beregnet på grunnlag av høydene bestemt fra profilene i figur 5.2 vil diskusjonen i avsnitt 5.2 om høydefeil, spesielt over snølinja, også gjelde her.

Fra tabellene over høyde- og volumendring kan det se ut som:

- Breen i øvre deler er delt i to bassenger (vest og øst). Hovedtyngden av høyde/volumendring har skjedd i det vestre bassenget.
- Breen har lagt på seg opptil 100 meter i det vestre og 20 meter i det østre bassenget.
- Hoveddelen av akkumuleringen av masse er skjedd høyere enn 400 moh. Det er kun det vestre bassenget som har høyder vesentlig over 400 moh.
- Nedsmeltingen i nedre deler av breen er konsistent i de to profilene.

Profillinjene for 1936 og 1990 i figur 5.2 krysser hverandre omtrent ved 350 moh. ELA for Fridtjovbreen er i Hagen et al. (1993) oppgitt til 260 moh, med en usikkerhet i størrelsesorden 25–50 moh. At ELA ligger markert lavere enn krysningpunktet for profillinjene tyder på at breen har hatt bevegelse i perioden, og ikke ligget passivt stille.

Volumbetraktningene ovenfor har sitt utspring i høydedata for to tidspunkter. Det foreligger ikke undersøkelser av brebevegelse i perioden, og det er derfor ikke grunnlag for å si noe om totalt akkumulert isvolum i perioden.

6 Konklusjon

I arbeidet med denne oppgaven er det konstruert terrengmodeller over Fridtjovbreen på Svalbard ved hjelp av digital fotogrammetri. Det er brukt flybilder fra 1936 (skråbilder) og 1990 (vertikalbilder). På bakgrunn av oppgavens resultater kan det sammenfattes følgende konklusjon.

- Skråbildene fra 1936 har vist seg å være meget krevende å bruke i en moderne fotogrammetrisk arbeidsflyt. Vanskelighetene har kommet dels av problemer med teknisk kvalitet på bildene (kontrast, krymping, fortegning), og dels av vanskeligheten med å identifisere gittpunkt i bildene.
- Det var ikke mulig med de foreliggende bildene, ved bruk av tilleggsparametre i blokkutjevning å komme fram til data for linsefortegning og hovedpunktsfeil for kameraet som tok S36-bildene. Mye av grunnen til dette antas å ligge i dårlig gittpunktgrunnlag.
- Fotogrammetrisk kartlegging er meget vanskelig i snødekte områder, på grunn av dårlig kontrast. På isbreer vil det ofte være mulig å oppnå gode resultater med matching i områder med bar is, men resultatene kan bli meget usikre i breens øvre deler.
- Det er laget terrengmodeller som viser Fridtjovbreens geometriske endringer i oppbyggingen mot et surge. Det vises at breen har bygget seg opp omlag 100 meter i de øvre vestre deler, og smeltet vekk i størrelsesorden to kilometer i fronten. Det er vist å være godt samsvar mellom kartet og terrengmodellene for 1990-bildene. Tilsvarende samsvar er det ikke for kart og terrengmodell fra 1936-bildene, men det kan ikke trekkes en endelig konklusjon på hvor feilen ligger.
- Resultatene er ikke egnet til å si noe om klimautvikling i perioden fordi Fridtjovbreen er av surge-type. Endringer i klimaet påvirker lengden på den passive fasen til slike breer, men det foreligger ikke materiale som kan påvise en slik endring.

Bibliografi

- Ackermann, F. (1996), 'Some considerations about feature matching for the automatic generation of digital elevation models', INPHO GmbH, Stuttgart, http://phot.epfl.ch/workshop/wks96/art3_4.html (besøkt 21. oktober 2005).
- Andersen, Ø. (1985), *Fotogrammetri grunnkurs, bind 1*, Landbruksbokhandelen.
- Andersen, Ø. (2002), Ytre orientering. Nye muligheter og gamle fallgruver. Notat.
- Andersen, Ø. (2003), *Orientering i stereoinstrument*, Institutt for kartfag, NLH.
- Andersen, Ø., Blankenberg, L. E. & Maalen, I. M. (1994), *Nye bilde tall terreng*, Ås-NLH.
- Andersen, Ø., Brånå, G. & Lønnum, S. E. (1991), *Fotogrammetri*, Yrkesopplæring ans.
- Andersen, Ø. & Johansen, I. (1998), *En innføring i digital fotogrammetri*, Ås-NLH.
- Andreassen, L. M. (1999), 'Comparing traditional mass balance measurements with long-term volume change extracted from topographical maps: A case study of Storbreen glacier in Jotunheimen, Norway, for the period 1940-1997', *Geografiska Annaler* **81 A**, 467-476.
- Andreassen, L. M., Elvehøy, H. & Kjølmoen, B. (2002), 'Using aerial photography to study glacier changes in Norway', *Annals of Glaciology* **34**.
- Arctic Pilot, Bd. 7* (1990), Den Norske Los: The Norwegian Hydrographic Service and The Norwegian Polar Institute.
- Arneberg, J. (1924), 'Fotogrammetriens utvikling, dens arbeidsmetoder og resultater. En oversikt', *Teknisk Ukeblad*.
- Barstad, B. (1998), 'Datafangst for terrengmodellering med digital fotogrammetri', Foredrag på Forum for fotogrammetri og fjernmåling.

- Barstad, B. (2002), 'Høgdekartlegging med laserskanning frå fly', Foredrag på Kartdagane, Oslo.
- Clarke, T. & Fryer, J. (1998), 'The development of camera calibration methods and models', *Photogrammetric Record* **16**(91), 51-66.
- Dowdeswell, J., Hagen, J. O., Björnsson, H., Glazovsky, A. F., Harrison, W. D., Holmlund, P., Jania, Jacekand Koerner, R. M., Lefauconnier, B., Ommaney, C. S. L. & Thomas, R. H. (1997), 'The mass balance of circum-arctic glaciers and recent climate change', *Quaternary Research* **48**.
- Dowdeswell, J., R., H., Hagen, J. O. & Hamilton, G. S. (1995), 'Mass balance change as a control of glacier surges in Svalbard, Norwegian High Arctic', *Geophysical Research Letters* **22**(21), 2909-2912.
- Ebner, H. (1976), 'Self calibrating block adjustment', *Bildmessung und Luftbildwesen* **44**, 128-139.
- EOS (2003), *PhotoModeler pro 5.0 Users Manual*.
- Etzelmüller, B. & Sollid, J. L. (1996), 'Long-term mass balance of selected polythermal glaciers on Spitsbergen, Svalbard', *Norsk Geografisk Tidsskrift* **50**, 55-66.
- Gens, R. & van Genderen, J. (1996), 'SAR Interferometry — issues, techniques, applications', *International Journal Remote Sensing* **17**(10), 1803-1835.
- Glasser, N. F., Huddart, D. & Bennett, M. R. (1998), 'Ice marginal characteristics of Fridtjovbreen (Svalbard) during its recent surge', *Polar Research* **17**(1), 93-100.
- Hagen, J. O., Liestøl, O., Roland, E. & Jørgensen, T. (1993), *Glacier atlas of Svalbard and Jan Mayen*, Meddelelser nr. 129, Norsk Polarinstitut.
- Harrison, W. D. & Post, A. S. (2003), 'How much do we really know about glacier surging?', *Annals of Glaciology* **36**.
- Hinz, A., Dörstel, C. & Heier, H. (2000), 'Digital Modular Camera: System concept and data processing workflow', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **XXXII**.
- Jiskoot, H., Murray, T. & Boyle, P. (2000), 'Controls on the distribution of surge-type glaciers in Svalbard', *Journal of Glaciology* **46**, 412-422.

- Kääb, A. (2000), 'Photogrammetric reconstruction of glacier mass balance using a kinematic ice-flow model: a 20 year time series on Grubengletcher, Swiss Alps', *Annals of Glaciology* **31**, 45-52.
- Kääb, A. & Funk, M. (1999), 'Modelling mass balance using photogrammetric and geophysical data: a pilot study at Griesgletcher, Swiss alps', *Journal of Glaciology* **45**(151), 575-583.
- Kääb, A., Haeblerli, W. & Gudmundsson, H. G. (1997), 'Analysing the creep of mountain permafrost using high precision aerial photogrammetry: 25 years of monitoring Gruben rock glacier, Swiss alps', *Permafrost and Periglacial Processes* **8**, 409-426.
- Kiefner, M. & Hahn, M. (2000), 'Image compression versus matching accuracy', *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII*.
- Kotlyakov, V. M., ed. (1985), *Glaciology of Spitsbergen*, Moscow "Nauka", Academy of Sciences of the USSR.
- Kwok, R. & Fahnestock, M. A. (1996), 'Ice sheet motion and topography from radar interferometry', *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **34**(1).
- Lammi, J. & Sarjakoski, T. (1995), 'Image compression by the JPEG algorithm', *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **61**(10), 1261-1266.
- Ledwith, M. & Lundén, B. (2001), 'Digital photogrammetry for air-photo-based construction of digital elevation model over snow covered areas — Blåmannsisen, Norway', *Norsk Geografisk Tidsskrift* **55**, 267-273.
- Liestøl, O. (1969), 'Glacier surges in West Spitsbergen', *Canadian Journal of Earth Sciences* **6**, 895-897.
- Liestøl, O. (2000), *Glaciology*, Unipub forlag.
- Melvold, K. & Hagen, J. O. (1998), 'Evolution of a surge-type glacier in its quiescent phase: Kongsvegen, Spitsbergen, 1964-95', *Journal of Glaciology* **44**(147), 394-404.
- Mikhail, E. M., Bethel, J. S. & McGlone, C. J. (2001), *Introduction to modern photogrammetry*, John Wiley & sons, Inc.
- Moffit, F. H. & Mikhail, E. M. (1980), *Photogrammetry*, Harper & Row publishers, New York.

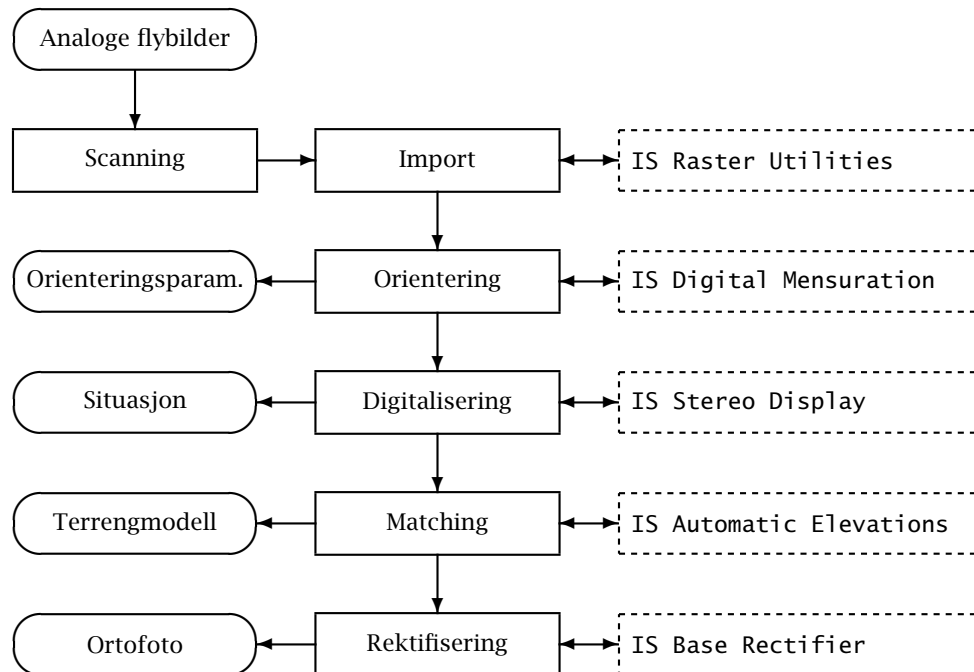
- Murray, T., Luckman, A., Strozzi, T. & Nuttall, A. M. (2003), 'The initiation of glacier surging at Fridtjovbreen, Svalbard', *Annals of Glaciology* **36**(7), 110-116.
- Nilsen, B. (1997), 'Nøyaktighet ved automatisk generering av digitale terrengmodeller', Foredrag på Fotogrammetridagene.
- Ny brennviddetabell for planigrafen* (1950), (ikke publisert) Norsk Polarinstitut.
- Paterson, W. (1994), *The physics of glaciers*, 3 edn, Oxford.
- The Place-names of Svalbard* (1991), Norsk Polarinstitut, skrifter nr 80 og 112.
- ZI (2004), *ImageStation Automatic Elevations (ISAE) User's guide*.
- Østrem, G. & Haakensen, N. (1999), 'Map comparison or traditional mass-balance measurements: Which method is better?', *Geografiska Annaler* **81A**(4), 703-711.

A Dataprogrammer

I arbeidet med denne oppgaven er følgende programvare brukt:

A.1 ImageStation

ImageStation levert av Z(I Imaging er programvaren på dfa'en som er brukt for å lage terrengmodellene i oppgaven. ImageStation består av flere forskjellige programmoduler som til sammen tar seg av hele produksjonsløypa fra import av bildene til ferdig terrengmodell. En skjematisk oversikt over arbeidsflyten er vist i figur A.1. Modulene i programsystemet har navn på formen ISXX. IS er akronym for ImageStation, og de to siste bokstavene er akronym for navnet på modulen.



Figur A.1: Arbeidsflyten i prosessen med å fremstille digitale terrengmodeller med ImageStation som er benyttet i arbeidet med denne oppgaven.

A.1.1 ISPM — Photogrammetric Manager

Brukes til å definere grunnleggende parametre som koordinatsystem og måleenheter for prosjektet. Her kan man også importere bilder og bygge opp striper og blokker.

A.1.2 ISRU — Raster Utilities

Består av to moduler; en for å se på bildefilene, altså et rent bildevisningsprogram, og en for å importere bildene. Før bruk i ImageStation må bildene importeres og det må lages bildepyramider, og dette gjøres med ISRU **Many Raw File Converter**.

A.1.3 ISDM — Digital Mensuration

Programmet for orientering og aerotriangulering. Brukt til indre og ytre orientering av bildene.

A.1.4 ISSD — Stereo Display

Program for å vise (ferdig orienterte) stereomodeller. ISSD er i denne oppgaven brukt til å konstruere begrensninger for hvilke områder som skulle matches ("collection boundaries"). Programmet er også brukt til å manuelt digitalisere punkt og linjer.

A.1.5 ISAE — Automatic Elevations

Lager terrengmodeller fra stereomodeller. Programmet matcher mange flere punkt enn antallet punkt som kommer med i den endelige terrengmodellen. Gjennom en filtreringsprosess hevder produsenten å oppnå nøyaktighet omkring 1/10000 av flyhøyden for gode bilder (ZI 2004). Programmet gjør flere matchinger (i et såkalt mesh) for hvert punkt som kommer med i den endelige terrengmodellen. Når programmet gjør flere matchinger, gir det mulighet til enkle statistiske analyser av matchingsresultatet. Analysene legges ut i loggfiler under kjøringen av programmet. Hvis en huker av for at ISAE skal legge ut terrengmodellen i .dgn-fila, blir høydepunktene lagt på ulike lag i denne. Når .dgn-fila så vises i ISSD/MicroStation vises punktene med forskjellig farge. Punktene får ulik koding ut fra tre kriterier: ok, høy RMS eller få punkt i meshet.

A.2 Surfer

Program for å lage koter og på andre måter visualisere digitale terrengmodeller. Har funksjon for å lage "slice" i terrengmodeller for å kunne presentere profiler.

A.3 VG-land (VG-L)

Landmålingsprogram. Brukt for å beregne rammemerkesentrum og utjevne koordinater for rammemerkeene til 1936-bildene.

A.4 VG-kart (VG-K)

Kartredigeringsprogram. Benyttet til:

- Visning av digitalkart fra SSD over Longyeardalen for å finne kontrollpunkt.
- Editering av linje og punktdata fra ImageStation til presentasjonsformål.

Programmet finnes i versjon for Windows og DOS, og begge er brukt. DOS-versjonen er betydelig mer fleksibel med tanke på formater for import og eksport. Windows-versjonen har et noe enklere brukergrensesnitt for editering og presentasjon.

A.5 ArcGIS

GIS (Geographic Information System). Dette er en større programvarepakke, der programmene arcCatalog (filhåndtering) og arcMAP ble brukt. arcMap har kraftfulle funksjoner for analyser og presentasjon av geografisk informasjon i mange former.

A.6 Photodeler 5.0

Program for nærfotogrammetri. Forsøkt brukt til å beregne kamerakalibrering for 1936-kameraet. Programmet har ikke mulighet for stereomålinger, alle målinger foregår monoskopisk, med de ulempene det fører med seg. Ellers ligger det full blokkutjevningfunksjonalitet i programmet, og det er intuitivt og lett å bruke.

A.7 Felles

felles.for er et lite program skrevet i Fortran av Trond Eiken. Programmet sammenlikner to terrengmodeller på *.tmo-format punkt for punkt og skriver ut punktene og høydeforskjellen mellom dem, og regner ut feilkvadratsum og sigma null.

Praktisk bruk av felles.for i denne oppgaven:

1. Eksportør med Microstation .dgn til .dxf
2. Importer .dxf i VG-K
3. Eksportør med VG-K til .tmo
4. Kjør felles.for på .tmo-filene

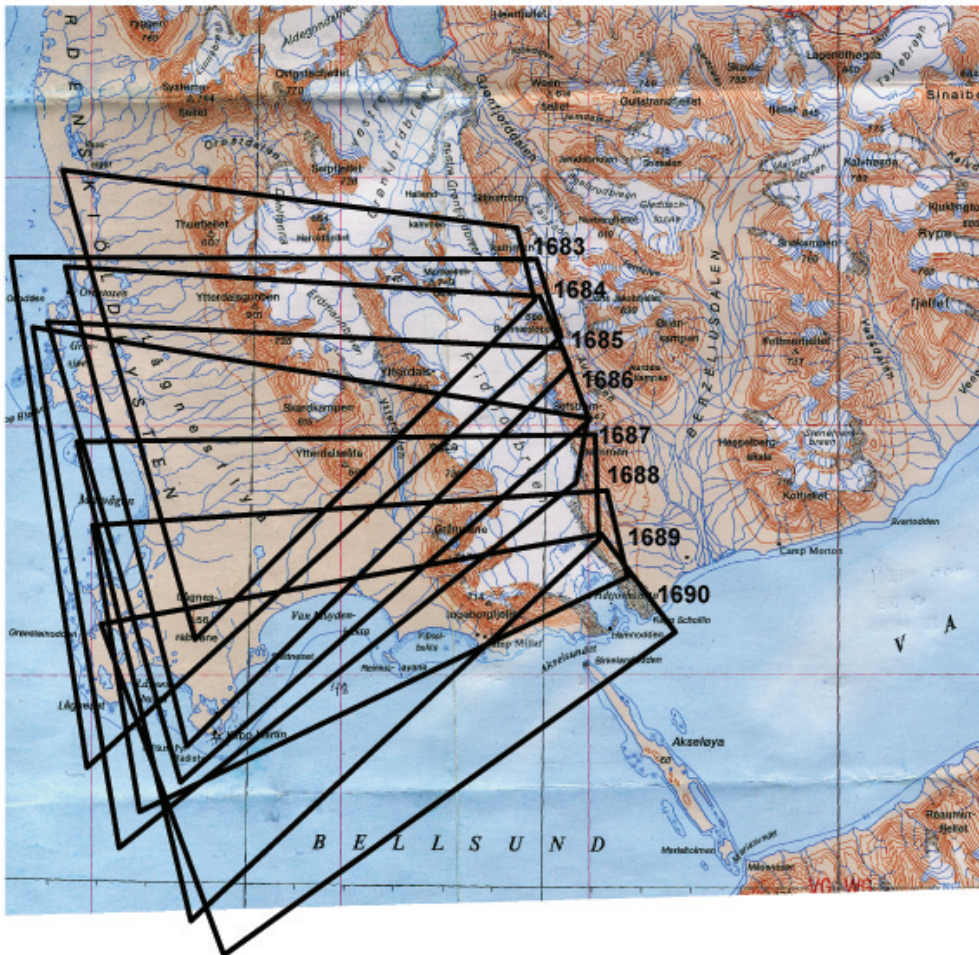
A.8 L^AT_EX

Program for å lage vakre dokumenter. Det er L^AT_EX som er brukt for å skrive denne oppgaven. Kildefilene til L^AT_EX er forberedt med Emacs.

B Dekningsoversikter

Dekningsoversikter og bildeplott for flyfotograferinger av Fridtjovbreen vises her. I tillegg vises bildedekning for S38 Longyearbyen. Alle flybildene tilhører Norsk Polarinstitut.

Dekningsoversikt S36



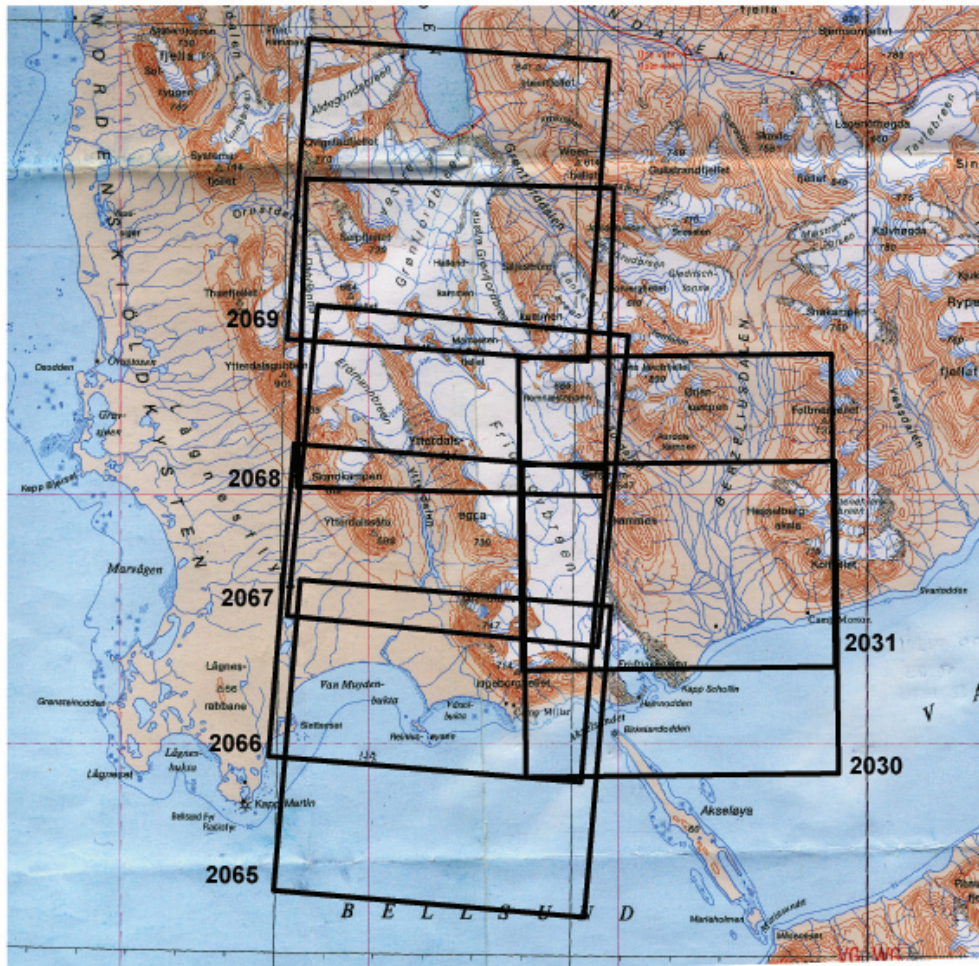
Tegnforklaring

— Dekn S36

0 1 2 3 4 5 Km

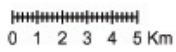
Kartgrunnlag: Turkart Nordenskiöldland 1:200000
(c) Norsk Polarinstitt

Dekningsoversikt S90



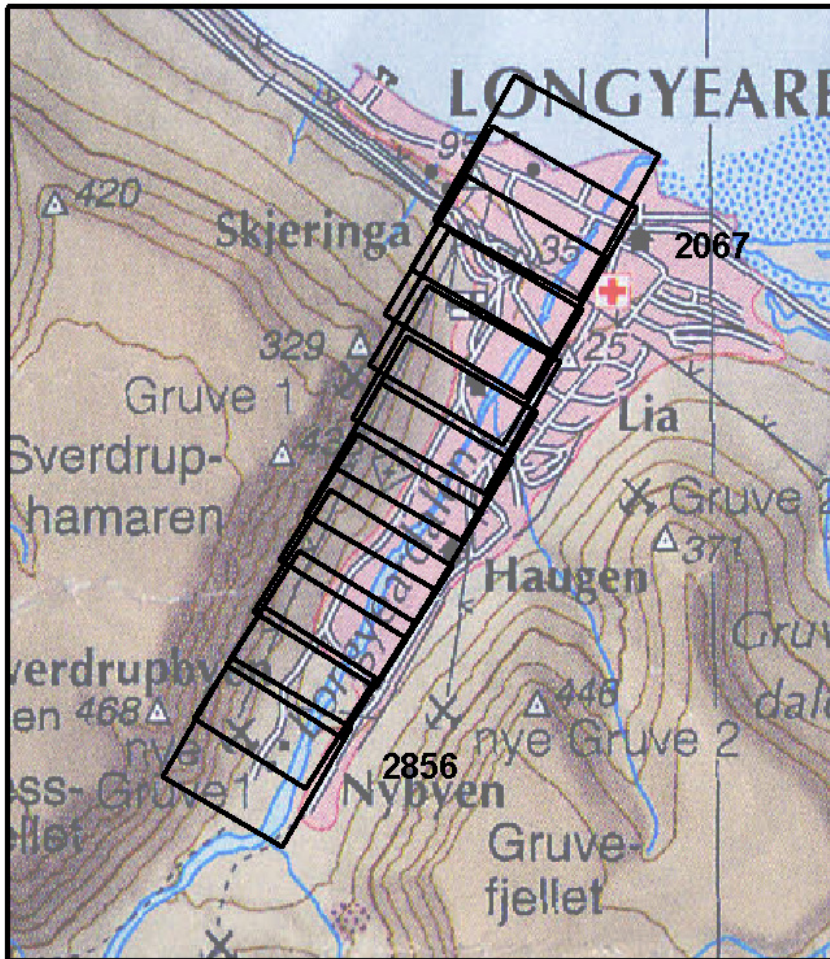
Tegnforklaring

— Dekn S90



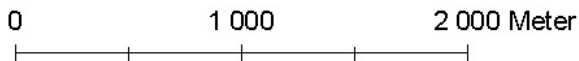
Kartgrunnlag: Turkart Nordenskiöldland 1:200000
(c) Norsk Polarinstittutt

Dekningsoversikt S38



Tegnforklaring

— LYB S38



C Transformasjon pixel – bilde-koordinater

Transformasjon mellom pixel- og bildekoordinater i S36-bildene for å beregne ekstra rammemerker til den indre orienteringa.

Pixel- og bildekoordinater for rammemerke 1-4:

1	4338.500	-211.000	0.000	87.245
2	7782.500	-3709.500	87.315	-0.028
3	4282.000	-7150.500	0.000	-87.283
4	839.000	-3652.500	-87.277	0.028

Pixelkoordinater for rammemerke 5-8:

6	7699.500	-3710.000
7	4283.500	-7066.000
5	4337.000	-289.500
8	923.500	-3653.500

Resultat av helmert transformasjon:

HELMERT TRANSFORMASJON

=====

NB - BERRE 90 GITTE PUNKT VERT NYTTA TIL TRANSFORMASJONEN

TRANSFORMASJONSPARAMETERAR

A= .025145654031 B= .000201543026 CX= -109.123 CY= 91.680

Talet paa overskytande maalingar er 4

Midlare koordinatmiddeilfeil er: .019

Målestokksendringa= .0251465 Dreininga= .5102gon

RESTFEIL I GITTE PUNKT

	PKTNR	VX	VY
1		.014	.003
2		.006	-.002
3		-.008	.022
4		-.012	-.024

Koordmedelf. mx,my .01 .02

TRANSFORMERTE KOORDINATAR

	PKTNR	X	Y
6		85.234	-.059
7		.013	-85.136
5		-.008	85.274
8		-85.164	-.004

D Kamerafil P21

Kamerafila som til slutt ble brukt for bildene som er tatt med kameraet P21. Kamera P21 ble brukt av Norsk Polarinstitutt til flyfotografering på Svalbard i 1936 og 1938 og i Antarktis i 1937 (*Ny brennviddetabell for planigrafen* 1950). Kamerafila er leselig for ImageStation. I den grad det skulle være nødvendig å bruke dataene med andre datasystemer skulle det være kurant å lese ut rammemerkekoordinater og kamerakonstant.

```
begin camera_parameters NPI_36_38_SVAL
  focal_length:          210.71
  ppac:                  0 0
  ppbs:                  0 0
  film_format:          180 180
  fiducial:              1 0 87.24500000000001
  fiducial:              2 87.315 -0.028
  fiducial:              3 0 -87.283
  fiducial:              4 -87.277 0.028
  fiducial:              5 -0.008 85.274
  fiducial:              6 85.234 -0.059
  fiducial:              7 0.013 -85.136
  fiducial:              8 -85.164 -0.004
  lens_distortion_flag: off
  io_required:           yes
  camera_type:           frame
  media_type:            film
  focal_length_calibration_flag: on
  calibrated_focal_length_stddev: 0.03
  ppac_calibration_flag: on
  calibrated_ppac_stddevs: 0.003 0.003
  self_calibration_enabled_params: 0
  antenna_offsets:      0 0 0
end camera_parameters
```

E Gittpunkter SV Nordenskiöld-land

Gittpunktene som ble brukt til orientering av S36 Fridtjovbreen. Punkt 1117-4443 kommer fra Norsk Polarinstitutt's punktliste og er i hovedsak fjelltopper og varder. Punkt 5501-5504 er bestemt fra S90-bildene. Punkt 6000-6003 er høydepunkt i Fridtjovhamna og langs Nordenskiöldkysten. Høydene er satt til 0 moh. for disse punktene, og grunnrisskoordinatene er ikke brukt i utjevninga.

1117	476529.74	8644786.41	900.6	XYZ	YTTERDALSGUBBEN
1118	474744.75	8647726.07	606.8	XYZ	609 THUEFJELLET
1119	479240.68	8647945.85	664.1	XYZ	HAROLDFJELLET
1176	488300.73	8632376.91	451.6	XYZ	SUNDHØGDA
1177	488967.9	8632380.08	368.2	XYZ	SUNDHØGDA
1178	485955.78	8632755.7799	713.5	XYZ	INGEBORGFJELLET
1179	480150.62	8638389.3800	592.6	XYZ	YTTERDALSSÅTA
1180	488480.59	8642635.65	526.74	XYZ	HAMRETOPPEN
1181	486909.77	8645062.6999	559	XYZ	WENDELBOFJELLET
1182	486143.76	8645444.3699	579.06	XYZ	VASSKILTOPPEN
1183	481242.49	8645493.84	683.4	XYZ	CHRISTOPHERSENFJELLET
1184	483614.18	8645717.2899	748.52	XYZ	MARCUSSENFJELLET
1186	486788.24	8646600.4700	691.9	XYZ	SILJESTRØMKAMMEN
1229	489691.19	8640279.94	546.5	Z	SEFSTRØMKAMMEN
1929	473989.74	8632166.58	56.07	XYZ	AUSTRE LÅGLANDSVARDE
4443	475014.76	8627502.3900	4	XYZ	KAPP MARTIN VARDE
5501	486029.4341	8636498.0308	447.020	XYZ	- Densified
5502	484566.6304	8640151.3862	529.309	XYZ	- Densified
5503	483961.7897	8645190.0160	629.717	XYZ	- Densified
5504	484082.7136	8641992.3827	573.919	XYZ	- Densified
6000	470868	8634133	0	Z	levika (fra kart)
6001	489907	8632904	0	Z	fritjovhamna (fra kart)
6002	468579	8640687	0	Z	kapp bjorset (fra kart)
6003	471997	8638145	0	Z	marvagen (fra kart)

F Ytre orienteringselementer S90

Ytre orienteringselementer for S90-bildene oppgitt av Norsk Polarinstitut. Resultatene stammer fra blokkutjevning av ei større blokk over Nordenskiöldland.

Bilde	Øst	Nord	Høyde	φ	ω	κ
s902030	492358.730	8639269.223	8360.993	0.16677	-0.03330	90.66402
s902031	492477.768	8634944.607	8361.650	0.35136	-0.26802	90.69084
s902065	482911.986	8629821.008	8353.642	-0.17226	-0.16353	-94.92876
s902066	482989.904	8635276.161	8356.679	-0.23112	1.65609	-94.71420
s902067	483220.539	8640843.780	8356.808	-0.58185	-2.36736	-95.60115
s902067	483220.539	8640843.780	8356.808	-0.07020	-1.42632	-91.75446
s902069	483329.702	8651893.260	8360.118	-0.26748	1.10034	-94.11570

Tabell F.1: Ytre orienteringselementer for S90-bildene oppgitt av Norsk Polarinstitut. Koordinatene er i ED-50 UTM sone 33N, ortometriske høyder.

G YO-parametre S36 Fridtjovbreen

Resultatfil fra sbsoluttorientering av S36 Fritjovbreen.

Photo-T Parameters and Results for Project S36FRI

PhotoT Triangulation Options

Adjustment Mode : Absolute
Precision Computation : Enabled
Error Detection : Disabled
Camera Calibration : Enabled
Self-Calibration : Enabled
Given EO/GPS : Enabled
Antenna Offsets : Enabled
GPS Shift/Drift Correction : Enabled
INS Shift/Drift Correction : Enabled

Parameters

Parameter	X/Omega	Y/Phi	Z/Kappa	XY
RMS Control	26.886	52.047	12.997	41.423
RMS Check				
RMS Limits	0.001	0.001	0.001	
Max Ground Residual	76.479	174.046	36.218	
Residual Limits	0.001	0.001	0.001	
Mean Std Dev Object	0.000	0.000	0.000	
RMS Photo Position	0.000	0.000	0.000	
RMS Photo Attitude	0.000	0.000	0.000	
Mean Std Dev Photo Position	0.000	0.000	0.000	
Mean Std Dev Photo Attitude	0.000	0.000	0.000	

Key Statistics

Sigma: 95.0 um
Number of iterations: 14
Degrees of Freedom: 248

Solution outside of sigma tolerance.

Solution outside of RMS tolerance.

Solution outside of residual tolerance.

Current Count

```

Control Points Used: 24
Check Points Used: 0
Photos Used: 8
Photos Not Used: 0
Image Points Used: 225

```

Cameras used: (1).

```

Camera Id Lens Distortion
NPI_36_38_SVAL Off

```

Project Settings

```

Linear Units: Meters
Angular Units: Degrees

Atm Refraction: Off
Earth Curvature: Off

```

Exterior Orientation

Strip Id	Photo Id	X	Y	Z	Omega	Phi	Kappa	Status	Given X	Given Y	Given Z	Given
1	1690	495327.003	8636454.241	3006.406	-56.371	52.335	-120.694	Used				
1	1689	494522.376	8638057.649	2990.966	-53.882	55.261	-124.164	Used				
1	1688	493805.642	8639747.249	2972.885	-49.636	57.881	-129.292	Used				
1	1687	493207.302	8641489.493	2987.563	-42.183	60.902	-136.899	Used				
1	1686	492589.828	8643153.084	2989.912	-44.817	61.167	-132.875	Used				
1	1685	491975.797	8644948.531	2984.201	-43.022	61.664	-136.750	Used				
1	1684	491440.069	8646605.605	2972.583	-46.255	59.546	-133.980	Used				
1	1683	490853.758	8648253.515	2972.472	-45.460	61.023	-133.926	Used				

H Presentasjon

I tråd med reglene for Mastergraden skal kandidaten offentlig presentere sin oppgave. Dette ble gjort 21. desember 2005. Lysarkene fra presentasjonen vedlegges her.

Overflategeometriendringer på Fridtjovbreen, Svalbard

Bestemt ved digital fotogrammetri med skråbilder og vertikalbilder

Presentasjon av Masteroppgave

Erik Scavenius
Institutt for Geofag



UNIVERSITETET I OSLO
DET MATEMATISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

Om oppgava:

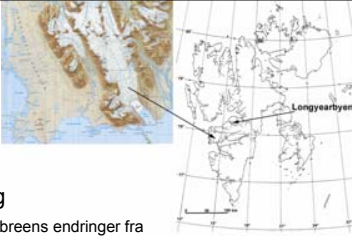
- Masteroppgave i Geofag
- Studieretning Naturgeografi, Geomatikk
- 60 studiepoeng

Veiledere:

- Trond Eiken, Senioring. Inst Geofag
- Jon Ove Hagen, Prof. Inst Geofag


Innhold

- Fridtjovbreen
- Fotogrammetri
- Gjennomføring
- Resultater
- Konklusjon






Problemstilling

- Beskrive Fridtjovbrens endringer fra 1936 til 1990
- Digital fotogrammetri
 - Bruk av gamle (skrå)bilder
 - Kamerakalibrering
 - Matching



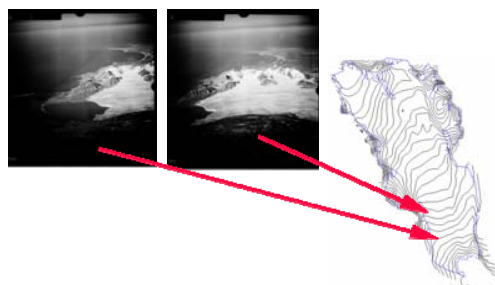
Fridtjovbreen

- Dalbre, 48.7 km², 11 km lang
- Surge-type
 - Stille fase
 - 100+ år
 - Oppbygging
 - Aktiv fase
 - 1-3 år
 - Framstøt, drenering av øvre deler
 - Vanlig på Svalbard
 - Surge-fremstøt ikke klimatisk styrt
- Surgefremstøt i 1858 og 1995

Fotogrammetri

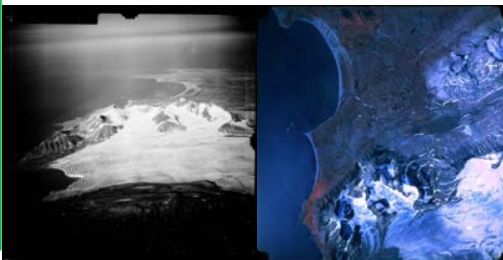
- Faget, vitenskapen og teknikken som brukes når en med bilder observerer og bestemmer egenskaper som beliggenhet, form, størrelse og identitet for avbildet terreng eller gjenstand (Ø. Andersen)



Arbeidsflyt

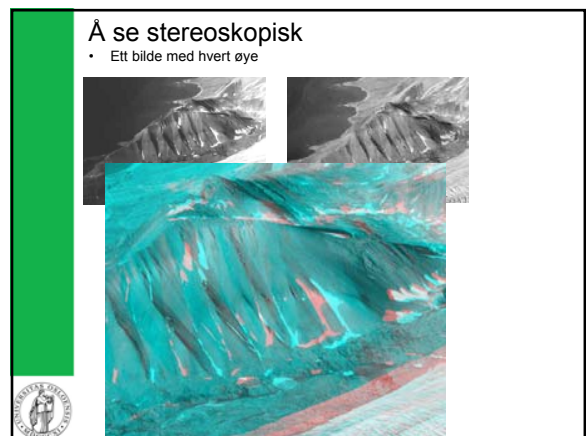
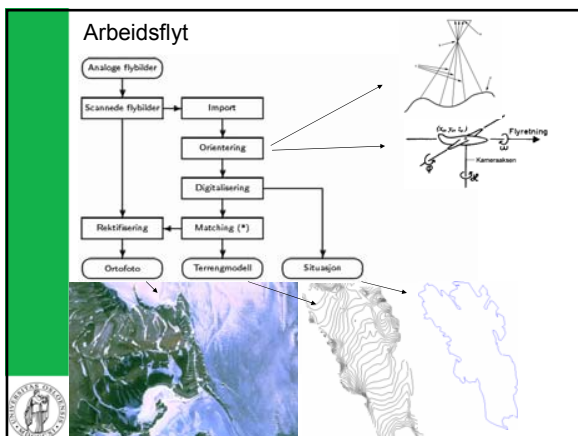
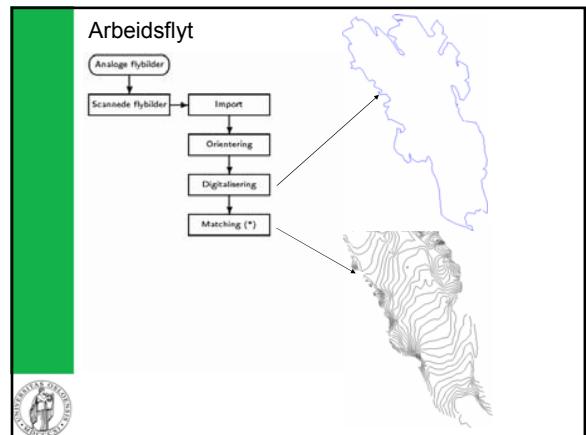
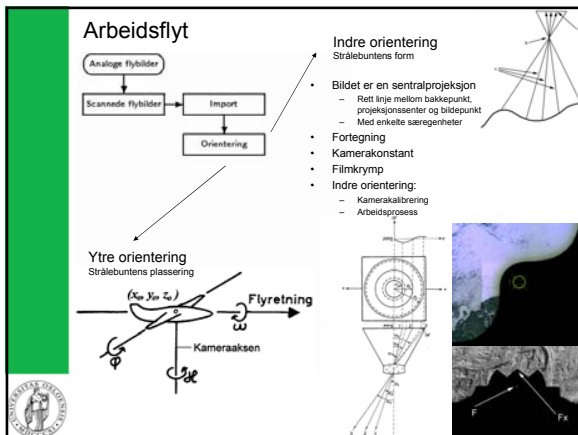
```

  Annlage flybilder
  ↓
  Scannede flybilder
  
```



S36 1689 S90 2066

Skråbilde, pankromatisk Vertikalbilde, NIR

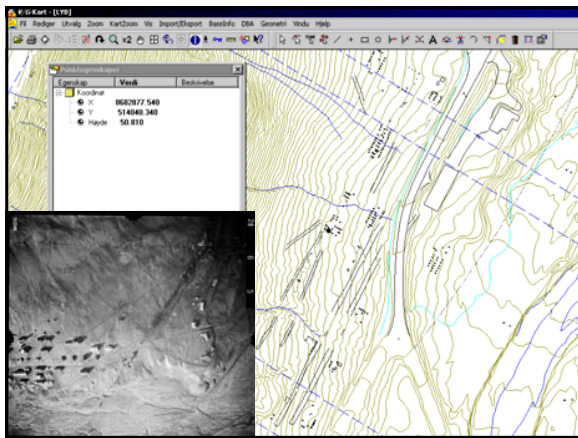


Stereoinstrument

- Autograf
 - Fysiske bilder
 - Stero ved ett øye på hvert okular
 - Mekanisk orientering
 - Fysisk kontakt mellom instrumentet og pennen som tegner kartet
 - Fortida...
- DFA
 - Digital Fotogrammetrisk Arbeidsstasjon
 - Stero ved separasjon av bilder
 - Digitale bilder, digital/numerisk beregning (orientering, konstruksjon)
 - Automatisert arbeidsflyt, digitale kart
 - Framtida....

Gjennomføring

- Forsøk kalibrering P21
 - Vertikalbilder fra Longyeardalen
- Orientering S36
- Terrengmodell S36
- Orientering S90
- Terrengmodell S90
- Høyde, areal og volum



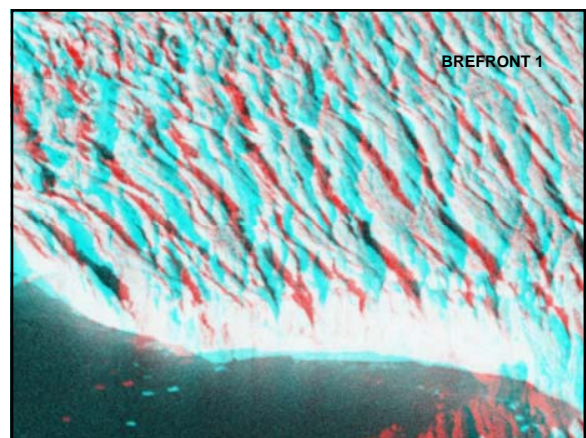
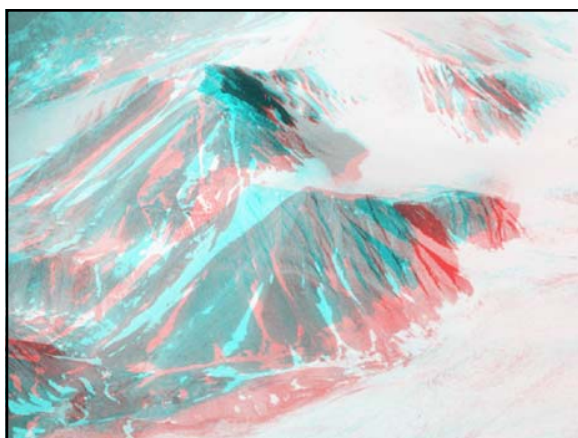
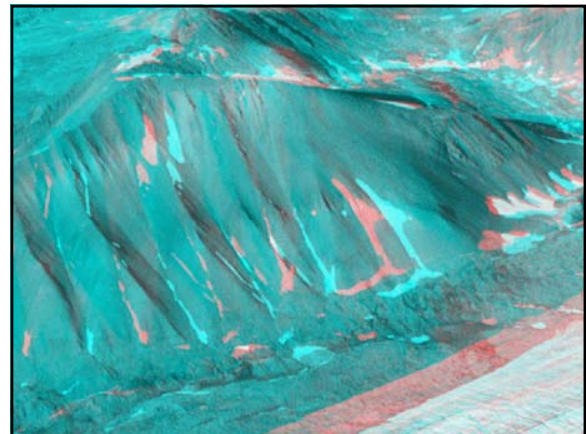
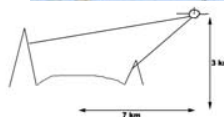
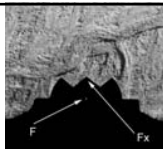
Resultater S38 LYB

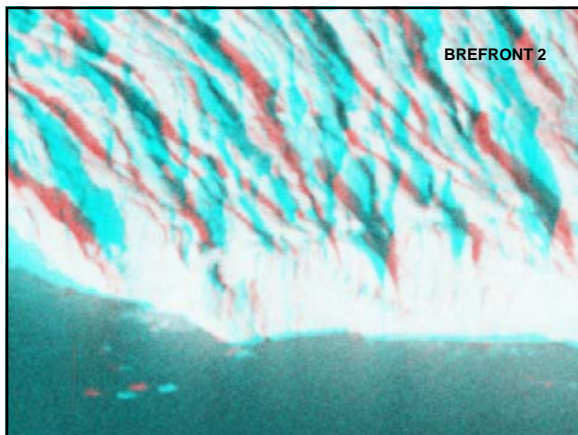
- Vanskelig med gittpunkt
- Gittpunkt på en rett linje
- Introdusert høydeflatter for å støtte opp
- God indre orientering
- God relativ orientering
- Upålitelig og ustabil absolutt orientering
- Ikke mulig å inkludere tilleggsparametre
- Dessverre ikke mulig å få ut fortegningsdata



Orientering S36

- Indre orientering vanskelig fordi ikke alle rammemerker var synlige → Dårlig IO
- Gittpunkter fra NPI triangelnett
 - Vanskelig å definere i bildene
- Ikke tilstrekkelig, lagt til
 - Høydepunkter i fjæra (±3-5 meter?)
 - Punkter bestemt i S90
 - Vanskelig å definere i bildene
- Restfeil $\sigma = 95 \mu\text{m}$
- RMS i gittpunkt 27, 52, 13 m (x,y,z)
- Ikke bra.





Terrengmodellering S36 FRI

- ISAE ville ikke matche
 - Available models
 - Selected models
- Sjekker ISAE parametre uten å si fra?
 - Orienteringsresultater?
 - Orienteringsparametre (spes kapp)
- Endte opp med manuell digitalisering av ~2000 punkt
- Langs smeltevannselver, sprekker, synlige detaljer
- Noen punkt på bart fjell for kontroll
- Ikke punkt i snøområder

Nøyaktighet S36

- Tilnærminger til nøyaktighet i terrengmodellen:
 - Teoretisk
 - Høydenøyaktighet 0.06 – 0.9 % av "fj høyde": 0.4 – 6.3 meter
 - Fasil → S90
 - Ikke over breen...
 - Knaus vest for breen
 - Høyde ~ -20 m
 - vest ~ +100 m
 - Nord ~ +150 m
 - Breddent sjø øst for breen:
 - Høyde ~ -10 m
 - Tidligere publiserte resultater:
 - Etzel Müller og Solli (1996), utført av Roilstad: 2 meter
- Anslår høydenøyaktighet S36 til i størrelsesorden 15 meter over breen der det er brukbar kontrast

S90 Fridtjovbreen

- Ferdig AO fra NPI etter blokkutjevning av større blokk
- Lest rett inn og brukt (etter noen tester)
- Matching → Terrengmodell
- Nøyaktighet 2-4 meter (der det er kontrast)

Resultater

- Terrengmodell S36
- Terrengmodell S90
- Høydeendring i profiler
- Volum

