

# Anvendelsen af historiske grønlandske flyfotos i klimaforskningen

Niels Jákup Korsgaard

Afdeling for Glaciologi og Klima,  
GEUS (De Nationale Geologiske  
Undersøgelser for Danmark og  
Grønland)

Keywords: Klimaforandringer,  
klimaforskning, gletsjere,  
Indlandsisen, flyfoto,  
georeferering, højdemodeller,  
Grønland, glaciologi

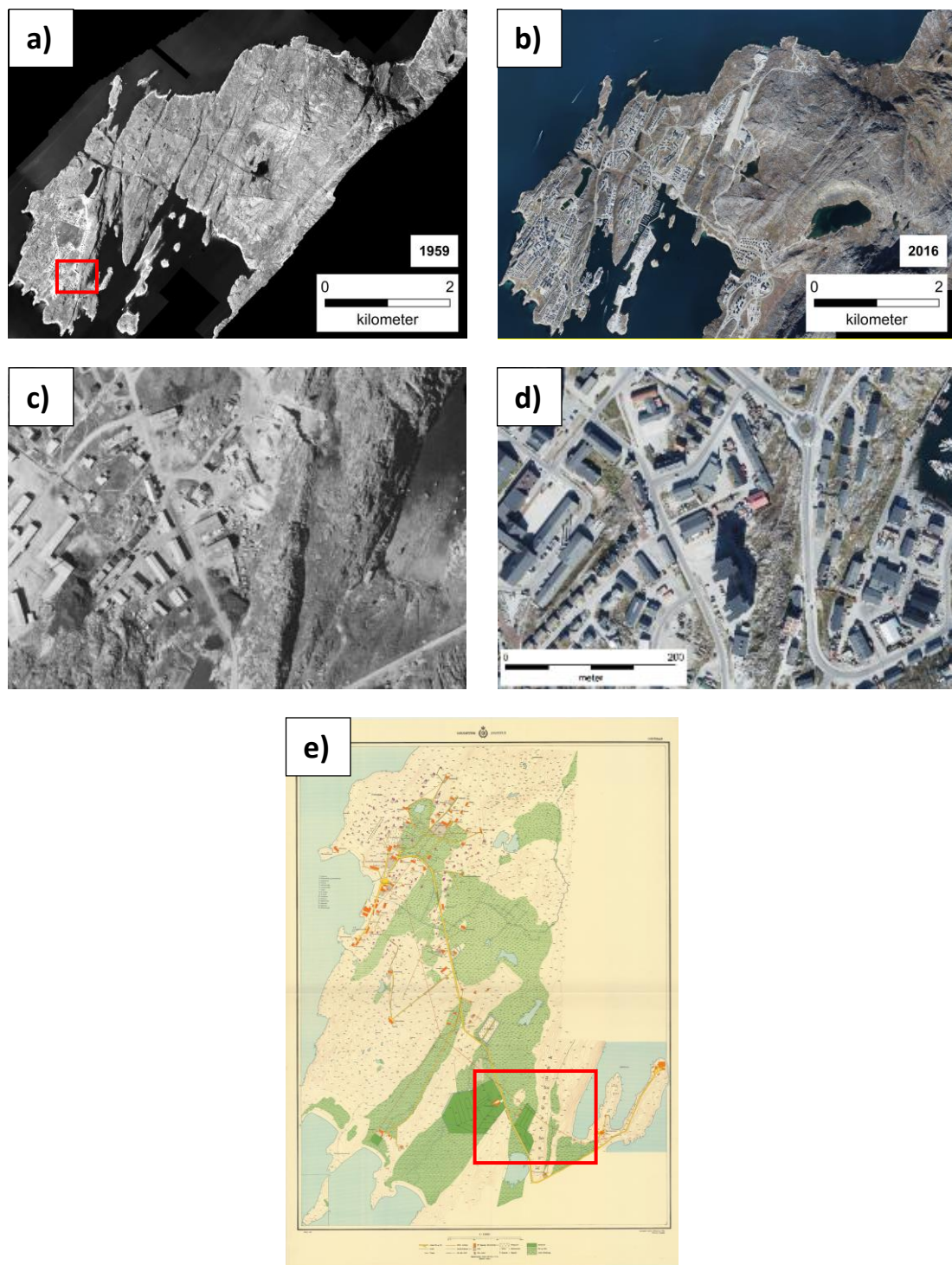
For at forstå hvordan gletsjere og indlandsis reagerer på nuværende klimaforandringer, og bestemme bidraget ved afsmeltning og kælvning til den globale havniveaustigning, monitoreres ismasserne på Grønland. Klima- og GPS-stationer placeret på isen i giver løbende oplysninger om bl.a. indstråling, lufttemperatur, nedbør og højdeændringer, mens det store overblik leveres med remote sensing fra fly og satellitter. Den moderne æra med primært satellitbaseret radar- og lasermåling af ismasserne begyndte i Grønland tidligt i 1990'erne, men det er muligt at finde direkte observationer af isen tilbage til starten af 1930'erne i de ca. 224.000 grønlandske flyfotos der findes i arkivet hos Styrelsen for Dataforsyning og Effektivitet (SDFE). I 2008 begyndte en forskergruppe ved Statens Naturhistoriske museum (SNM) at arbejde med SDFE's historiske flyfotos, og blev godt hjulpet på vej af at digitaliseringen af (fly-) rutekortene og andre nødvendige arkivalier netop var afsluttet. Her gennemgås de anvendte teknikker, hvilke oplysninger om det dynamiske grønlandske landskab der kan hentes ud af historiske flyfotos, og de afledte forskningsmæssige resultater, med vægt på forskningen ved SNM.

## 1 | Indledning

I kælderen under Styrelsen for Dataforsyning og Effektivitet (SDFE) og i en bunker i Vestvolden uden for København opbevares flyfotos brugt til kortlægning af Danmark, Grønland og Færøerne. For Grønlands vedkommende drejer det sig om ca. 224.000 flyfotos fra perioden 1932-1987. Fotografierne har gennem årtierne dokumenteret ændringerne i det meget dynamiske grønlandske landskab, bl.a. for gletsjere og iskapper og langs randen af Indlandsisen. Da isen reagerer på klimaforandringer, kan fotografierne betragtes som et arkiv med observationer af situationen, da de blev taget. Det oprindelige formål med optagelserne var opmåling og topografisk kortlægning, og derfor er den tekniske kvalitet så høj, at når informationerne hentes ud af billederne, kan de bruges sammen med moderne remote sensing data, der er blevet samlet ind siden starten af 1990'erne. Ændringer af ismasserne fundet ved direkte observationer giver mulighed for at forstå ismassernes dynamik og respons på klimaforandringer over en længere tidsskala, end de moderne data dækker. Med udgangspunkt i arbejdet med grønlandske flyfotos hos Palæoklima- og Kvartærgruppen ved Statens Naturhistoriske Museum 2008-2018, suppleret med andre arbejder, beskrives gruppens anvendte teknikker og resultater. Arbejdet har forbedret vores forståelse af de grønlandske ismassers respons på klimaforandringer i det 20. århundrede – og fungerer som reference for de forandringer, vi oplever i dag.

## 2 | Grønlandske flyfotos i arkivet hos SDFE

Det grønlandske materiale i flyfotoarkivet hos Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering (SDFE) dækker perioden fra 1930'erne til slutningen af 1980'erne, og stammer derfor primært fra aktiviteter, der er foregået i regi af Geodætisk Institut (GI) og Kort & Matrikelstyrelsen (KMS). Disse to organisationer findes ikke mere af navn, og da KMS skiftede navn til Geodatastyrelsen (GST), og senere til SDFE, fulgte flyfotoarkivet med, og ligger derfor i dag hos SDFE. Arkivalierne består af negativfilmruller opbevaret i metaldåser og har formatet 140 mm for optagelser fra 1930'erne, og derefter 230 mm. Omfanget af historiske flyfotos fra Grønland i arkivet estimeres til ca. 224.000 historiske skrå- og lodfotos (Jørgensen 2013). De ældste grønlandske flyfotos i arkivet inkluderer bl.a. optagelserne fra Treårsekspeditionen (1931-34) og 7. Thule ekspedition (1932-33) (Higgins 2010).



Figur 1. Ortomosaik af Nuuk fremstillet af GI flyfotooptagelser fra 1959 sammenstillet med en ortomosaik fra 2016 og et "kolonikort" udtegnet fra 1947-flyfotos. De 39 lodbilleder, der indgår i mosaikken, er taget 31. august fra en højde af 1500 m. En ortomosaik består af fotos, der er geometrisk oprettet med en højdemodel, der korrigerer for fortegning fra landskabets relief og derfor har det samme målforshold i hele mosaikken. Den kan bruges på samme måde som et kort, men viser utolket information. a) Ortomosaik af Nuuk fra 1959, og b) ortomosaik fra 2016 (Asiaq, Greenland Survey, NUK0600, hentet 19. februar 2020). c-d) Detalje fra området mellem Dronning Ingrid's Hospital og havnen (markeret med rødt udsnit på a)). Billedopløsningen på 1959 og 2016 mosaik er henholdsvis 12 og 10 cm. e) "Kolonikort" fra Kortarkivet i skala 1:2000 udtegnet af GI i 1954 fra 1947 flyfotos. Som det fremgår af figur 1, så begrænser den mulige anvendelse af flyfotos og kort sig ikke til glaciologien, og der er et uudnyttet potentiale for at dokumentere grønlandsk samfundshistorie.

De danske skråfotooptagelser fortsatte frem til 1938, hvorefter der var en pause i danske flyvninger, der genoptoges i 1947 og fortsatte frem til 1987. Ud over optagelsernes funktion som støtte til opmålingen, blev de brugt til udtegnelse af en kortbladsserie (G/250) i målforholdet 1:250.000 (Nielsen et al. 1995; figur 2a-d), og kolonikort over grønlandske byer og bygder i målforholdet 1:2000 (figur 1e). Produktionen af G/250 kortbladene strakte sig fra 1936-1972 med anvendelse af det tilgængelige foto- og paspunktgrundlag (Nielsen et al. 1995). Fra 1978-1987 blev alle isfrie dele af Grønland fotograferet i målforholdet 1:150.000 og senere aerotriangleret med GPS-paspunkter (Korsgaard et al. 2016), og det har bl.a. dannet basis for geologisk kortlægning (Pedersen et al. 2013).

Under og efter Anden Verdenskrig foretog US Coast Guard, US Navy, og US Army Air Force omfattende rekognoscering og kortlægning af Grønland med flyfotos, og med fotoflyvninger 1941-1960. Gennem hele perioden udførte amerikanske fly rekognoscering som forundersøgelser for etablering af flyvestationer og landingsbaner. Kendt fra Anden Verdenskrig er flyvestationerne Narsarsuaq og Søndre Strømfjord, mens landingsbanen ved Thule blev anlagt i 1946 (Ross & Ancker 1977). De sidste amerikanske fotoflyvninger skete i 1960 i forbindelse med Operation Groundhog, der undersøgte etablering af landingsbaner (Higgins 2010). På trods af omfattende fotoflyvninger ud over rekognosceringerne var det først med Operation Eardrum i 1947-1948, at amerikanerne gennemførte en fuld og systematisk dækning fra luften med henblik på kortproduktion. Resultatet blev aeronautiske kort i målforhold 1:1.000.000 (Ross & Ancker 1977; Nielsen et al. 1995) og Joint Operations Graphics kortværket, der blev produceret af Army Map Service i målforholdet 1:250.000 (Nielsen et al. 1995; Polar Geospatial Center 2017).

Danmark har fået en kopi af nogle af de amerikanske filmrullenegativer, der nu er en del af arkivalierne hos SDFE. Der er tale om optagelser 1942-1954, der er indgået i produktionen af danske G/250 kortblade, og man formodes at dække de samme dele af Grønland som G/250 kortværket.

Rent teknisk har formålet bl.a. indflydelse på flyvehøjden. Kort over byer og bygder og tekniske forundersøgelser er fløjet i lavere flyvehøjde end ved kortlægningsarbejder. Generelt kan det siges, at typiske flyvehøjder ved kortlægningsarbejde var 3.000-6.000 m (f.eks. figur 2a-e), mens byer og bygder er fløjet ved 600-1.500 m (figur 1a, 1c), hvilket gør det muligt at kortlægge langt mere detaljeret. Flyvefotokampagnen 1978-1987 er speciel i og med, at den er fløjet i 13.000 m højde med et super-vidvinkelkamera. Billedrammen for lodbilledet kommer således til at dække 30x30 km på jorden, mens det almindelige er at bruge et vidvinkelkamera der i en flyvehøjde på 6.000 giver en billedramme på 9x9 km. Det betyder, at modeffektiviteten forbedres – antallet af stereomodeller der skal til for samme dækning reduceres drastisk, og det samme gør arbejdet med at aerotriangulere og udtegne.

Primært har formålet med danske fotoflyvninger været at støtte opmålingsarbejdet og indsamle data til produktion af kortbladsserier (G/250) og kolonikort (figur 1e) samt geologisk kortlægning (Higgins 2010; Pedersen et al. 2013). Der kan dog findes enkelte eksempler på, at Geodætisk Institut har udført fotoflyvninger med glaciologiske undersøgelser for øje, og her er fotoflyvningerne udført i forbindelse med Expédition Glaciologique Internationale Au Groenland 1957-1960 i Vestgrønland nok de mest kendte og omfattende, med fotoflyvninger udført af Armée de l'Air Française i 1958, og af GI for årene 1958, 1959 og 1964. (Andersen 1968) Her fik forskerne bl.a. oplysninger om kælvningsfrontens højde og position, samt isens topografi. Det der bl.a. gjorde denne flyvefotoekspedition til en glaciologisk opmåling var ikke kun, at ruterne blev fløjet langs Indlandsisens rand, men også at ruterne blev gentaget med to ugers mellemrum, hvilket gjorde det muligt at beregne, hvor hurtigt udløbsgletsjerne løb ud i havet, og dermed hvor meget is der kælvede for en snes udløbsgletsjere i Diskobugten og Uummanaq Fjord (Carbonnel & Bauer 1968). En af disse udløbsgletsjere er den vigtige Sermeq Kujalleq – også bedre kendt som Jakobshavn Isbræ.

Det typiske er dog, at når flyfotos er blevet brugt til glaciologiske undersøgelser, har deres oprindelige formål været til brug i opmåling og kortlægning. Higgins (1988) er et eksempel på, hvordan flyfotos, der er taget med kortlægning for øje, kan bruges til glaciologiske opgaver. Her sammenholdes eksisterende optagelser fra 1959, 1963, 1971 og 1978 for at bestemme udløbsgletsjernes hastighed i det nordlige og nordøstlige Grønland, hvilket understreger, at optagelserne ikke nødvendigvis skal være taget med glaciologiske undersøgelser for øje for at kunne bruges til formålet.

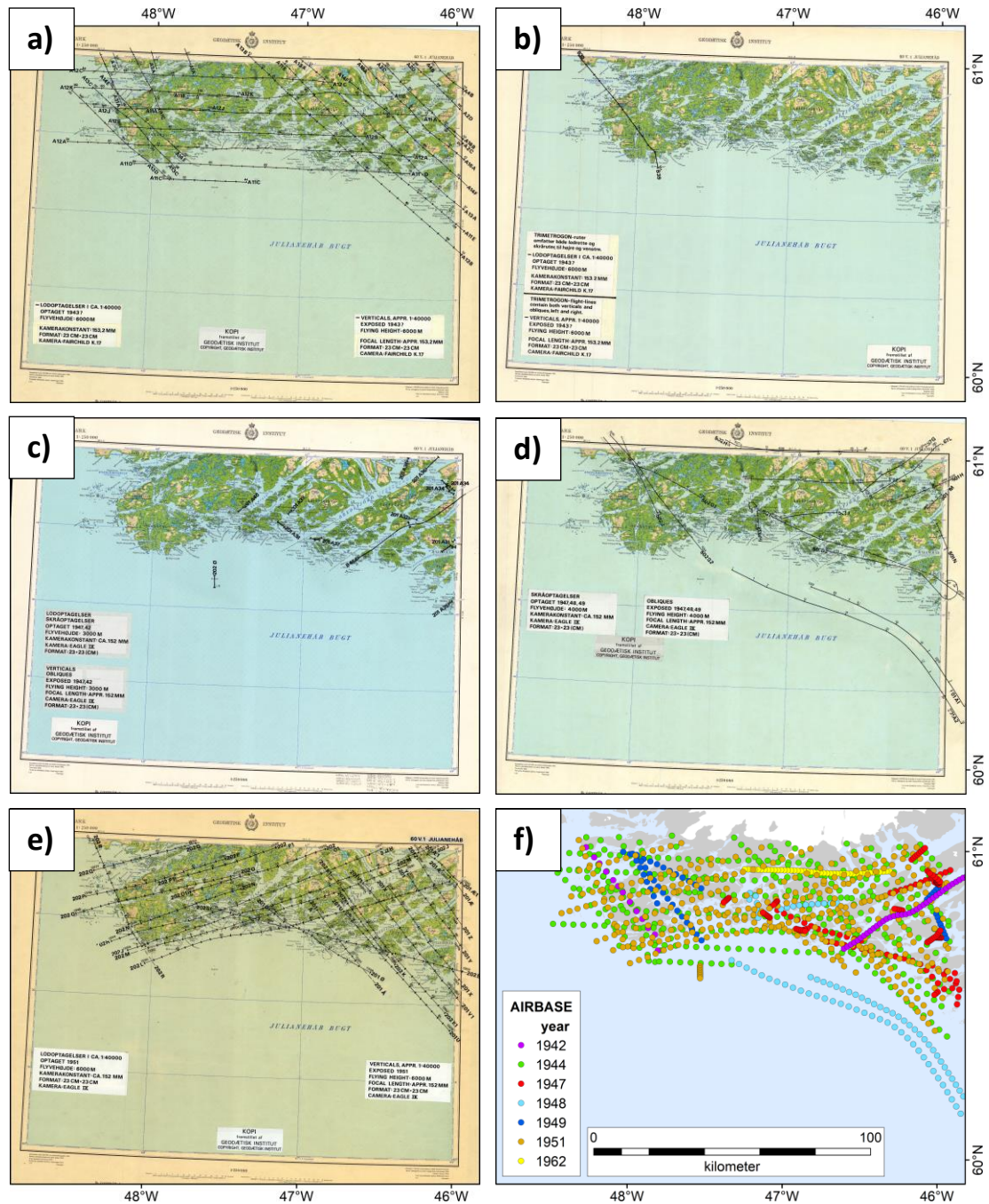
### 3 | Forskning med historiske flyfotos ved Statens Naturhistoriske Museum

Arbejdet med flyfotos ved Statens Naturhistoriske Museum (SNM) begyndte i foråret 2008 i forbindelse med Kurt H. Kjær's projekt Respons af Indlandsisen til Naturlige Klimaændringer (RINK) (Uddannelses- og Forskningsministeriet 2007, 2008), hvor det blev klart at flyfotos kunne levere et betydeligt bidrag til

projektet. Det skulle vise sig at være god timing i forhold til tilgængeligheden af arkivalierne, da arkivet hos SFDE netop havde digitaliseret de såkaldte ruteoversigtskort.

Når der arbejdes med flyfotos, vil der typisk være et ruteoversigtskort til rådighed, der viser flyruter og fotopunkter plottet på et kortblad. Det gør det nemt og effektivt at udvælge de flyfotos, der dækker den lokalitet, der har interesse. Der findes flere end 500 grønlandske ruteoversigtskort i Kortarkivet, og som del af et større arbejde med at digitalisere Kortarkivet var man i begyndelsen af 2008 blevet færdig med at scanne ruteoversigtskortene over de grønlandske flyfotos. Samtidigt blev arbejdet med "Projekt Kartotekskort" (Jørgensen 2013) påbegyndt i Kortarkivet. Her blev oplysningerne fra de såkaldte kartotekskort, der indeholder nøgleoplysningerne fra "Flight Reports", der blev udfærdiget i forbindelse med selve fotoflyvningen, tastet ind i en database. I databasen kan man bl.a. finde oplysninger om projekt- og rutenummer, billedinterval, dato for optagelsen, kameranummer, nummer på dåsen som filmrullen opbevares i, og et kommentarfelt (Jørgensen 2013).

Det er en tung opgave at samle tidsserier af flyfotos for hundreder af Indlandsisens udløbsgletsjere og tusinder af lokale gletsjere og iskapper. Oplysningerne fra kartotekskortene kan ikke knyttes maskinelt til de digitaliserede kort for stedfæstelse, og ruteoversigtskortene indeholder ofte fotopunkter fra mange projekter fløjet forskellige år (figur 2).



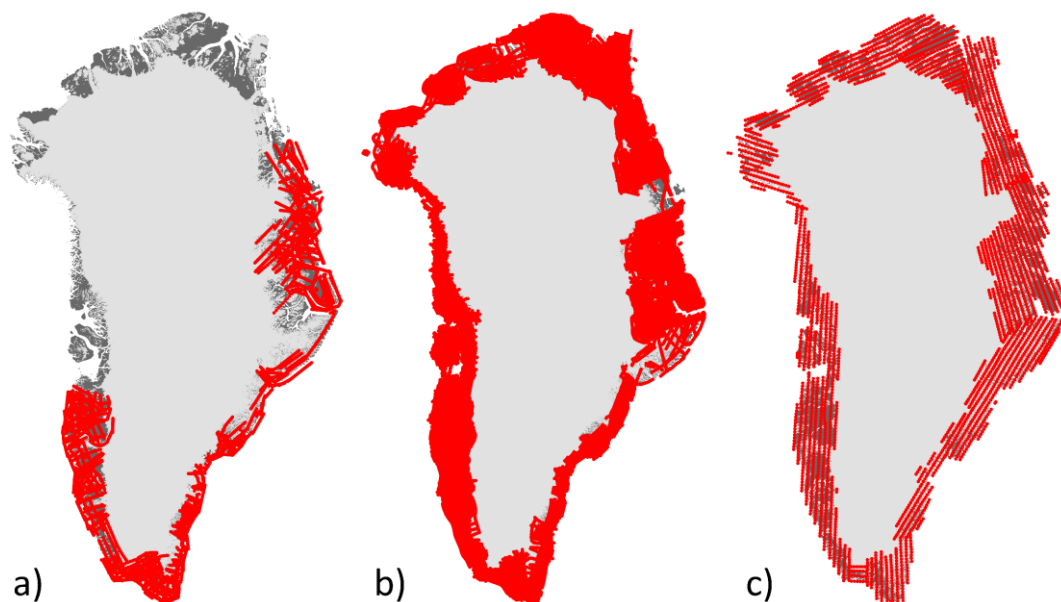
Figur 2. Fem ruteoversigtskort med danske og amerikanske optagelser på kortblad G/250 60 V.1. Kortbladene indeholder plot af flyfotos fra et eller flere år. a-b) Formodet 1943. c) 1942 og 1947. d) 1947, 1948 og 1949. e) 1951. f) Plot af fotopunkter fra kortblad 60 V.1 fra AirBase (figur 3b) Fotopunkterne er farvekodet med året for optagelsen, opnået ved at sammenkæde stedfæstelsen i AirBase med datooplysningerne fra "Projekt kartotekskort", og suppleret med oplysninger fra amerikanske ruteoversigtskort. Bemærk at en rute der fejlagtigt fremgår som værende fra 1940'erne i d) nu med baggrund i kartotekskortene er identificeret til 1962 som året for optagelse i f). Ligeledes er fotopunkter angivet som "1943?" på ruteoversigtskort a) og b) nu identificeret til henholdsvis 1942 og 1944 i f).

Det blev derfor nødvendigt at tage endnu et skridt og vektorisere fotopunkterne og flyruterne fra ruteoversigtskortene. Det er et arbejde, der også letter den efterfølgende opgave med selve billedbehandlingen, da fotopunkterne hermed fik tildelt koordinater. Fremgangsmåden var, at de enkelte ruteoversigtskort blev georefereret vha. hjørnekoordinaterne, hvorefter ruter og fotopunkter blev vektoriseret semiautomatisk som henholdsvis linjer og punkter og derefter tildelt projekt- og rutenumre samt billednumre.

Resultatet blev samlet i AirBase, hvor oplysningerne fra "Projekt kartotekskort" kan knyttes til stedfæstelsen med projekt- og rutenummer som nøgle (Korsgaard et al. 2013). Arbejdet med at vektorisere ruteoversigtskort til AirBase begyndte i foråret 2008, og med assistance fra to studende blev det afsluttet foråret 2010, med mindre ajourføringer frem til 2013.

De ca. 10.000 fotos fra 1930'erne er alle stedfæstet ved at vektorisere ruteoversigtskort (figur 3a), mens stedfæstelsen af 3.532 fotos ud af ca. 10.000 fotos taget 1978-1987 (figur 3c) er sket ved analytisk aerotriangulation (Nielsen et al. 1995). Fotos 1978-87 er taget med 80% overlap for at sikre fuld dækning, men det er kun nødvendigt med et 60% overlap, så de resterende 6400 er redundante. Fotopunkterne for de restende 1978-1987 fotos kan findes på ruteoversigtskortene, men en vektorisering blev fravalgt, da data allerede er fuldt operative, og udbyttet ved en vektorisering være marginalt. For den mellemliggende periode angiver "Projekt kartotekskort", at der findes ca. 204.000 fotos 1942-1977, men det er kun lykkedes at stedfæste 85.000 der dækker perioden 1942-1969 ved vektorisering af ruteoversigtskort (figur 3b). Det må konstateres, at der kun er fremstillet ruteoversigtskort sådan, at knap halvdelen af arkivets flyfotos kan stedfæstes ved den beskrevne fremgangsmåde.

Digitaliseringen af arkivet var således forudsætningen for at kunne arbejde effektivt med grønlandske flyfotos på en stor skala og dermed for ti års arbejde med historiske flyfotos hos Palæoklima- og Kvartærgruppen ved SNM.



Figur 3. Plot af fotopunkter fra AirBase. a) Fotopunkter 1932-1938 vektoriseret fra ruteoversigtskort. b) Fotopunkter 1942-1969 vektoriseret fra ruteoversigtskort. c) Fotopunkter 1978-1987 bestemt ved analytisk aerotriangulation.

#### 4 | Materialer, teknikker og formål

I dag findes der en række teknikker til at beregne Indlandsisens massebalance. Indsamlingen af data er primært satellitbaseret, og der måles på ændringer i gravimetri, højder, kælvningsfronter og overfladehastigheder. Observationerne skal ofte kombineres med data fra andre kilder, f.eks. en model for massebalancen af isens overflade for at kvantificere processerne (se Khan et al. 2015 for en gennemgang af metoder).

Det er generelt de samme oplysninger, der kan hentes ud af det historiske materiale, men det kræver en større indsats at hente dem ud. Længde-, areal- og volumenændringer, og – når omstændighederne tillader det – overfladehastigheder. På satellit- og flyfotos kræver det mindst billedbehandling at hente oplysninger om de enkelte gletsjerfronters position (længde). Gletsjerens areal eller Indlandsisens rand kræver mere arbejde, og typisk vil satellitbilleder fra de mest anvendte satellitter – for eksempel Landsat og Sentinel-2 – være rettet op med en statisk højdemodel, og fejlen fra fortegningen vil til formålet være acceptabel. Et

luftfoto kræver derimod en opretning til et ortofoto for at fjerne relieffets fortegnings over hele billedet (figur 4). Rent teknisk kræver kortlægning af fronter og arealer mindst af billedmaterialet, for eksempel kan en scanning af en kontaktkopi på en flatbed scanner være nok. Men hvor der skal produceres højdedata eller ortofotos fra flyfotos, er forudsætningen, at de er scannet på en speciel fotogrammetrisk scanner, da fortegnings fra scanning på almindelige scannere kan være betydelig (Mitrovic et al. 2004), og det er en fordel at kende de indre dimensioner og linsefortegningen på det anvendte kamera. Der findes tilstrækkelige tekniske oplysninger – kamerakalibreringsrapporter – om kameraer brugt til danske optagelser. Selvom det er muligt at identificere de enkelte kameraer brugt til amerikanske optagelser, er det ikke altid, at der findes en kalibreringsrapport. Kendskabet til typen af kamera hjælper dog en del, da man så kan bruge generiske oplysninger for kameratypen i stedet. En fejlkilde man ikke kan kompensere for analytisk, er krympning og forvrængning af negativfilmen. Der kommer dog nogen kontrol på problemet, når billedet registreres til kameraets sensormodel, og generelt er arkivalierne i øvrigt i rigtig god stand. Undtagelsen er optagelser foretaget af Armée de l'Air Française og dele af de danske optagelser fra 1930'erne, da tidens tand har været hårdere ved nitratfilmene end resten af filmene. Hvis der findes kontaktkopier, kan man om nødvendigt bruge disse i stedet.

Da kortlægning af gletsjerfronter (-længder) således stiller færre tekniske krav, er der også mere egnet billedmateriale til rådighed. For eksempel supplerer Bjørk et al. (2012) flyfotos fra SDFE's arkiv med flyfotos fra British Arctic Air Route samt Corona satellitfotos fra 1960'erne og Landsat satellitbilleder fra 1972-2015 (Bjørk et al. 2012, 2018) ved kortlægningen af fronter, der så omregnes til gletsjerlængder.

For højdedata er den tidligste satellitaltimetri på Indlandsisen fra 1992, hvor ERS-1 satellitten målte højder med et radar altimeter. RA-1 altimeteret på ERS-1 havde et footprint med en diameter på 16-20 km. Det fungerede bedst på Indlandsisens indre, hvor isen er homogen og ikke hælder, og fjelde og nunatakker ikke reflekterer radarpulsen. Det var også i starten af 1990'erne, at NASA begyndte at flyve med et laser altimeter (NASA Airborne Topographic Mapper, ATM) over indlandsisen. ATM LiDAR måler højder præcist og uden støj, men dækningen før år 2000 er sporadisk i tid og rum. Det er først efter årtusindskiftet, at Indlandsisen er blevet fuldt dækket med satellitbaseret og flybåren laseraltimetri (ICESat og ATM) og raster højdemodeller baseret på optiske stereooptagelser fra satellit (Howat et al. 2015; Porter et al. 2018).

Hvor de tidligste moderne målinger af isens højde begynder i starten af 1990'erne, kan man med historiske flyfotos komme tilbage til 1930'erne og dermed bliver perioden med direkte observationer 2-3 gange længere.

For lokale gletsjere og iskapper gælder det generelt, at højdemodel og ortofoto fra 1978-1987 (Korsgaard et al. 2016) er de ældste data, der er publiceret. Denne model er bl.a. blevet brugt af Huber et al. (2020) sammen med moderne højdedata TanDEM-X (Wessel 2016) til at beregne et regionalt massetab for gletsjere i Vestgrønland fra 1985-2012 med direkte observationer. Tilsvarende beregner Carrivick et al. (2019) volumenændringerne for nordøstgrønlandske gletsjere fra 1980'erne-2014 med direkte observationer (højdeændringer), her med ArcticDEM (Porter et al. 2018) som det moderne højdedatasæt. Carrivick et al. (2019) beregner også volumenændringer tilbage til isens maksimale udbredelse under den lille istid, i Nordøstgrønland sat til ca. 1910. Den beregnes dog ved modellering. Beregning af volumenændringer fundet ved højdeændringer mellem to højdemodeller kaldes også den geodætiske metode.

Når højdemodeller beregnes på Indlandsisen og ved lokale gletsjere og iskapper, skal man være opmærksom på, at når man bruger billedkorrelation i stereooptagelser til at måle højder, kan mangel på kontrast være et problem. Den manglende kontrast findes i områder dækket med sne, og det sætter en begrænsning på, hvor langt ind på Indlandsisen, der kan måles. Ligesom det gælder for moderne billeder, må man også på historiske fotos forvente sne i dele af en gletsjers akkumulationsområde.

Mængden af glaciologiske informationer, der kan hentes ud af historiske, grønlandske flyfotos, er særdeles stor og forlænger tidshorizonten for vores viden. I det efterfølgende vil der være fokus på udvalgte glaciologiske resultater, der vil blive præsenteret sammen med en beskrivelse af, hvordan flyfotos er anvendt i den konkrete artikel. Dette er en bevidst afgrænsning, og det skal nævnes, at der findes andre geovidenskabelige resultater, hvor SNM's arbejde med stedfæstelse af flyfotos i AirBase, samt ortomosaikker og højdemodeller (Korsgaard et al. 2016) også har fundet anvendelse. For eksempel viser Bendixen et al. (2017), at sydvestgrønlandske deltaer prograderer (rykker frem mod havet) i et varmere klima. Ligeledes skal et glaciologisk studie, der bestemmer nye forankringspunkter for udløbsgletsjere, efterhånden som de trækker sig tilbage i en varmere fremtid (Felikson et al. 2017), kun nævnes her, da det primært er udført ved

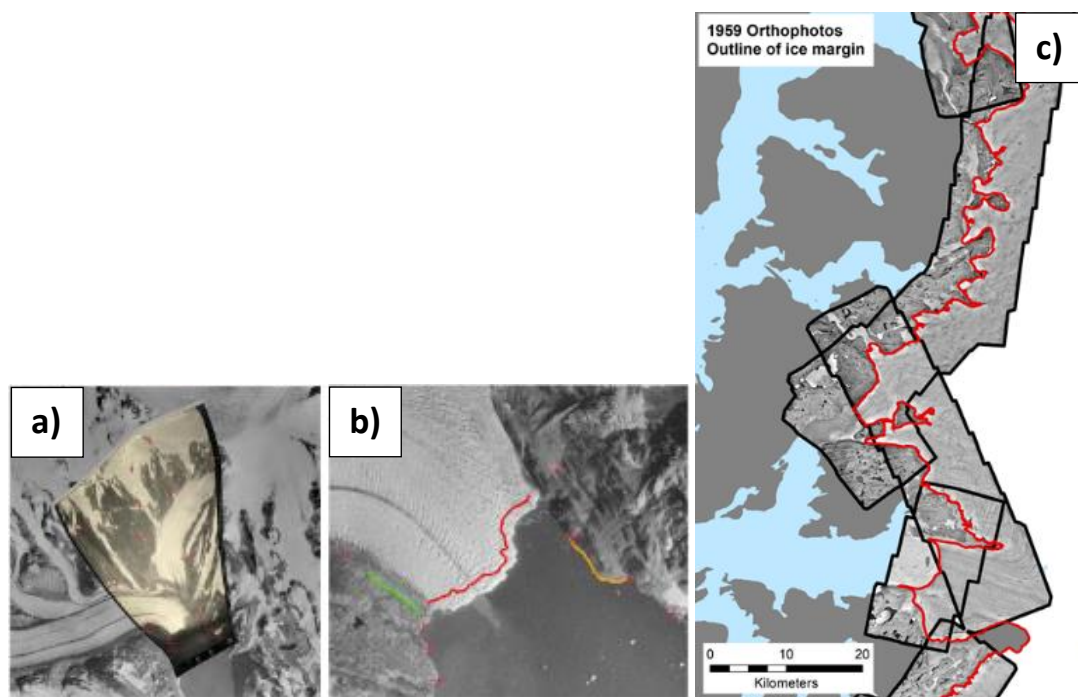
amerikanske universiteter. Der er også et potentiale for at bruge historiske flyfotos i den grønlandske samfundshistorie (figur 1).

Overordnet er det spørgsmål om ismassernes respons til klimaforandringer i det 20. århundrede, der er blevet besvaret med flyfotos. Hvor følsomme er gletsjerne, og hvad er de følsomme over for? Er responsen af marint- og landbaserede gletsjere forskellig, og er den lokal eller regional? Hvor meget is er forsvundet, og hvor stor er ændringen af havniveauet som følge?

## 5 | Måling af ændringer af gletsjerfronters position

Når en gletsjerfront avancerer eller trækker sig tilbage, er det et udtryk for, at gletsjeren ikke er i balance. Ændrede temperatur- eller nedbørsforhold kan få gletsjeren til at vokse eller trække sig tilbage alt efter, om pålejrings- eller afsmeltningprocesser dominerer. Står fronten i en fjord – hvilket er typisk for Indlandsisens udløbsgletsjere –, vil gletsjeren også tabe is gennem kælningsprocesser, hvor isen brækker af og flyder ud i havet. Undtagelsen er gletsjere af surge-typen, hvor frontens position ikke er et udtryk for gletsjerens massebalance. I det tilfælde akkumulerer gletsjeren is opstrøms over mange år, for pludseligt at skride frem og transportere store mængder is nedstrøms, med advancement af fronten til følge. Når gletsjeren er af surge-typen, er variationen derfor ikke et udtryk for et klimasignal, hvilket der skal tages højde for i den videnskabelige anvendelse (f.eks. Bjørk et al. 2018).

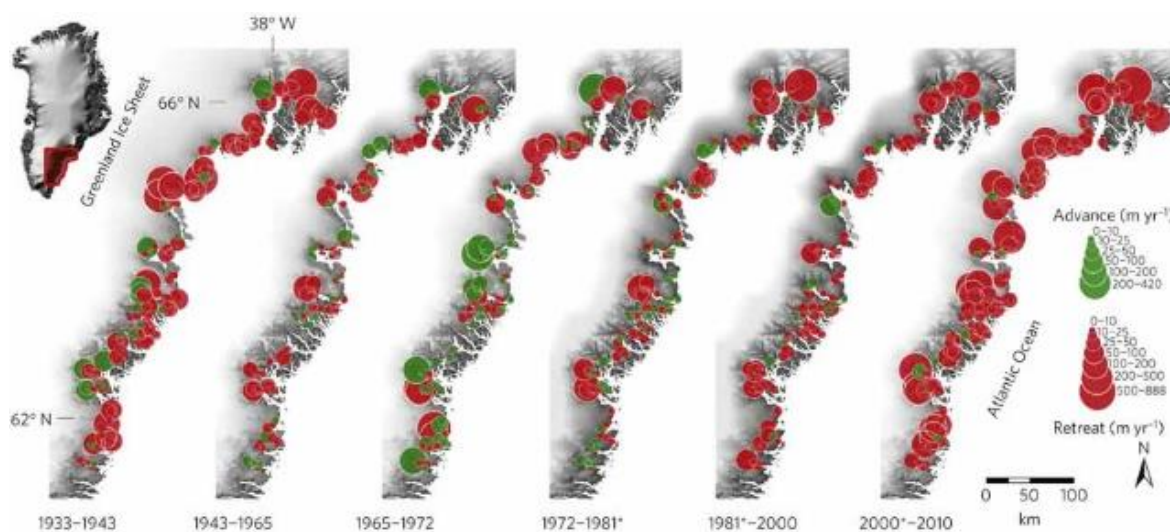
I Bjørk et al. (2012, 2018) måles længden som den gennemsnitlige afstand fra et antal punkter på fronten og ind til et referencepunkt længere inde på gletsjeren. Det er altså ikke nødvendigt at bruge hele gletsjerens længde, men kun variationen af gletsjerfrontens position.



Figur 4. Procedure fra Bjørk et al. (2012) ved måling af positionen af en udløbsgletsjers front, her Thrym Gletsjer. a) Skråfoto fra 1933 er georefereret til en ortomosaik fra 1980'erne (Korsgaard et al. 2016) og udjævnet med en 2. ordens polynomial transformation, hvorefter der kan vektoriseres i billedet. Med denne metode er fortegningen lille i det område der udtegnes, her fronten af udløbsgletsjeren. b) Den vektoriserede gletsjerfront vist med rødt valideres mod ortomosaikken. Den grønne og orange linje er vektoriseret i fotoet fra 1933, og markerer henholdsvis en trimline og kystlinjen, der som kontrol skal ligge korrekt i ortomosaikken. c) Med en ortomosaik kan israndslinjen tegnes uden fortegning langs hele isranden. Ortomosaikken vist her er fremstillet af fotos fra Expédition Glaciologique Internationale Au Groenland 1957-1960 (Andersen 1968) ved brug af structure-from-motion teknologien, der er tidsbesparende og er ved at finde bred anvendelse i arbejdet med historiske flyfotos (f.eks. Child et al. 2020).



I to studier af Bjørk et al. (2012, 2018) bruges historiske fly- og satellitfotos (U.S. Geological Survey 2008), og moderne, digitale satellitbilleder til at kortlægge variationen i gletsjerylængder for henholdsvis 132 gletsjere, iskapper, og udløbsgletsjere i Sydøstgrønland 1931-2010 (Bjørk et al. 2012), og 334 gletsjere og iskapper i Vest- og Østgrønland (Bjørk et al. 2018). I det første studie viser Bjørk et al. (2012; figur 5), at gletsjerne i det sydøstlige Grønland responderer hurtigt og regionalt til ændringer i klimaet på en skala af dekader, både når det bliver varmere og koldere. Gletsjerne har trukket sig mest udtalt tilbage under og efter en varmeperiode 1919-1932 (early twentieth-century warming, ECW), og en senere under en varmeperiode fra slutningen af 1990'erne og frem til 2010. Under en kuldeperiode fra midten af 1950'erne til de tidlige 1970'ere rykkede 60% af gletsjerne frem; hovedsageligt de marint terminerende gletsjere. Det tilskrives lavere havtemperaturer. Under den seneste varmeperiode er gletsjerne rykket asymmetrisk tilbage sammenlignet med ECW, idet de marint terminerende gletsjere er rykket kraftigere tilbage under den seneste periode end under ECW, mens de landbaserede lokale gletsjere og iskapper rykkede hurtigst tilbage under ECW.



Figur 5. Ændringer i gletsjerylængder i Sydøstgrønland over seks perioder (fra Bjørk et al. 2012).

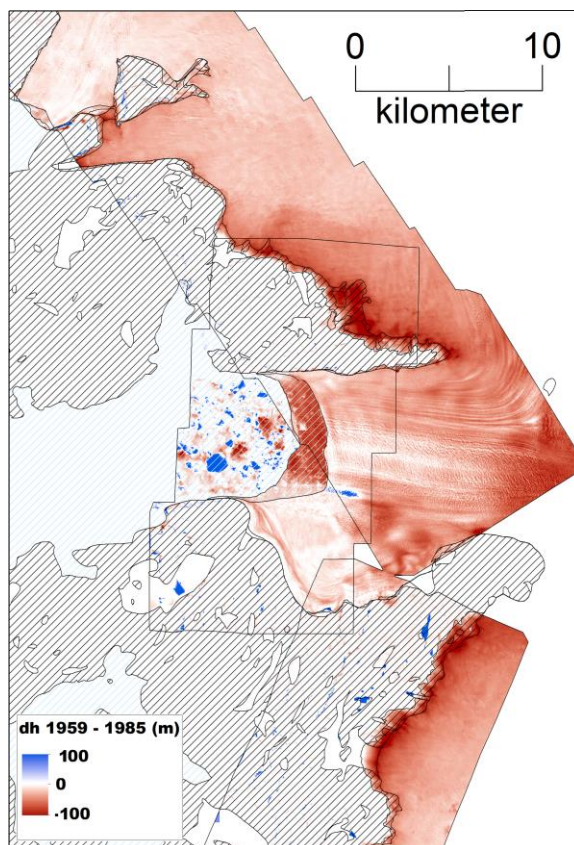
I det andet studie har Bjørk et al. (2018) forlænget tidsserien yderligere tilbage til den lille istid for de landbaserede gletsjere og iskapper i Vest- og Østgrønland. Gletsjernes maksimale udbredelse kan findes i landskabet som trimlines og endemoræner. Forskningen i timingen af den maksimale udbredelse af grønlandske gletsjere i den lille istid er begrænset, og tidspunktet for, hvornår gletsjerne forlader endemorænerne, er sat til 1890-1910 på baggrund af den eksisterende viden (Kjeldsen et al. 2015; Bjørk et al. 2018). Også her viser gletsjerne sig at være følsomme over for ændringer i klimaet. Ser man bort fra specielle forhold 1910-1932 i Østgrønland, er de gennemsnitlige rater, som gletsjerne trækker sig tilbage i, størst efter år 2000 i både øst og vest. Ændringer i gletsjerylængder repræsenterer også ændringer i deres massebalance, og her viser Bjørk et al. (2018), at der er en kobling mellem gletsjerylængder og nedbørsmængder, styret af storskala cirkulationsmønstrene i atmosfæren.

Kortlægning af gletsjerfronters positioner foregår i dag ved hjælp af optiske billeder (f.eks. Andersen et al. 2018) eller radarbilleder (synthetic aperture radar) (Moon & Joughin 2008). Kortlægning af fronter i flyfotos har været en almindelig brugt metode til datafangst, her kan blot nævnes Weidick (1958), Carbonnel & Bauer (1968) og Yde & Knudsen (2007).

## 6 | Den geodætiske metode

Metoden kan simpelt beskrives således, at to højdemodeller med to forskellige tidsstempler trækkes fra hinanden, og volumenændringen beregnes inden for et israndspolygon, der repræsenterer isens maksimale udbredelse på begge tidspunkter (figur 6). Herefter konverteres volumenændringen til masse. Det er i praksis mere kompliceret, og det er ofte nødvendigt at forberede data, inden proceduren kan gennemføres. For eksempel er højdemodeller lavet af stereooptagelser fra satellit som udgangspunkt georefereret ved hjælp af kendskabet til satellitbanerne og ikke med paspunkter på jorden. Derfor vil to højdemodeller typisk ikke

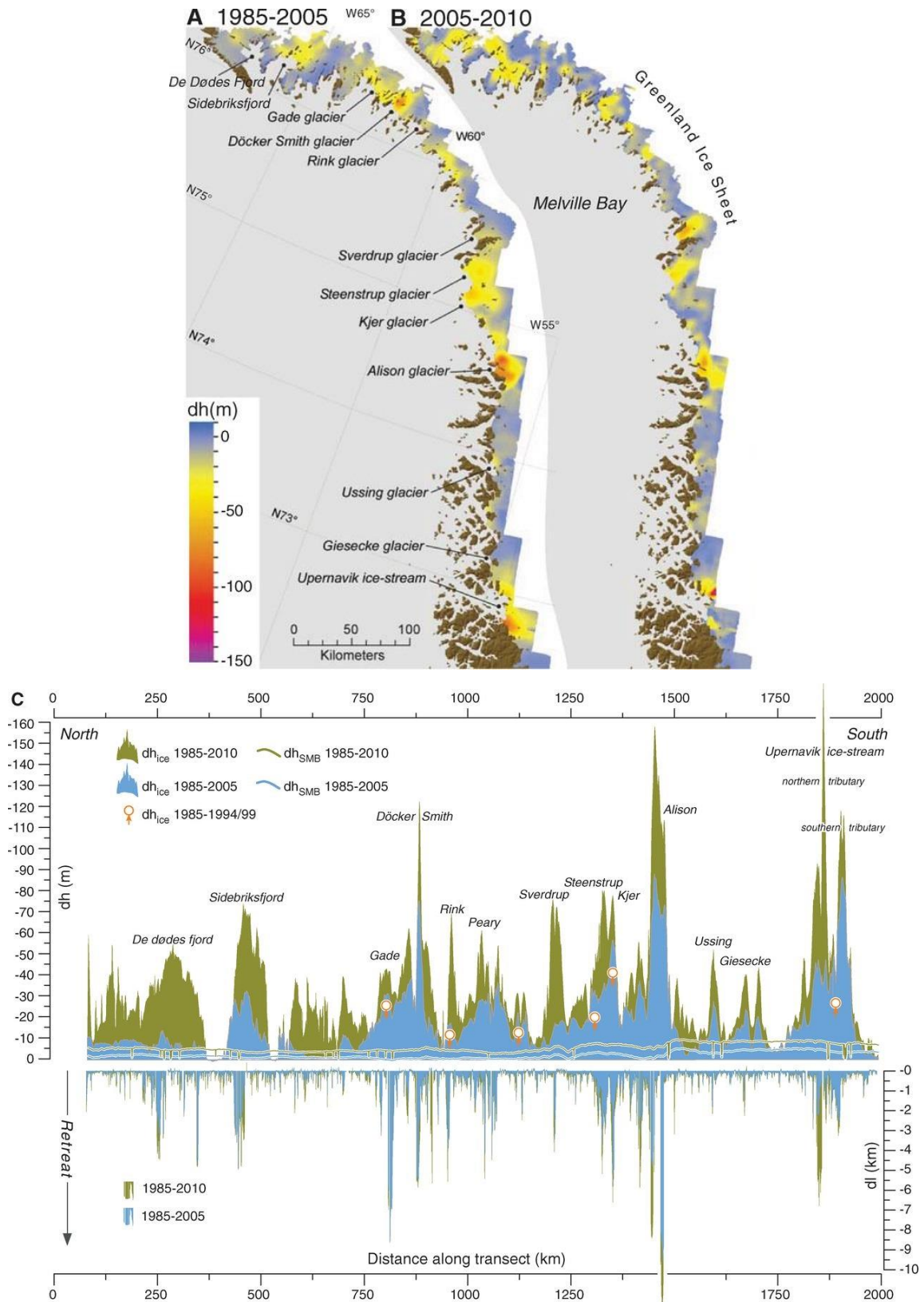
ligge nøjagtigt nok på hinanden, hvilket er en vigtig kilde til systematiske fejl i efterfølgende udregninger. En co-registrering i 3D af højdemodellerne på det stabile, isfrie terræn er en løsning, der kan flytte modellerne på plads i forhold til hinanden (Nuth & Kääb 2011).



Figur 6. Højdeændringer for Jakobshavn Isbræ og omegn 1959-1985 fundet ved den geodætiske metode. Højdemodellen fra 1985 er fra Korsgaard et al. (2016), og højdemodellen fra 1959 er fremstillet af fotos fra Expédition Glaciologique Internationale Au Groenland 1957-1960, der ikke før er blevet brugt til forskning (Andersen 1968). Kælvningsfronten har trukket sig tilbage, og isen tynder ud. Foran kælvningsfronten ses "røde isbjerger" fra 1959 og "blå isbjerger" fra 1985. Israndslinjen er fra 1985.

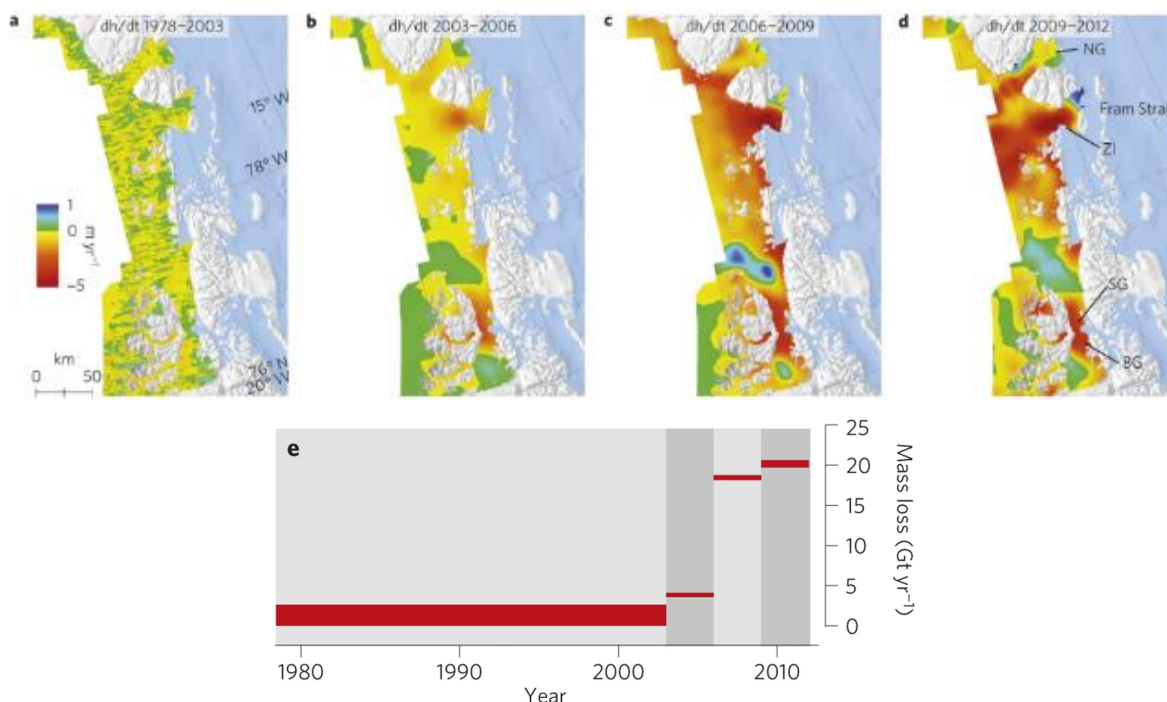
I de to første eksempler vil der forekomme to typer højdedata. Den første type er en historisk fladedækkende raster DEM med tidsstemplerne 1985 (Kjær et al. 2012) og 1978 (Khan et al. 2014) fremstillet fra flyfotos. Den anden type højdedata er laser altimetri – fra satellit (ICESat-1) og fly (NASA Airborne Topographic Mapper, ATM). Laser altimetri er ikke fladedækkende, men er en punktsky, og der findes kun data i de spor, hvor satellitten har scannet, eller hvor flyet har fløjet. Der er derfor ikke fuld fladedækning. Uanset kombinationen af datatype er fremgangsmåden at beregne højdeændringerne, hvor der er overlap af data på begge tidspunkter, og derefter beregne fuld fladedækning ved at interpolere højdeændringerne (se også McNabb et al. 2019).

Kjær et al. (2012) viser ændringer af Indlandsisens højde og længde langs et profil i det nordvestlige Grønland, hvor isen løber ud i havet (figur 7). Afsmeltningen beregnes som en model for massebalance på isens overflade, og ved at fratække massetabet langs profilet fundet ved den geodætiske metode findes det dynamiske tab af is, hvor fronten trækker sig tilbage ved kælvning, og isen tynder ud. Vi finder, at i begge perioder, 1985-2005 og 2005-2010, skyldes ca. 80% af massetabet dynamisk udtynding, mens resten kan tilskrives afsmeltning. Det understreger, hvor vigtig en proces dynamisk massetab er i det nordvestlige Grønland. Ved at undersøge den sparsomme laser altimetri fløjet af NASA i 1990'erne og en GPS-station ved Thule, der registrerer accelerationen i landhævning, kan det dynamiske massetab isoleres til to begivenheder 1985-1993 og 2005-2010. To perioder med høje havtemperaturer i Melvillebugten er samtidige med de to begivenheder og er den sandsynlige årsag til det regionale massetab.



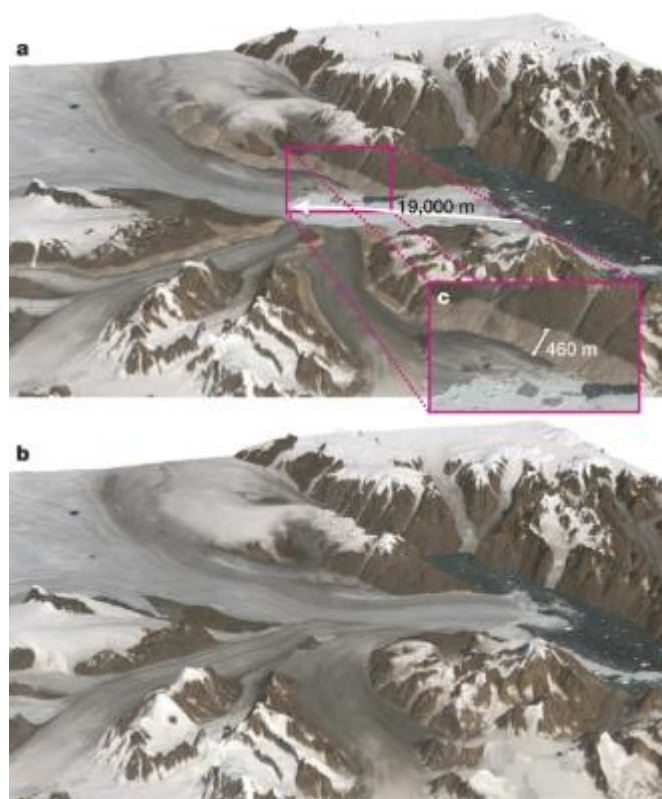
Figur 7. Indlandsisens højdeændringer i Nordvestgrønland (fra Kjær et al. 2012). A og B viser højdeændringer langs Indlandsisens rand ud mod Melville Bugt. Flyfotos dækker 15-20 km ind på isen. På C vises øverst udtyndingen langs et nord-sydgående profil placeret 200 m inde på Indlandsisen. Målte højdeændringer på isen er vist som  $dh_{ice}$ , mens afsmeltningen,  $dh_{SMB}$ , vises som linjer. Nederst et plot af ændringen af udløbsgletsjernes længde langs samme profil.

I det nordøstlige Grønland dræner den mere end 600 km lange Nordøstgrønlandske Isstrøm 16% af Indlandsisen gennem tre udløbsgletsjere, Nioghalvfjerdsfjorden (NG), Zachariae Isbræ (ZI) og Storstrømmen Gletsjer (SG). I 2002-2004 trækker gletsjerfronterne for NG og ZI sig tilbage som følge af højere lufttemperaturer, der får havis og isdebris foran fronterne til at forsvinde. ZI fortsatte sin tilbagetrækning, acceleration og udtynding frem til 2012, hjulpet på vej af forekomsten af dybereliggende varmere havvand i 2006-2007. Den forventes at trække sig yderligere 25 km tilbage, til en position, hvor højere liggende grundfjeld kan forankre istrømmen igen (Khan et al. 2014; figur 8). Til forskel fra Kjær et al. (2012), hvor brugen af flyfotos kunne bruges til at dokumentere dramatiske ændringer langs isranden, anvendes de i Khan et al. (2014) til at vise, at isen har været relativt stabil i mange år.



Figur 8. Højdeændringer og massetab for den Nordøstgrønlandske Isstrøm 1978-2012 som rater. Modificeret fra Khan et al. (2014). a) Raten af højdeændringer 1978-2003 beregnet med en højdemodel fra 1978 flyfotos og NASA ATM og ICESat laser altimetri. b-d) Raten af højdeændringer i intervaller af tre år 2003-2012 fra laser altimetri. Positive rater skyldes sandsynligvis at Storstrømmen Gletsjer (SG) er ude af balance efter et såkaldt surge 1978-1984, hvilket er årsagen til de positive højdeændringer. e) Raten af massetab for de tre epoker. Denne del af Indlandsisen er relativt i balance 1978-2003 med et tilvækst på  $1,4 \pm 2,6$  Gt/år (gigaton/år). Tykkelsen af linjen angiver usikkerheden.

En variant af den geodætiske metode bruges i Kjeldsen et al. (2015), hvor direkte observationer bruges til at skalere højdeændringer tilbage til isens maksimale udbredelse i den lille istid (1890-1910, men sat til 1900) for at give et estimat af Indlandsisens massetab for epokerne 1900-1983, 1983-2003 og 2003-2010, og den rumlige fordeling af massetabet. Det dynamiske massetab, der repræsenterer massetabet ved kælvning, findes ved at trække overflademassebalancen fra det geodætiske massetab.



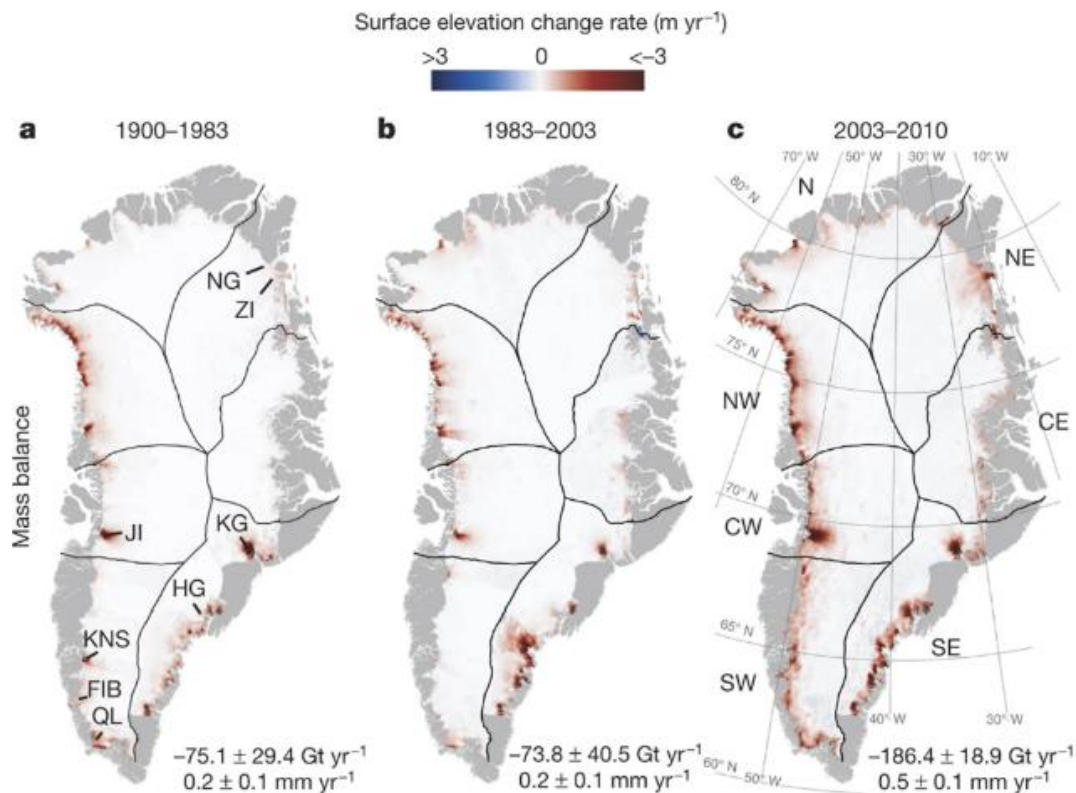
Figur 9. Konceptuel skitse af rekonstruktion af overfladen af Kangerlussuaq Gletsjer, Østgrønland, ved maksimal udbredelse i den lille istid (fra Kjeldsen et al. 2015). a) Situationen 2013 illustreret med et Landsat satellitbillede draperet ud over en højdemodel. Isen har stået højest i slutningen af den lille istid, og når den trækker sig væk, efterlader den trimlines (udsnit c) der fremstår som frisk erosion af grundfjeldet i siden af dalen. Her kan højdeforskellen måles i stereofotos. Der måles også på moræner, der er associeret med maksimal udbredelse af isen i den lille istid. b) Satellitbillede draperet ud over den lille istids overflade, rekonstrueret ved at skalere med trimlines fundet i a).

Isoverfladen ved den lille istids maksimale udbredelse 1890-1910 er fundet ved at måle i stereo-modeller. Højdeændringen mellem to tidspunkter findes ved at måle isens højde langs en trimline for tidspunktet for fotooptagelsen, og tilsvarende ved toppen af den samme trimline. Disse målinger er foretaget for hele isranden og så skaleret med højdeændringerne for hele Indlandsisen 2003-2010, fundet ved brug af laser altimetri (figur 9).

De overordnede resultater fra Kjeldsen et al. (2015) viser, at estimerede rater for det samlede massetab var 75, 74, og 186 Gt/år (gigaton/år), for hhv. 1900-1983, 1983-2003, og 2003-2010 (figur 10). Det samlede massetab for Indlandsisen 2018/2019 var 329 Gt, men med et gennemsnit på 260 Gt/år 2002-2016 (Carbonbrief 2020). Da der i Kjeldsen et al. (2015) ikke er taget højde for ændrede israndslinjer, og den samme ismaske er brugt ved alle beregninger, kan de ikke sammenlignes direkte med nyeste tal (251 Gt/år, Carbonbrief 2020), men det giver en idé om størrelsesordenen.

Et andet interessant resultat er størrelsen af det dynamiske massetab, der er konstant inden for usikkerhederne i alle tre epoker. Det betyder, at når man opdeler massetabet i en dynamisk komponent og en komponent for massebalancen på isens overflade over 110 år, så er massetabet ved kælvning konstant, og de seneste årtiers acceleration skyldes øget afsmeltning (overfladeprocesser).

Indlandsisens massetab bidrager til den globale havniveaustigning, og resultatet fra Kjeldsen et al. (2015) gør, at en kilde til havniveaustigning i det 20. århundrede nu er kvantificeret. I FN's IPCC klimarapport fra 2013 er tabellen tom hvor dette bidrag skulle have stået (Church et al. 2013, tabel 13.1). De i Kjeldsen et al. (2015) fundne rater for havniveaustigning kan aflæses nederst i figur 10. Ifølge den geodætiske metode bidrager Indlandsisen med 25 mm til den samlede havniveaustigning 1900-2010 og 10-18% af det samlede bidrag i hver epoke.



Figur 10. a-c) Højdeændringernes geografiske fordeling på Indlandsisen for de tre epoker. Den farvekodede skalabar øverst beskriver raten i m/år ( $m\ yr^{-1}$ ) af isens højdeændringer. Bogstaverne vist i 10a er forkortelser for gletsjerner og i 10c angiver bogstaverne forkortelser for sektornavne, der kun bruges i originalartiklen. Nederst er massetabet i gigaton/år ( $Gt\ yr^{-1}$ ) og det tilsvarende bidrag fra Indlandsisen til havniveaustigningen ( $mm\ yr^{-1}$ ) angivet for hver epoke.

## 7 | Konklusion og perspektiv

Arbejdet med grønlandske flyfotos ved SNM har over ti år dannet basis for et antal højprofilerede artikler, der har bragt ny og uvurderlig viden til klimaforskningen. Der er blevet kastet lys over de grønlandske ismassers respons på klimaforandringer i det 20. århundrede, hvilket bidrager til vores forståelse af – og som reference for – de forandringer vi oplever i dag. Denne viden ville ikke kunne være tilvejebragt uden brug af arkivalierne hos SDFE og de digitaliseringsprojekter, der gjorde dem tilgængelige.

Flere af forfatterne på de præsenterede artikler bruger stadig i større eller mindre omfang grønlandske flyfotos som kilde i deres arbejde, så det slutter ikke her (f.eks. Khan et al. 2020).

Den teknologiske udvikling gør bearbejdningen af historiske flyfotos mindre arbejdsintensiv. Den stadigt øgende regnekraft og teknologiske udvikling gør det nemmere at automatisere håndtering og processering af de store mængder data. Eksemplerne fra 1959 i herværende artikel koster i dag en brøkdel af den indsats, det ville have krævet i 2008. Flaskehalsen er digitaliseringen af flyfotos, hvor specifikt ortomosaikker og højdedata til brug for nøjagtige volumenberegninger forudsætter scanning på specielle fotogrammetriske scannere.

I dag investeres betydelige ressourcer i monitoring af kryosfæren, bl.a. gennem ICESat og CryoSat satellitterne, og der er efterhånden opbygget 20 års data og historik af isen i høj kvalitet. Ser man i stedet tilbage i tid, giver historiske flyfotos også viden om ismassernes afsmeltning og dynamik. Indtil videre er det under 5 procent af 224.000 fotos, der er blevet brugt til forskning. SDFE, GEUS og SNM har p.t. scannet ca. 4.200 på en fotogrammetrisk scanner. Desuden er 2.000 fotos fra SDFE blevet scannet hos National Land Survey of Finland (Maanmittauslaitos), der sammen med yderligere 1.350 fotos (Carlsbergfondet 2020) udgør et mindre projekt, der undersøger israndslinjer og geodætisk massebalance for gletsjere og Indlandsisen i Nordvestgrønland tilbage til 1953-54.

## 8 | Summary

The Greenland Ice Sheet and its peripheral glaciers are being monitored closely to understand their response to climate change and to determine the contribution to global sea level rise from melting and calving processes. Automated weather and GPS stations on the ice provide a continuous stream of information on e.g. insolation, air temperature, precipitation, and elevation change, whilst the big picture is provided by remote sensing from satellites and aircraft. The modern era of remote sensing of the ice masses in Greenland began in the early 1990's using primarily satellite-based radar altimetry, but also laser altimetry from aircraft. From the c. 224,000 aerial photos of Greenland found in the archive of the Agency for Data Supply and Efficiency (SDFE), it is possible to extend the record of direct observations back to the early 1930's.

In 2008 a group of researchers at the Natural History Museum of Denmark (NHM) began working with the historical aerial photos at SDFE. The work was made possible by the recent digitization of the index maps and other information needed to use the photos. The applied techniques, the information that can be retrieved about the dynamic landscape of Greenland from aerial photos, and the results are presented, with weight on the research carried out at the NHM.

## 9 | Litteraturliste

Andersen, E. 1968. *Report of the Geodetic, Geophysic, and Photogrammetric Work at the West Coast Region of Greenland - Executed by the Danish Geodetic Institute in connection with the Ice-Cap work of E.G.I.G.* Meddelelser om Grønland 173 (4).

Andersen, J.K., Fausto, R.S., Hansen, K., Box, J.E., Andersen, S.B., Ahlstrøm, A.P., van As, D., Citterio, M., Colgan, W., Karlsson, N.B., Kjeldsen, K.K., Korsgaard, N.J., Larsen, S.H., Mankoff, K.D., Allan, A.Ø.P., Shields, C.L., Solgaard, A. og Vandecrux, B. 2019. Update of annual calving front lines for 47 marine terminating outlet glaciers in Greenland (1999–2018). *GEUS Bulletin* 43. doi:10.34194/GEUSB-201943-02-02.

Bendixen, M., Iversen, L.L., Bjørk, A.A., Elberling, B., Westergaard-Nielsen, A., Overeem, I., Barnhart, K.R., Khan, S.A., Box, J.E., Abermann, J., Langley, K. og Kroon, A. 2017. Delta progradation in Greenland driven by increasing glacial mass loss. *Nature* 550, 101–104. <https://doi.org/10.1038/nature23873>.

Bjørk, A.A., Kjær, K.H., Korsgaard, N.J., Khan, S.A., Kjeldsen, K.K., Andresen, C.S., Box, J., Larsen, N.K. og Funder, S.V. 2012. An aerial view of 80 years of climate-related glacier fluctuations in southeast Greenland. *Nature Geoscience* 5, 427-432. doi:10.1038/ngeo1481.

Bjørk, A.A., Lütt, A., Khan, S.A., Box, J.E., Kjeldsen, K.K., Larsen, N.K., Korsgaard, N.J., Cappelen, J., Colgan, W., Machguth, H., Andresen, C.S., Peings, Y. og Kjær, K.H. 2018. Changes in Greenland's peripheral glaciers linked to the North Atlantic Oscillation. *Nature Climate Change* 8, 48–52. doi:10.1038/s41558-017-0029-1.

Carbonbrief. 2020. <https://www.carbonbrief.org/guest-post-how-the-greenland-ice-sheet-fared-in-2019>. [set 16. august 2020].

Carbonnel, M. & Bauer, A. 1968. *Exploitation des couvertures photographiques aériennes répétées du front des glaciers vélant dans Disko Bugt et Umanak Fjord, Juin-Juillet 1964.* Meddelelser om Grønland 173 (3).

Carlsbergfondet. 2020. [https://www.carlsbergfondet.dk/da/Forskningsaktiviteter/Bevillingsstatistik/Bevillingsoversigt/CF19\\_0665\\_Niels-J%a1kup-Korsgaard](https://www.carlsbergfondet.dk/da/Forskningsaktiviteter/Bevillingsstatistik/Bevillingsoversigt/CF19_0665_Niels-J%a1kup-Korsgaard) [set 16. august 2020].

Carrivick, J.L., Boston, C.M., King, O., James, W.H., Quincey, D.J., Smith, M.W., Grimes, M. og Evans, J. 2019. Accelerated Volume Loss in Glacier Ablation Zones of NE Greenland, Little Ice Age to Present. *Geophysical Research Letters* 46:3. doi: 10.1029/2018GL081383.

Child, S.F., Stearns, L.A., Girod, L. og Brecher, H.H. 2020. Structure-From-Motion Photogrammetry of Antarctic Historical Aerial Photographs in Conjunction with Ground Control Derived from Satellite Data. *Remote Sensing* 13(1), 21; <https://doi.org/10.3390/rs13010021>.

Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D. og Unnikrishnan, A.S. 2013. Sea Level Change. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex og P.M. Midgley (red.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the*

- Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1137-1216.
- Felikson, D., Bartholomaus, T., Catania, G., Korsgaard, N.J., Kjær, K.K., Morlighem, M., Noël, B., van den Broeke, M., Stearns, L., Shroyer, E., Sutherland, D. og Nash, J. 2017. Greenland outlet glacier geometry controls inland thinning. *Nature Geoscience*, 10, 366–369. doi:10.1038/ngeo2934.
- Higgins, A.K. 1988. *Glacier velocities from aerial photographs in North and North-East Greenland*. Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 140.
- Higgins, A.K. 2010. *Exploration history and place names of northern East Greenland*. GEUS Bulletin 21.
- Howat, I., Negrete, A. og Smith, B. 2015. MEaSUREs Greenland Ice Mapping Project (GIMP) Digital Elevation Model, Version 1. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/NV34YUIXLP9W>. [set 16. august 2020].
- Huber, J., McNabb, R. & Zemp, M. 2020. Elevation Changes of West-Central Greenland Glaciers From 1985 to 2012 From Remote Sensing. *Frontiers in Earth Science* 8:35. doi:10.3389/feart.2020.00035.
- Jørgensen, L.T. 2013. *Projekt kartotekskort v30*. Geodatastyrelsen.
- Khan, S.A., Aschwanden, A., Bjørk, A.A., Wahr, J., Kjeldsen, K.K. og Kjær, K.H. 2015. Greenland ice sheet mass balance: a review. *Reports on Progress in Physics* 78 (4). <https://doi.org/10.1088/0034-4885/78/4/046801>.
- Khan, S.A., Bjørk, A.A., Bamber, J.L., Morlighem, M., Bevis, M., Kjær, K.H., Mouginot, J., Løkkegaard, A., Holland, D.M., Aschwanden, A., Zhang, B., Helm, V., Korsgaard, N.J., Colgan, W., Larsen, N.K., Liu, L., Hansen, K., Barletta, V., Dahl-Jensen, T.S., Søndergaard, A.S., Csatho, B.M., Sasgen, I., Box, J. og Schenk, T. 2020. Centennial response of Greenland's three largest outlet glaciers. *Nature Communications* 11, 5718. doi:10.1038/s41467-020-19580-5.
- Khan, S.A., Kjær, K.H., Bevis, M., Bamber, J.L., Wahr, J., Kjeldsen, K.K., Bjørk, A.A., Korsgaard, N.J., Stearns, L.A., van den Broeke, M.R., Liu, L., Larsen, N.K. og Muresan, I.S. 2014. Sustained mass loss of the northeast Greenland ice sheet triggered by regional warming. *Nature Climate Change* 4, 292-299. doi:10.1038/NCLIMATE2161.
- Kjeldsen, K.K., Korsgaard, N.J., Bjørk, A.A., Khan, S.A., Box, J.E., Funder, S., Larsen, N.K., Bamber, J.L., Colgan, W., van den Broeke, M., Siggaard-Andersen, M.-L., Nuth, C., Schomacker, A., Andresen, C.S., Willerslev, E. og Kjær, K.H. 2015. Spatial and temporal distribution of mass loss from the Greenland Ice Sheet since AD 1900. *Nature* 528, 396–400. doi:10.1038/nature16183.
- Kjær, K.H., Khan, S.A., Korsgaard, N.J., Wahr, J., Bamber, J.L., Hurkmans, R., van den Broeke, M., Timm, L.H., Kjeldsen, K.K., Bjørk, A.A., Larsen, N.K., Jørgensen, L.T., Færch-Jensen, A. og Willerslev, E. 2012. Aerial Photographs Reveal Late-20th-Century Dynamic Ice Loss in Northwestern Greenland. *Science* 337, 569-573. doi:10.1126/science.1220614.
- Korsgaard, N.J., Nuth, C., Khan, S.A., Kjeldsen, K.K., Bjørk, A.A., Schomacker, A. og Kjær, K.H. 2016. Digital elevation model and orthophotographs of Greenland based on aerial photographs from 1978–1987. *Scientific Data* 3:160032. doi: 10.1038/sdata.2016.32.
- Korsgaard, N.J., Jørgensen, L.T., Weng, W.L., Olsen, J. og Kjær, K.H. 2013. *AirBase - A database of 224,000 aerial photos of Greenland 1930-1980s*. Statens Naturhistoriske Museum.
- McNabb, R., Nuth, C., Käab, A. og Girod L. 2019. Sensitivity of glacier volume change estimation to DEM void interpolation. *The Cryosphere* 13, 895–910. <https://doi.org/10.5194/tc-13-895-2019>.
- Mitrovic, M., Cvijetinovic, Z. og Mihajlovic, D. 2004. Procedures and experiences on using desktop scanner for orthophoto production. I: *XXth ISPRS Congress Technical Commission I, conference papers*, 53-58. <https://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm1/papers/11.pdf>.
- Moon, T. og Joughin, I. 2008. Changes in ice front position on Greenland's outlet glaciers from 1992 to 2007 *Journal of Geophysical Research-Earth Surface* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JF000927>.
- Nielsen, A., Olsen, J. og Weng, W.L. 1995. Grønlands opmåling og kortlægning. *Landinspektøren* 95:2, 368-386.
- Nuth, C. og Käab A. 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere* 5, 271–290. <https://doi.org/10.5194/tc-5-271-2011>.



- Pedersen, M., Weng, W.L., Keulen, N. og Kokfelt, T. 2013. A new seamless digital 1:500,000 scale geological map of Greenland. *Geological Survey of Denmark and Greenland* 28, 65–68.
- Polar Geospatial Center. 2017. *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA): AMS C501 Greenland 1:250,000 Topographic Series*. <https://maps.apps.pgc.umn.edu/arctic/05/03>.
- Porter, C., Morin, P., Howat, I., Noh, M-J., Bates, B., Peterman, K., Keeseey, S., Schlenk, M., Gardiner, J., Tomko, K., Willis, M., Kelleher, C., Cloutier, M., Husby, E., Foga, S., Nakamura, H., Platson, M., Wethington Jr., M., Williamson, C., Bauer, G., Enos, J., Arnold, G., Kramer, W., Becker, P., Doshi, A., D'Souza, C., Cummins, P., Laurier, F. og Bojesen, M. 2018. *ArcticDEM*. Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/OHHUKH>, [set 16. august 2020].
- Ross, F. S. og Ancker, P. E. 1977. Thule Air Base. *Tidsskriftet Grønland* 9-10, 268-278.
- U.S. Geological Survey. 2008. *Declassified intelligence satellite photographs: U.S. Geological Survey Fact Sheet 2008-3054*. <https://pubs.usgs.gov/fs/2008/3054/>.
- Uddannelses- og Forskningsministeriet. 2007. *Kommissionen for Videnskabelige Undersøgelser i Grønland - Bevillinger 2007*. <https://ufm.dk/forskning-og-innovation/tilskud-til-forskning-og-innovation/hvem-har-modtaget-tilskud/2007/kommissionen-for-videnskabelige-undersogelser-i-gronland-bevillinger-2007>. [set 4. marts 2021].
- Uddannelses- og Forskningsministeriet. 2008. *Forskningsrådet for Natur og Univers - Bevillinger november 2008*. <https://ufm.dk/forskning-og-innovation/tilskud-til-forskning-og-innovation/hvem-har-modtaget-tilskud/2008/forskningsradet-for-natur-og-univers-bevillinger-november-2008>. [set 4. marts 2021].
- Weidick, A. 1958. Frontal variations at Upernaviks Isstrøm in the last 100 years. *Meddelelser fra Dansk Geologisk Forening* 14, 52–60.
- Wessel, B., Bertram, A., Gruber, A., Bemm, S. og Dech, S. 2016. A new high-resolution elevation model of Greenland derived from TanDEM-X. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 3, 9–16. doi: 10.5194/isprs-annals-III-7-9-2016.
- Yde, J.C. og Knudsen, N.T. 2007. 20th-century glacier fluctuations on Disko Island (Qeqertarsuaq), Greenland. *Annals of Glaciology* 46, 209-214.

