

GEOLOG

NYT FRA GEUS

TEMANUMMER FOLDEBJERGENE I NORDØSTGRØNLAND

NR. 2 SEPTEMBER 2001

Foldebjergene i Nordøstgrønland



Niels Henriksen
A. K. Higgins



Den nordøstgrønlandske del af det kaledoniske foldebælte er blevet udforsket gennem de sidste 30 år i forbindelse med den geologiske oversigtskortlægning i Nordøstgrønland. Denne kortlægning er for nyligt blevet afsluttet, og geologerne har nu en bred viden om disse foldebjerges opbygning og dannelse samt deres relationer til nabokontinenterne omkring Grønland.

Dette temahefte beskriver opbygningen og dannelsen af de kaledoniske foldebjerge i Nordøstgrønland, der opstod ved kollision mellem et nordamerikansk og et nordeuropæisk kontinent for 450–400 millioner år siden. Ved kollisionen

blev bjergarterne i randzonerne mellem kontinenterne skubbet sammen og jordskorpen blev herved fortykket og nogle af bjergarterne blev presset ned i dybet, hvor de blev omdannet under høje tryk- og temperaturpåvirkninger.

Sammenpresningerne i jordskorpen medførte intense deformationer af bjergarterne med foldninger og dannelse af jordskorpeflager, der med forskydninger på hundredvis af kilometer blev stablet oven på hinanden som overskydninger. På grund af opvarmningen i dybet blev dele af bjergarterne opsmeltet, så der opstod granitmagmaer, der trængte op i de højere jordskorpeniveauer som intrusioner.

Jordens ydre del består af en 50–300 km tyk skal af stive bjergarter, litosfæren, der ligger oven på en blødere zo-

ne kaldet asthenosfæren (se Fig.1). Litosfæren er opdelt i syv større og en række mindre plader, der ikke ligger fast, men bevæger sig langsomt i forhold til hinanden, idet pladerne kan glide ovenpå asthenosfæren. Litosfæren består af kontinent- og ocean områder; kontinenterne er gamle og opstået gennem langsom tilvækst gennem hundredvis af millioner år, medens ocean områderne er forholdsvis unge, og hele tiden både forsvinder ved indsynkning og nydannes ved tilførsel af vulkansk materiale fra jordens indre.

Bevægelserne mellem jordskorpepladerne medfører at de stedvis kolliderer langs pladegrænserne og herved opstår sammenpresningszoner, der bliver til bæltet af foldebjerge.



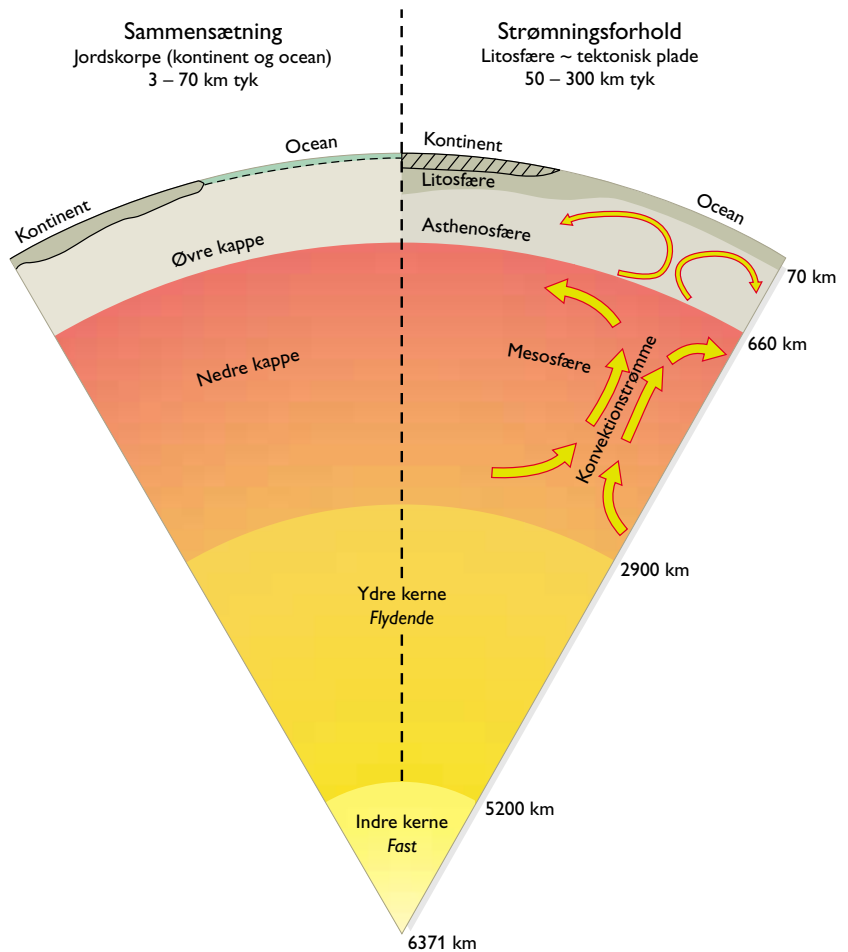
Billede af et bjerglandskab med alpine toppe og en karakteristisk plateauagtig overgrænse der ses i baggrunden, der når op i 2000–2500 m højde. Nordlige del af Stauning Alper (ca. 72°N) med Kong Oscar Fjord til højre i billedet.

Bjergkædedannelse

Jordens opbygning og sammensætning er tredelt. Inderst findes en tung jernkerne (2900–6371 km's dybde) og derover følger en mellemliggende kappe (fra varierende mellem 3–70 og ned til 2900 km's dybde), bestående af tungere ultrabasiske og basiske silikater, og øverst findes en ydre skorpe (3–70 km's dybde) domineret af lette silikatbjergarter. Denne opdelte sammensætning er et resultat af, at der er sket en differentiation – altså en adskillelse og bevægelse mellem forskellige komponenter, således at de tunge elementer er "sunket til bunds", medens de lettere er samlet øverst. Bevægelser mellem jordens forskellige komponenter har fundet sted siden dens første dannelse og har været årsag til udformningen af de geologiske processer, der præger den geologiske historie. Et af de geologiske storskala fænomener, der er resultat heraf, er dannelsen af bjergkæder. Et eksempel er den 400 mio. år gamle kaledoniske fjeldkæde i Østgrønland.

De pladetektoniske processer blev først erkendt i begyndelsen af 1960'erne, men i dag har disse forklaringsmodeller for bevægelser i jordens ydre del vundet almindelig anerkendelse og accept. Undersøgelse af de pladetektoniske forhold har vist, at jordens øvre ca. 660 km tykke zone består af to hoveddele, nemlig yderst en stiv 50–300 km tyk litosfære og derunder en plastisk deformbar blødere zone kaldet asthenosfæren ned til ca. 660 km's dybde. Litosfæren består af jordskorpen og den øverste del af kappen (se Fig. 1) og er opdelt i en række tektoniske plader. Jordskorpedelen omfatter kontinenter og oceaner, og pladernes bevægelser i forhold til hinanden finder sted oven på asthenosfæren. Kontinenterne er gamle og udbygges gradvist, medens ældre oceanbund hele tiden går til grunde samtidig med, ny oceanbund dannes. Den ældste oceanbund på jorden er ca. 200 mio. år gammel, medens de ældste dele af kontinenterne er ca. 4000 mio. år.

Litosfærepladerne, med kontinenter og oceaner, bevæger sig oven på asthenosfæren, og pladerne forskydes indbyrdes, hvilket blandt andet kan iagttages som kontinentaldrift. Årsagen til bevægelserne må sandsynligvis søges i strømninger i jordens kappe.



Figur 1. Udsnit gennem jorden, der viser dens opbygning fra inderst til yderst. Figurens venstre side viser opdelingen efter sammensætning, medens dens højre side viser opdelingen efter de strømningsforhold (rheologisk opbygning), der præger de forskellige dele. Pladebevægelserne, der er årsag til bjergkædedannelserne, finder sted som indbyrdes bevægelser af stive litosfæreplader, der "flyder" på et plastisk underlag af asthenosfæren.

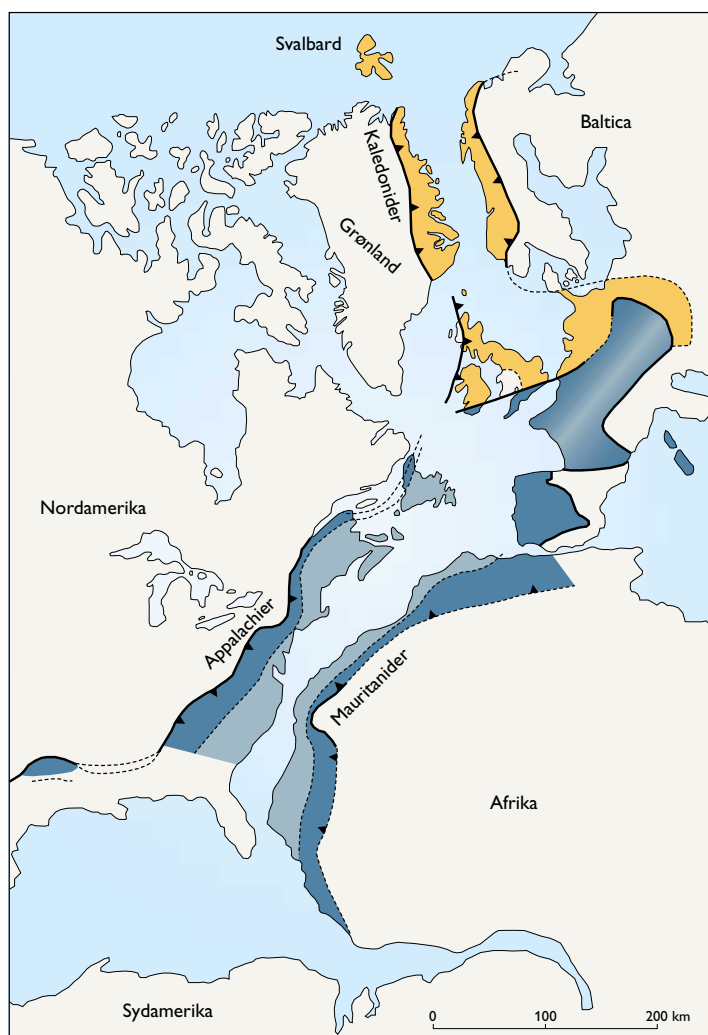
Bjergkæder kan følges over tusinder af km som lange kurvede eller retlinjede bælter i jordskorpen, der er præget af foldninger og andre deformationer. De dannes under pladebevægelserne, når kontinenter støder sammen (på engelsk: collisional orogens), eller når oceanbund skydes ned under kontinenter (på engelsk: accretionary orogens). Gennem jordens historiske udvikling har bjergkædedannelse været en stadig tilbagevendende begivenhed, der gentages med regelmæssige intervaller på flere hundrede mio. år.

Hver "cyklus" omfatter tre faser:

1. Opsplitning af en samling kontinenter (superkontinent).

2. Dannelse af oceanbund i opsplitningszonerne ved åbning mellem kontinenterne.
3. En efterfølgende lukning igen af et mellemliggende ocean med bjergkædedannelse (orogenese) langs randzonerne af de gamle kontinenter.

En sådan cyklus (en "Wilson cyklus"), har et tidsspand på flere hundrede mio. år. Den yngste omfattende foldekædedannelse på jorden er den, der dannede Alperne og Himalaya for ca. 30–50 mio. år siden. Den næstnyeste meget store globale bjergkædedannelse (epoke) var den kaledoniske for ca. 450–400 mio. år siden. Denne artikel fortæller om det hjørne af det globale kaledoniske orogen, der findes i Østgrønland.



VARISISKE – APPALACHISKE FOLDEBÆLTER

Sene foldninger, alpin type: 300–250 mio. år

Tidlige foldninger, pacifisk type: 350–300 mio. år

KALEDONISKE FOLDEBÆLTER

Alpin type: 480–400 mio. år

Stabile kontinentområder

Grænse mellem tektoniske zoner

Overskydning

Figur 2. Palæozoiske foldebælter omkring Atlanten afbilledet på et kort, hvor kontinenterne er vist i deres indbyrdes placering før den senere oceanbundsspredning.

Det kaledoniske foldebælte opstår ved kollision mellem det nordamerikanske kontinent med Grønland (Laurentia) og Skandinavien (Baltica) samtidigt med at Iapetus Oceanet lukkes. Denne type foldekædedannelse, hvor to kontinenter støder sammen kaldes en alpin type. Dannelsen af kaledonierne finder hovedsageligt sted på overgangen mellem Silur og Devon tid, men allerede i Ordovicium er der nogle steder spor af deformationen, så det totale tidsspannd går fra ca. 480–400 mio. år siden. De varisiske – appalachiske foldebælter, der forekommer syd for det sammensvæjede Laurentia-Baltica kontinent, er dannet noget senere. I en tidlig fase opstår vulkanske øbuer og løsrevne kontinentfragmenter (mikrokontinenter), der skubbes sammen i randen af de omliggende stabile kontinentområder (accretion). Denne foldekædetype betegnes pacifisk. Den finder hovedsageligt sted i Karbon tid (350–300 mio. år siden), men der forekommer også forskellige faser før da. Hovedepoken for dannelsen af de varisiske – appalachiske bjergkædestrøg finder imidlertid først sted i sen-Karbon – Perm tid (300–250 mio. år), hvor blokken af sydlige kontinenter, Gondwanaland med bl.a. Afrika og Sydamerika (Fig. 5), kolliderer med samlingen af kontinenter med Laurentia-Baltica nord derfor. Denne fase, der er af alpin type, genfolder og omdanner også de områder, der i den pacifiske fase først blev dannet i disse foldekædestrøg, medens de kaledoniske strøg var blevet konsoliderede og derfor ikke påvirkes af disse deformationer. Ved lukningen af oceanet mellem kontinenterne efter dannelsen af de varisiske, appalachiske og mauritanske foldebjerge opstår superkontinentet Pangea (Fig. 4).

Den kaledoniske bjergkæde

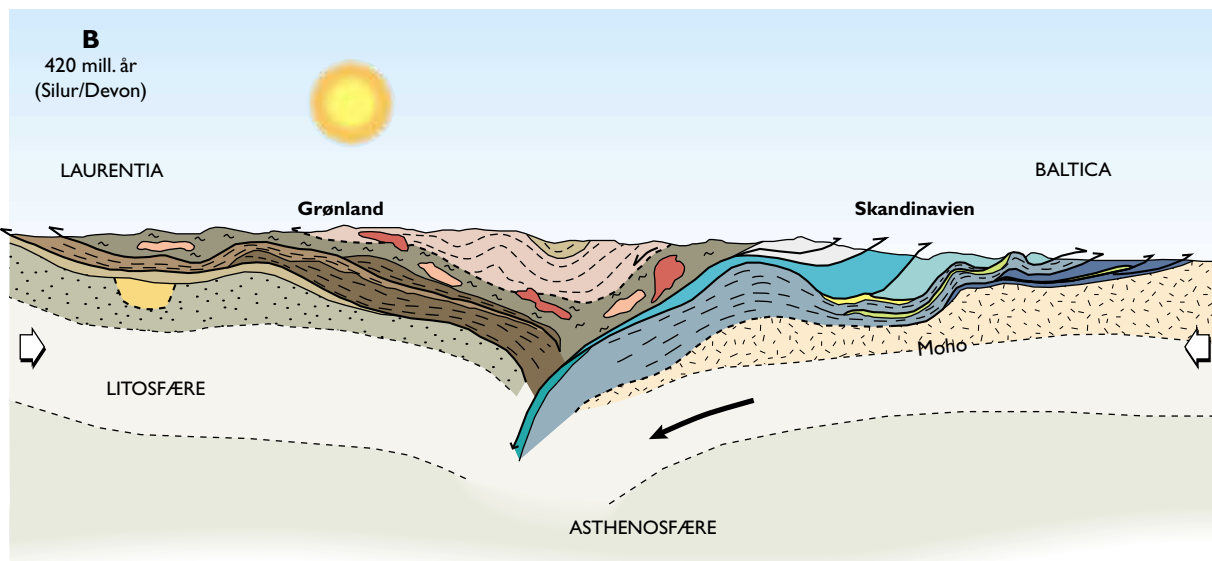
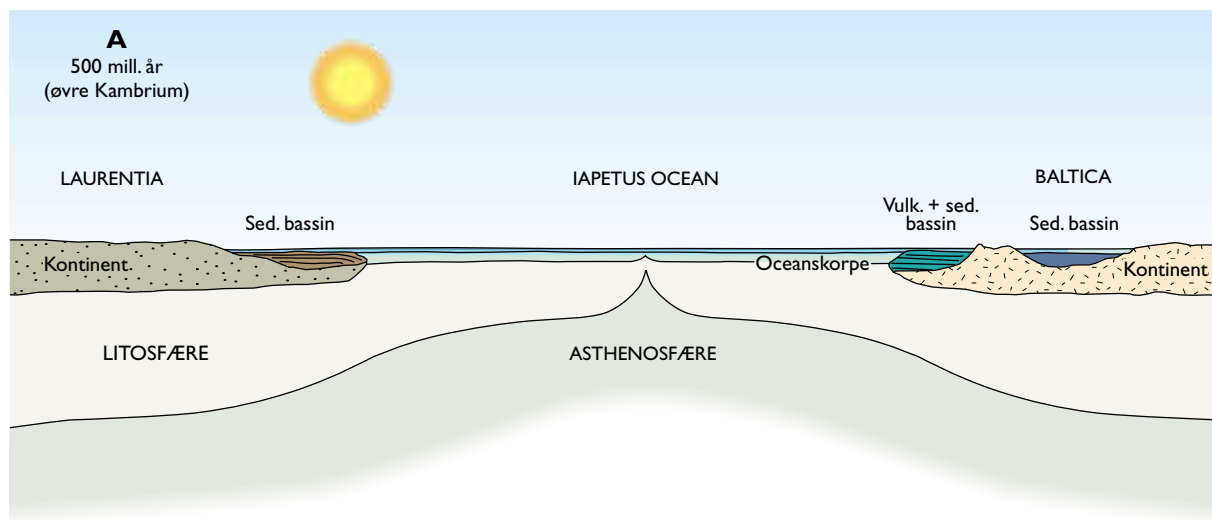
Denne findes i dag udbredt på begge sider af Atlanterhavet (Fig. 2), men bjergkædestrøg af lignende alder findes også andre steder på jorden. Bjergkæden omkring Atlanten blev dannet ved opsplitning af et gammelt superkontinent (Gondwana), der bl.a. omfattede Nordamerika og Grønland (Laurentia) og en del af Nordeuropa (Baltica). Ved opsplitningen mellem Laurentia og Baltica blev Iapetus Oceanet dannet, og det blev igen lukket i Ordovicium – Silur for 480–400 mio. år siden. Herved kolliderede de to modstående kontinenter, og bjergkæden blev opfoldet langs randen af de gamle kontinenter (Fig. 3). Kontinenterne på hele jorden samledes herefter for 450–250 mio. år siden i et nyt superkontinent Pangea

(Fig. 4). En senere opsplitning af Pangea begyndte i det tidlige Mesozoikum for ca. 160 mio. år siden og førte bl.a. til åbningen af Atlanten til den form, vi kender i dag. Ved denne nye opsplitning blev den kaledoniske bjergkæde opdelt på langs og enkelte dele fra den oprindelige laurentiske side af orogenet blev skilt fra denne og kan nu findes på østsiden af Atlanten bl.a. i Skotland. Selvom der således i dag er mange tusinde kilometers afstand mellem Østgrønland og Skotland, har disse to områder oprindeligt været nærmeste naboer under den kaledoniske orogenese. Det har derfor stor interesse at sammenligne de to områders geologi.

Den kaledoniske bjergkæde blev oprindeligt først studeret i detalje netop i Skot-

land, der på latin hedder Caledonia. Herfra har denne bjergkædefoldning fået sit navn.

De pladetektoniske bevægelser medfører, at kontinenterne ikke ligger fast på jordoverfladen, men de er i en stadig bevægelse både i forhold til hinanden og i forhold til deres beliggenhed på jorden. Bevægelseshastighederne er nogle få cm pr. år, men gennem årmillionerne betyder det, at de enkelte dele kan forskydes mange tusinde kilometer. Herved kan et bestemt område komme til at passere gennem forskellige klimazoner, og de geologiske lagserier kan derved afspejle et spektrum af varierende klimatiske aflejningsmiljøer spændende fra tropiske til arktiske forhold. Dette er fx tilfældet med nogle af de aflejringer, vi finder i den kaledoniske bjergkæde i Østgrønland,



SEDIMENTER

Grønland

- Kambrium–Ordovicium
- Neoproterozoikum
- Mesoproterozoikum
- Palæoproterozoikum (incl. vulkaniter)

Skandinavien

- Kambrium–Silur
- Neoproterozoikum–Silur
- Neoproterozoikum
- Udifferentieret

GNEJSE OG KRYSTALLINSKE SKIFRE

- Mesoproterozoikum med granitter
- Oparbejdede basamentbjergarter–Grønland
- Oparbejdede basamentbjergarter–Skandinavien
- Prækambrisk grundfjeldsskjold–Grønland
- Prækambrisk grundfjeldsskjold–Skandinavien

KALEDONISKE GRANITTER

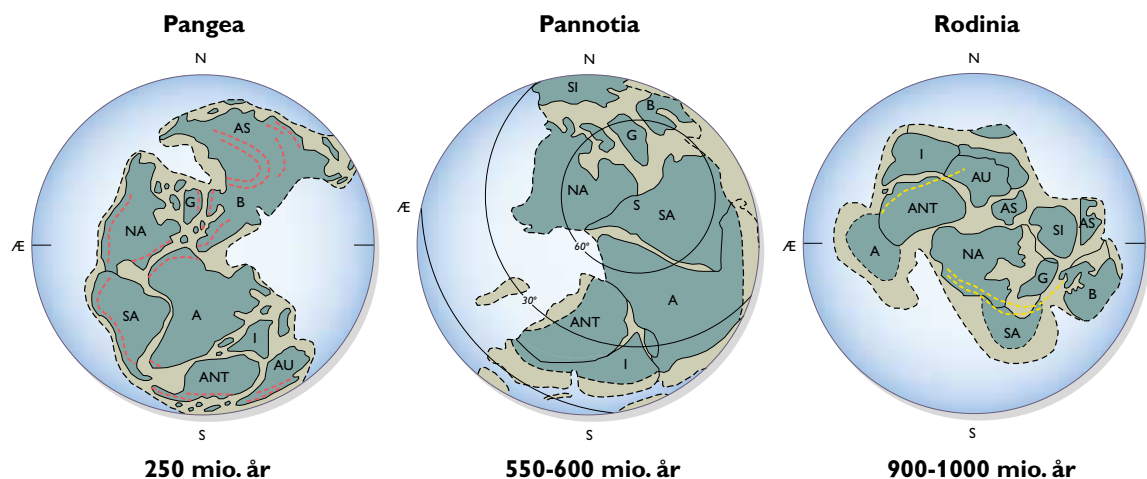
- VULKANSKE BJERGARTER MED SEDIMENTER
- Skandinavien
- Ordovicium–Silur
- Neoproterozoikum–Silur
- OCEAN BUNDS RESTER
- Kambrium–Silur

Figur 3. Pladetektonisk model for kaledonidernes dannelse i Grønland og Skandinavien. Bjergkæden opstod ved kollision mellem kontinenterne Laurentia og Baltica ved Iapetus Oceanets lukning.

A) Langs kontinenternes rand mod Iapetus dannes nogle store sedimentbassiner og vest for Skandinavien aflejres en mægtig lagserie med oceanbundslignende vulkanske bjergarter og sedimenter.

B) Ved kontinentkollisionen opstod en symmetrisk opbygning af overskydningsstrukturer med østrettede bevægelser i Skandinavien og vestrettede tektoniske transportretninger i Grønland.

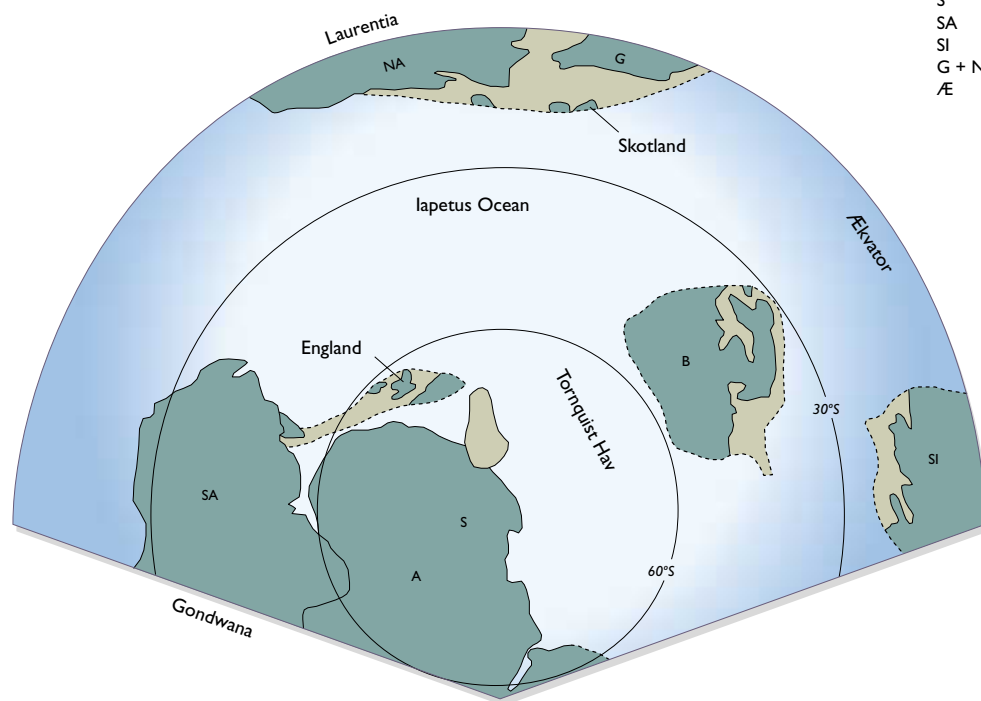
Profilskitserne er vist med en overhøjning for at tydeliggøre lagseriernes indhold. Bredden af Iapetus Oceanet i (A) er flere tusinde kilometer - og placeringen af de to modstående kontinenter var ikke parallel, som man kunne få indtryk af fra figuren. Figur 5 viser hvorledes kontinenterne var placeret i forhold til hinanden i begyndelsen af Ordoviciet.



Figur 4. Superkontinentsamlinger gennem de sidste 1000 mio. år. Modellerne er behæftede med en del usikkerheder og specielt er der mange uafklarede elementer ved det ældste superkontinent (Rodinia). Dette sidstnævnte blev dannet i den sidste del af Mesoproterozoikum, og i forbindelse hermed opstår der en udbredt serie bjergkædedannelser for 1200–900 mio. år siden (gule linier). I Nordamerika betegnes de som Grenville, mens en noget senere fase i det sydlige Skandinavien betegnes som sveco-norwegisk. Det sidst dannede superkontinent Pangea opstår efter de palæozoiske pladebevægelser og de herved opståede foldebælter (røde linier). Dette superkontinents opbygning og de indbyrdes geografiske relationer og placeringer mellem kontinenterne er ganske veldokumenterede primært gennem resultater fra palæomagnetiske undersøgelser.

Forkortelser:

A	: Afrika
ANT	: Antarktis
AS	: Asien
AU	: Australien
B	: Baltica
G	: Grønland
I	: Indien
N	: Nordpol
NA	: Nordamerika
S	: Sydpol
SA	: Sydamerika
SI	: Sibirien
G + NA	: Laurentia
Æ	: Ækvator



Nedre Ordovicium ca. 485 mio. år

Figur 5. Rekonstruktion af kontinentfordelingen i den nedre del af Ordovicium omkring det nedre palæozoiske Iapetus Ocean. Figuren viser hvorledes kontinenterne på den sydlige halvkugle var samlet som en stor sammenhængende landmasse – Gondwana – medens Nordamerika (Laurentia) og Skandinavien (Baltica) var adskilt fra de øvrige landområder af mellemliggende oceaner.

hvor dele af karbonataflejringerne fra Nedre Palæozoikum er dannet på et tidspunkt, hvor Grønland befandt sig i en position syd for ækvator (Fig. 4, 5). Først efter den kaledoniske bjergkædedannelse flyttedes Nordamerika med Grønland gradvist op til sin nuværende nordlige geografiske position.

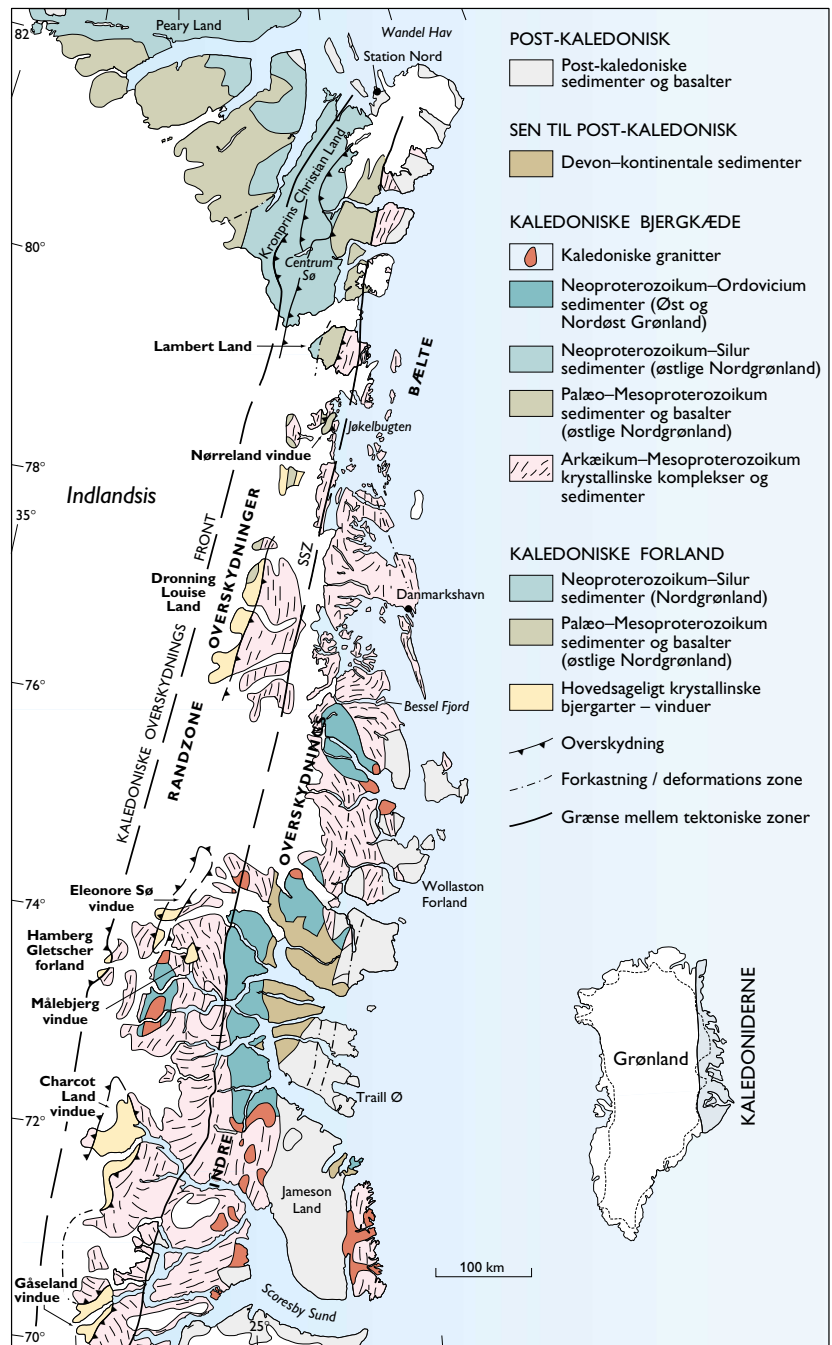
Den cyklus, der førte til dannelsen af den kaledoniske bjergkæde, spænder over ca. 500 mio. år. I Østgrønland begynder denne cyklus med aflejring af sedimenter, der er ca. 850 mio. år gamle, medens de yngste sedimenter og intrusioner, der indgår i bjergkæden, er ca. 420–400 mio. år. Ved bjergkædedannelsen i Østgrønland blev dele af randzonen til det 1000–3000 mio. år gamle grønlandske grundfjeldsskjold påvirket, således at dele af dette indgår som et medfoldet underlag (basement), der består af rester fra tre tidligere prækambriske orogenkomplekser (Fig. 3 og 6).

Den kaledoniske fjeldkæde i Østgrønland

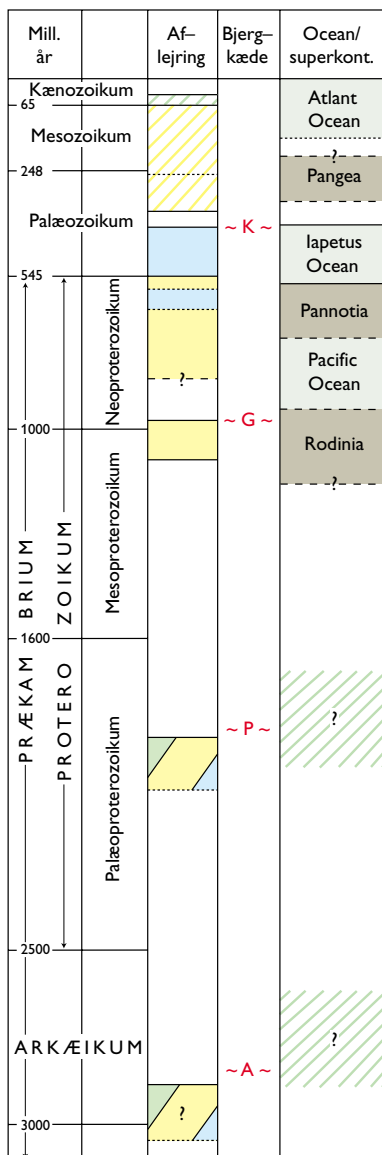
Det kaledoniske foldebælte kan følges over ca. 1300 km i Østgrønland fra Scoresby Sund regionen i syd (70°N) til den nordligste del af Kronprins Christian Land i nord (ca. 81°30'N) (Fig. 6). Indlandsisen dækker det meste af den vestlige randzone, og mod øst langs kysten og mod syd overlajres de kaledonisk foldede bjergarter af yngre sedimenter og basalter. Kun i den nordligste del er det vestlige forland til kaledoniderne blottet nemlig i regionen vest for Kronprins Christian Land.

Fjeldmassiverne i bjergkæden har ofte karakteristiske flade plateauagtige overgrænser, der ligger 1000–2000 m.o.h. Enkelte områder har dog alpine landskaber med spidse toppe, som kan nå højder på op til knapt 3000 m (Se billede på side 2). Overalt er fjeldet gennemskåret af fjorde, gletscherdale og elve, der giver geologerne fantastiske muligheder for at studere de blottede klippesider, hvor geologien præsenterer sig som en åben bog.

Den kaledoniske fjeldkæde i Østgrønland rummer en serie forskellige bjergarts-komplekser, der hver for sig har en egen baggrund og geologisk historie, men i løbet af den kaledoniske orogenese er de blevet skubbet sammen, foldet og omdannet. Bjergartskomplekser fra randzonen af det



Figur 6. Geologisk kort der viser den kaledoniske bjergkædes opbygning og udbredelse i Nordøstgrønland. Bjergkæden har en kystparallel orientering og grænser mod vest op til det prækambriske grundfjeldsskjold, der i denne del af Grønland er næsten totalt skjult under Indlandsisen. Kaledonidernes vestgrænse er vist som fronten af de store vestrettede overskydninger. Den vestlige randzone er karakteriseret af tynde overskydningsdækker oven på et stift prækaledonisk underlag (thin skinned thrust belt), medens de indre dele er karakteriseret af overskydninger, hvori de dybtliggende skorpeelementer er inddraget (thick skinned thrust belt). Lagserier med sedimenter og basalter, der er aflejret efter den kaledoniske bjergkædefoldning (post kaledonisk), er kun angivet differentieret.



Figur 7. Tidsmæssig fordeling af enheder der indgår i den kaledoniske bjergkæde i Nordøstgrønland. Bjergkæden indeholder oparbejdede dele fra ældre foldebjergskomplekser, der senere er blevet optaget i efterfølgende bjergkædedannelser (orogener). Kaledonidernes opbygning er således "polyorogent" - d.v.s. komplekst sammensat med elementer fra mindst fire orogener. Figuren viser også den tids-mæssige placering af de tre superkontinentsamlinger indenfor de seneste 1000 mio. år.

Deformationerne og foldningerne resulterer i en sammenstuvning af dele af alle de nævnte bjergartskomplekser, hvor store tektoniske overskydninger transporterer bjergartskomplekserne flere hundrede kilometer fra øst mod vest. Efter sammenstuvningen og foldningerne, hvorved jordskorpen fortykkes, sker der en gradvis hævnung og erosion af bjergkæden, således at vi nogle steder ved jordoverfladen har blottet bjergarter, der har været presset dybt ned i jordskorpen under den kaledoniske bjergkædefoldning.

Laurentias randzone i den kaledoniske bjergkæde

Det grønlandske grundfjeldsskjold, der udgør ca. 80% af hele Grønland, opstod gennem en række foldekædedannelser (orogener) for mellem ca. 3900 mio. år og ca. 1750 mio. år siden. Det meste af skjoldet blev formet i arkæisk tid, men store dele er senere blevet genfoldet og remobiliseret i palæoproterozoisk tid for ca. 1700–2000 mio. år siden. I randzonen til det kaledoniske foldebælte i Østgrønland er grundfjeldsskjoldets dannelser næsten helt dækket af Indlandsisen, og kan kun ses enkelte steder bl.a. i nogle såkaldte tektoniske vinduer. Vest for den nordligste del af foldebæltet er grundfjeldet i det kaledoniske forland dækket af en palæoproterozoisk–mesoproterozoisk lagserie med sandsten og basalter, som ikke er foldet (Fig. 6).

De dele af det tidligere grundfjeldsskjold, der nu indgår i det kaledoniske foldebælte, forekommer alle i store overskydninger og stammer altså oprindeligt fra områder, der har ligget op til flere hundrede kilometer øst for, hvor vi i dag finder dem. Man kan derfor ikke i detalje korrelere dem med de bjergarter, vi finder i vinduerne, men blot vise, at de tilhører komplekser med omtrent samme alder. Aldersbestemmelserne foretages ved hjælp af radioaktive isotoper, der er et uundværligt redskab i moderne geologisk arbejde – specielt når der arbejdes med bjergarter fra Prækambrium og med andre bjergartstyper, der ikke kan dateres ved hjælp af fossiler.

Læs mere om aldersbestemmelse ved radioaktivt henfald i GEOLOGI - Nyt fra GEUS, nr. 3 november 1999; Temanummer om Guldfund og pladetektonik.

grønlandske grundfjeldsskjold, udgør et underlag for de sedimentserier, der oprindeligt blev afsat i et hav langs Laurentias kyst forud for foldningen. Grundfjeldsskjoldets bjergarter er sammensatte og består af elementer fra tre tidligere bjergkædedannelser før den kaledoniske (Fig. 7), der fandt sted i arkæisk tid (ca. 2700–3000 mio. år), i palæoproterozoisk tid (ca. 1750–2000 mio. år) og i mesoproterozoisk tid (ca. 1100–

920 mio. år). Hovedparten af de overliggende sedimentlagserier er afsat efter ca. 850 mio. år i tidsrummet op til foldningen for ca. 420 mio. år siden (Neoproterozoikum – Silur). I en sen fase af den kaledoniske orogener dannes i den sydlige del af foldebæltet en række karakteristiske granitiske intrusioner, der skærer igennem de tidligere aflejringer, samtidig med at foldekædens bjergartskomplekser hæves i jordskorpen.

Figur 8. Lyse arkæiske (2700–3000 mio. år) gnejser skæres af yngre mørke metamorfoserede basiske gange (diskordante amfiboliter). Relationerne mellem bjergarterne afspejler eksistensen af to bjergkædedannelser (orogeneser). Under den første dannes gnejserne og efter konsolidering opsprækkes disse senere og intruderer af gangformede basaltiske bjergarter. Under den anden orogenese deformeres intrusionerne, de foldes og opbrydes i stykker, og samtidigt metamorfoserer de under amfibolitfacies betingelser, hvorved de under høje tryk og temperaturer omdannes til bjergarten amfibolit.

Tærskeldal vest for Forsblad Fjord (Fig. 20). Skala i form af geologhammer med et ca. 40 cm langt skaft.



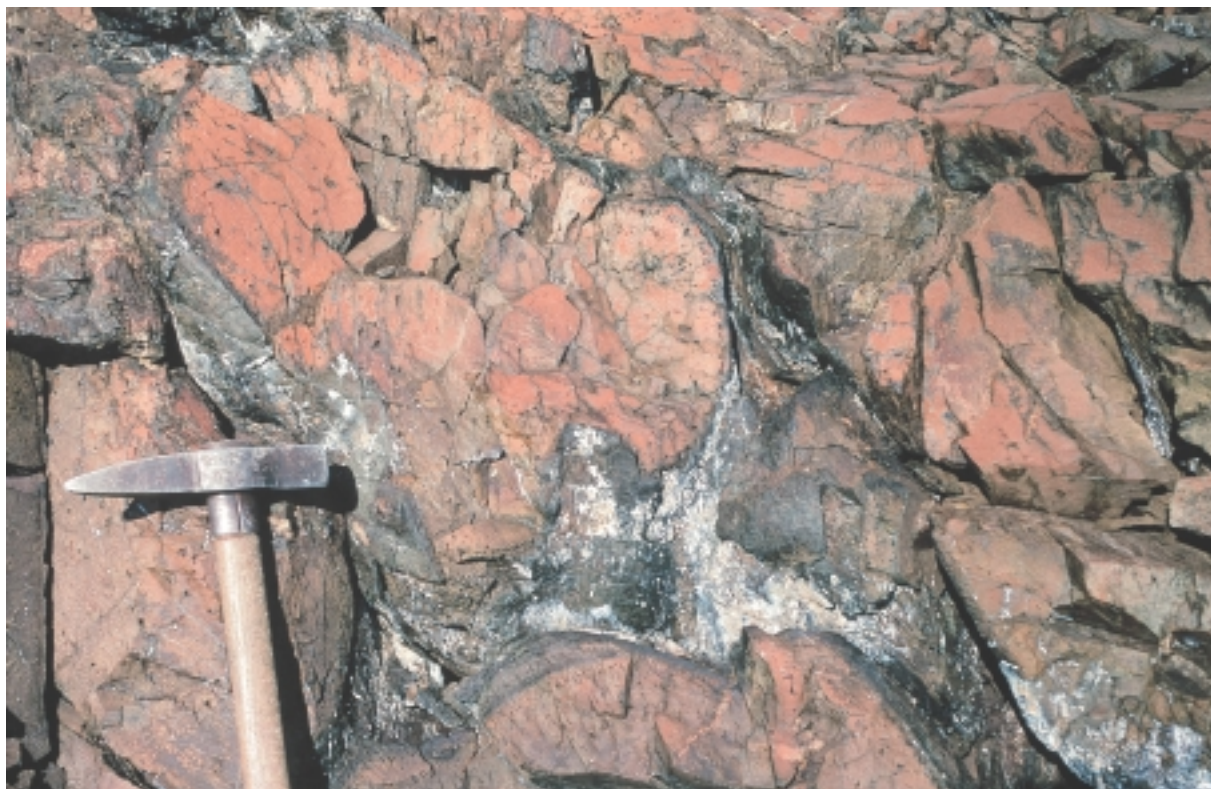
Det arkæiske kompleks

De ældste bjergarter i foldebæltet forekommer hovedsageligt i den sydlige del mellem 70°N og 73°N. De omfatter et kompleks bestående af lyse bandede gnejser indeholdende forskellige bånd og linser af mørkere amfibolitiske bjergarter og spredte bånd af metamorfoserede tidligere sedimentære aflejringer, der nu ses som horisonter af marmor og glimmerskifer. Bjergartsserien er gennemsat af medfoldede granitoide årer og konforme granitiske intrusioner og er hyppigt migmatiseret dvs. gennemsat af et uregelmæssigt netværk af tynde årer og udsondringer med kvarts og feldspat, der er dannet ved opsmeltning og mobilisering af de letteste smeltelige komponenter i bjergarten.

Et karakteristisk træk ved det arkæiske gnejskompleks i foldebæltet er forekomsten

af en række deformerede og foldede, metamorfoserede basaltiske gangformede intrusioner (Fig. 8). Disse, der af geologerne ofte bliver omtalt som "diskordante amfiboliter", indtager en nøgleposition for tolkningen af udviklingen i komplekset. De viser nemlig, at der inden gangene blev intruderet fandtes et tidligere dannet gnejskompleks, der afspejler en forudgående bjergkædedannelse og stabilisering samt hævnning af jordskorpen. Gnejsdannelsen fandt sted med plastiske deformationer under højt tryk og høje temperaturer og uden muligheder for sprækkedannelser. Først efter afkølingen kunne det basaltiske materiale trænge ind i sprækker og åbninger opstået i den stivende jordskorpe. Efter intrusionen af de basiske gange blev hele komplekset med gangene og deres sidesten udsat for en ny bjergkæde-

foldning, og blev herved både deformeret og foldet. Gangene blev brudt op i mindre stumper og linser og blev omdannet, hvorved de blev omkrystalliseret og ændret mineralogisk fra basalter til amfibolitiske bjergarter, medens de i store træk bibeholder deres kemiske sammensætning. Kun i områder, hvor deformationen har været moderat eller begrænset (såkaldte low strain områder), kan det ses hvordan de oprindeligt skar sig igennem de ældre gnejser. I områder med kraftige efterfølgende deformationer bliver strukturerne i både gangene og deres omgivende ældre gnejser helt sammenfoldet og konforme, så man ikke ad den vej kan identificere en oprindelig aldersforskel mellem de to elementer i komplekset, selvom der kan være flere hundrede mio. år forskel i alder.



Figur 9. Pudelava fra den svagt omdannede palæoproterozoiske lagserie i det tektoniske vindue i Charcot Land (ca. 72°N). Pudelavastrukturer dannes når flydende basaltisk lava strømmer ud i havet og magmaet størkner næsten momentant ved kontakten med vandet. Herved opstår afrundede smålegemer, puder af lava med en umiddelbart størknet ydre skal og en indre del, hvor lavaen størkner lidt langsommere. På billedet ses puder med en tynd finkornet helt mørk skal og en indre brunfarvet del. Mellem puderne er der senere udskilt lysere feldspat og karbonatholdige afsætninger.

Lokalitet: Charcot Land, Scoresby Sund regionen.

Palæoproterozoiske kompleks

I forbindelse med den systematiske geologiske kortlægning i Østgrønland er der foretaget radiometriske aldersbestemmelser på de granitoide og gnejsiske bjergartskomplekser, der udgør kærnen af foldebæltet og indgår i en række af de store overskydningsdækker. De fleste analyser er foretaget som uran-bly bestemmelser på enkeltkorn af mineralet zirkon, og den overvejende del af disse bjergarter giver aldre på 2000–1750 mio. år. Området, hvor bjergarter med disse aldre forekommer, ligger nord for den arkæiske region og strækker sig over ca. 900 km fra syd mod nord (73°–81°30'N). Analyserne indeholder ingen spor fra en arkæisk skorpedannelse, og basementet med de palæoproterozoiske aldre tolkes derfor som opstået som en nydannet jordskorpe (juvenil skorpe) ved en

"accretionary orogenese" i palæoproterozisk tid. Ligesom det arkæiske basement er det palæoproterozoiske et sammensat kompleks, der sandsynligvis er opstået som resultat af pladetektoniske bevægelser over en periode på ca. 250 mio. år. Indesluttet i gnejserne og sammenfoldet med dem forekommer bånd og opbrudte lagserier med marmor, kvartsit og glimmerskifer, alt sammen rester af omdannede sedimentære aflejringer, der oprindeligt blev afsat langs en passiv kontinentrand, i forbindelse med en oceanåbning.

Det palæoproterozoiske jordskorpesegment er senere blevet oparbejdet i den kaledoniske bjergkæde under denne langt yngre orogenese. Det er uafklaret, hvor mange af de strukturer vi i dag ser i dette kompleks, der er dannet under den oprindelige palæoproterozoiske orogenese, og hvilke strukturer

der er af en egentlig kaledonisk oprindelse.

Større sammenhængende ca. 1900 mio. år gamle overfladenære aflejringsserier findes to steder i randzonen af den sydlige del af det kaledoniske foldebælte. Begge områder forekommer i tektoniske vinduer, nær det vestlige kaledoniske forland, men under kaledoniske overskydningsdækker. I det nordligste vindue, Eleonore Sø vinduet (Fig. 6), forekommer en flere kilometer tyk lagserie med såvel sedimentter som mørke vulkanske bjergarter. Både sedimentter og de vulkanske aflejringer er metamorfoserede, men ikke stærkere omdannet end man tydeligt kan erkende deres oprindelige sammensætning og struktur. I de basiske vulkanitter forekommer tydelige såkaldte pudelava strukturer (Fig. 9) en struktur, der dannes, når smeltet lava løber ud i vand og afkøles hurtigt. En lignende lagserie forekommer i et

andet vindue, Charcot Land vinduet (Fig. 6), med en tilsvarende tektonisk placering nogle hundrede kilometer længere mod syd (72°N). Her består den kilometertykke lagserie også af en kombination af let omdannede sedimente, med kalksten, sandsten og lerede bjergarter samt en basisk vulkansk serie med bl.a. pudelavaer og gabbrointrusioner.

Medens de ovennævnte palæoproterozoiske dannelser alle er sat i forhold til pladetektoniske begivenheder og bevægelser, der fandt sted for 1750–2000 millioner år siden, forekommer der i det kaledoniske forland vest for den nordligste del i Kronprins Christian Land nogle lagserier af en anden alder og herkomst. Her findes en nogle kilometer tyk sandstensserie, "Independence Fjord Gruppe", hvis alder ikke har kunnet bestemmes præcist men kun som værende mellem 1750 og 1230 mio. år. Denne lagserie kunne repræsentere en aflejring af erosionsprodukter fra den palæoproterozoiske foldekæde, efter den var foldet op og derefter nederoderet. Der er ikke fundet lagserier, der i alder svarer til Independence

Fjord Gruppen, bortset fra i foldebæltets nordlige del.

Mesoproterozoiske komplekser

Ved pladetektoniske bevægelser for ca. 1300–900 mio. år siden dannedes et superkontinent, der kaldes Rodinia (Fig. 4). Spor af tektoniske begivenheder fra dette tidsrum findes i Østgrønland i bjergartskomplekser, der indgår i det kaledoniske foldebæltets sydlige del. De bevarede bjergarter fra perioden omfatter en mange kilometer tyk lagserie af omdannede sandede og lerede sedimente, kaldet Krummedal sedimente, samt en række gnejser og granitter. Sedimenterne er aflejret for mellem 1050–950 mio. år siden, medens granitterne er dannet for ca. 950–910 mio. år siden. Alle disse bjergarter fra denne periode forekommer udelukkende som en del af de kaledoniske overskydningskomplekser i foldebæltets sydlige del mellem 70° og 76°N, og de udgør således transporterede bjergartselementer, hvis placering på dannelsesstidspunktet var op til flere hundrede kilometer relativt øst for, hvor de nu forekommer. Alders-

bestemmelserne viser, at aflejring og efterfølgende orogenese spænder over 100–150 mio. år omkring grænsen ved 1000 mio. år mellem Mesoproterozoikum og Neoproterozoikum.

Krummedalsedimenterne kan spores over ca. 500 km fra Scoresby Sund regionen i syd til Bessel Fjord området i nord (Fig. 6). Set i en overordnet skala er det en forholdsvis ensartet lagserie, der består af lagdelte sandsten med bænke og enheder af lerede bjergarter. Sedimenterne er oprindeligt aflejret som lavtvandsdannelser, formodentligt langs en kontinentrand, men en detaljeret sedimentologisk analyse er ikke gennemført, da bjergarterne i dag er metamorfoserede og hyppigt for kraftigt omdannede til generelt at have bevaret deres oprindelige sedimentære strukturer. Det er mest almindeligt at finde dem som granatførende brunlige glimmerskifre og kvartsrige skifre (Fig. 10), der er rekrytalliseret under høje tryk- og temperaturforhold (amfibolitfacies). Krummedalsedimenterne er hyppigt migmatiserede, dvs. indeholder lyse årer af granitisk materiale, der er



Figur 10. Småfoldede Krummedal sedimente bestående af lagdelte sandsten med lerede bænke. De viste bjergarter har her bevaret deres oprindelige sedimentære karakter, men de er metamorfoseret under epidot-amfibolitfacies forhold. Lokalitet i Krummedal i den inderste nordvestlige del af Scoresby Sund regionen (72°N).



Figur 11. Deformeret øjegranit. Bjergarten består af større linseformede feldspatstrøkorn, der forekommer i en finkornet gnejsisk grundmasse af kvarts, feldspat og mørk biotit. Bjergarten er oprindeligt dannet som en ca. 950 mill år gammel granitisk intrusion og først ved en senere deformation er den blevet orienteret (folieret). Lokalt: Bartholin Nunatak (se Fig. 20). Filtpen er ca. 15 cm lang.

opstået ved uds melting af kvarts og feldspat fra sedimenterne selv.

De metamorfoserede Krummedalsedimenter indeholder overalt små korn af zirkon. Zirkon er et særdeles robust og bestandigt mineral, der kan nydannes under høje tryk- og temperaturforhold, men som også til tider er i stand til at overleve disse senere omdannelser, hvorved de kan afspejle en tidligere tilblivelseshistorie.

Isotopgeologiske analyser på enkeltkrystaller af zirkoner fra Krummedalsedimenterne har vist, at disse består af korn af forskellig alder med en spredning, der spænder fra ca. 1800–1100 mio. år. Dette er et tidsspand, der rækker tilbage til før den orogene periode, der førte til samlingen af kontinenterne i Rodenia. Endvidere er spredningen så stor, at zirkonkornene må afspejle flere forskellige orogeneser.

Krummedalsedimenterne rummer enkelte zirkonkorn, som er blevet tilført sedimentet som "sandkorn" (detritiske korn), der stammer fra erosion og nedbrydning af områder fra flere forskellige Prækambriske

grundfjeldsområder.

Da grundfjeldsskjoldet i Grønland ikke indeholder dele med aldre mellem ca. 1700 og 1000 mio. år, må det derfor konkluderes, at Krummedalsedimenterne er opstået ved nedbrydning af bjergarter fra et andet og mere fjerntliggende kontinent og oprindeligt afsat i et bassin nær dette. Et sådant bassins placering kunne være et sted langt syd for Grønland i en position relativt øst for det sydøstlige Canada, hvor der netop forekommer grundfjeldsområder, der indeholder orogenesegmenter fra intervallet mellem ca. 1800 og 1000 mio. år.

Krummedalsedimenterne er som sagt mange steder blevet migmatitiseret, dvs. gennemsat af et uregelmæssigt og diffust netværk af tynde åre af kvarts/feldspat materiale, der tilsammen har en sammensætning, der geokemisk er meget lig en granit. Materialet i disse åre stammer fra sedimenterne selv, idet de letsmelte og mobiliserbare andele er blevet udskilt, når de tidligere vandrige sedimentserier udsættes for temperaturer over ca. 600–700 °C.

Når den delvise opsmeltning og mobilisering af sedimenterne når et større omfang, dannes der egentlige granitiske magmaer. Disse er mobile og kan spredes rundt i omgivelserne og intrudere som regulære bjergartssmelter eller kan replacere de eksisterende bjergarter uden, at de oprindelige strukturrelationer ændres og således, at de eksisterende storskala foldestrukturer bevares. Granitlegernerne kan blive mange kilometer i udstrækning, og de repræsenterer altså enorme partielle opsmeltninger af de sediment, som de oprindeligt stammer fra.

De beskrevne granitdannelser omfatter forskellige typer. De mest karakteristiske er øjegrانيتter, hvor øjnene er cm-lange feldspatkorn, der "svømmer" i en grundmasse af mere finkornet granit (Fig. 11). Disse granitter er mest udbredte i den sydligste del af foldebæltet. En anden type består af lyse fint-mellemkornede mere homogene granitter, hvis udseende og forekomstform ikke kan skelnes fra de langt senere yngre granitter, der er ca. 420 mio. år gamle og er

af kaledonisk oprindelse. De ældre ca. 950–910 mio. år gamle granitter er ofte påvirket af forskellige senere deformationer, og de er derved blevet folierede (mineralerne er orienteret i en ensartet retning). Granitterne kan dog i nogle tilfælde være helt homogene og uden tegn på senere deformation.

Samspeilet mellem Krummedal sedimenterne og granitterne samt de strukturer, der er knyttet til dem, viser, at der i den sydlige del af området har fundet en egentlig orogenese sted for omkring 1000–900 mio. år siden. I områdets nordlige del er påvirkningerne fra deformationer mindre,

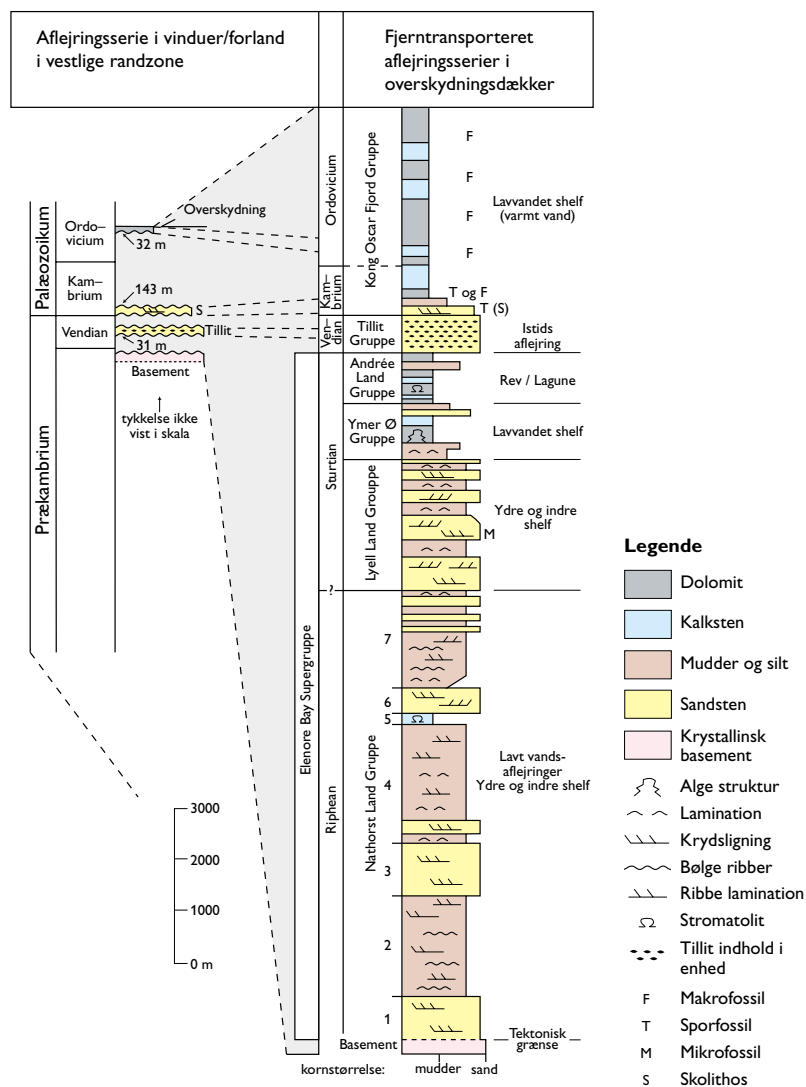
og man har her eventuelt repræsenteret et område, hvor de ca. 1000 millioner år gamle pladetektoniske processer primært har haft karakter af strækningsbevægelser og forhøjede temperaturer.

Sedimentbassiner fra Neoproterozoikum – Silur (ca. 850–420 mio. år)

Optakten til det kaledoniske orogen i Østgrønland begyndte allerede ca. 400–500 mio. år før den egentlige bjergkædefoldning. I dette lange tidsrum dannes der langs den østlige rand af det stabile prækambriiske grundfjeldsskjold i Grønland nogle sedimentbassiner, hvori der i tidens løb aflejres sedimentlagserier på mange kilometers tykkelse. Udformningen af bassinerne skifter gradvis karakter med tiden og er noget forskelligt udformet i den nordlige og den sydlige del af strøjet, således at der nu skelnes mellem en bassinsekvens i den sydlige del (71°–76°N) og en anden i den nordlige del (79°–82°N). I den tidlige del af Neoproterozoikum blev aflejringerne afsat på en langsomt indsynkende kontinentrand i et marint miljø. Derefter begyndte for ca. 600 mio. år siden en oceandannelse, der førte til åbning af Iapetus Oceanet (Fig. 5) og dermed til begyndelsen til den kaledoniske "Wilson Cyklus". Sedimentserierne, der i Østgrønland afsættes langs randen af dette ocean, begynder med sandede aflejringer, men domineres af en tyk serie lavvandsafsatte karbonatsedimenter fra Kambrium til Ordovicium/Silur. I den sidste del af udviklingen begynder Iapetus Oceanet at lukke og den egentlige bjergkædefoldning finder sted i Silur tid og begyndte lidt før i syd end i nord. Nedenfor beskrives sedimentbassinudviklingen i henholdsvis syd og nord.

Sedimentbassinerne i den sydlige del af foldebæltet

Denne del omfatter en lagserie på i alt 18,5 kms tykkelse (Fig. 7 og 12). De nederste ca. 13 km betegnes som "Eleonore Bay Supergruppen", der er aflejret i Neoproterozoikum. Herefter følger "Tillit Gruppe" sedimenterne, der bl.a. består af en række karakteristiske istidsaflejringer med en tykkelse på 800–1000 m. Disse sedimenter blev aflejret i den Vendiske periode (for mellem 580–560 mio. år siden) umiddelbart før



Figur 12. Den neoproterozoiske – nedre palæozoiske sedimentære lagseries udvikling i den sydlige del af det kaledoniske foldebælte i Østgrønland. Hovedlagserien blev oprindeligt afsat i et bassin, der fandtes langt (flere hundrede kilometer) øst for, hvor de forekommer i dag i bjergkæden. Sedimentlagserien havde her en samlet mægtighed på over 18 km, der blev aflejret i tidsrummet mellem ca. 850 og 460 mio. år. I foldebæltets vestlige randzone blev der i samme tidsrum kun afsat en ganske tynd lagserie på ca. 200 m tykkelse. Denne enorme forskel i udvikling bekræfter antagelsen af, at der oprindeligt var meget stor afstand mellem bassinets vestlige randzone og dets centrale dele mod øst. Når de to forskellige udviklingsformer i dag forekommer geografisk med kun et halvt hundrede kilometers afstand imellem skyldes det, at hovedlagseriens bjergarter er blevet transporteret vestpå med de store kaledoniske overskydningsbevægelser.



Figur 13. Panorama over et udsnit af den øvre del af Eleonore Bay Supergruppe (EBS) sedimenterne fra Nordøstgrønland. Denne sedimentserie er aflejret på en lavvandet shelf øst for den nuværende kyst og er senere under den kaledoniske bjergkædedannelse blevet transporteret ind over randen af det grønlandske grundfjeldsskjold, som en del af et flere kilometer tykt overskydningsdække. Sedimentserien, der ses på billedet, omfatter dele af Lyell Land, Ymer Ø og Andrée Land Grupperne, der hver er henholdsvis ca. 2200, 1200 og 1200 m tykke. Ymer Ø Gruppen omfatter seks formationer, der er fra 60–290 m tykke, og som hver har en karakteristisk farvesammensætning, der gør dem let genkendelige. Hele Gruppen er derfor en særdeles markant enhed, hvoraf nogle dele kan følges i stor detalje over en 300–400 km lang strækning i Nordøstgrønland fra Canning Land (ca. 72°N) til Ardencape Fjord (ca. 75°N). (Figurtekst fortsætter næste side).

Kambrium tid. Under den seneste del af bassinudviklingen ændres aflejningsforholdene radikalt og i løbet af Kambrium og Ordovicium aflejres en 3–4 km tyk lagserie med karbonatsedimenter, "Kong Oscar Fjord Gruppen", der afspejler afsætninger i et tropisk-subtropisk marint lavvandsområde. De mægtige lagserier forekommer i dag udelukkende i de store overskydningsdækker og er altså oprindeligt aflejrede på et sted der lå flere hundrede kilometer øst for, hvor vi ser dem i dag. Bassinets vestlige randzone grænser op til det stabile prækambriske grundfjeldsskjold og her mangler sedimentudviklingen enten helt eller dele af lagserien er udviklet som meget tynde lagserier på op til få hundrede meters tykkelse.

Lignende bjergartsserier som dem, vi finder i Eleonore Bay Supergruppen og Tilit Gruppen, forekommer også på Svalbard,

der nu ligger øst for Nordgrønland. Dette tages som udtryk for at dele af Svalbard, før den seneste udvikling af Nordatlanten, befandt sig nær den centrale del af Østgrønland, og at bassinudviklingen i de to områder var meget lig hinanden.

Eleonore Bay Supergruppen

Denne er domineret af marine lavvandsaflejringer med sandede og lerede bjergarter, der opad går over i en serie kalksedimenter. Aflejringerne kan følges som en markant og karakteristisk lagserie i et bælte der fra syd til nord kan følges over en ca. 400 km lang strækning. Lagseriens udformning er præget af rolige og stabile aflejningsforhold og det er muligt at følge udsnit af lagserien i hele udbredelsesområdet.

Den nederste del af supergruppen, "Nathorst Land Gruppen", er i alt ca. 9 km

tyk. Den består af bandede sandsten og mere lerede bjergarter samt en enkelt kalkstensenhed omtrent midt i serien. Bjergarterne indeholder overalt forskellige sedimentstrukturer f.eks. krydslejring, bølge- og strømdannede ribber, lokale strømningsstrukturer, tørresprækker m.v. Disse strukturer viser hen til et aflejningsmiljø på lavt vand spændende fra en ydre shelf med stormpåvirkede sedimentære aflejningsforhold til en indre shelf med tidevandspåvirkede forhold. Aflejringeres alder kan kun angives omtrentligt ud fra radiometriske bestemmelser af underlagets alder og alderen på de overliggende sediment. Ud fra disse bestemmelser må "Nathorst Land Gruppen" være afsat efter for 920 mio. år siden og før for ca. 700 mio. år siden.

Den øvre del af Eleonore Bay Supergruppen består af en sedimentserie på i alt



Ymer Ø Gruppens sedimenter består af grå, rustbrune og rødlig muddersten og sandsten, mørke grå og sorte kalksten, samt hvide, gullige og rødbrune dolomiter. Hele serien er meget velbåndet og indeholder forskellige sedimentære strukturer samt aftryk efter algevækster, der vidner om organisk aktivitet i aflejningsbassinet. I den vestlige ende af profilet (mod venstre) ses dele af den underliggende Lyell Land Gruppe og mod øst (højre) ses dele af den overliggende Andrée Land Gruppe med den karakteristiske grålige karbonatsekvens. Den øvre del af Eleonore Bay Supergruppe aflejringerne er neoproterozoiske, men deres præcise alder kendes ikke. De antages at være ca. 620–700 mio. år gamle.

Billedet er taget fra sydsiden af Forsblad Fjord (blotningerne i forgrunden med personerne) set over mod det ca. 1900 m høje Berzelius Bjerg på nordsiden af fjorden.

4–5 km's tykkelse. Nederst findes "Lyell Land Gruppen" med en 2–2,5 km tyk serie, der består af båndede skiftende hvide, brunlige og violette sandsten med mørkere muddersten ind imellem. Indhold af mikrofossiler (acritarcher) i lagserien viser, at den er afsat i Sturtian perioden og er ca. 700 mio. år gammel. Aflejningsmiljøet svarede til en placering på et ydre til indre shelfområde.

Næste del udgøres af den ca. 1200 m tykke "Ymer Ø Gruppe", der er en særdeles iøjnefaldende mangefarvet serie af rødlig, grå, rustbrune, sorte, hvide og gule muddersten, finkornede sandsten og kalkbjergarter.

Hele sekvensen er tidligere blevet benævnt den "Brogede Serie", på grund af disse iøjnefaldende farver, der gør det let at spore og følge den over store afstande i den østgrønlandske fjordzone (Fig. 13).



Figur 14. Nærbillede af et ca. 2 m tykt udsnit af bjergarten fra den finlagdelte Andrée Land Gruppe. Den er aflejret i den øverste del af Neoproterozoikum og består af gullige og lyse – mørke grålige kalksten, der meget hyppigt indeholder algedannede organiske strukturer. Disse danner små banker og mindre bølgeformede strukturer, som dem der ses på billedet. De undulerende lagflader er altså ikke folder, men stammer fra algevæksternes former.

Ymer Ø Gruppen er afsat i lavvandede shelfområder, med et overordentligt stabilt udviklingsmønster, der bevirker, at enkelte del-lagfølger i detalje bevarer deres udformning over flere hundrede kilometers afstand. Dette afspejler den yderst rolige indsynkning af shelfområdet og viser klart, at der ikke har fundet tektoniske forstyrrelser sted, medens disse sedimenter blev aflejret.

Den øverste del af Eleonore Bay Supergruppen udgøres af "Andrée Land Gruppen" med en ca. 1200 m tyk lagserie af båndede kalksten og dolomiter med enkelte lerede indslag. Lagseriens bjergarter indeholder en række karakteristiske algestrukturer (Fig. 14) samt små ærtstore kugleformede kalklegemer (pisoliter), der sammen med andre sedimentære strukturer viser at sedimenterne blev afsat på en tidevands-påvirket shelf med en indre lagune begrænset af en barriere (rev) og med en stejle skråning længere ude mod det dybe hav. Aflejringerne afspejler et varmt klima, med tropiske til subtropiske forhold.

Tillit Gruppen

Denne, der har en tykkelse på 300–1300 m, overlejrer Andrée Land Gruppens kalkbjergarter, eventuelt med et mindre tidsmæssigt ophold i sedimentationen mellem de to serier. Overgangen mellem dem afspejler en markant klima ændring, idet Tillit Gruppen bl.a. indeholder istidsaflejringer, der altså umiddelbart overlejrer aflejringer, der er afsat i et varmt miljø. Istidsaflejringerne, de såkaldte tillitter, kan sammenlignes med kvartærtidens moræneaflejringer og viser at området, hvor de blev afsat, har været nediset. Tillitbjergarten består af en grundmasse med en forskellig blanding af fint og groft sand, hvori der findes indlejret store og små blokke af fjerntransporterede sten (Fig. 15), der kommer fra det bagland som gletscherne afhøvede og nederoderede. Det tolkede bratte klimaskift er et geologisk problem med forskellige forklaringsmuligheder. En af antagelserne indebærer, at der på dette tidspunkt i jordens udviklingsforløb eksisterede en periode med en udbredt nedisning, der nåede ned til breddegrader

væsentligt nærmere ækvator, således at Grønland på dette tidspunkt godt kunne være påvirket af nedsningsfænomener, selvom Laurentia med Grønland på dette tidspunkt befandt sig nærmere ækvator på den sydlige halvkugle. Antagelsen af en udbredt global nedisning finder støtte i det faktum, at man fra samme periode finder tillitaflejringer mange andre steder i verden bl.a. i Afrika og i Australien samt en del andre steder inden for den kaledoniske bjergkæde. En bedømmelse af disse tillitforekomsters udbredelse må tage sit udgangspunkt i den kontinentfordeling og placering, der fandtes inden for superkontinentet Pannotia (Fig. 4).

Kong Oscar Fjord Gruppen

Ved overgangen til Palæozoikum skifter aflejringsmiljøet igen drastisk. Lagserien i det centrale Østgrønland er fra Kambrium og Ordovicium og betegnes "Kong Oscar Fjord Gruppen". Den begynder med en tynd serie sandede sedimenter fra det nederste Kambrium, men derefter afsættes en ca. 3 km



Figur 15. Tillit – en forstenet morænelignende bjergart fra en ca. 600 mio. år gammel istidsaflejring. Den afbillede bjergart består af en uomdannet (umetamorfiseret) sandet grundmasse med indsluttede uregelmæssige op til 1/2 m store blokke af granit, gnejs og metamorfe skifre m.m. Den afbillede bjergart forekommer i et tektonisk vindue i Charcot Land (ca. 72°N), hvor den tillitiske bjergart er afsat på et ca. 1900 mio. år gammelt gnejsisk-granitisk basement. I vinduet forekommer de begge under et kaledonisk overskydningsdække med højmetamorfe krystallinske skifre og migmatiter.



Figur 16. Skolithos kvartsit. Oprindeligt dannet som en sandsten, der blev gennemboret af lodrette rørformede gravegange fra orm. I snit vinkelret på lagdelingen, som på billedet, ses rørene som lyse op til 10–20 cm lange lyse striber i bjergarten. Set på lagfladerne er sporene formet som runde 2–4 mm store aftegninger. På billedet forekommer også en zone, hvor ormerørene er knækket og danner et lag med skråstillede rør. Dette skyldes en senere tektonisk påvirkning (shear), der hænger sammen med overskydningsbevægelserne. Skolithos er karakteristisk for den nederste del af Kambrium og derfor et yderst vigtigt sporfossil, der viser hvor den palæozoiske lagserie begynder.

Lokalitet: Det tektoniske vindue ved Eleonore Sø.

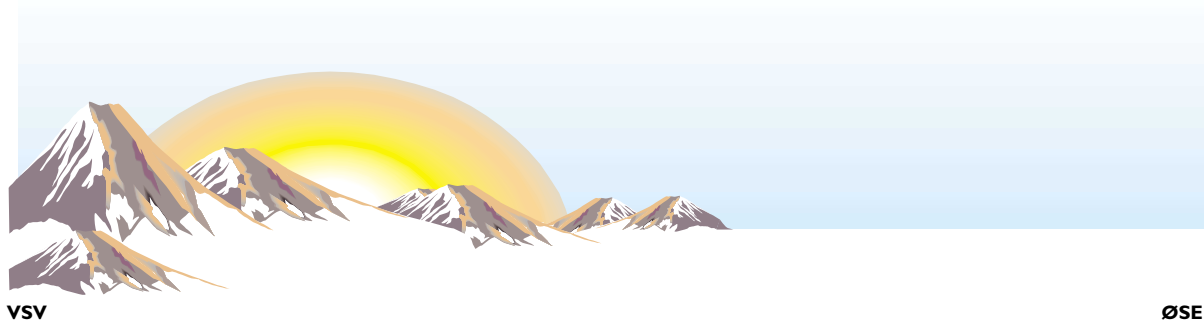
tyk lagserie med kalksedimenter. De kambr-ordoviciske sedimenter indeholder som de første i foldebæltet en række karakteristiske forsteninger – trilobitter, snegle, brachiopoder (armfodder), muslinger m.fl. I de nedre sandsten forekommer de karakteristiske og stratigrafisk set særdeles betydningsfulde sporfossiler – *Skolithos* (Fig. 16) – der tolkes som spor efter gravende organismer f.eks. sandorm eller lign. Tilstedeværelsen af disse sporfossiler i nogle af de tektoniske vinduer har været afgørende for tolkningen af den tektoniske udvikling, idet de med deres sikre aldersindikation beviser, at der i disse områder forekommer kambriske sandsten, der er overskudt af ældre bjergarter, med en mesoneoproterozoisk alder. En sådan omvendt lagfølge kan kun dannes ved en senere strukturelt betinget sammenstuvning af bjergarterne, hvilket dermed også er nøglen til forståelsen af den geotektoniske opbygning baseret på dannelsen af store overskydningsdækker. De palæozoiske kalksten i fjord-zonen når alders-

mæssigt op til slutningen af Ordovicium – svarende til en alder på ca. 450–445 mio. år.

Sedimentbassinene i den nordlige del af foldebæltet

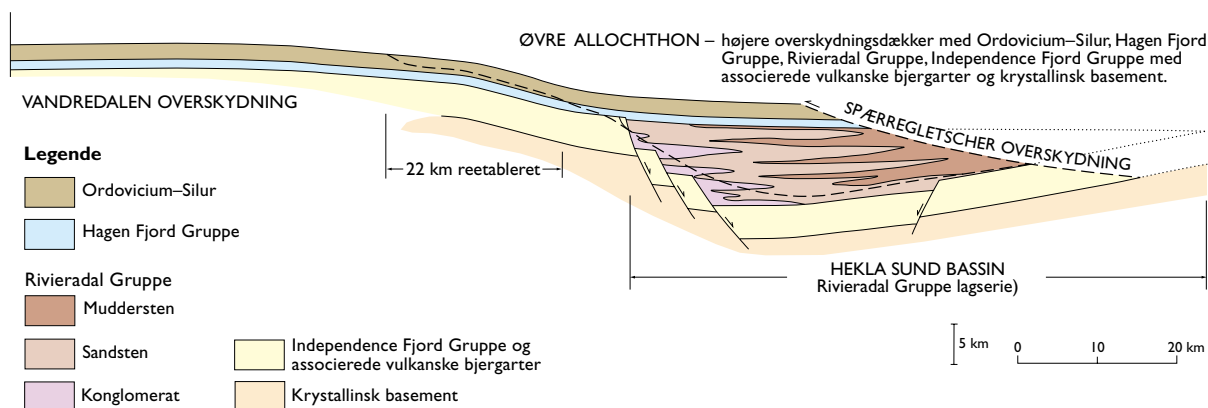
Bassinudviklingen i den nordlige del afspejles i opbygningen af foldebæltet i Kronprins Christian Land regionen (Fig. 6). Her forekommer en Neoproterozoisk – Silur lagserie, der er udviklet noget forskelligt fra den samtidige lagserie i den centrale del af Østgrønland. I Kronprins Christian Land regionen forekommer de fleste af sedimenterne både i foldebæltet, hvor de indgår i store vestrettede overskydninger, og som en ufuldelt lagserie i det vestlige forlandsområde. Den neoproterozoiske del af lagserien blev afsat i "Hekla Sund Bassinet", der i begyndelsen udvikles som et tektonisk betinget indsynkningsområde (halv gravsænkning) på kanten af grundfjeldsskjoldet inden den senere bliver en del af den begyndende kontinentopbrydning ved åbningen af Iapetus Oceanet. Den ældste aflejringsserie i bassi-

net består af en 7–8 km tyk lagfølge af sandsten og muddersten med indslag af store enheder med kileformede konglomerater i den vestlige side af bassinet. Disse aflejringer, benævnt "Rivieradal Gruppen" (Fig. 17), forekommer i dag udelukkende i et kaledonisk overskydningsdække. Sedimentologiske studier af den måde Rivieradal sandstens aflejringer forekommer på viser, at disse oprindeligt blev afsat i et bassin langs den nuværende østrand af grundfjeldsskjoldet. Bassinets vestgrænse dannes af en serie stejltstående forkastninger, der blev udviklet samtidigt med indsynkningen i bassinet. Disse stejltstående forskydninger giver ophav til en kraftig reliefdannelse, der resulterer i aflejringer af en række grove konglomerater, der afsættes som aflejringsfaner (kegler) ud i bassinet foran store flodudmundinger fra baglandet mod vest. Rivieradal Gruppens aflejringsserie udviser en markant ændring fra vest mod øst med grovere sedimenter afsat nær kysten i bassinets lavere vestlige dele og med mere



VSV

ØSE



Figur 17. Øst–vest tværsnit gennem Kronprins Christian Land med den neoproterozoiske – ordoviciske og silure sedimentlagserie i Hekla Sund Bassinet og på den lavvandede shelf vest for bassinet. Rivieradal Gruppe sedimenterne omfatter kiler med grovkornede konglomerater afsat uden for en forkastning i grænsen til landområdet mod vest. Ud i bassinet mod dets dybere dele og bort fra forkastningen aftager kornstørrelsen i sedimenterne med gradvise overgange fra konglomerater via sandsten til muddersten.

finkornede sedimenter aflejret i de dybere dele af bassinet længere mod øst i en større afstand fra kysten. Rivieradal sandstens alder kan ikke angives præcist, men den kan vises at være afsat i intervallet mellem 1230 og 620 millioner år; sandsynligvis er den lidt yngre end 1000 millioner år.

Rivieradal Gruppen overlejres af "Hagen Fjord Gruppens" lagserie af sandsten og kalksedimenter, der i alt har en tykkelse på 1–2 km og som består af en transgressiv serie, der breder sig ind over det stabile skjold vest for foldebæltet. Alderen antages at være seneste Riphean (650–750 mio. år?). Lagserien begynder med sandede flodaflejringer der går over i marine lavvands aflejringer. Hagen Fjord Gruppen findes både i de kaledoniske overskydninger og i det tilgrænsende forland. De overlejres begge steder efter en betydelig hiatus (et tidsrum uden aflejringer) af en nedre Palæozoisk lagserie, der ligesom i Østgrønland begynder med sandsten i den nederste del af Kambrium, men som derefter er udviklet som en serie af kalksten og dolomiter med en righoldig fossil fauna. Kalklagene blev aflejret på en

lavvandet kontinental-shelf i randen af lappet Oceanet. Dette havområde (bassin) udgør den østlige del af "det Franklinske Bassin", der dækker hele Nordgrønland og som strækker sig ind over de nordlige dele af Canada. Den østligste del af det Franklinske Bassin hævedes og blev nederoderet delvis i løbet af øvre Kambrium og nederste Ordovicium, så denne del af lagserien mangler i Kronprins Christian Land. De yngste afsætninger er fra den øverste del af Silur perioden, hvor aflejringerne i toppen af serien i Kronprins Christian Land regionen består bl.a. af skifre, der oprindeligt blev afsat i mere dybtliggende dele af bassinet.

Deformation og omdannelse

Med lappet Oceanets lukning kolliderede kontinenterne Laurentia (med Grønland) og Baltica (med bl.a. Norge) og herved blev bjergarterne langs disse kontinenters modstående randzoner sammenpresset og foldet op. I Norge blev bjergarterne hovedsageligt presset mod øst ind over det stive baltiske grundfjeldsskjold, og i Grønland blev bjergarterne presset i den modsatte retning,

altså mod vest, ind over det grønlandske grundfjeldsskjold (Fig. 3). Sammenpresningen danner et strukturelt spejlbillede med sammenlignelige hovedstrukturer i de to regioner, men i øvrigt er der betydelig forskel på bjergartselementerne langs de to kontinenter. Sammenpresningen medførte en betydelig forkortelse af jordskorpen på tværs af foldebæltet, og selvom det ikke er blevet målt direkte, er det sandsynligt, at bredden af de oprindelige randzoner er blevet mere end halveret ved bjergkædefoldningen. Deformationerne på såvel den skandinaviske som den grønlandske side påvirker både de Neoproterozoiske – Palæozoiske aflejringer og deres stive underlag af ældre "basement" komplekser med prækambriske gnejser og krystallinske skifre. Ved deformationerne og sammenstuvningen af bjergarterne dannedes en række gigantiske skiveformede enheder i jordskorpen, der som sammenhængende flager blev presset ind over hinanden og ind over de tilgrænsende kontinenters randzoner. Disse flager, der betegnes som overskydningsdækker, kan være mange kilometer tykke og have en ud-

strækning på flere hundrede kilometer i foldebæltets længderetning og flere titals kilometer på tværs af foldebæltet. Inde i de enkelte overskydningsflager kan der opstå lokale strukturer med folder og forsætninger. Alt dette afspejler et kompliceret strukturelt hændelsesforløb, med dannelse af yngre strukturer, der overpræger og genfolder ældre foldningsmønstre, hvoraf nogle kan være dannet før den kaledoniske foldning.

I Grønland er det påvist, at enkelte overskudte flager kan være transporteret mere end 100 km mod vest, og i den skandinaviske del antager man, at overskydningerne har transporteret visse bjergartsmasser mange hundrede kilometer fra vest mod øst og derved bragt tidligere oceanbundsdannelser fra lapetus Oceanet ind over kontinentet mod øst. Ved overskydningsbevægelserne bliver dybere dele af jordskorpen skudt ind over højere liggende dele, og det betyder, at der opstår en om-

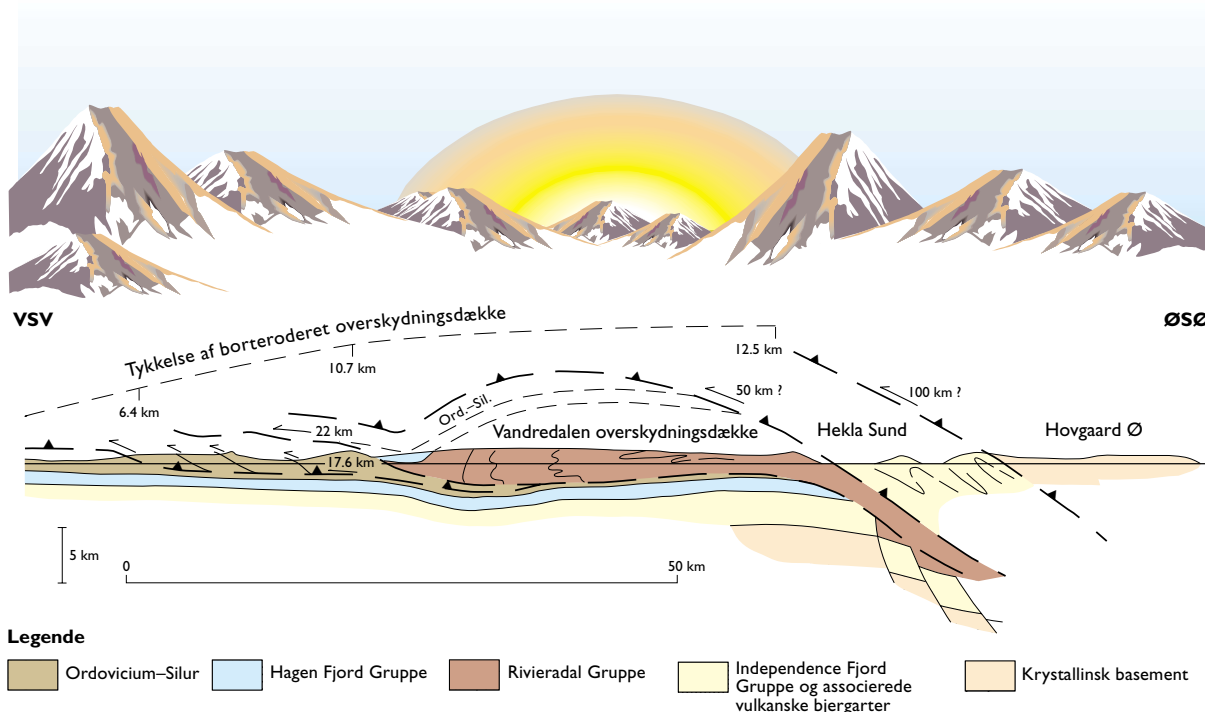
vendt lagstilling, altså at ældre bjergartskomplekser ligger oven på yngre komplekser.

I Østgrønland kan man skelne mellem strukturmønstre, der er dannet i den øvre del af foldekæden og mønstre, der er opstået i de dybere dele af bjergkæden. I den vestlige del af foldebæltet glider overskydningsdækkerne oven på et næsten upåvirket underlag af forlandsbjergarter; denne form for tektonisk relation betegnes som "thin skinned". I den mere centrale del af foldebæltet er underlaget helt indarbejdet i deformationerne, og denne form for relation betegnes som "thick skinned" (Fig. 6).

Overfladenære strukturer i foldebæltets nordlige del

Et eksempel på deformationsstilen i "thin skinned" zonen findes i foldebæltets nordlige del i Kronprins Christian Land. Her viser et tværsnit fra øst til vest (Fig. 18), hvorledes kaledonidernes randzone er opbygget mod det vestlige forland. Bjergarter fra mere

centrale dele af foldebæltet bringes som store overskudte flager ind over det stive forland, her i form af det såkaldte "Vandredalen overskydningsdække" (Fig. 19) med Neoproterozoiske sedimenter fra "Rivieradal Gruppen" og "Hagen Fjord Gruppen" og et antaget højereliggende dække med mesoproterozoiske sandsten fra "Independence Fjord Gruppen". Under disse dækker er det tidligere grundfjeldsskjold med overliggende sedimenter bevaret nogenlunde intakt. Foran Vandredalen overskydningsdækket består randzonen af en række mindre overskydningssegmenter, af palæozoiske sedimenter fra Ordoviciu–Silur. Detaljerede beregninger af overskydningernes størrelse har vist, at Vandredalen overskydningen har transporteret bjergarterne ca. 40 km mod vest. I den sammenskubbede zone med palæozoiske bjergarter foran Vandredalen overskydningsdækket er en oprindelig 43 km bred zone blevet sammenpresset til 25 km svarende til en forkortelse på ca. 45 %.



Figur 18. Øst-vest tværsnit gennem overskydningsdækkerne i Kronprins Christian Land, der viser, hvordan Rivieradal Gruppens sedimentserie skydes ind over forlandet mod vest, idet den glider på en stor overskydningsflade (Vandredalen overskydningen). Studier af temperaturforholdene under overskydningsfladen ved hjælp af farveændringer i mikrofossiler (conodonter) viser, at temperaturerne har været væsentligt forhøjede, hvilket betyder, at overskydningsdækket oprindeligt har været meget tykkere end det, vi ser i dag, så store dele af det må være eroderet bort.



Figur 19. Vandredalen overskydningen med mørke neoproterozoiske Rivieradal Gruppe sandsten (RG), der i vestlig retning er skudt ind over den yngre underliggende lysere nedre palæozoiske karbonat lagserie (SK). Profillet er ca. 900 m højt. Lokaltitet: Vandredalen i den sydlige del af Kronprins Christian Land (ca. 80°N).

Foruden de horisontale bevægelser kan man også påvise at der har fundet vertikale jordskorpebevægelser sted, bl.a. efter hovedkompressionen i foldebæltet. Ved hjælp af temperaturbestemte omdannelseskarakterer på nogle mikrofosiler (conodenter) kan det vises, at overskydningsdækkerne i den østlige ende af tværsnittet oprindeligt har været overdækket af en 10–12 km tyk bjergartsserie, medens overdækningen i den vestlige ende har været halv så tyk (5–6 km). Disse tidligere overliggende lagserier er senere borte-roderet, men hele modelopfattelsen indebærer altså, at overskydningsdækkerne oprindeligt nåede længere mod vest og begravede de underliggende bjergarter.

Overskydningsteknikken i foldebæltets sydlige del

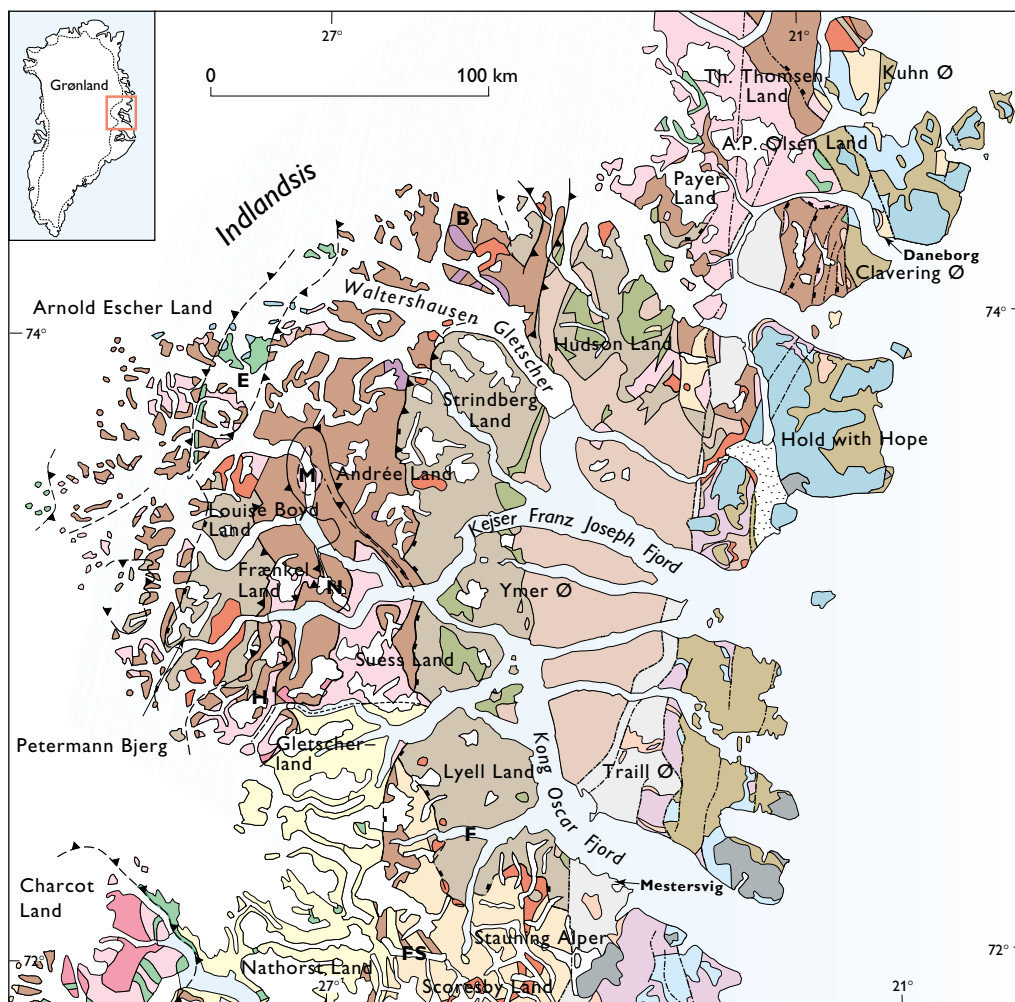
Den nyligt afsluttede geologiske kortlægning af fjordzonen mellem 72°–74°30'N (Fig. 20) har afsløret, hvorledes dette segment i Kaledoniderne er opbygget og kan

tages som model for udviklingen af foldebæltet i Østgrønland. Fjordzonens kaledoniske strukturer viser at hele komplekset, bortset fra enkelte tektoniske vinduer i den vestlige randzone, består af fjerntransporterede bjergartsskvenser, der som overskydningsdækker er bevæget mod vest og stablet oven på hinanden. Herved fortykkes jordskorpen til mere end 40–50 km tykkelse. Strukturerne afspejler såvel bløde og åbne deformationsmønstre dannet i jordskorpens øvre zone ned til 15–20 km dybde, som en mere intens og plastisk deformet zone med tætte folder dannet på større dybde, hvor bjergarterne samtidigt er blevet stærkt omdannede (metamorfoserede). Overskydningsenhederne består af et underliggende "Niggli Spids overskydningsdække" og et overliggende "Hagar Bjerg overskydningsdække" (Fig. 21). Hver for sig indeholder de en række specielle bjergartsserier, der viser, at de oprindeligt kommer fra forskellige områder øst for deres nuværende placering (Fig. 23). Den nedre

enhed kommer fra et område mere end 100 km øst for dens nuværende position, og den øvre enhed består af bjergarter der oprindeligt fandtes yderligere over 100 km længere mod øst. De 300–400 km, der i dag udgør foldebæltets bredde, var oprindeligt 500–700 km, og deformationerne har således reduceret bredden med 40–60 %.

Niggli Spids overskydningsdækket består udelukkende af gamle basementbjergarter, med arkæiske (2700 mio. år) og palæoproterozoiske (2000–1750 mio. år) gnejsiske komplekser, samt overliggende metamorfe skifre fra Krummedal aflejringerne (ca. 1050–950 mio. år). Alle bjergarterne i dette dække er omdannet og deformet i kaledonisk tid, men der er også mange spor fra før-kaledoniske orogener. Overskydningsdækkets tykkelse er ikke kendt, men er som minimum 5–6 km tykt.

Hagar Bjerg overskydningsdækket, der har en samlet tykkelse på ca. 25 km, består af en nedre del med gammelt basement og en øvre del med en overliggende serie af



Legende

SEN TIL POST – KALEDONISK

□ Kvartær, istids aflejringer

VULKANSKE BJERGARTER

■ Tertiære intrusioner

■ Tertiære lavaer

SEDIMENTER; alder

■ Kridt

■ Jura

■ Trias

■ Perm

■ Karbon

■ Devon

KALEDONISKE FOLDEBJERGE

■ Kaledoniske graniter

SEDIMENTER

■ Vendian – Nedre Palæozoikum

■ Eleonore Bay Supergruppe

GNEJSER OG METAMORFE BJERGARTER

■ Kaledoniske og Mesoproterozoiske migmatitter og granitoide bjergarter

■ Neoproterozoiske granitter

■ Mesoproterozoiske metamorfe skifre

--- Forkastning

--- Overskydning

--- Tensionsforkastning

Palæoproterozoiske

■ Gnejs og granitoide bjergarter

■ Metamorfe sedimenter og vulkanske bjergarter

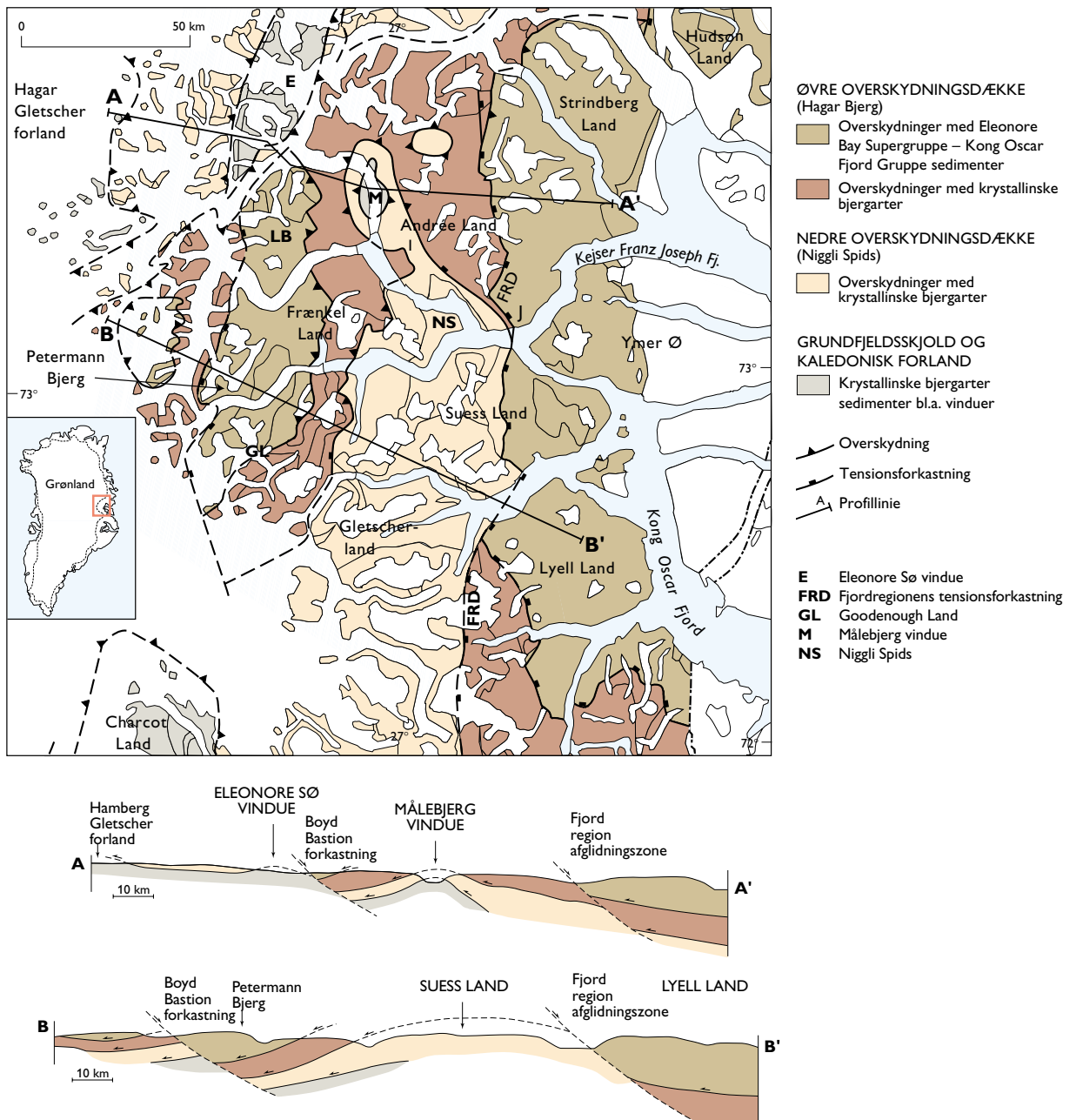
■ Gnejskomplekser

Arkæiske

■ Gnejskomplekser

B Bartholin Nunatak
E Eleonore Sø vindue
F Forsblad Fjord
M Målebjerg vindue
FS Fure Sø

Figur 20. Geologisk kort over Kong Oscar Fjord regionen (72°–74° 30' N), der blev kortlagt påny fra 1997 til 1998. De afgørende beviser for tolkningen af regionens tektoniske opbygning med store vestrettede overskydninger findes i de tektoniske vinduer omkring Eleonore Sø (E) og Målebjerg (M), hvor fossilførende uomdannede palæozoiske sedimenter bliver dækket af overskudte enheder af højmetamorfe prækaledoniske gnejs og skifre (se også Fig. 21).



Figur 21. Geotektonisk tolkning af den kaledoniske bjergkædes opbygning i den indre del af Kong Oscar Fjord-regionen med to øst-vest gående tværprofiler (A og B). Figuren viser altså ikke de samme bjergartsenheder som det geologiske kort (Fig. 20), men angiver de skiveformede tektoniske overskydningsdækker og deres underlag mod vest samt placeringen af de tektoniske vinduer. Nederste overskydningsdække – Niggli Spids – omfatter arkæiske og palæoproterozoiske gnejser samt højmetamorfte mesoproterozoiske Krummedal sedimenter. Det øvre overskydningsdække – Hagar Bjerg – indeholder mesoproterozoiske gnejser, migmatitiserede Krummedal sedimenter samt den neoproterozoiske – ordoviciske lagserie af svagt omdannede sedimenter. De sidstnævnte sedimenter forekommer i Petermann Bjerg området og i Fjord regionen og begge steder viser deres deformerede nedre grænser til de underliggende ældre metamorfoserede skifre, at sedimentlagserien er transporteret som lokale overskydninger oven på deres underlag i Hagar Bjerg overskydningsdækket.

neoproterozoiske–ordoviciske sedimenter, nogle steder med en samlet tykkelse på 18 km. Grænsen mellem basementet og sedimenterne er tektonisk, hvilket viser at lagserien, foruden at være transporteret som en del af hele overskydningsdækket, også i nogen udstrækning er transporteret som en selvstændig enhed oven på basement underlaget i overskydningsdækket. Basement enheden består af palæoproterozoiske gnejser (1980–1725 mio. år) samt en tyk serie migmatiserede og metamorfoserede skifre fra Krummedal serien, der indeholder ældre granitiske intrusioner (950–910 mio. år), bl.a. i form af øjegrانيتter. Oven over basementenhedens stærkt omdannede og plastisk foldede bjergarter forekommer den ca. 18 km tykke lagpakke med sedimenter fra Eleonore Bay Supergruppen, Tillit Gruppen og Kong Oscar Fjord Gruppen (Neoproterozoikum – Ordovicium) der i nogen grad er bevæget hen over basement underlaget, som en selvstændig enhed. Sedimentseriens bjergarter er kun svagt omdannede og bliver kun deformeret og foldet i et åbent foldningsmønster, der viser at denne

lagserie under hele den kaledoniske orogenese har befundet sig forholdsvis højt oppe i jordskorpen.

Dele af Krummedal sedimenterne findes både i Niggli Spids og Hagar Bjerg overskydningsdækkerne, men med en markant forskel mellem bjergarterne i de to niveauer. I det nederste dække optræder Krummedal sedimenterne som metamorfe skifre uden granitiserings-elementer, medens de i det øvre dække er repræsenteret ved migmatiserede bjergarter med spredte gennemsættende ældre førkaledoniske granitter (Fig. 22). Denne forskel viser, at påvirkningerne fra orogenesen for ca. 1000–900 mio. år siden var mere intens i området længere mod øst, hvorfra Hagar Bjerg dækket kommer, end fra området hvor bjergarterne fra Niggli Spids enheden fandtes på samme tidspunkt (Fig. 23).

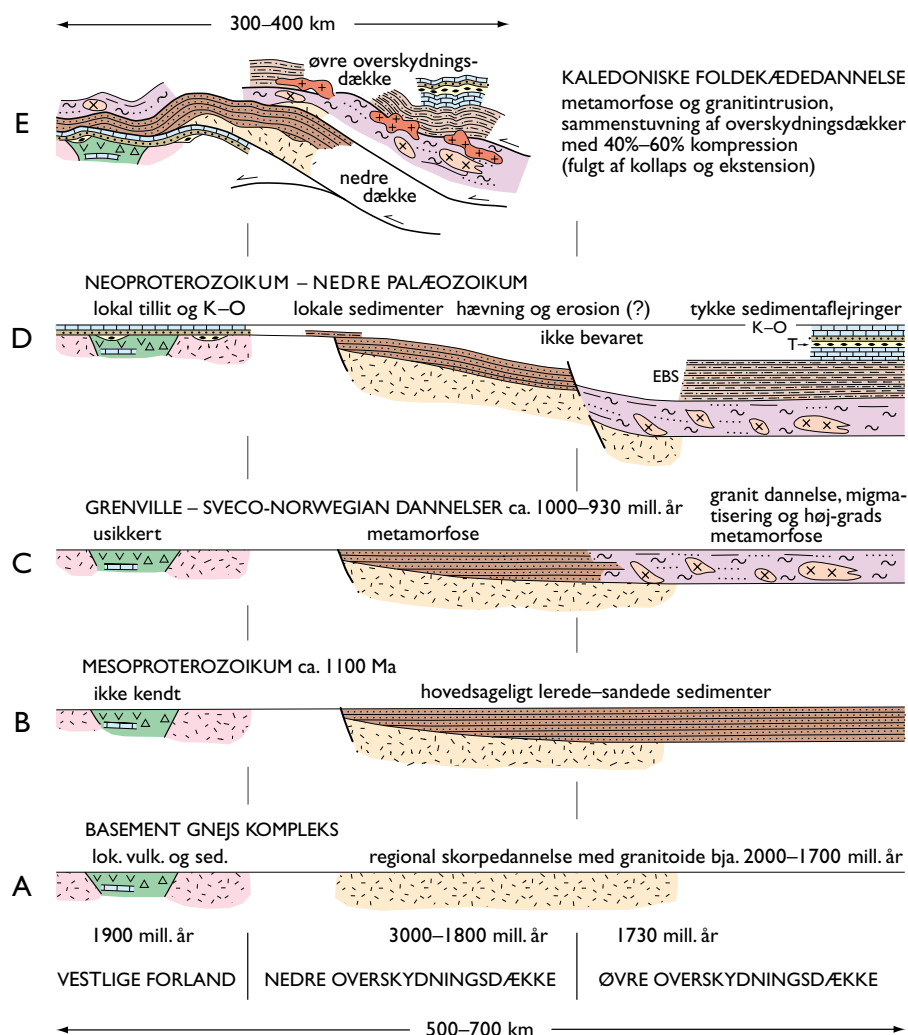
De tektoniske vinduer i foldebæltets vestlige randområder giver et indblik gennem overskydningsdækket og "ned" i forlandets bjergarter, der kun er moderat påvirket af den kaledoniske foldning. I randzonen forekommer tre vinduer med palæoproterozoiske bjergarter, der er overlejret af enkelte tynde og spredte sedimenter fra Tillit Gruppen samt kambriske sandsten, som indeholder *Skolithos* og i et enkelt tilfælde også med ordoviciske kalkstenssedimenter (Fig. 24). Eksistensen af disse nedre palæozoiske lag, som tynde aflejringer ovenpå et krystallinsk prækambriske basement og under de overliggende overskydninger med bl.a. metamorfe og migmatiserede skifre fra Krummedalserien, blev først påvist under den nyligt afsluttede geologiske kortlægning. Disse nye iagttagelser er fundamentet og det endelige bevis for tolkningen af det Kaledoniske foldebæltets opbygning som et stærkt sammenpresset kompleks med en række store overskydninger med retning mod vest.

Metamorfose og omdannelser

Ved sammenpresningen af bjergarterne i kollisionszonen mellem kontinenterne under bjergkædedannelsen fortykkes jordskorpen. Det skyldes både at nogle segmenter presses ned i dybet, og fordi overskydningsdækkerne stables oven på hinanden. Herved



Figur 22. Kontakt mellem det nedre (Niggli Spids) og det øvre (Hagar Bjerg) overskydningsdække. Bjergarterne i Niggli Spids dækket (**NSTS**) består af rødbrune glimmerskifre fra Krummedal sedimentserien, der ikke er migmatiseret. Hagar Bjerg dækkets (**HBTS**) bjergarter består af migmatiserede lyse glimmerskifre og gnejser med hyppige granitiske intrusioner, der er konforme med lagseriens strukturer. Lokalitet i Andrée Land (Fig. 21). Profillet er ca. 1000 m højt.



Legende

- Kaledoniske granitter (ca 445–425 mill. år)
- Tidlig Neoproterozoiske granitter (ca 930 mill. år)
- Kambrium–Ordovicium (K–O) karbonater. (ca 540–460 mill. år)
- Tillit gruppe (ca 610–560 mill. år)
- Kambriske sandsten (ca 540 mill. år)
- Eleonore Bay Supergruppe sedimenter (ca 850–610 mill. år)
- Krummedal sedimenter; metamorfe skifre (ca 1000 mill. år)
- Gnejser og migmatiter; Grenville – Sveco–Norwegian (ca 950 mill. år)
- Metamorfe vulkanske og sedimentære bjergarter (ca 1900 mill. år)
- Prækambrisk grundfjeldsskjold (ca 1900 mill. år)
- Kaledoniske basement gnejser (ca 3000–1700 mill. år)

Figur 23. Fortolkning og rekonstruktion af overskydningsdækkernes oprindelige placering øst for deres nuværende forekomstområde med afbildning af udviklingen fra Palæoproterozoikum (A) gennem Mesoproterozoikum (B & C) og Neoproterozoikum (D) til den eksisterende form efter den kaledoniske bjergkædedannelses afslutning (E). De tektoniske overskydninger har medført en reduktion af segmentets bredde til ca. det halve fra 500–700 km til 300–400 km.

bliver bjergarterne med tiltagende dybde i jordskorpen udsat for gradvis større tryk og temperaturer, der medfører at bjergarterne bliver omdannet (metamorfoseret), hvilket betyder at deres mineraler rekrystalliserer og danner nye mineralselskaber, der er tilpasset de ændrede tryk- og temperaturforhold. De forskellige mineralselskaber opdeles i en serie af såkaldte metamorfe facies, der hver med sine karakteristiske mineraler kan benyttes som indikatorer på, hvor høje tryk og temperaturer bjergarterne har været udsat for, og dermed hvor dybt nede i jordskorpen de har været under bjergkædedannelsen.

Geologerne skelner mellem følgende metamorfe facies med stigende omdannelsesgrad: Grønskiferfacies; Epidot-Amfibolitfacies; Amfibolitfacies, Granulitfacies og Eklogitfacies (se Tabel 1). I den kaledoniske bjergkæde i Østgrønland findes repræsentanter for alle facies, generelt sådan at lavmetamorfe facies er karakteristiske for de svagtomdannede dele af neoproterozoiske-

silure sedimenter, medens amfibolitfacies er den mest udbredte type i de nedre dele af foldebæltet, der domineres af ældre krystallinske bjergarter i det underliggende basement (Fig. 25). Her er de karakteristiske bjergarter gnejser, forskellige granitlignende enheder, krystallinske glimmerskifre, f.eks. Krummedal serien, og forskellige stærkt omdannede oprindelige overfladenære dannelser som marmor (tidligere kalksten) og amfibolit (tidligere basiske intrusioner med basaltisk sammensætning). De metamorfe mineralselskaber er hovedsageligt udformet under den kaledoniske bjergkædedannelse, men da mange af bjergartskomplekserne også har en førkaledonisk forhistorie, afspejler nogle mineralselskaber også rester fra tidligere orogeneser.

Det samlede billede kan blive meget komplekst, og der kan opstå usikkerhed om tolkningen af alderen på såvel mineraldannelsen som de tilhørende strukturer.

Ved detaljerede studier af bjergarternes mineral opbygning og mineralernes indbyr-

des relationer kan man aflæse, hvorledes de metamorfe forhold har ændret sig gennem et udviklingsforløb. Et godt eksempel herpå er undersøgelserne af dannelsesforløbet for nogle af de stærkest omdannede bjergarter i den midterste del af fjeldkæden i Nordøstgrønland. Her forekommer inden for en ca. 100 × 300 km stor region basiske linser af såkaldte eklogitiske bjergarter omgivet af stærkt deformerede gnejser. Eklogitternes kemiske sammensætning ligner den, der kendes fra vulkanske basalter, men deres mineralselskab er helt anderledes og består af metamorfe mineraler dannet under meget store tryk og temperaturer, svarende til en dybde i jordskorpen på mere end 50–60 km. Studiet af eklogitternes mineraler og deres indbyrdes relationer og stabilitetsforhold har resulteret i, at det har været muligt at beskrive disse bjergarters varierende placering i jordskorpen og følge deres udviklingsforløb fra et niveau på 15–20 km dybde, ned til ca. 55 km dybde og derfra op igen til et niveau på ca. 8–10 km



Figur 24. Målebjerget vinduet i Andrée Land (Fig. 20). Niggli Spids overskydningen (NST) adskiller den underliggende lagserie af fastliggende bjergarter fra den overliggende serie af fjerntransporterede bjergarter, der som et overskydningsdække er skudt ind over forlandet og transporteret mere end 100 km mod vest. Under overskydningen består lagserien af grå ca. 1900 mio. år gamle gnejser (G), der overlægges af en serie lyse rødlig-gule nedre kambriske sandsten (Slottet Formation, SF, med deres indhold af Skolithos sporfossiler). Over overskydningen omfatter bjergartsserien forskellige højmetamorfe, men umigmatiserede typer af den ca. 1000 mio. år gamle Krummedal sedimentserie. Målebjerget vinduet er en nøglelokalitet for forståelsen af den strukturgeologiske opbygning af foldebæltet og viser med dens "omvendte lagfølge" med ældre lag oven på yngre, at der er tale om overskydninger. Profilet er ca. 1500 m højt.



Figur 25. Typiske grå gnejser fra det krystallinske basement. Bjergarten er oprindeligt dannet for ca. 1900 mio. år siden af granitoid intrusioner, der senere er blevet deformeret og rekrystalliseret under amfibolitfacies forhold. Bemærk de tydelige små tætte folder, der ses af de lyse årer. Dette viser at bjergarten er stærkt deformeret og tæt komprimeret. Hammerskæftet er ca. 40 cm langt. Lokaltiteten er fra den centrale del af foldebæltet nær Bessel Fjord (Fig. 6).

dybde. De tilknyttede temperaturændringer spænder fra ca. 550° til over 700° og tilbage igen til ca. 400° (Fig. 26). Udviklingsmønstre af lignende type gør sig gældende for næsten alle de metamorft omdannede bjergarter og afspejler et generelt forløb med sænkning og efterfølgende hævnning gennem jordskorpen. Det er dog kun enkelte steder, at bjergarterne har været helt nede i over 50 km dybde. I de fleste områder består de stærkest omdannede sedimenter af amfibolit facies mineralselskaber svarende til 20–40 km's dybde i jordskorpen.

Når visse bjergartstyper udsættes for temperaturer på 650°–700° grader, begynder nogle af deres kvarts-feldspat dominerede dele at smelte. Opsmeltningen lettes hvis der forekommer vandholdige mineraler i udgangsbjergarten; derfor er lerede sedimenter udsatte for opsmeltninger. Ved disse processer mobiliseres kvarts og feldspat andelen, og der dannes granitiske smelter; der kan gennemvæve sidestenen som fine årer og diffuse linser. Herved opstår blandingsbjergarten migmatit, der består af en gammel værtskomponent samt en nyttilført gra-

nitisk komponent. I migmatiterne er granit-elementet til stede i fine årer eller som en diffus komponent, der opspiser omgivelserne (Fig. 27). Granitsmelten kan dog også samles i større enheder i magmalegerner, der kan transporteres over større afstande og intrudere og gennemskære sidestenen. Granitlegemernes bevægelser i jordskorpen er betinget af deres forholdsvis mindre massefylde end omgivelserne, hvorfor de som regel stiger opad gennem lagserierne i jordskorpen. I de østgrønlandske Kaledonider er lagserien med Krummedal sedimenterne et meget vigtigt udgangspunkt for dannelsen af både migmatitter og granitter. Såvel under orogenesisen for ca. 920–950 mio. år siden som under den kaledoniske orogene har denne sedimentserie dannet baggrund for en regional udbredt dannelse af granitintrusioner.

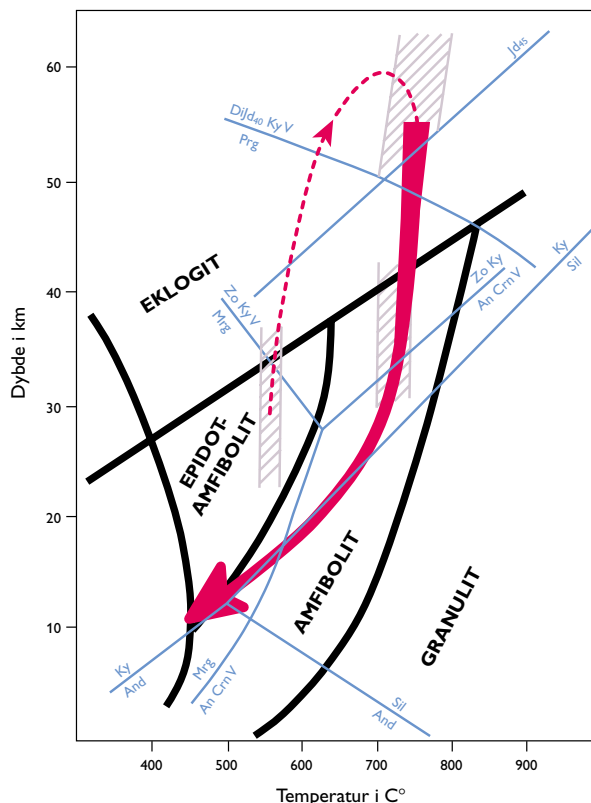
Kaledoniske granitter

Hele den sydlige del af den kaledoniske bjergkæde i Østgrønland mellem Scoresby Sund regionen (70°N) og Bessel Fjord (76°N) er præget af store granitiske legemer, der

gennemskærer deres sidesten og altså er yngre end disse. Samspillet og aldersrelationerne mellem granitterne og deres sidesten udgør et vigtigt kronologisk forhold, idet de kaledoniske granitter kan skelnes fra tilsvarende ældre granitter, når den gennemskærer de neoproterozoiske sedimenter (Eleonore Bay Supergruppen). I basementet, hvor der kan forekomme både ældre og yngre granitter, bl.a. i Krummedal sedimenterne, kan de to granit generationer sædvanligvis kun adskilles ved hjælp af radiometriske aldersbestemmelser.

Granitlegernerne forekommer med meget forskellige former, der spænder fra små tynde lagparallelle årer (veins) over mellemstore fladtliggende legemer til store sammenhængende og gennemskærende intrusioner; der er over 10 km på tværs. Disse sidstnævnte kan indeholde skarpkantede indslutninger af sidestenen, hvilket sammen med intrusionsmønstrene viser, at granitterne er trængt ind i de omgivende bjergarter enten ved simpelt hen at presse sig vej op gennem de øvrige bjergarter eller ved delvis fortrængning af sidestenen, hvorfra

Figur 26. Tryk-temperatur diagram der viser den metamorfe udvikling ved dannelsen af de specielle eklogitbjergarter, der er fundet i foldebæltets nordlige del mellem Danmarkshavn og Jøkelbugten (Fig. 6). Diagrammets lodrette akse viser dybden i jordskorpen (trykforholdene), medens den vandrette akse viser temperaturen i celsiusgrader. Undersøgelser af en basaltisk gangbjergarts mineralsammensætning og relationerne mellem de forskellige mineralfaser i bjergarten viser, hvorledes den har været sænket ned til stor dybde i jordskorpen fra et niveau på ca. 20 km ned til ca. 60 km, hvor den omdannes til højtryksbjergarten eklogit. Herefter hæves den igen og bliver gradvis omdannet delvist til en lavtryksbjergart tilpasset en dybde på ca. 10 km. Udviklingsforløbet er vist med den røde pil, der i diagrammet følger en bevægelse, der går med uret. De angivne bogstavforkortelser og linierne mellem dem angiver forskellige metamorfe mineraler og deres tryk/temperatur stabilitetsområder. De metamorfe faciesområder er også vist.



Tabel 1. Omtrentlige dybde- og temperaturintervaller for de forskellige regional metamorfe facies. Sammenhæng mellem temperatur og tryk (dybde) fremgår af Fig. 26.

Regional metamorf facies	Dybde i km	Temperatur i grader Celsius
Grønskifer	10 – 20	350 ? – 500
Epidot-amfibolit	10 – 30	400 – 650
Amfibolit	20 – 40	450 – 800
Granulit	20 – 50	600 – 900
Eklogit	30 – 60	400 – 900

blokke løsrives og synker ned i magmaet. Disse intrusionsformer kan iagttages på de stejle fjeldsider langs fjorde og gletschere, hvor alle bjergarterne er omtrent totalt blottede og fri for overdækning (Fig. 28). Aldersbestemmelser med forskellige radiometriske metoder har vist, at de kaledoniske granitter er dannet og intruderet inden for intervallet mellem 445–425 mio. år siden, med hovedmængden dannet for omkring ca. 435 mio. år siden. Deres udbredel-

se er tæt forbundet til forekomsten af Krummedal sedimenterne i Hagar Bjerg overskydningsdækket. De tilknyttede metamorfe mineralselskaber i disse sedimenter viser at granitterne blev dannet ved en temperatur på ca. 700° på 12–15 km dybde i jordskorpen. Disse betingelser sammenholdt med dannelsesetidspunktet afspejler en sen fase i bjergkædedannelsen, hvor den kompressive spænding (sammenpresning) var aftagende eller delvis ophørt og hvor der

skete en trykaflastning, samtidig med en hævnning af bjergartsmasserne i foldebæltet.

Deformationernes kronologiske forløb

De nedre palæozoiske aflejringer som blev afsat langs den østgrønlandske kyst mod lapetus Oceanet er i foldebæltets sydlige del bevaret med sedimenter aflejret op til mellemste Ordovicium for ca. 460 mio. år siden, medens der i den nordlige del findes



Figur 27. Tre billeder af forskellige migmatitiske bjergarter, der viser en stigende omdannelse hen mod granitiske bjergartsenheder.

A) Det tilførte granitiske materiale injiceres som årer i den oprindelige grå glimmerskifer.

B) Den lyse granitiske fase injiceres diffust og absorberer lokalt de ældre grå gnejser.

C) Den injicerede granitiske fase har absorberet størstedelen af de gamle bjergarter og migmatitbjergarten får et udseende, der går i retning af en sribet (folieret) granit eller gnejs.

Lokaliteter i Nordvestfjord i den nordvestlige del af Scoresby Sund regionen (Fig. 6)



Figur 28. Intrusiv kaledonisk granit i Eleonore Bay Supergruppe sedimenter. Den lysfarvede smeltede granitiske bjergart er trængt ind i den mørkfarvede sedimentlag-pakke og danner et netværk af skiveformede legemer, der i store træk følger sedimenternes lagdeling. Brudstykker af sedimenterne bliver mange steder omsluttet af granitten. Billedudsnittet er ca. 1000 m højt.

Lokalitet: Frænkelland, inderste del af Kejser Franz Joseph Fjord komplekset. Ca. 72°40'N.

sedimentaflejringer til den øverste del af Silur for ca. 420 mio. år siden (Fig. 29). Fra det centrale Østgrønland viser aldersbestemmelserne, at den regionale metamorfose og den udbredte granitdannelse fandt sted for ca. 435 mio. år siden. Bjergkædedannelsen ebber ud med aftagende deformation og metamorfose indtil for ca. 420 mio. år siden, hvorefter der sker en hævnning og nederodering af foldekæden hen mod for 400 mio. år siden. Det er bemærkelsesværdigt at de store overskydninger er dannet forholdsvis sent, idet de skærer gennem det regionale metamorfosemønster. Dette kan medføre, at højmetamorfe bjergarter stedvis kommer til at ligge oven på bjergarter med en mindre metamorfosegrad, og herved bringes bjergarter fra vidt forskellige jordskorpeniveauer i kontakt med hinanden.

I den nordlige del af det kaledoniske foldebælte i Østgrønland viser de tidligste

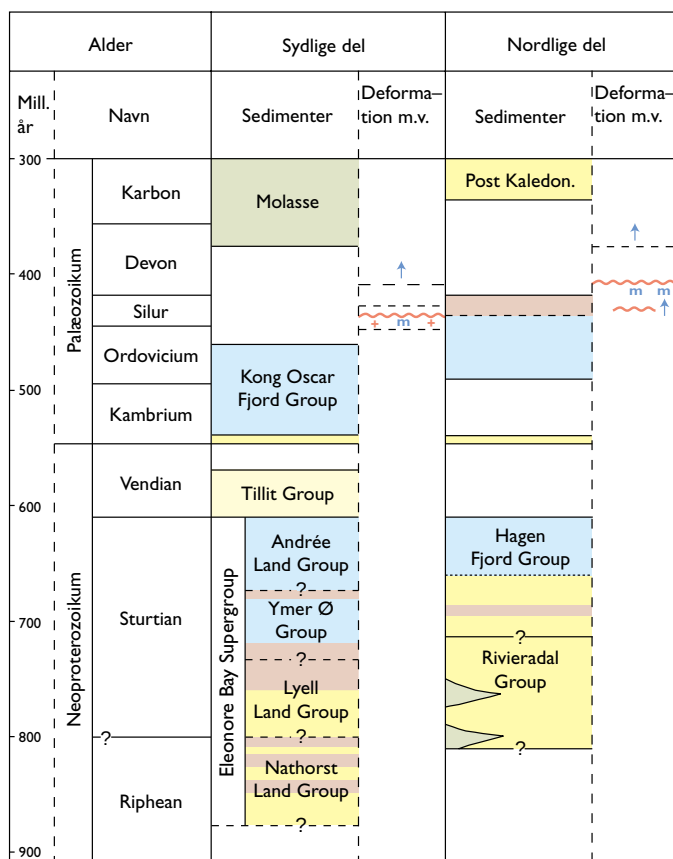
spor fra opfoldningen af bjergkæden en alder på ca. 425 mio. år, medens hoveddeformationen og opstuvningen af overskydningsdækkerne antages at være foregået i den tidlige del af Devon for ca. 415–400 mio. år siden.

Forskellen på deformationstidspunkterne i syd og nord med ca. 20 mio. år viser, at kontinentkollisionen ikke har været helt parallel med de to kyster af de modstående dele af Laurentia og Baltica, men er foregået skævt. Den første kollisionskontakt har været i syd, og derefter har den sandsynligvis gradvist bredt sig videre mod nord.

Den sene udvikling

Ved kontinenternes kollision hindres deres fortsatte drift på et tidspunkt og de store horisontale sammenpresninger ophører. Herefter opstår der en fase, hvor den overfortykkede jordskorpe, der er presset ned i

litosfæren, begynder at hæve sig, fordi dens massefylde er mindre end omgivelserne. Samtidig foregår der en sideværts trykaflastning på tværs af foldebæltet, der fører til en udvidelse af jordskorpen i modsat retning af den tidligere sammenpresning. Denne bevægelse betegnes som ekstension. Hævnningen sker langsomt med en hastighed på op til 1 mm/år svarende til ca. 1 km pr. mio. år. Ved hævnningen bliver lagene fra undergrunden gradvis blottet og bliver nedbrudt ved erosion, på samme måde som man kender det fra nyere foldebælter som Alperne og Himalaya. Nedslidningen af den kaledoniske bjergkæde i Østgrønland resulterer i aflejringer af en omtrent 10 km tyk sandstensdomineret lagserie fra Devon, Karbon og nedre Perm. Denne lagserie er delvis bevaret i forskellige forkastningsbegrænsede blokke i Østgrønland og viser, at de oprindelige bassiner har modtaget nedbryd-



Figur 29. Den neoproterozoiske – nedre palæozoiske sedimentære lagserie er forskelligt udviklet i den nordlige og sydlige del af det kaledoniske foldebælte. Der er også forskel på, hvornår deformationerne finder sted i de to ender af foldebæltet, idet bevægelserne i den sydlige del afsluttes ca. 20 mio. år tidligere end i den nordlige del.

Legende

- Kalksten m.v.
- Tillit
- Ler/siltsten
- Sandsten
- Konglomerat/sandsten
- Ekstension og hævnning
- Overskydning og folding
- Granit
- Metamorfose

ningsmaterialer fra både vest og øst. Dermed viser de samtidigt, at det kaledoniske foldebælte oprindeligt også har haft en udbredelse øst for den nuværende kystlinie. Det må derfor antages, at kaledoniske bjergarter også danner et underlag for de yngre aflejringer på kontinentalsoklen øst for den nuværende kystlinie.

Ved den globale samling af kontinenterne efter den kaledoniske orogenese dannes superkontinentet Pangea (Fig. 4), der opstod ved kontinentaldrift og pladebevægelser gennem intervallet fra ca. 450–320 mio. år siden. Dette superkontinent begyndte at blive brudt op igen for ca. 160 mio. år siden, og med ny oceandannelse kommer man

gradvis frem til den kontinentfordeling, vi kender i dag. Dannelsen af det Atlantiske Ocean medfører den langsgående opsplitning af den kaledoniske bjergkæde, således at dette oprindelige sammenhængende langstrakte bælte i dag forekommer med foldekædestrøg på begge sider af Atlanten. 



Niels Henriksen (Oscar) tog magisterkonferens i geologi ved Københavns Universitet i 1961. Han har været ansat ved GGU/GEUS fra 1963–2000 og har gennem årene deltaget i det geologiske arbejde i de fleste landsdele i Grønland. Han har været med i samtlige feltsæsoner under GGU/GEUS arbejdet med foldebjergene i Nordøstgrønland mellem 1968–1998. Niels Henriksen har kompileret en række geologiske kortblade og oversigtskort samt publiceret en lang række videnskabelige afhandlinger specielt om foldebæltets bjergarter og strukturgeologiske forhold.



A.K. (Tony) Higgins er uddannet som geolog med B.Sc. og Ph.D. fra Imperial College, London (1961 og 1964). Han har været ansat ved GGU/GEUS siden 1964, og mellem 1968 og 1998 deltaget i 16 feltsæsoner med arbejde i Nordøstgrønlands foldebjergene. Hans hovedbeskæftigelse har været geologisk kortlægning samt strukturgeologiske studier i Grønlands nedre Palæozoiske foldekæder. I samarbejde med britiske kolleger fra eksterne institutioner, har han publiceret en lang række afhandlinger om foldebæltets strukturelle opbygning.

Den geologiske udforskning af Nordøstgrønland

Nordøstgrønland befinder sig befolkningsmæssigt på bagsiden af Grønland. Der findes ingen lokalbefolkning i området og de eneste mennesker, som bor der hele året, er personalet på en vejstation, samt folkerne fra Slædepatruljen Sirius og besætningen på Station Nord, i alt mindre end 30 mand i et område, der er ca. fire gange så stort som Danmark. Regionen er udlagt som Nationalpark, med en række begrænsninger for færdsel og ophold m.m. for at bevare de naturgivne forhold. Beliggenheden i en højarktisk klimazone gør, at hele området i 8–10 måneder om året er lukket ned i sne og is. Kun i de få højsommer måneder smelter sneen bort fra fjeldene, så man kan studere deres geologiske opbygning.

Gennem tiderne er der gennemført mange ekspeditioner til Nordøstgrønland, der hver har tilført elementer til den viden, vi i dag har om en række naturvidenskabelige forhold i området bl.a. om den geologiske opbygning i regionen. I praksis er betingelserne for at studere de geologiske forhold vanskelige, men det mere end opvejes af, at blotningerne i Nordøstgrønland er fantastisk gunstige, så man ofte kan studere det nøgne fjeld over store sammenhængende afstande. Herved kan man kortlægge og overskue den strukturelle opbygning ud fra et detaljarbejde på jorden inden for begrænsede arealer og ved at sammenføje disse observationer med "kikkert iagttagelser" af velblottede fjeldsider langs med fjorde og gennem dalene.

De første europæiske opdagelsesrejser og ekspeditioner til Nordøstgrønland går tilbage til begyndelsen af 1800-tallet og følges mere intenst op i slutningen af århundredet. Den første mere målrettede geologiske aktivitet blev realiseret med en større svensk ekspedition i 1901 under ledelse af A.G. Nathorst, og som resultat heraf fik man tegnet et første geologisk oversigtskort over regionen mellem 70° og 76°N. De nordligste områder af Nordøstgrønland blev første gang besøgt og geografisk kortlagt under Danmarksekspeditionen fra 1906–1908, og herfra stammer de første geologiske informationer fra dette jomfruelige område mellem 76°–81°N. Den egent-

lige systematiske geologiske udforskning af Nordøstgrønland begynder dog først med "De Danske Ekspeditioner til Østgrønland" fra 1926–1958 under ledelse af geologen Lauge Koch. Gennem denne mere end 30 år lange periode gennemførte Lauge Koch en lang række storstilede ekspeditioner, der havde et højdepunkt med 3-års ekspeditionen fra 1931–1934, med samlet mere end 200 deltagere, og med en række intense sommerekspeditioner fra sidst i fyrrerne til den sidste sæson i 1958. Lauge Koch ekspeditionerne fulgte logistisk set med tiden og fik introduceret anvendelsen af små vandfly, der både blev brugt til transport og til luftfotografering samt blev benyttet til at flyve geologerne rundt, så de fra luften kunne foretage geologiske observationer. Resultaterne fra Lauge Koch ekspeditionerne og en række andre samtidige, men mindre ekspeditionsgrupper er fremlagt i talrige afhandlinger og kort, hvoraf de fleste er publiceret i tidsskriftserien "Meddelelser om Grønland". Denne samlede geologiske basisviden dannede baggrund for den moderne geologiske udforskning, der er gennemført i forbindelse med Grønlands Geologiske Undersøgelses (GGU) og GEUS' generelle geologiske kortlægning af hele det kaledoniske bjergkædestrøg fra 70°–81°N. Dette arbejde, der nu er afsluttet, fandt sted i perioden fra 1968–1998, hvor GGU/GEUS i mere end 15 somre udsendte større ekspeditioner. Hver sæson har ekspeditionsgrupperne haft 30–40 deltagere, der med støtte fra et mindre fly og 2–3 helikoptere har arbejdet i regionen i en periode på 7–8 uger midt i højsommeren fra sidst i juni til sidst i august.

GGU/GEUS' geologiske udforskning af Nordøstgrønland har været et led i den systematiske geologiske kortlægning, der har som mål at publicere geologiske oversigtskort i skala 1:500 000. I praksis er feltarbejdet foregået ved, at geologerne har arbej-

det i tomandshold. Under feltarbejdet har disse hold opholdt sig i små teltlejre der med korte intervaller (4–7 dage) er blevet flyttet med helikoptererne, således at geologerne hele tiden til fods har kunnet nå rundt i de tilgængelige dele af områderne. Arealerne mellem lejrområderne er blevet dækket af rekognoscering fra helikoptererne. Primært observerer geologerne de relative aldersfølger mellem de forskellige bjergartstyper og dernæst foretages en række målinger af bjergarternes strukturer. Dette danner basis for konstruktion af tredimensionale modeller for bjergarternes rumlige udbredelse. Endvidere foretages observationer og vurderinger af en række basale geologiske forhold, fx bjergartstype, mineralindhold, evt. fossilindhold, mineraliserings indikationer, omdannelsesgrad m.v. Der indsamles prøver til laboratorieundersøgelser, hvor bjergartssammensætningen, den kemiske sammensætning, aldersbestemmelser, fossilbeskrivelse, sedimentanalyser m.v. indgår. Alle observationer refereres til bestemte feltlokaliteter, der plottes ind på de topografiske grundkort.

GGU/GEUS' geologiske udforskningsarbejde af foldebjergene i Nordøstgrønland er foregået som et internationalt forsknings samarbejde mellem institutionens egne medarbejdere og inviterede eksterne specialister fra danske og udenlandske universiteter. Oparbejdningen af det meget store indsamlede materiale er foregået ved den enkelte medarbejders egen institution, hvorved det har været muligt at udnytte en lang række forskningsfaciliteter; GEUS ikke selv har haft rådighed over. Herved er det blevet sikret, at det samlede resultat fuldt ud har levet op til kravene for en moderne forskningsaktivitet. Dette har også medført, at projektet gennem årene er blevet støttet med flere store forskningsbevillinger fra bl.a. Statens Naturvidenskabelige Forskningsråd og Carlsbergfondet samt forskellige tilsvarende udenlandske forskningsfonde.

Publikation fra GEUS

GEUS' årsberetning for 2000 blev udsendt juli 2001.

Beretningen fortæller om det faglige arbejde samt om de økonomiske og organisatoriske forhold. Man kan læse om aktiviteter og resultater på institutionens fem arbejdsområder: Databanker, informations-teknologi og generel formidling; Vandressourcer; Energiråstoffer; Mineralske råstoffer og Grønlandskortlægning samt Natur og Miljø.

Hovedvægten i årsberetning er lagt på fem historier der går mere i dybden med det faglige arbejde: Lagring af CO₂ i undergrunden; Overvågning af pesticider i grundvand; Nordboernes livsgrundlag i sydvest Grønland; GEUS' internationale arbejde og GIS på GEUS.

Læs mere på hjemmesiden: www.geus.dk



Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse (GEUS) er en forsknings- og rådgivningsinstitution i Miljø- og Energiministeriet.

Institutionens hovedformål er at udføre videnskabelige og praktiske undersøgelser på miljø- og energiområdet samt at foretage geologisk kortlægning af Danmark og Grønland.

GEUS udfører tillige rekvirerede opgaver på forretningsmæssige vilkår. Interesserede kan bestille et gratis abonnement på **GEOLOGI - NYT FRA GEUS**. Bladet udkommer 4 gange om året. Henvendelser bedes rettet til: Knud Binzer

GEUS giver i øvrigt gerne yderligere oplysninger om de behandlede emner eller andre emner af geologisk karakter.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.

GEOLOGI - NYT FRA GEUS

Er redigeret af geolog Knud Binzer (ansvarshavende) i samarbejde med en redaktionsgruppe på institutionen.

Skriv, ring eller mail:

GEUS
Danmarks og Grønlands
Geologiske Undersøgelse
Thoravej 8, 2400 København NV.
Tlf.: 38 14 20 00
Fax.: 38 14 20 50
E-post: geus@geus.dk
Hjemmeside: www.geus.dk



GEUS

GEUS publikationer:

Hos Geografforlaget kan alle GEUS' udgivelser købes.
Henvendelse kan ske enten på tlf.: 64 44 16 83 eller telefax: 64 44 16 97
E-post: go@geografforlaget.dk
Hjemmeside: www.geografforlaget.dk



Adressen er:
GEOGRAFFORLAGET 5464 Brenderup

ISSN 1396-2353

Produktion: Annabeth Andersen og Carsten E. Thuesen, GEUS

Tryk: From & Co.

Forsidebillede: Niels Henriksen.

Illustrationer: Annabeth Andersen og Helle Zetterwall.