

2014

geoviden

GEOLOGI OG GEOGRAFI NR. 01



Kontinenter i kollision
- da bjergene blev gennemsigtige

Kontinenter i kollision - da bjergene blev gennemsigtige

I anden halvdel af 1800-tallet førte kortlægning af Alperne, Skotland og Skandinavien til en nogenlunde samtidig forståelse af den slags bjergkædedannelse, hvor kontinenter kolliderer. Det centrale element her var, at man opdagede, at løsrevne skorpe-enheder (dækker) var stablet på uventet vis, fx fandt man ældre enheder, der lå oven på yngre. De udbredte, daterbare sedimenter i Alperne har gjort denne bjergkæde til et skoleeksempel for tektonikken, fordi de muliggjorde en detaljeret forståelse af bjergkædens opbygning. I 1930'erne fandt alpegeologer lighedspunkter i klodens højeste bjerge – i Himalaya. For at forstå disse fremskridt i erkendelse tager vi igennem Alperne og Himalaya med geologer, der var med til at knække gåden om bjergenes dannelse.

De første vanskelige skridt

Den forståelse, som vi i dag har om bjergkæders dannelse, er skabt i to omgange. I første omgang i en pionerperiode i slutningen af 1800- og begyndelsen af 1900-tallet og i anden omgang i konsekvens af 'opfindelsen' af pladetektonikken i 1970'erne. I dette hæfte vil jeg tegne et subjektivt billede af pionertiden, ved at koncentrere skildringen om en håndfuld schweiziske geologer, som udfordret af deres eget lands bjerge nåede langt i forståelsen af Alperne som et resultat af kontinent-kontinent-kollision og dernæst 'kastede sig over' Himalaya. Den afgørende erkendelse var dog ikke blot et schweizisk produkt – tilsvarende fremskridt blev skabt i forståelsen af de kaledoniske bjerge i både Skotland og Skandinavien samtidigt.

Geologisk kortlægning

I begyndelsen af 1800-tallet havde man kun en forsimplet forestilling om strukturen af bjergkæder.

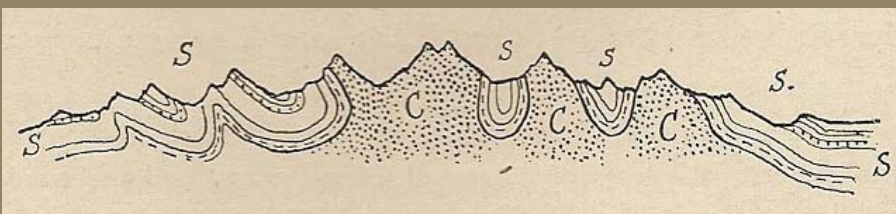
En rigtig forståelse af bjergenes struktur krævede både en veludviklet stratigrafi og dermed evnen til at knytte en (relativ) alder til et sediment ved hjælp af dets indhold af fossiler – og en færdighed i geologisk kortlægning, som nødvendigvis først måtte læres et sted, hvor lagenes struktur er simpel. Det blev i England, at den første omfattende kortlægning blev foretaget af William Smith i første tredjedel af 1800-tallet. Inspireret af denne kortlægning, som kan siges at være et resultat af den industrielle revolution, idet Smith kortlagde med det formål at finde ruter til anlæg af kanaler til kulfragt, blev den britiske geologiske undersøgelse, BGS, grundlagt i 1835. I den sidste halvdel af 1800-tallet blev geologisk kortlægning taget op som nationale opgaver over hele Europa, således i Norge og Sverige i 1858, og i Danmark i 1888. Indsatsen i Sverige kom bl.a. til at betyde, at den erkendelse, som for alvor åbnede for forståelsen af bjergkædedannelse, ikke bare blev opnået i Alperne og Skotland, men også i den skandinaviske fjeldkæde.

Sir Roderick Murchison var direktør for BGS fra 1855 og var i den sidste del af sit aktive liv optaget af de geologiske forhold i det nordvestlige Skotland, hvor man kunne se, at krystalline skifre (en metamorf bjergart) overlejrerede sedimenter af før-Silur alder.

Etableringen af den geologiske periode Silur (ca. 444–416 mio. år før nu) var Murchisons bidrag til den stratigrafiske tidsinddeling. Murchinson var overbevist om, at de krystalline skifre (som nu kaldes Moine skifre) var af Silur alder, og at de indgik i en normal lagserie, med de ældste lag nederst og yngste øverst. Moine bjergarterne er dog langt ældre end Silur og overlejrer de kambriiske sedimenter, fordi de er skubbet op over disse. En fladtliggende forkastning, som bringer ældre bjergarter til at 'hvile' på yngre bjergarter, kaldes en overskydning. Og den bjergartspakke, som er blevet 'overskudt', kaldes et 'dække'.

Mio. år	Periode		Æra	Æon
2,6	Kvartær		Kænozoikum	Phanerozoikum
23	Tertiær	Neogen		
		Palæogen		
65	Kridt		Mesozoikum	
143	Jura			
200	Trias			
251	Perm		Palæozoikum	
299	Karbon			
359	Devon			
416	Silur			
444	Ordovicium			
488	Kambrium			
542				
			2500	Proterozoikum
	Prækambrium			Arkeikum
				Hadaikum

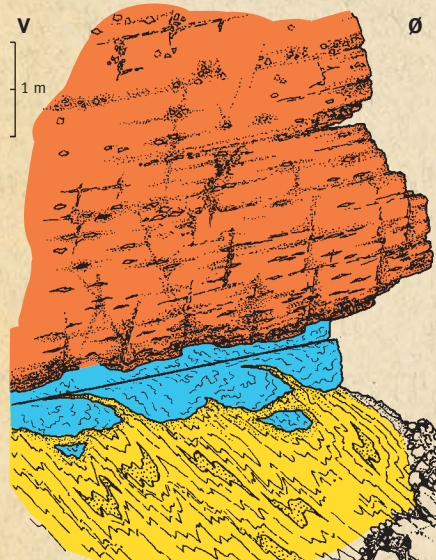
Tidlig alpeopfattelse (Studer 1832)



C: krystalline massiver; S: sedimenter.

Bjergryggen Tschingelhoren over Elm. Tunger af gult i blå antyder en bevægelse af den øvre enhed mod venstre i forhold til den nedre enhed. Foto af Arnold Heim fra starten af 1900-tallet med hans håndkolorering. Fotoet er spejlvendt for at alle figurer i dette hæfte er orienteret således at subduktion sker mod højre i profilerne.

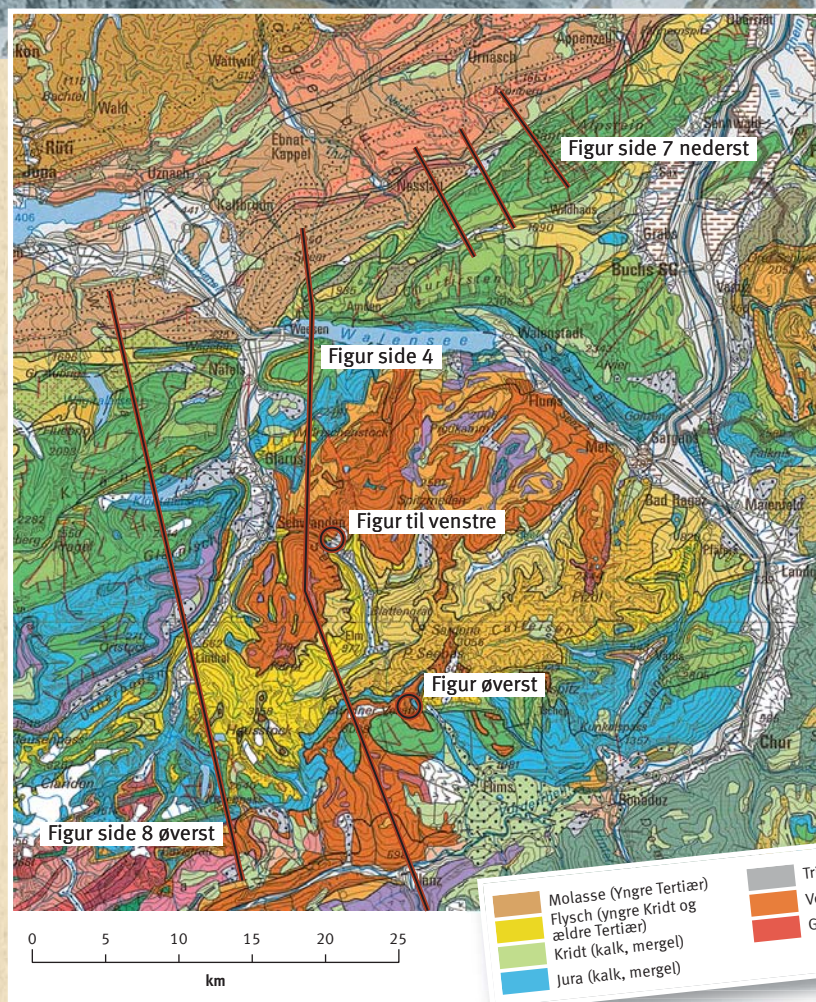
Kilde foto: Copyright ETH Bibliotek.



Vejsidelokalitet ved Lochseite, Glarus. I Glarus står verden på hovedet: Øverst Perm (orange) ovenpå Jura (blå) og nederst Tertiær (gul). Også her ses tunger af gult i blå, som viser en bevægelse af den øvre enhed mod venstre i forhold til den nedre enhed. Legende: Se det geologiske kort til højre.

Kilde profil: Tegnet af Albert Heim, gengivet fra 'Geologie der Schweiz'.

I 1848 besøgte Murchison Schweiz og så på geologi i kantonen Glarus, der ligger umiddelbart syd for Zürich. Kortlægningen af denne del af Alperne 'tilhørte' familien Escher, faderen Hans Conrad og hans søn Arnold. Både far og søn udførte omfattende feltarbejde i Glarus-alperne og opdagede, at der i store dele af området ligger bjergarter af Perm alder over meget yngre bjergarter. Deres kortlægning var således gået skridtet videre end William Smith: kortlægning af komplicerede strukturer i vanskeligt bjergteræn. Murchison rapporterede om sit besøg i Glarus med disse ord: "the strata had been inverted, not by frequent folds like in the Higher Säntis (læs om Säntis længere fremme) ... **but in one enormous overthrow**". Hvad Murchison ikke skrev noget om var, at der var britiske geologer, der havde den opfattelse, at man også i Skotland måtte ty til



Udsnit af geologisk kort over Schweiz. Verrucano-konglomeraterne danner overflade i den centrale del af kortet. Beliggenheden af profilerne fra side 4, 7, 8 og denne side er vist. Legenden er stærkt forenklet. Den fulde legende kan ses på: <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/en/home/products/maps/geology/geo-maps/gm500.html>

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

tilsvarende dramatiske fortolkninger, men det var ikke en ide, som Murchison kunne acceptere. Hvad var det så, han havde fået at se i Glarus?

Glarus

Centralt i Glarus kan man på nutidens geologiske kort, som blandt mange kilder bygger på far og søn Eschers kort (se kortet ovenfor), se, at bjergarter med gul signatur overlejres af bjergarter med orange signatur, stedvist med

sedimenter af grøn og blå signatur indimellem. Det ses både i enkelte blotninger, som en meget berømt blotning ved Lochseite på vejen mellem Schwanden og Elm og i fjeldtoppene over Elm, som ses øverst. De mørke bjergarter, der udgør fjeldtoppene, er de såkaldte Verrucano konglomerater, der er af Perm alder. I profilet ligger der kalksten af Jura og Kridt alder under Verrucano konglomeraterne. Nederst, delvist dækket af snefanen, ligger sedimenter, som Heim har farvet gule.

Flysch og molasse

Flysch og molasse er de typiske alpine bjergarter, begge knyttet til bjergkædedannelsen. Flysch består af vekslende lag af lerskifer og sandsten og er dannet på dybt vand på kontinentalskråningen og den dybe havbund. I den typiske flysch indgår lag som tænkes dannet fra strømme af suspenderet sediment, måske løsrevet fra kontinentalskråningen af jord-

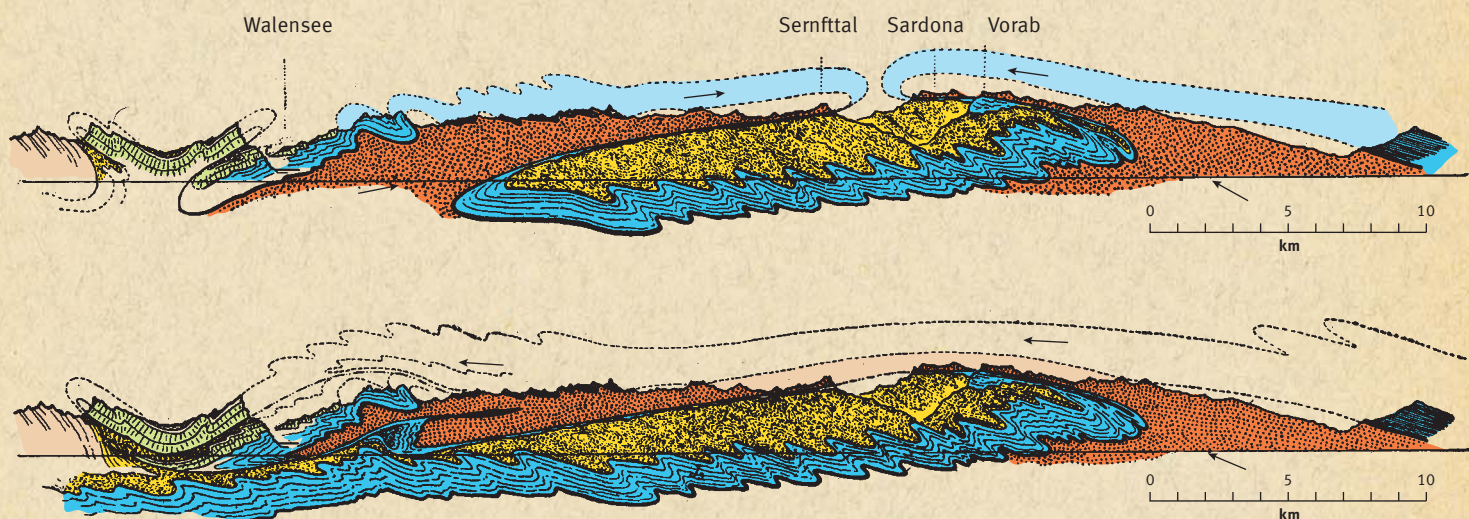
skælv. På et senere stadium bliver dette bassin 'fyldt' og der aflejres nu grove konglomerater og sandsten, veksellagret med skifre; til sammen kaldt molasse. Molasse signalerer både fremvæksten af bjergkæden og overgangen fra marin til kontinental sedimentation. I både flysch og molasse kan indgå lag af mergel og af vulkanske bjergarter.



Til venstre: Foldet flysch i Axen-dækket ved Axenstrasse.

Øverst: Molasse ved Schwägalp nær Säntis (se øverste profil side 6 og 7).

Fotos: Kai Sørensen.



Profil gennem de helvetiske dækker i Glarus. Øverst tolket som en dobbeltfold af Arnold Escher og Albert Heim. Nederst tolket som en stor liggende fold (nappe i 'Alpesprog') af Marcel Bertrand.

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

De samme farver er brugt i Lochseite-profilet. Man ser at i begge profiler strækker tunger af gult sig igennem det blå. De blå og grønne farver bruges for sedimenter af Jura og Kridt alder, og i Glarus er de alle kalksten. De gule bjergarter er en blanding af sandsten og lerskifre,

med det lokale navn *flysch*. Det er en betegnelse, som er 'alpin', men bruges mange andre steder i verden også. Bjergarter af Perm alder, over bjergarter af Jura/Kridt alder, over bjergarter af Tertiær alder, viser en omvendt – eller med et finere ord – inverteret, lagserie. Det var,

hvad Sir Murchison fik at se og tolkede som fremkommet ved **“one enormous overthrow”**. Over hele Glarus danner flysch underlag for en række dækker af ældre bjergarter.

Arnold Escher var ikke meget skrivende og han var ikke tryk ved den tolkning, som Mur-

chison gjorde sig til fortalere for: eksistensen af store overskydninger. Han mente, at han risikerede sit gode navn og rygte, hvis han støttede Murchisons tolkning af forholdene i Glarus. Arnold Escher blev den første professor i geologi i Zürich og efterfulgtes på denne post af den kun 24-årige Albert Heim i 1873. Sammen forklarede Escher og Heim forholdene i Glarus som en dobbeltfold, se figur side 4.

Overskydninger kortlagt i Skotland

I 1883, efter Murchisons død, begyndte BGS systematisk kortlægning i det nordvestlige Skotland og de foreløbige resultater af denne kortlægning blev publiceret i 1888. På det tidspunkt havde man kortlagt halvdelen af 'zonen med komplikationer' i det nordvestlige Skotland fra Cape Wrath i nord til øen Skye i syd, en strækning på ca. 175 km. 'Zonen med komplikationer' består af et gammelt grundfjeld overlejret af sedimenter. Oven på disse sedimenter hviler i visse dele af området igen grundfjeldsbjergarter, som kan have bevaret de overlejrende kambriske sedimenter under endnu en skive af bjergarter af dyb oprindelse; de tidligere omtalte Moine-skifre. Dette var utvivlsomt en struktur, som involverer to overskydninger og den foreløbige beskrivelse fra 1888 er klar i mælet: strukturen af højlandet mod nordvest er karakteriseret af overskydninger, hvoraf den ene, Moine overskydningen, må have flyttet bjergarter fra dybe skorpeniveauer i øst mod vest over et forkastningsplan med en oprindelig hældning mod øst og over en afstand, der skulle måles i titals kilometer.

Den forventningsfulde læserkreds måtte vente tyve år på den endelige rapportering af kortlægningen af det nordvestlige højland: 'The Northwest Highlands Memoir', der udkom i 1907 og senere blev en klassiker.

Glarus dobbeltfolden omfortolket

Omkring tidspunktet for den foreløbige beskrivelse af kortlægningen i Skotland publicerede en fransk geolog en nyfortolkning af Glarus-geologien. Den formastelige, som aldrig havde sat sine ben i Glarus-området, var Marcel Bertrand, der i 1883 tolkede Glarus-strukturen som én stor – mod nord rettet – overskydning, som vist på figuren side 4.

Denne tolkning blev indtil 1903 ignoreret af Albert Heim, skønt dobbeltfolden på en måde altid havde været et misfoster, som det fremgår af Heims egen fremstilling af strukturerne: Det er tydeligt, at folderne i Jura-lagene

under flysken antyder en entydig bevægelsesretning mod nord og ikke to modsatte bevægelser. Albert Heims modstand mod Bertrands tolkning standsede dog ikke andre geologer. Glarus-området indgår i Alpernes nordlige Helvetiske Bælte og i slutningen af 1800-tallet var der en intensiv kortlægningsaktivitet i dette område og geologerne Lugeon og Schardt publicerede væsentlige afhandlinger om dækkestrukturen i de helvetiske alper.

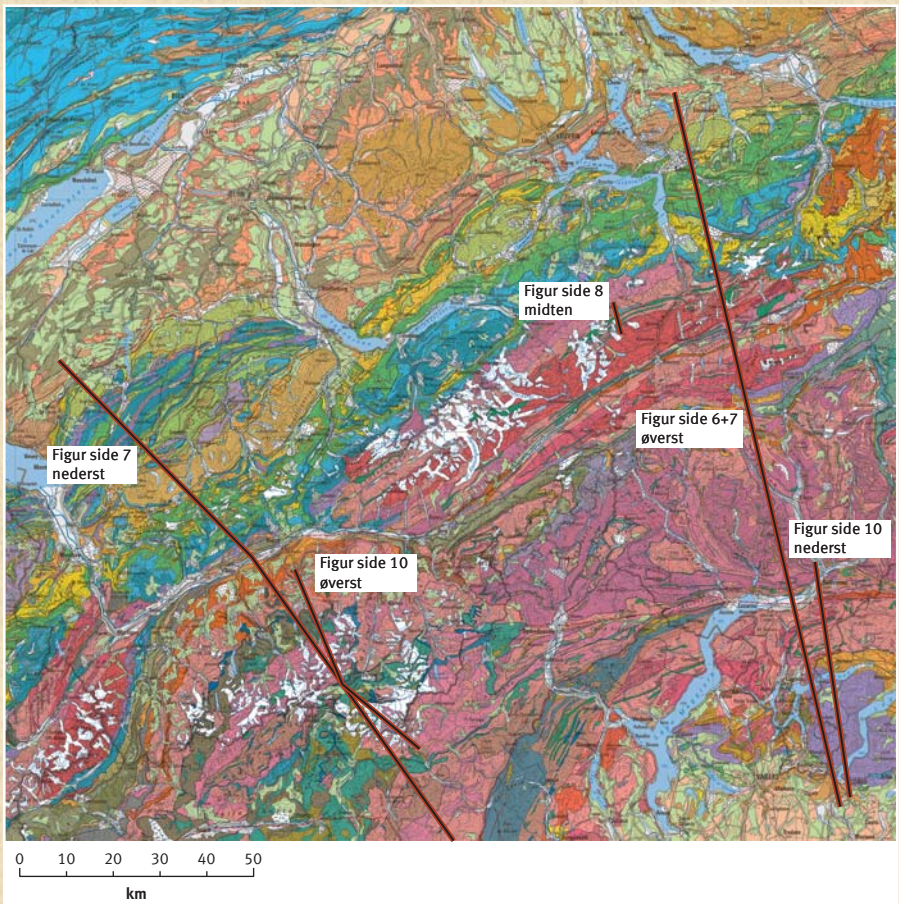
I den skandinaviske fjeldkæde indvarsledes overskydningsteknikkens betydning i 1888 med afhandlingen 'Om fjällproblemet' af den svenske geolog Törnebohm, som på basis af sin kortlægning i Jämtland kunne sandsynliggøre en overskydningsbevægelse af mindst 100 km. Gennembruddet til forståelsen af bjergkædedannelse kan således dateres til en håndfuld år i slutningen af 1800-tallet og den skete samtidig i Sverige, Skotland og Alperne. Det tog altså et halvt

århundredes arbejde med stratigrafi og kortlægning at nå dertil.

Med Heim og Argand gennem Alperne

I årtierne omkring århundredskiftet var en række geologer optaget af at udforske Alperne efter Bertrands omfortolkning af Glarus dobbeltfolden fra 1883. Men først skal vi lige en hurtig tur gennem de schweiziske alper.

Mod nord er erosionsprodukterne fra nedbrydningen af Alperne endt i molasse-bassinet, angivet med brune farver på det geologiske kort. Dernæst følger en zone med mesozoiske sedimenter, der indgår i en række overskydningsenheder, de 'helvetiske dækker'. Ovenpå dem og foran dem finder man en række rester af et engang sammenhængende overdække – på tysk: 'klippen' – med en 'uhelvetisk stratigrafi'. Omkring Genevesøen kaldes de prealperne. Disse klippedækker fik deres første moderne fortolkning af Schardt i 1893–1898.



Udsnit af geologisk kort over Schweiz med beliggenhed af profilerne på side 6, 7, 8 og 10. Legende: se kortet side 3. De violette farver på indersiden (sydøst for) af de hercyniske massiver angiver grundfjeldsbjergarterne i de pennine dækker. Man kan ikke yde så stort et udsnit af det geologiske kort retfærdighed i et hefte som dette, så læseren opfordres til at åbne kortet i linket anført i kortet side 3.

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

durch die

SCHWEIZER-ALPEN

nach dem heutigen Stande
der Untersuchungen entworfen

1919

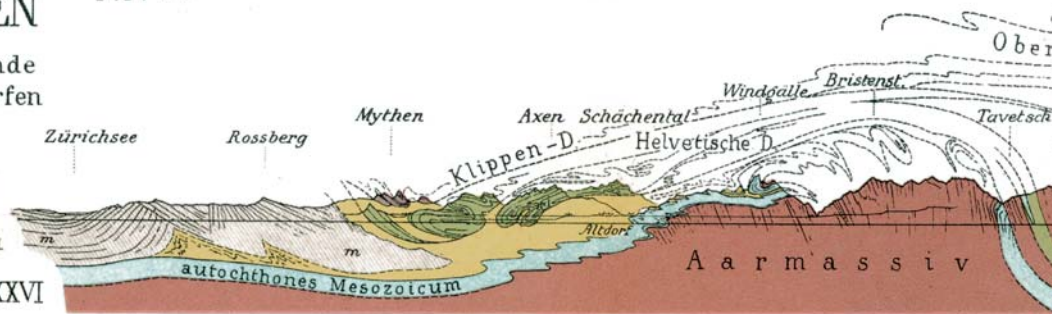
Maasstab 1 : 400000

0 5 10 15 20 km

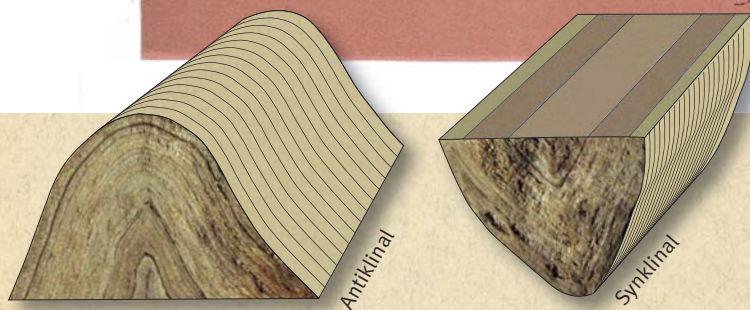
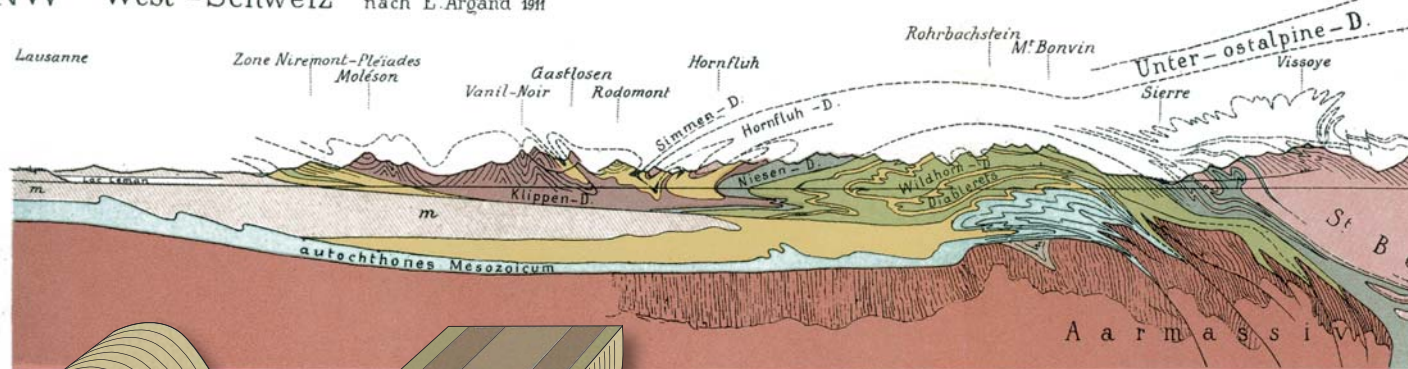
Farbenerklärung auf Taf. XXVI

NNW

Central – Schweiz



NW West – Schweiz nach E. Argand 1911



To profiler gennem Alperne fra Albert Heims 'Geologie der Schweiz', fra 1921.

Det helvetiske bælte er indad i bjergkæden begrænset af de hercyniske massiver, bestående af grundfjeldsbjergarter, typisk granitter og gnejser. I det østlige Schweiz er det Aar- og Gotthardmassivet, som er adskilt af en smal synklinal fold med mesozoiske sedimenter. Langs sydsiden af de hercyniske massiver findes stedvist bevarede rester af de sedimenter, der engang overlejedede de hercyniske massiver, og som nu er skrællet af og ført mod nord som de 'helvetiske dækker'. Syd for disse såkaldt autochtone sedimenter (dvs. sedimenter, der er dannet samme sted, som de nu findes), kommer nu en stabel af nye overskydningsenheder, de 'pennine dækker', som er meget forskellige fra de helvetiske, idet de hovedsageligt består af grundfjeldsgnejser. Mod syd bliver disse pennine dækker mere og mere stejltstillede og ender med at udgøre en ca. 10 km bred zone af lodretstående gnejser i grænseområdet mellem Schweiz og Italien. I den klassiske alpegeologi kaldes denne zone for 'de pennine dækkers rodzone'. Syd herfor kommer de sydlige Alper, og endelig Po-slettens molasse-

sedimenter. Bredden af Alperne fra fx Luzern til Como – fra den nordlige til den sydlige molasse – er 150 km. Normalt er tykkelsen af kontinental skorpe uden for bjergkæder på 30–40 km.

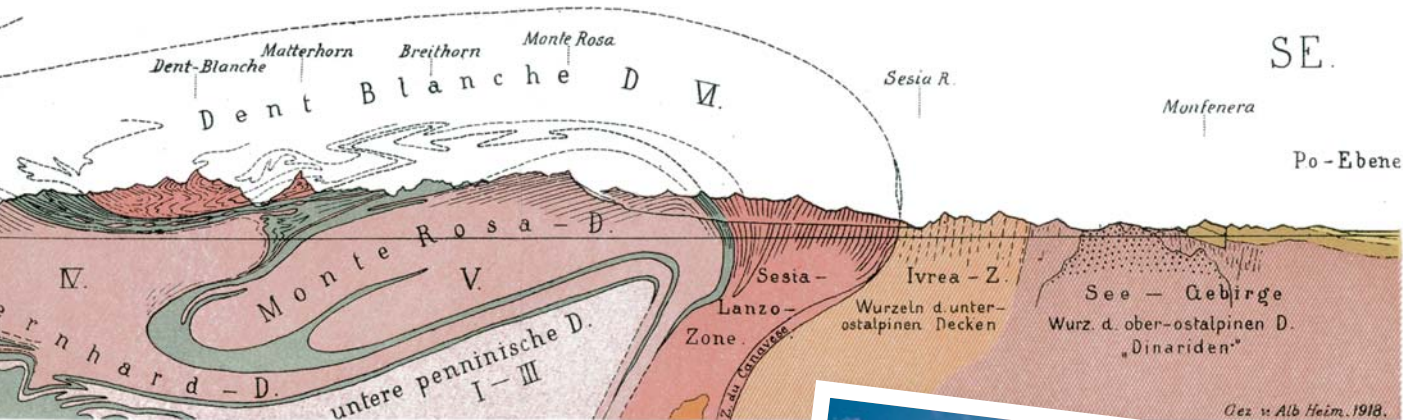
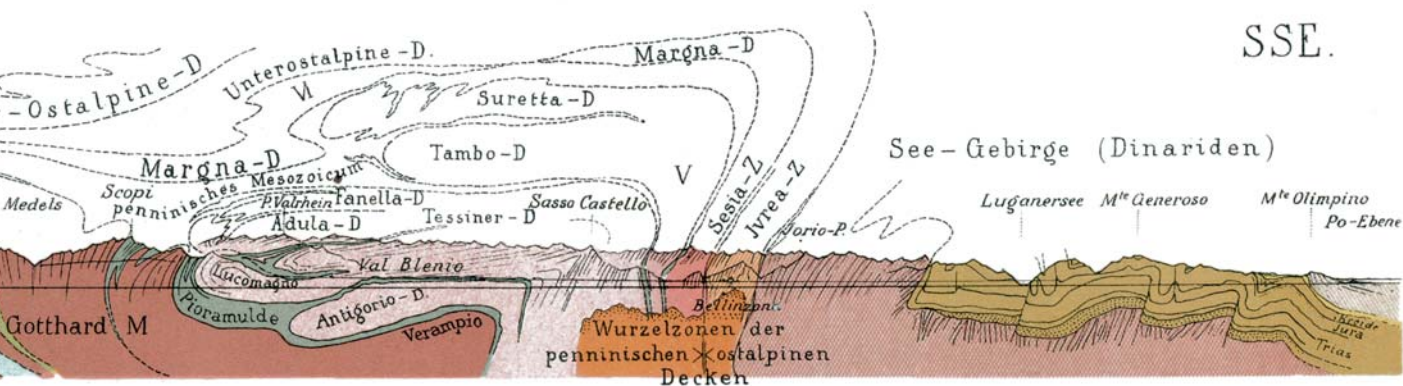
Man kan hævde, at Alpegeologiens heroiske periode sluttede i år 1916 med Argands afhandling 'Sur l'arc des Alpes occidentales' og allerede i 1920 blev der rejst et monument for denne periode. Da udkom nemlig Albert Heims tykke trebindsværk 'Geologie der Schweiz'. Man kunne måske forvente af en bog, der snart fylder 100 år, at den er både umoderne i sit indhold og primitiv i sin æstetik. Men nej; ikke i dette tilfælde. 'Geologie der Schweiz' er stadig både mættet med indsigt og et værk af stor skønhed. Det tog Albert Heim ca. 15 år at skrive bogen. En stor del af den tid gik med at fremstille figurerne. Heim siges at have graveret mange af trykpladerne egenhændigt. Bøgerne er tilgængelige på nettet, og er en nydelse at bladere i – også for ikke-fagfolk.

"Säntis-bjerget er et vidunderligt foldebjerg"

Fra Säntis til Disentis: den helvetiske zone

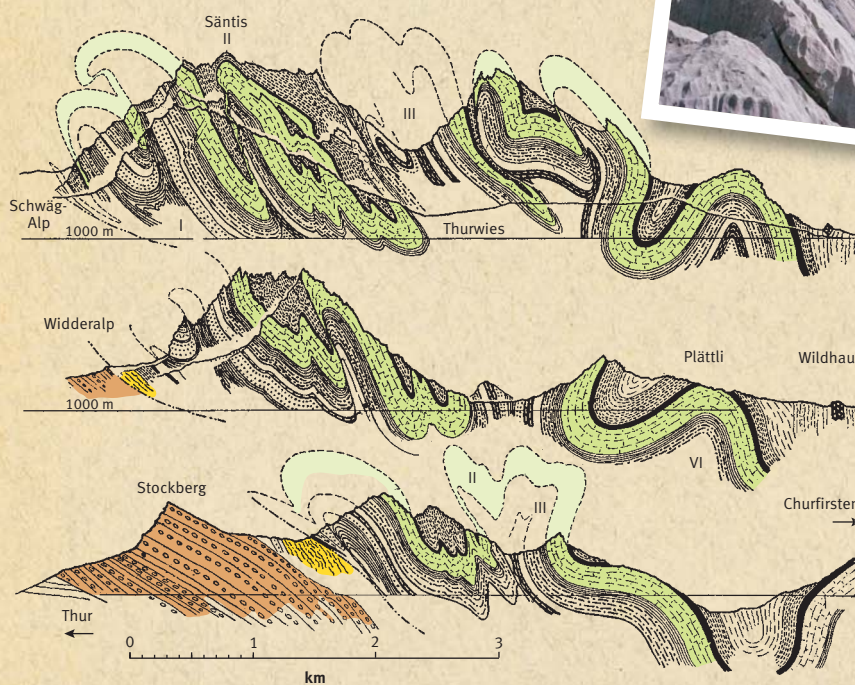
Før overskydningernes indtog i alpegeologien var 'hovedpersonen' i fortællingen om bjergkædedannelsen: folder. Og den mest udbredte opfattelse af drivkraften bag tektonik var ideen om en skrumpende planet. Albert Heim kortlagde den kæde af bjerge, der mellem Zürichsøen og Bodensøen, udgør Alpernes nordlige front: Säntiskæden. Disse bjerge er intenst foldede og det var en stor bedrift at kortlægge disse bjerge i slutningen af 1800-tallet. Om Säntiskæden skriver Albert Heims søn Arnold i sin disputation fra 1905: "das Säntisgebirge ist ein wunderbares Faltengebirge", (Säntis-bjerget er et vidunderligt foldebjerg) – nok inspireret af sin fars profiler, se profilerne side 7 nederst.

Man ser, at molassen er stejltstillet og hælender ind under de foldede kridtsedimenter, og man ved i dag, at molassen under den helvetiske hovedoverskydning rækker langt ind under de helvetiske dækker, formentlig helt til de hercyniske massiver.



Säntis-toppen med endestationen
for svævebanen øverst oppe.

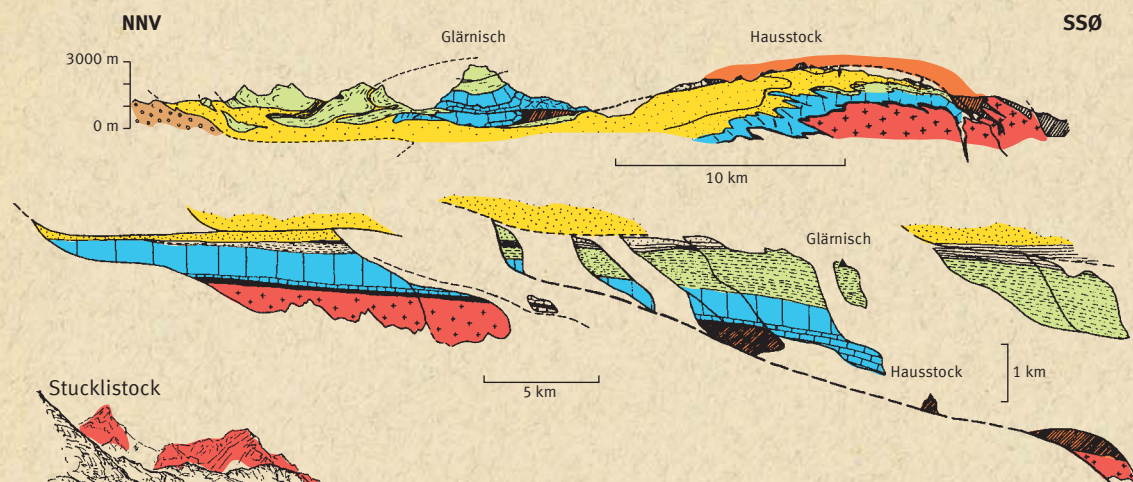
Foto: Kai Sørensen.



Tre af Albert Heims Säntis-profiler. Kun ét af mange kalklag af Kridt alder, Schrattenkalk, er farvelagt (med grønt). Flysch og molasse ses nederst i profilerne. Beliggenhed af profilerne er vist på udsnittet af det geologiske kort side 3.

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

Fortsætter man mod syd fra Säntis-kæden, retter de helvetiske strukturer sig ud; overskydningsplanerne bliver fladtliggende og folderne er enten frontale og dannet over det underliggende overskydningsplan, eller distale og dannet under det overliggende overskydningsplan. Gennem Schweiz – fra øst til vest – er de helvetiske dækker begavet med en række navne som Säntis, Axen, Verrucano, Mürtchen, Wildhorn, Diablerets og Morcles. Forudsætningen for at forstå hvordan de helvetiske dækker er blevet dannet, var at man erkendte, at de forskellige aflejringsmiljøer kan ændre sig inden for de enkelte dækker fra nord til syd. Det var således

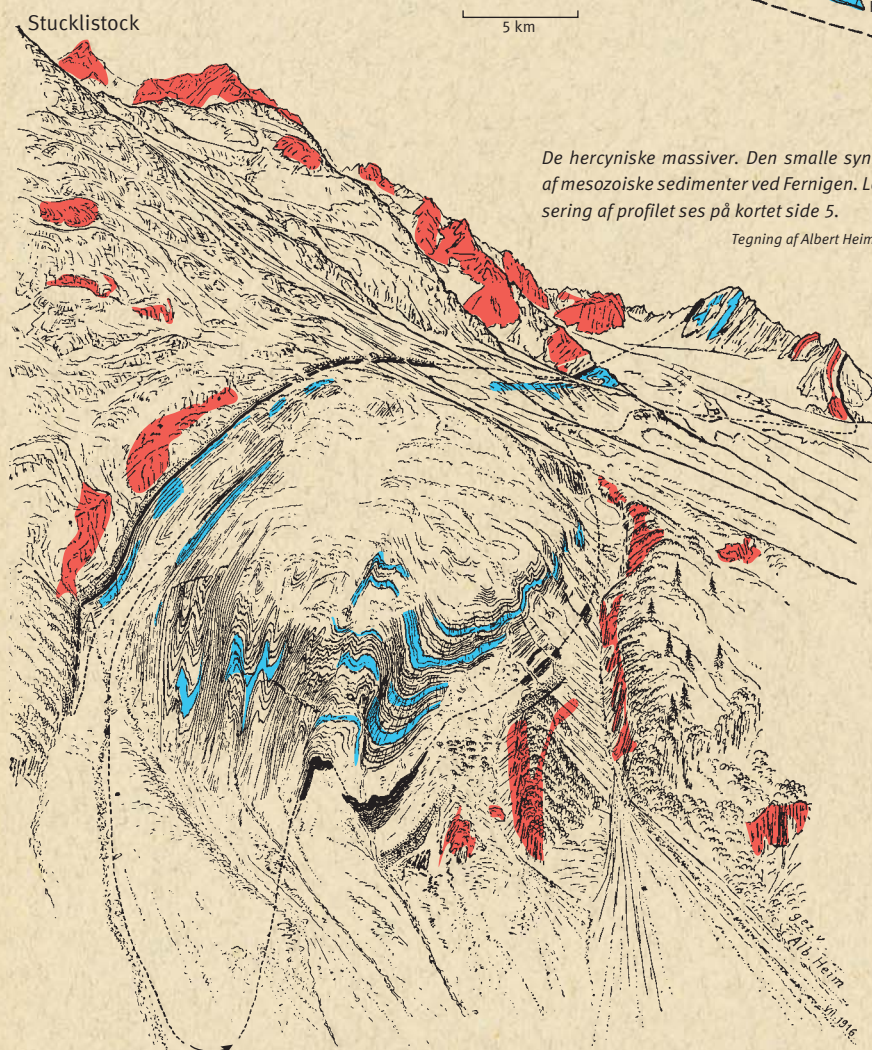


Endnu et Glarus-profil og dets dekonstruktion i henhold til Arnold Heims palinspastiske metode. Trümpy tog denne metode op i en berømt afhandling fra 1960, som revitaliserede Alpeforskningen på tærskelen til pladetektonikkens tidsalder. Denne metode muliggør palæogeografiske rekonstruktioner tilbage i geologisk tid. Placering af profilet er anført på udsnippet af det geologiske kort side 3.

Kilde: R. Trümpy (1985)

De hercyniske massiver. Den smalle synklinal af mesozoiske sedimenter ved Fernigen. Lokalisering af profilet ses på kortet side 5.

Tegning af Albert Heim 1921.



et afgørende fremskridt, at man fandt at aflejringsdybder øgedes mod syd. Også mellem de enkelte dækker kunne man iagttage sådanne facies-forskelle og Albert Heims søn Arnold Heim, som udførte omfattende feltarbejde i Sântis-området fik den ide, at man kan skille dækkerne ad og arrangere dem i en meningsfuld geografisk orden – en såkaldt *palinspastisk* rekonstruktion. Denne metode gør det muligt at lave en detaljeret beskrivelse af Alpernes palæogeografi, en tilgang til den regionale geologi, som blev revitaliseret i 1960'erne af R. Trümpy og af de tankebaner, som pladetektonikkens fremkomst pludselig åbnede for. Et eksempel på dekonstruktion er vist i figuren ovenfor.

Det er værd at notere sig, at den tertiære flysch over en afstand på ca. 30 km fra nord til syd overlejres af mesozoiske (og Verrucano) sedimenter. Dette er den mindste afstand, som de helvetiske dækker har rejst. Bemærk den markante vækst i tykkelsen af kridtsedimenterne (grønne). Grundfjeldet, de hercyniske massiver, findes tæt på overfladen sydligst i profilet.

Pelvoux-massivet i de franske Alper til illustration af de hercyniske massivers topografi.

Foto: Kai Sørensen.



Emile Argand

Argand (1879–1945) studerede geologi i årene 1904–1909 og allerede i 1905 står han som medforfatter til en artikel *‘sur les grandes nappes de recouvrement de la zone du Piémont’* sammen med sin professor i Lausanne, Maurice Lugeon. Det meste af sin studietid tilbragte han i felten. I følge et festskrift i anledning af 50-året for Argands død tilbragte han i denne seksårige periode “1000 days above an altitude of 2000 metres in the interests of geology, and cartography”. I april 1909 indleverede han sin disputats: *‘L’Exploration géologique des Alpes Penniques Centrales’* og i 1916 det første af sine to hovedværker: *‘Sur l’arc des Alpes occidentale’*. I billedet her ved siden af ses han ved tegnebordet. Der var han afgjort et geni. I 1911 blev han professor i Neuchâtel; en stilling han blev i til sin død. Efter arbejdet med Alperne udvidede han sit arbejdsfelt betragteligt, til at omfatte hele området fra Atlanterhavet i vest til Stillehavet i øst. Resultatet var *‘Tectonique de L’Asie’* der udkom i 1924. Argand var – og kunne vel ikke være andet – *‘mobilitist’*. Han så Alperne som et resultat af kollision mellem Europa og Afrika, og Himalaya som et resultat af kollision mellem Indien og Asien. En opfat-

telse som klingede godt med Wegeners kontinentaldriftsteori, men som rimede dårligt med den ortodokse indstilling, der herskede i geologiens verden frem til pladeteknikken holdt sit indtog.



Emile Argand (1879–1940) i færd med at tegne et af sine meget instruktive kort. Foto af C.E. Wegmann (Argands efterfølger som professor i Neuchâtel), ca. 1920. Kilde: *Eclogae Geologicae Helvetiae* 1991.

I højre del af det geologiske kort (side 5) kan man se Aar-massivet og dets lillebror Gotthard-massivet komme ‘i dagen’ (være blotlagt) vest for profilinjen. De to massiver er adskilt af en smal zone af mesozoiske sedimenter. De hercyniske massiver tegner en bue i Alperne fra Glarus og gennem Schweiz og Frankrig næsten helt til Middelhavet: Aar–Gotthard, Aiguilles Rouge–Mont Blanc, Belledonne, Pelvoux og Argentera. Til sammen er massiverne hjemsted for nogle af de mest *alpine* bjerglandskaber i Alperne.

Den smalle sedimentzone mellem Aar- og Gotthardmassivet huser den eneste gennemgående tværforbindelse gennem de schweiziske alper som også både Rhônes og Rhinens øvre løb følger. På mange lokaliteter er de nedfoldede sedimenter synlige på spektakulær vis, se figuren midt på side 8, fx Fernigen synklinalen umiddelbart vest for Andermatt. Sedimenterne, der er af

Jura alder, indeholder ‘strakte’ belemnitter, som vidner om den stærke deformation, sedimenterne har været igennem.

Syd for massiverne: den pennine zone

De hercyniske massiver er ikke de mest spændende dele af Alperne og vi vil da også gå videre til området syd for massiverne efter denne korte berøring af emnet. Geologen, der lukkede op for forståelsen af området syd for massiverne, var den kendteste af alle alpegeologer: Emile Argand, se ovenfor.

Zonen syd for de hercyniske massiver består af dækker af stærkt deformerede grundfjeldsbergarter med rester af de oprindeligt pålejrende sedimenter klemte ind mellem de enkelte grundfjeldsdækker.

Denne zone benævnes den Pennine zone. Siden Argand er der gået meget tid med at udrede og diskutere alder og art af de sedimen-

ter, der adskiller dækkerne. Man skal være opfostret med alpegeologi for at kunne følge med i denne diskussion, men to væsentlige forhold om disse sedimenter skal dog nævnes:

- Nogle af sedimenterne er sammenlignelige med sedimenterne i den såkaldte Briançonnaiszone i de franske Alper og der er nu enighed om, at de tilhører et mikrokontinent, der blev fanget i kollisionen mellem Europa og Adria (hjørne af Afrika?) – denne erkendelse er meget senere end Argand!
- Det andet væsentlige element af sediment indeklemte mellem grundfjeldsdækkerne kortlagde Argand i Zermatt-regionen og det er illustreret i profilet gennem Matterhorn, øverste profil side 10. I dette profil optræder to ‘nye’ bjergarter, som er karakteristiske for den Pennine zone, nemlig Bündnerskifer (BS) og ofiolitter (se Boxen side 10).

Ofiolitter og Bündnerskifer

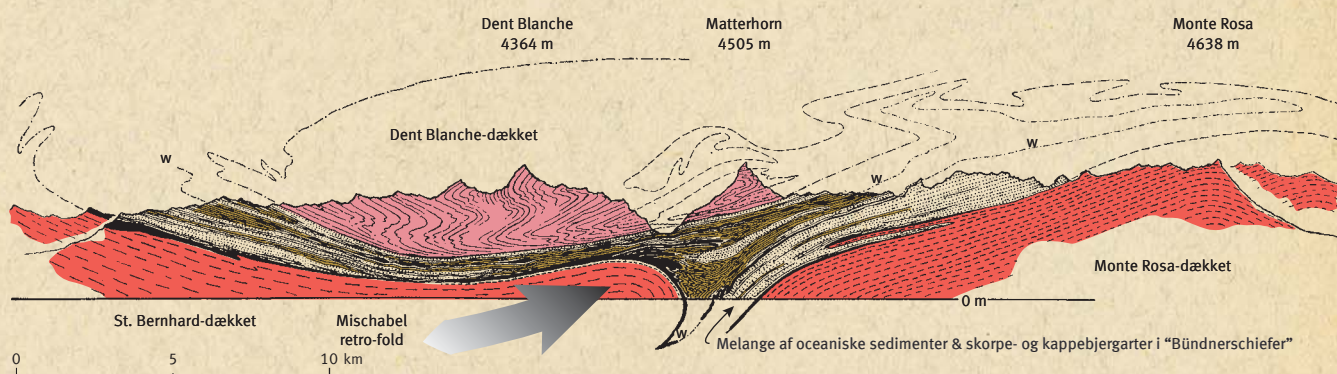
Sammen med grundfjeldsbjergarterne i de tre grundfjeldsdækker Dent Blanche, Monte Rosa og Bernhard udgør associationen (forbindelsen) af Bündnerskifer (BS) og ofiolitter de pennine karakterbjergarter. BS er en kalkholdig lerskifer – i de fransktalende dele af Alperne kendt under navnet schistes lustrées – af hovedsagelig Jura og Nedre Kridt alder. De er afsat på dybt til meget dybt vand, idet der i dele af sekvensen kan ses sedimenter svarende til det kiselrige slam, der dækker store dele af de nuværende oceaners bund. I disse skifre forekommer vulkansk materiale, omdannede basalter og pudelavaer sammen med ultrabasiske bjergarter (olivinrig kappe-

bjergart), oftest i form af serpentinit, der er dannet ved hydrering af olivin. Denne association, som præger store dele af det pennine område, blev erkendt som noget særligt allerede tidligt i 1800-tallet, og omtales ofte som 'Steinmans treenighed' efter den tyske geolog, som omkring år 1900 beskrev og diskuterede betydningen af disse bjergarter. Det er først efter pladetektonikkens indførelse, at man kan forklare hvordan disse bjergarter er blevet dannet.



Ofiolit i Pfulwe-passet med Matterhorn i baggrunden.

Foto: Kai Sørensen.



Struktur i den pennine zones dækker af grundfjeldsbjergarter adskilt af sedimenter med ofiolitiske inklusioner. Profil af Argand som gengivet i Albert Heims 'Geologie der Schweiz'. Kan genfindes på profilet lige over midten på side 7. Den rosa farve angiver Dent Blanche-dækket.

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

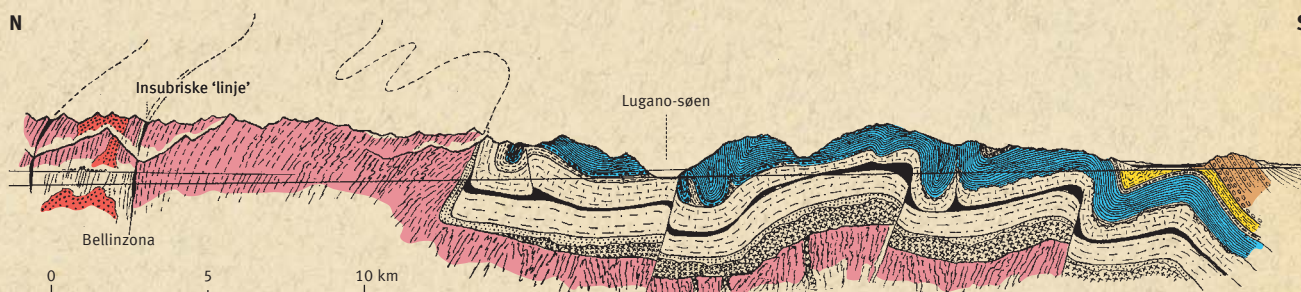
Strukturen i Matterhorn-området er i øvrigt præget af en stor fold i Bernhardsdækket, den såkaldte 'Mischabel Rückfalte'. Dette navn har folden fået, fordi den indikerer bevægelse mod syd, modsat den generelle retning af dækkernes bevægelse. Tilbagefoldning af denne type er almindelig i de vestlige alper, altså den del af Alperne, der ligger mellem Matterhorn og Middelhavet. Øst for Zermatt-området er en tilsvarende kontra-struktur kendt som de penni-

ne dækkers rodzone (se profil øverst side 7 samt figuren nedenfor).

Rodzonen og de sydlige Alper

De sydlige alper består af sedimenter, som ikke har undergået metamorfose, af mesozoisk alder hvilende på grundfjeld og karakteriseret af simple strukturer, som vist på profilet nedenfor. De simple strukturer er reverse forkastninger med en bevægelse rettet mod syd.

Overgangen fra disse sedimenter i de sydlige Alper til metamorfoserede bjergarter i den pennine zone sker 'momentant' på tværs af den *insubriske* linje, som er en stejltstillet forkastning med en kompliceret bevægelses-historie, der danner sydgrænsen for rodzonen. Videre mod syd afsluttes bjergkæden af flysch og molasse tilhørende Po-bassinets. Vi har rejst fra molasse til molasse i Alperne. Vi kan nu foretage en lignende rejse i Himalaya.



Rodzonen og de sydlige Alper. Profil fra Albert Heims 'Geologie der Schweiz'.

Den insubriske linje er grænsefladen mellem de pennine dækker og de sydlige alper: i moderne opfattelse = grænsen mellem de to kontinentale blokke, hvis kollision skabte Alpernes struktur. Resterne af det mellemliggende ocean er sedimenterne med ofiolitiske inklusioner, illustreret i figuren ovenfor. Den insubriske linjes modstykke i Himalaya er Indus-Tsangpo-suturen, se næste afsnit.

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.



Himalaya-kæden set fra rummet. Hvide gletsjere markerer beliggenheden af det høje, centrale Himalaya, som tektonisk består af et dække af grundfjeldsbergarter overskudt mod syd hen over den centrale hovedoverskydning.

Kilde til satellitbilledet:
Landsat Science.



Heim og Gansser i soveposerne i Himalaya, hvor morgenerne kunne være ganske kolde. Tredje 'standlejr' i Milam. Heim var en fremragende fotograf, fx er der i Ark-tisk Instituts gemmer en samling på 700 fotos, taget af ham i 1909 under en tur til Disko-Umanaq-regionen; og i ETH Biblioteks billedarkiv findes ca. 3550 af Arnold Heims billeder fra alle verdensdele. Håndkoloreret af Heim.

Kilde: ETH Bibliotekets billedarkiv.

Med Arnold Heim og Augusto Gansser gennem Himalaya

Himalaya-bjergkæden strækker sig som en 2.500 km lang guirlande fra det indiske kontinents NV-hjørne i det nordlige Pakistan til dets NØ-hjørne i det sydøstlige Tibet, se figuren ovenfor. Hjørne er et velvalgt ord, for det er, hvad de er i geologisk forstand: det indiske kontinents hjørner, der har trængt hundredvis af kilometer ind i det eurasiske kontinent. Ikke bare er Himalaya den suverænt højeste af klodens bjergkæder: den indgår også i et fællesskab med det tibetanske højland, et andet af klodens geologiske vidundere. Et kæmpestort område beliggende i en gennemsnitlig højde på ca. 4 kilometer. Hvis man forestiller sig, at Himalaya og det tilhørende Tibetanske højland er som en elefant, så er Alperne blot en lille mus.

For Argand, der med en vis ret følte, at han havde knækket Alpernes kode, blev hans ambition den ultimative udfordring: Asiens tektonik. Hans *'Tectonique de l'Asie'* fik ikke den indflydelse, som den fortjente – den var jo skrevet på fransk og først oversat til engelsk efter 2. verdenskrig – men blandt alle de mo-

deller, som søger at koble Himalaya med det Tibetanske plateau, står Argands stadig som den med vel nok flest tilhængere: at Himalaya er et resultat af Indiens kollision med Asien og at Tibet er et område, hvor skorpen er fordoblet i tykkelse ved at indisk skorpe er skudt ind under asiatisk skorpe. Dette er ikke et emne, vi vil forfølge. I stedet vil vi tage udgangspunkt i arbejder udført af andre 'Alpegeologer', som havde den opfattelse, at det for forståelsen af Himalayas geologi ville være klogt at lave feltarbejde i bjergkæden. Argand havde ikke den slags anfægtelser: hans Asiens-tektonik var skrevet ud fra læsning af bl.a. de skrifter, som beskrev den store svenske Centralasien-udforsker, Sven Hedins mange ekspeditioner.

Albert Heims søn, Arnold Heim, ledede i 1936 den første schweiziske ekspedition til Himalaya. I 1930–1931 var Arnold Heim professor i Kina og berejste det østlige – kinesiske – Tibet, så Heim var velforberedt til en ekspedition gennem Himalaya. Den resulterede i to værker, som endnu i dag kan give store læseoplevelser: den almene beretning om ekspeditionen – *'Thron der Götter'* samt en geologisk etape-for-etape-beretning. På sin ekspedition var Heim ledsaget af en ung geo-

log, Augusto Gansser, som vil spille en hovedrolle i dette og det følgende kapitel. Himalaya var ikke *terra incognita* på det tidspunkt, men man kan lidt forenklet sige, at forståelsen af Himalaya i 1936 var på et niveau, som var sammenligneligt med forståelsen af Alperne omkring århundredskiftet: Nogle havde den opfattelse, at overskydningstektonik var nøglen til forståelsen af Himalaya, mens andre tegnede profiler uden overskydninger, med blot simple folder og forkastninger. En geolog, W. H. Auden, der var tilknyttet den britiske geologiske undersøgelse i Indien, som var hjemsted for udforskningen af Himalaya, var i færd med at publicere den første veldokumenterede afhandling om Himalayas geologi, forstået som et resultat af mod syd rettede overskydninger. Som en indledning til deres eget arbejde tilbragte Heim og Gansser nogen tid i felten sammen med Auden. Det område, som de gennemrejste under deres feltarbejde, er først og fremmest geologisk kendt takket være denne første schweiziske ekspedition. Og Heim og Gansser gik naturligvis ind til opgaven med den dagsorden at finde ud af i hvor høj grad, deres forståelse af Alperne kunne omformes til en forståelse af Himalaya.



Satellitbillede og geologisk kort over det område, som Heim og Gansser gennemrejste i 1936 med udgangspunkt i Almora. Kortet er fra Ganssers 1964-bog "Geology of the Himalayas". Legenden er forenklet. Beliggenheden af figurer fra side 13, 14, 15 og 18 er vist.

Kilde til satellitbilledet:
Den europæiske rumfartsorganisation, ESA.

På tværs af Himalaya: Purana-sedimenter og underliggende grundfjeld

Det var ikke ukendt land, som Heim og Gansser startede ud i: som i Alperne er bjergkædens yderste element et molasse-bassin, hvoraf en del selv er påvirket af overskydninger. Molassen syd for Himalayakæden er kendt under navnet Siwaliks og den danner lave rygge skabt af helt unge overskydninger. Jordskælvsaktivitet, der kan være af katastrofal intensitet, vidner om at overskydningerne i Himalayakæden er aktive strukturer. Siwaliks-bæltet varierer i bredde fra nogle få kilometer til næsten 100 km afhængig af bevægelserne på den overskydning, der danner

Lidt geografi om Himalaya

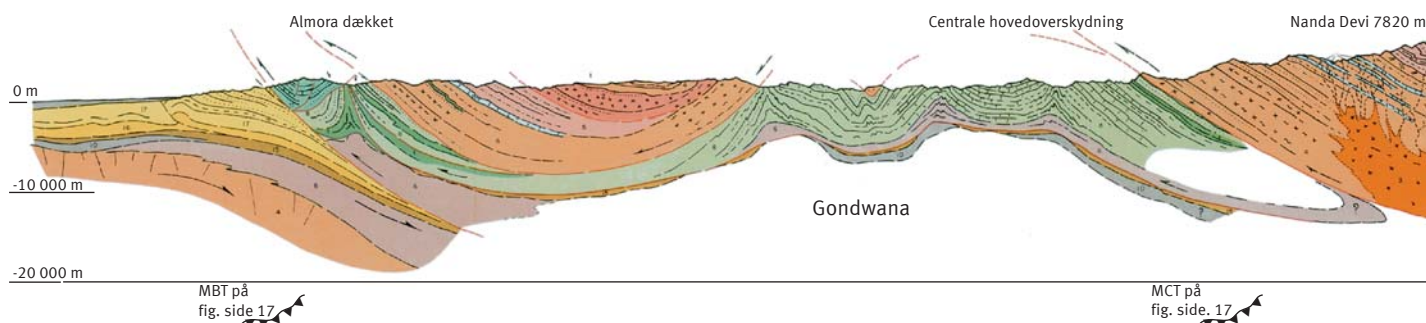
På satellitbilledet ses tydeligt hovedelementerne i Himalayas opbygning: mod syd Gangesletten og nord derfor Siwaliks (molasse) og sydlige Himalaya i mørke farver: Siwaliks fremtræder mørkere end Sydlige Himalaya. Central Himalaya markeres af de hvide gletsjerområder, som skærmer det Nordlige Himalaya fra monsunens nedbør og fremtræder i brunlige

nuancer: det er højtliggende ørken. Nord for Centrale Himalaya ses nogle få søer. Det centrale og sydlige Himalaya mangler søer og adskiller sig på denne måde markant fra Alperne. Manglen på søer er et resultat af Himalayakædens unge alder. En anden morfologisk konsekvens af ung alder er forekomsten af floddale, der skærer på tværs af hele Himalayakæden.

SV

Sydlige Himalaya

Centrale Himalaya



Geologisk profil gennem Himalaya langs en linje fra det hellige bjerg Kailas og gennem Almora til Gangesletten. Se legende ved kortet ovenfor.

Kilde: Ganssers 1964-bog.

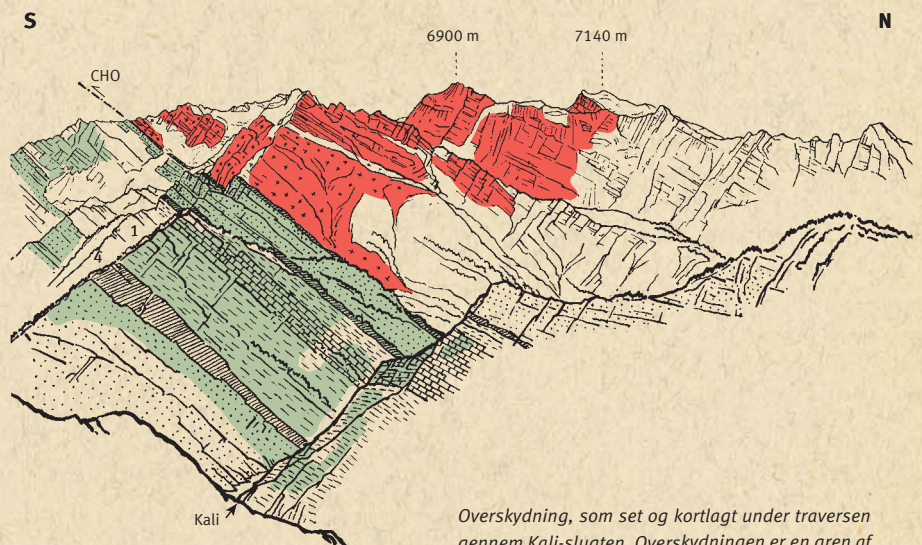
Om klipper og vinduer

I områder præget af overskydninger vil man se, at overskydninger sjældent er helt plane: de kan være foldede eller trinformede. Det betyder, at skæringslinjen mellem terræn og overskydninger bliver en kompliceret figur, og dermed også et kompliceret geologiske kort. Et geologisk kort er i al sin enkelhed et kort over skæringslinjer mellem terræn og planer af forskellig karakter: lagplaner og overskydninger; gå fx tilbage til Argands profil fra Matterhorn-området (side 10). Der ligger gnejser tilhørende Dent Blanche-dækket over sedimentær og vulkanske bjergarter og det danner på et geologiske kort en *klippe*. Almora-dækket er ikke

helt en klippe, da kurven ikke lukker mod øst! Det omvendte af en klippe er et *vindue*: dér har naturen givet et kig ned igennem én enhed, til en underliggende enhed. Heim og Gansser krydsede et vindue på deres vej mod nord i Kali-slugten, se figuren nedenfor. Altså et vindue igennem det store centrale grundfjelds-dække ned til de underliggende Purana-sedimenter. I Alperne er det mest berømte vindue 'Hohe Tauern' i Østrig, hvor man igennem de austro-alpine dækker (som Dent Blanche) ser de underliggende Pennine dækker.

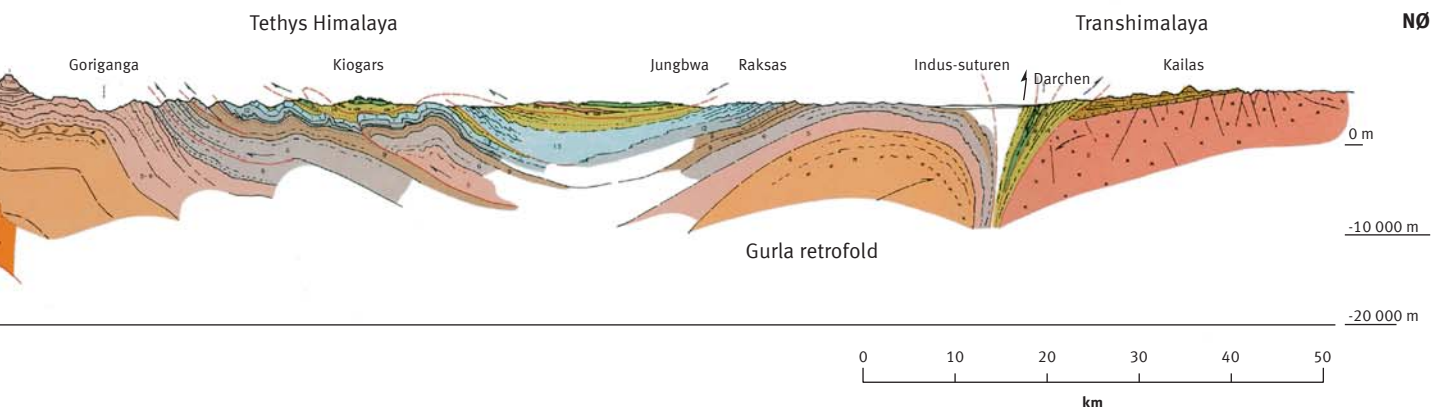
grænse mellem Siwaliks-molassen og de nordfor liggende formationer, der består af sedimentær af prækambrisk alder (grønne farver på kortet), dvs. uden fossiler. Manglen på fossiler gør det vanskeligt at afsløre overskydninger, medmindre helt åbenlyse gentagelser af bjergartssekvenser forekommer, så den interne struktur i disse sedimenter, som kaldes Purana-aflejringerne, kan kun med vanskelighed opløses i en serie dækker, som det er muligt i Alperne. Den samlede tykkelse af Purana-sedimenterne er mere end 10 km og de findes også bevaret i områder mod syd på det indiske grundfjeldsskjold. Purana-sedimenterne er næsten helt umetamorfoserede. I området, som Heim og Gansser gennemrejste, er Purana overlejret af grundfjeldsbjergarter, der er adskilt fra de underliggende sedimentær af en overskydning navngivet efter byen, hvorfra de startede deres ekspedition: Almora. Denne overskydning definerer en næsten lukket figur, en klippe af grundfjelds-gnejser hvilende på sedimentær: Almora-dækket. Hele området syd for Centrale Himalaya kan beskrives som en række store (Almora) og små klipper af grundfjeld hvilende på Purana-sedimenter.

Mod nord afløses dette 'klippe'-billede af Centrale Himalaya, som er et mindst tyve kilometer tykt dække af grundfjelds-gnejser, der opad går over i metamorfoserede sedimentær. Dette dække er bragt mod syd henover Himalayas mest betydningsfulde struktur, den centrale hovedoverskydning (CHO); på engelsk Main Central Thrust. Heim og Gansser så denne for første gang, da de fulgte floden Kali, der danner grænse mellem Indien og Nepal, mod nord, se figuren ovenfor til højre.



Overskydning, som set og kortlagt under traversen gennem Kali-slugten. Overskydningen er en gren af den centrale hovedoverskydning (CHO), som anbringer grundfjeld oven på sedimentære aflejringer: altså den omvendte verden, som i Alperne. Figuren er vist spejlvendt, således at nord er til højre, retningen af Indiens subduktion under Tibet. Farvekode, se legende på side 12.

Kilde: Heim og Gansser, 1939.



Augusto Gansser: Baba Himalaya og 'et århundredes' vidne

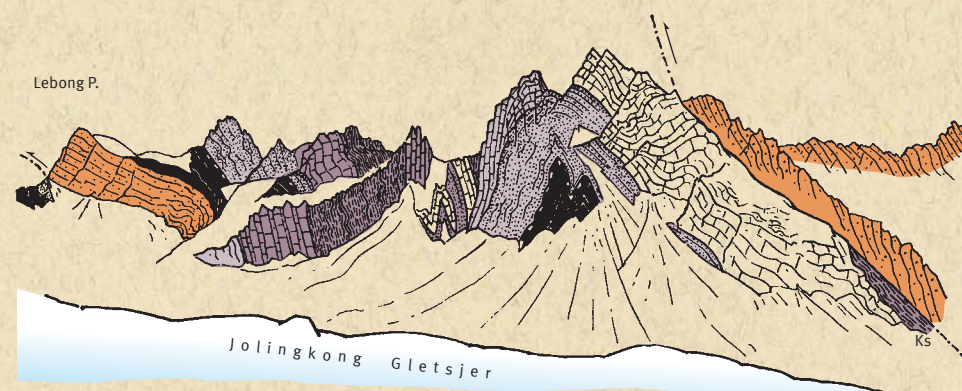
Turen til Himalaya blev unge Augusto Ganssers skæbne. I 1936 var han kun 26 år gammel, men han var en værdifuld følgesvend for den erfarne Arnold Heim, der da også priser ham. Gansser fik en karriere som oliegeolog i Sydamerika for Shell og i Iran for det iranske statslige olieselskab inden han i 1958 blev professor ved ETH (Eidgenössische Technische Hochschule) i Zürich. Han fulgte en opfordring til at skrive en bog om Himalayas geologi, der udkom i 1964. Mens han var ved ETH, foretog han flere ekspeditioner til Himalaya, bl.a. fire ekspeditioner til Bhutan mellem 1963 og 1969; Gansser har skrevet en bog om Bhutans geologi. Som man kan se af flere af figurene i dette afsnit, var Gansser en værdig

arvtager til den tradition for 'feltskitser', som han fik ind med modernælken i Alperne. Gansser var en bjergenes mand og kun vidne til (som andre landkrabber) pladetektonikkens revolutionerende indtog i geologien i slutningen af 1960'erne og begyndelsen af 70'erne. Vi skal senere se hvordan Gansser tager pladeteknikken til sig. Gansser deltog også i en højt profileret ekskursion på tværs af Tibet arrangeret af britiske Royal Society i 1985. I 1983 blev han beæret med titlen Baba Himalaya, Himalayas far, af universitetet i Peshawar. I en bog om ham skrevet af en af hans døtre er der et billede af Gansser i samtale med Deng Xiao Peng. Han døde 101 år gammel d. 9. januar 2012.



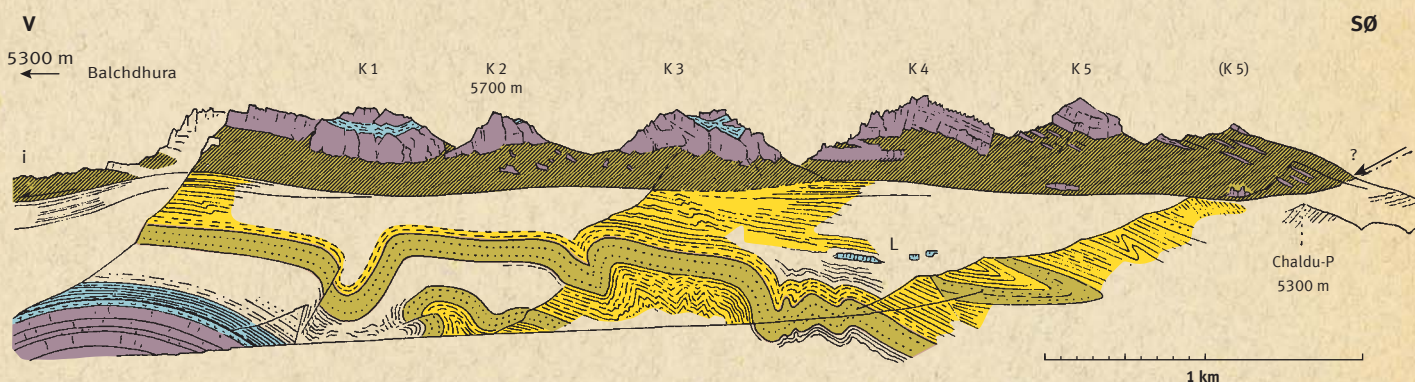
Gansser klædt som pilgrim.

Kilde: Arn. Heim den 9. juli 1936.
(foto: ETH Biblioteks billedarkiv).



Folder i Tethys sedimenter nord for Central-Himalaya. Farvekode, se legende side 12. Herfra gik Gansser på en 13-dages tur mod nord til Kailash-bjerget, klædt som pilgrim.

Kilde: Heim og Gansser, 1939.



Geologisk profil i Kiogar-området. Underst: flysch sedimenter, som udgør den yngste del af Tethys-aflejringerne og præget af mod syd rettede folder, som sedimenterne vist i figuren ovenfor. Derover et dække af ofiolitiske bjergarter og 'eksotiske' sedimenter af Trias alder, der her danner toppene Kiogar 1 til 5.

Kilde: Heim og Gansser, 1939.

I Tethys-oceanets aflejringer

Heim og Ganssers første standjejr var Garbyang, hvorfra de foretog ekspeditioner i omegnen. På en af disse fandt de for første gang fossilførende sedimenter, nemlig ammonitter af Trias alder. Dette var 'nye bjergarter', ligesom man ved at krydse Alperne møder 'nye bjergarter', når man er kommet over de hercy-

niske massiver på vejen mod syd. Disse sedimenter er aflejret i et hav, som blev dannet ved opsplittning af superkontinentet Pangea på grænsen mellem Karbon og Perm tid, hvor Tibet, Iran og Lilleasien blev adskilt fra Afrika-Arabien-Indien gennem rifting og havbundsspredning. Mellem Indien og Tibet dannedes Tethys-oceanet og Tethys-sedimenter-

ne er aflejret på randen af dette ocean. Denne nordlige del af Himalayakæden kaldes derfor ofte Tethys Himalaya. De egentlige Tethys-sedimenter strækker sig i alder fra Perm til Kridt og overligger andre sedimenter, der er så gamle som Ordovicium. Toppene af Mt. Everest består af metamorfoserede sedimenter af ordovicisk alder.

I disse Tethys-bassiner er overskydningstektonikken udpræget og strukturen er på mange måder sammenlignelig med strukturerne i Heim og Ganssers schweiziske hjemland, dvs. overskydninger, der nær overskydningsfronten er tilsat en markant portion folder; prøv at sammenligne strukturerne på profilet nederst side 14 med strukturerne i Sântiskæden, side 7.

Fra Kitu foretog Gansser en legendarisk ekspedition til det hellige bjerg Kailash, ledsaget af tre bærere – og uden telt. Kailash ligger i Tibet, som var et lukket land på det tidspunkt. Derfor rejste Gansser klædt som tibetansk pilgrim (hele historien kan læses i *‘Thron der Götter’*). Rejsen varede 13 dage, og gik over pas i mere end 5000 meters højde i monsuntidens sne og regn. Anledningen til rejsen var, at Kitu skulle fejre en religiøs højtid og dertil skulle bruge får, som havde græsset ved foden af Kailash. Skønt rejsen således havde meget lidt med geologi at gøre, blev denne tur en stor succes for den unge Gansser, idet der efterfølgende kunne sættes et punktum for den geologiske travers. Et vigtigt element i det nordlige Himalayas opbygning er et (eller flere?) dække af ofiolitter hvilende på flysch-lignende sedimenter af hovedsagelig Kridt alder. Denne gruppe af bjergarter blev første gang beskrevet omkring år 1900 ud fra iagttagelser i Kiogar (se figuren side 18), men blev da tolket som et resultat af vulkanudbrud i Tibet. Det var derfor en fjer i hatten for Gansser at finde lignende bjergarter nær Jungbwa på vejen til Kailash. Det var en nyopdagelse, som viste at dette dække af ofiolitter havde en stor lateral udbredelse, se næste afsnit.

De geologer, der besøgte Kiogar-området omkring år 1900, var Østrigere og det må have været en gedigen overraskelse, da de blandt de eksotiske sedimenter i Kiogar fandt kalksten af Trias alder (se foto side 16) og i en facies, som i forbløffende grad lignede den kalksten, de kendte fra de østlige alper. Derimod lignede den intet andet kendt fra Himalaya (og er derfor benævnt eksotisk).

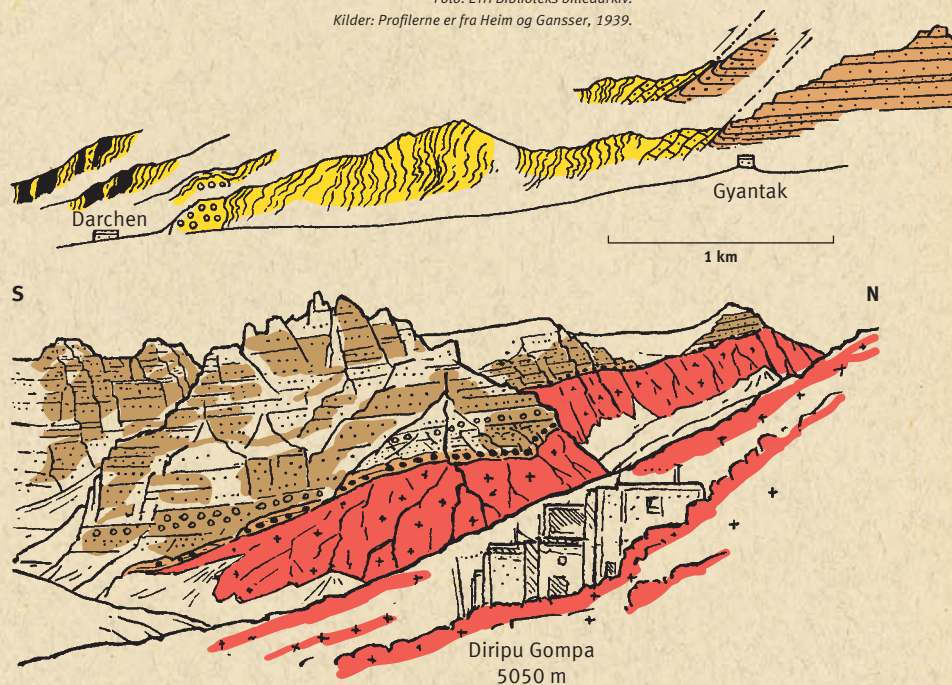
Himalayas naturlige grænse mod nord

Den sidste brik til puslespillet på Heim og Ganssers ekspedition fandt Gansser i egnen omkring det hellige bjerg Kailash, som af både Hinduer og Buddhister opfattes som verdens centrum. Det skulle vise sig at bestå af



Himalayas nordlige grænse. I øverste profil nedenfor såkaldt Indus flysch overskudt mod nord. Legende: Se kortene side 12 og 18. Nord herfor (profil nederst): konglomerater, der overlejrer granitiske bjergarter. Gansser overnattede en enkelt nat i klostret Diripu Gompa, nær det hellige bjerg Kailash; se foto. Bjerget består af konglomerater, Himalayas nordlige molasse.

*Foto: ETH Biblioteks billedarkiv.
Kilder: Profilerne er fra Heim og Gansser, 1939.*



kilometertykke molasse-sedimenter, som ligger oven på granitter med en pålejringskontakt – altså ikke en tektonisk kontakt. Mod syd (se figuren lige ovenfor) er molassen i tektonisk kontakt med flysch-sedimenter langs en overskydning, der hælder stejlt mod syd; og analogien til Alperne er komplet: denne kontraforkastning svarer til Alpernes insubriske linje og som man kan se på profilet (side 12 og 13) bliver den allerede i 1964 betegnet *Indus-suturen*. Afslutningen mod nord af Heim og Ganssers undersøgelser efterlader billeder, som først kom til at give mening,

da pladetektonikken kunne definere en altomfattende kinematisk teori for klodens overfladeelementer. Man kan hævde – og det antyder schweizisk geologis nyligt afdøde nestor, R. Trümpy – at der ikke sker noget væsentligt med hensyn til forståelsen af Alperne/Himalaya i perioden fra 1930ernes slutning til pladetektonikkens fremkomst. Det var jo en periode, hvor en verdenskrig og dens efterveer både satte meget i stå og skabte forudsætningerne for opdagelsen af pladetektonikken.

Eksotiske Trias-blokke (med rødlig farve), fotograferet i Kiogar-området (1936) og efterfølgende håndkoloreret af Arnold Heim.

Kilde: ETH Biblioteks billedarkiv.



Shiala-passet – det var landskaber som disse, Heim og Gansser gennemrejste i Himalaya i 1936. Fotograferet af Heim.

Kilde: ETH Biblioteks billedarkiv.

Den nutidige forståelse af bjergkædedannelse

I løbet af de første årtier i 1900-tallet blev kendskabet til Alperne udbygget i rask tempo og det førte også til tankedannelser om mekanismen bag bjergkædedannelsen. Det var klart for mange, at overskydningerne i Kaledoniderne og Alperne krævede en form for mobilitet, som var forskellig fra den herskende opfattelse, som var: at den hyppige forekomst af folder i bjergkæder, samt af store tykkelser af sedimenter, krævede eksistens af særlige bassiner, *geosynklinaler*, som dernæst blev udsat for sammenpresning, drevet af en skrumpende Jord! Man forestillede sig disse særlige bassiner som værende stort set skabt sammen med Jorden. Alpernes og andre bjergkæders meget forskellige sedimenttyper førte til opsplitning i *miogeosynklinaler* (lavtvands-sedimenter som dem vi finder i det helvetiske bælte i Alperne) og *eugeosynklinaler* (dybtvands-sedimenter med et 'vist' indhold af ofiolitter, som vi finder i det pennine bælte i Alperne).

Argand tog et skridt videre, idet han mente, at Alpernes struktur krævede store horisontale bevægelser og kædede dette sammen med konvergens mellem Europa og Afrika. Han indså også, at den pennine zone repræsenterede det område mellem Europa og Afrika, som var blevet omformet til ukendelighed. I sit senere

arbejde med Asiens tektonik foreslog Argand videre, at Himalayakæden var et resultat af konvergens mellem Indien og Asien, og at den exceptionelle højde af det tibetanske plateau var et resultat af en fordoblet skorpe, nemlig indisk skorpe presset ind under asiatisk skorpe. Argand var således snublende tæt på at foregribe væsentlige elementer i pladetektonikken. Og han følte sig naturligvis bestyrket i sin opfattelse af mobilitet ved fremkomsten af Wegeners kontinentaldriftsteori. I et brev til en professorkollega i anledning af den første oversættelse af Wegeners *'Die Entstehung der Kontinente und Ozeane'* til fransk skriver Argand:

"Wegener er en dristig person og en afhans stærke sider er, som du så rigtig påpeger, at han er rimelig bekendt med geologiske fænomener, men tilstrækkelig uvidende om detaljerne (...) til at kunne løse et af geologiens mest uoverstigelige problemer"

og videre, at Wegeners tanker vinder i klarhed ved oversættelsen til fransk!!! Argands samtidige, Rudolf Staub, der i 1924 udgav sit opus magnum *'Der Bau der Alpen'* har som sin afsluttende figur en tavle med følgende titel:

'Die Bildung der Alpen durch die Verschiebung der Kontinente'.

Argand og Staub stod ikke alene med deres

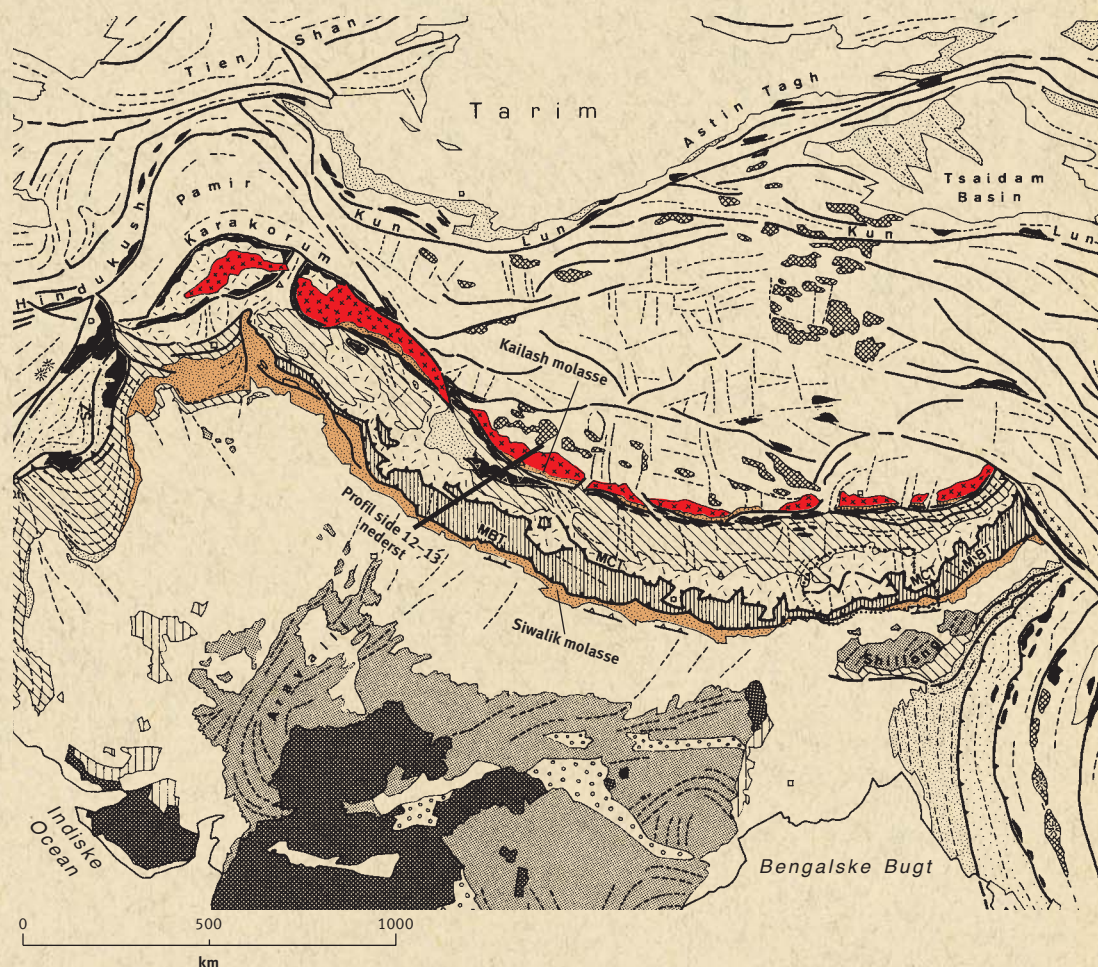
Argand var således snublende tæt på at foregribe væsentlige elementer i pladetektonikken.

'mobilistiske' ideer, men at de havde ret, blev først alment accepteret i forbindelse med pladetektonikkens sejrsgang i løbet af en håndfuld år før og efter 1970. Det afgørende nye, der skete – set gennem alpine briller – var naturligvis, at geofysiske data fra oceanerne førte til en ny kinematik, og at de efterfølgende undersøgelser af oceanbunden førte til en forståelse af oceanbundens lagdelte struktur. Pludselig kunne man konstatere, at ofiolitter er rester af oceanbund dannet ved havbundsspredning og atter opslugt i moder jord ved subduktion; hvilket i Alperne skete i sen Kridt tid.

Anvendelsen af disse nybrud bygger på den kendsgerning, at ikke hele oceanskorpen forsvinder ved subduktion. Store og små stumper af den oceaniske skorpe findes i alle (rigtige) bjergkæder, som vidnesbyrd om oceanerne, der forsvandt.

I begyndelsen af 1970'erne må Augusto Gansser være blevet overbevist om styrken i den pladetektoniske teori, for da han i 1974 publicerer en afhandling om ofiolitiske mellembjergarter i Mellemøsten og Himalaya, sker det i en pladetektonisk begrebsramme. Men før vi eftergør dette, skal den tektoniske betydning af granitten, som Gansser fandt under molassen ved Kailash, beskrives.

Et geologisk oversigtskort af Himalaya og bjergkædens omgivelser, som sammenstillet af Gansser i hans bog om Bhutans geologi (1985). Granitten under sedimenterne i Kailas-området tilhører en streng af granitter, som blev dannet ved Tethys-havets subduktion under det asiatiske kontinent. Molassen mod syd (Siwalik) og nord (Kailash) afgrænser Himalayakæden.



Kailash granitten i moderne tolkning

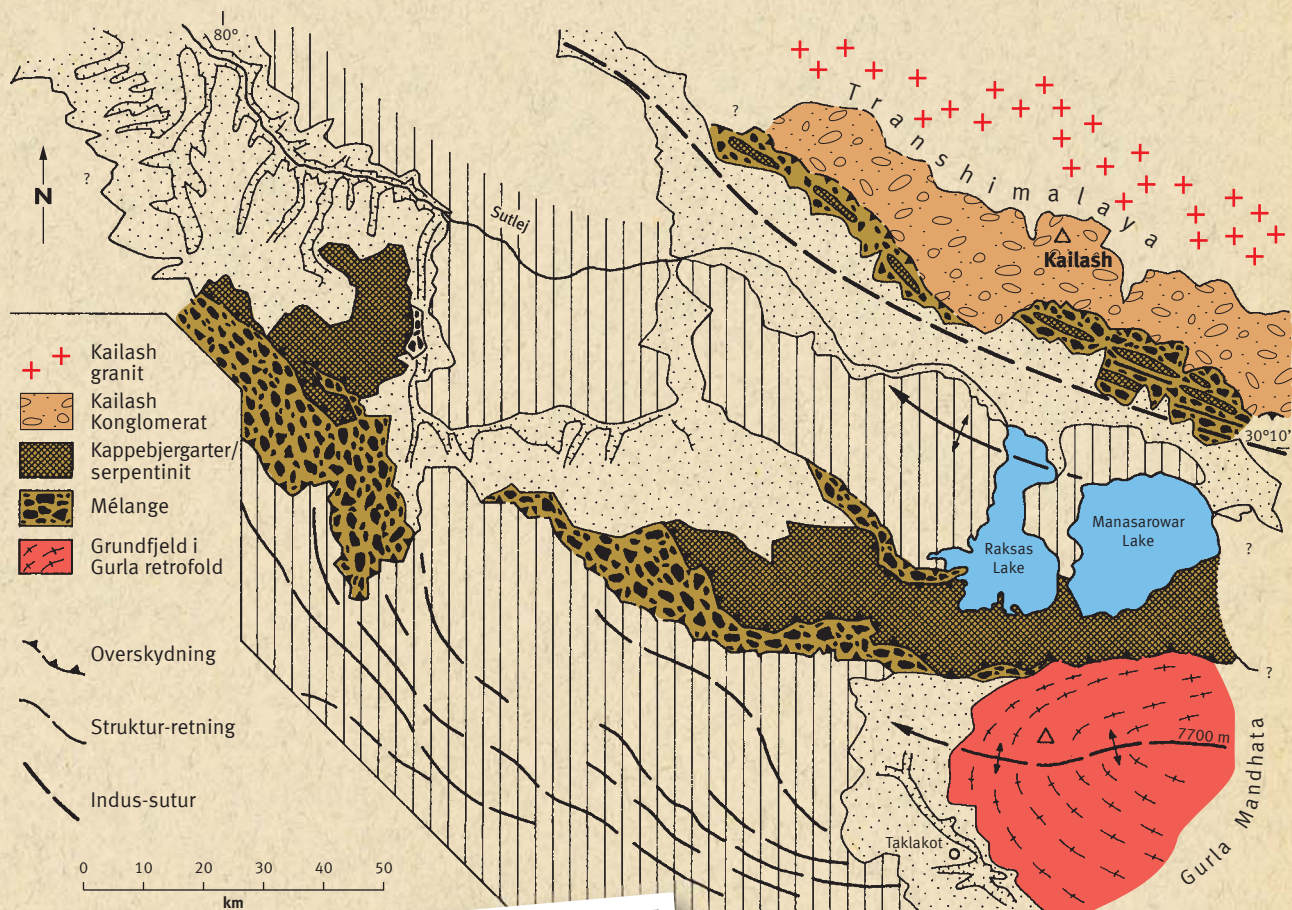
Den granit, som ligger under konglomeraterne i Kailash-bjerget er blot én af en række af granitter, som kan spores hele vejen gennem det sydlige Tibet, både mod øst og mod vest fra Kailash, se kortet ovenfor. Vi ved i dag, at de er af sen Kridt og tidlig Tertiær alder og blev dannet før Indiens kollision med Asien (som fandt sted for 40 mio. år siden) som resultat af subduktion af en oceanisk plade (Tethys-oceanets) mod nord under det asiatiske kontinent. Altså en tektonisk situation svarende til den nuværende vestlige rand af Nord- og Sydamerika. Bjergarterne i dette bælte svarer i sammensætning til granitter, granodioritter og dioritter, som i dag findes i Peru og fx Sierra Nevada i Californien.

Strengen af granitiske bjergarter dannede en såkaldt kontinental bue af vulkaner (for længst fjernet igen ved erosion) og deres dybere dele, som nu ses langs den sydlige rand af Tibet, dannet ved subduktion af Tethys-oceanet under Tibet. I det nordvestlige hjørne af Himalaya har man endda rester af en oceanisk øbue, den såkaldte Kohistanbue, inkorporeret i den nutidige bjergkæde.

Mount Everest bagerst til venstre. Fotograferet fra Phurtyang i Solo Khumbu-regionen i Nepal.

Foto: Henrik Klinge Pedersen, GEUS.





Kiogar–Raksas–Kailash-regionen, hvor igennem suturen mellem Indien og Asien forløber og hvori de oceaniske bjergarter (ofiolitter) er blottet dels i suturen, dels i det ofiolit-dække, som er bevaret syd for Sutlej-floden. Ganssers miniekspedition gik via Taklakota til Kailash. De ofiolitiske bjergarter kan ses på satellitbilledet.

Kilde til kortet: Gansser, 1974, i *Eclogae Geologicae Helvetiae*.

Kilde til satellitbilledet: Landsat Science.

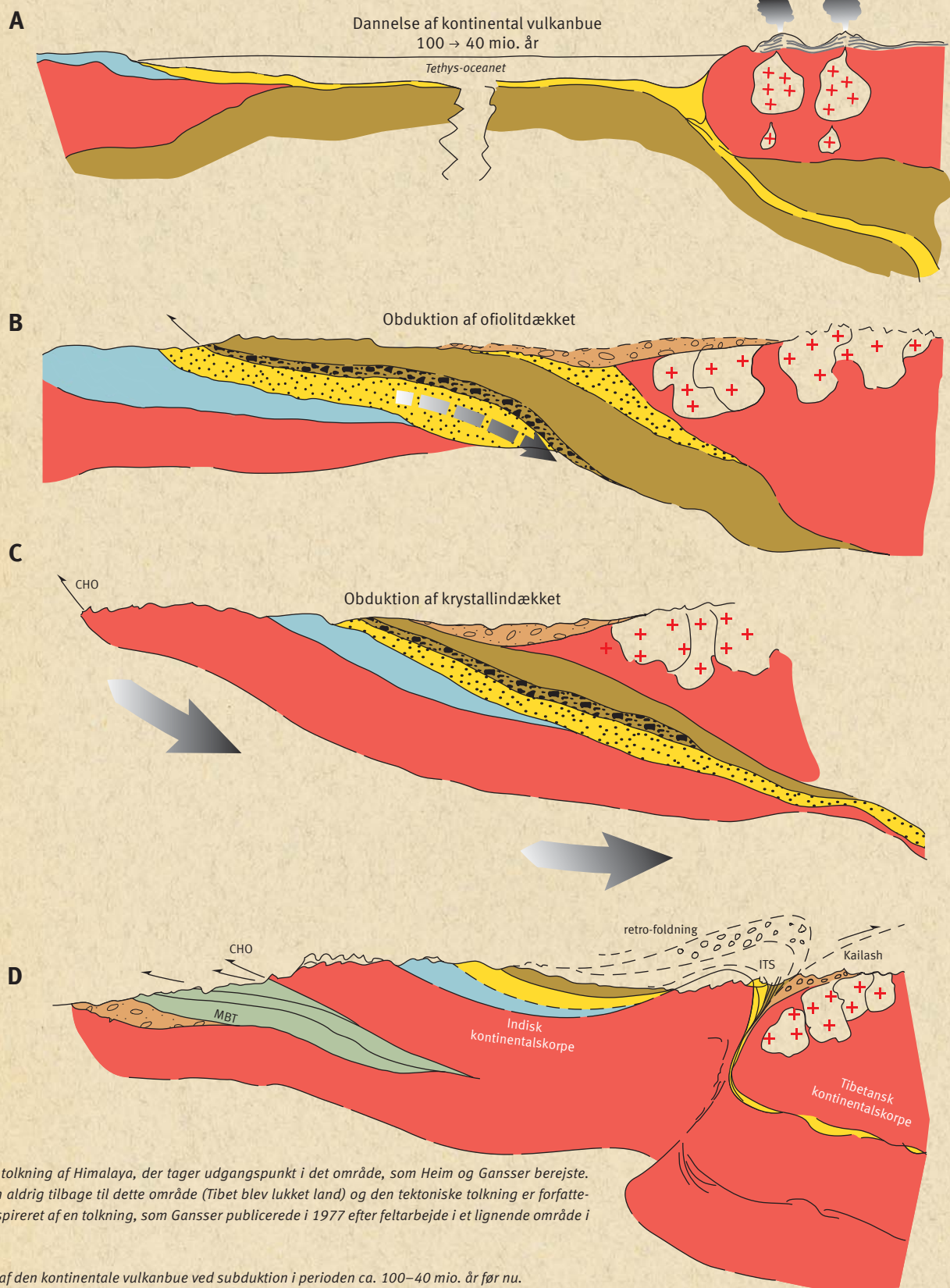
Ofiolitter, flysch og subduktion mod nord

Men subduktion mod nord – er det ikke bare en etikette? Kan man se andre vidnesbyrd om subduktion, vil den opmærksomme læser spørge? De ofiolitiske dækker, som Gansser så på sin 'pilgrimsfærd' til Kailash ved Jungbwa og som Heim og Gansser undersøgte i Kiogar-området senere på året (se kortet ovenfor) samt de stejlt stillede, tilsvarende bjergarter, som er signaturbjergarten i det, der i dag kaldes Indus–Tsangpo-suturen, kan forklares som oceanbund, der har været under subduktion. I denne proces bliver de forskellige bjergarts-

komponenter tektonisk opsplittet og danner en blandingsbjergart, en såkaldt melange, og denne type af bjergarter er et fingeraftryk for kollision, eller subduktion. Denne bjergart kaldte Gansser en *ofiolitisk* melange og han skrev om den i 1974, og lavede feltarbejde i disse bjergarter langs Indus i 1975. I den række af begivenheder, som skaber en bjergkæde ved kollision af to kontinenter, udgør disse ofiolitter og deres tilknyttede melange-komplekser det afgørende vidnesbyrd om det ocean, som i denne proces forsvinder ved subduktion. Geologien i det nordlige område, som Heim og Gansser besøgte, med ofiolitterne i

suturen, molassen oven på granitterne nord for suturen, og dækkerne af melange og serpentinit syd for suturen oven på dækker af Tethys-sedimenter, hører til geologiens kronjuveler. Der mangler kun én ting: et grundfjeldsdække fra det overliggende kontinent oven på ofiolit-dækket: som Dent Blanche dækket i Zermatt-området. Men måske har der været et? Eller er der et på vej? Der er mange spørgsmål, som vi i dag ikke kan besvare. Men for at give et svar må geologien bygge på solide iagttagelser. Heim og Gansser gjorde arbejdet.





En tektonisk tolkning af Himalaya, der tager udgangspunkt i det område, som Heim og Gansser berejste. Gansser kom aldrig tilbage til dette område (Tibet blev lukket land) og den tektoniske tolkning er forfatterens, dog inspireret af en tolkning, som Gansser publicerede i 1977 efter feltarbejde i et lignende område i Ladakh.

A: Dannelselse af den kontinentale vulkanbue ved subduktion i perioden ca. 100–40 mio. år før nu.

Farvekode i denne og følgende scener er som i legenderne til kortene side 12 og 18.

B: Begyndende kollision mellem Indien og Tibet fører til obduktion af ofiolitdækket.

(Subduktion og obduktion er to sider af samme sag).

C: Fremskreden kollision og obduktion af det krystalline dække; ca. 15 mio. år før nu.

D: Videre kollision. Den tibetanske skorpe er fordoblet i tykkelse (Argands model!) og der dannes retrofolder, som er under dannelselse i dag og danner Gurla Mandhata massivet (se hvor det ligger på kortet side 18).

For dem, der gerne vil læse en moderne fremstilling af Himalayas geologi er der et link til en ETH-forelæsning:

http://www.structuralgeology.ethz.ch/education/teaching_material/tektonik/Lektion_10_Himalaja.pdf

Illustration: Kristian Anker Rasmussen, GEUS.

Forfatteren på vej til Alperne for første gang i 1966. Lederne af ekskursjonen: E. Bondesen (med alpehue) og N. Henriksen (med ryggen til). Halvt skjult: medstuderende Vagn Jensen. Ekskursjonen var midlertidigt strandet pga. et nedbrudt Folkevogns-rugbrød. Vi camperede i den tyske mekanikers hønsegård.

Foto: Niels Kelstrup.



GEOCENTER DANMARK

GEOCENTER DANMARK

Er et formaliseret samarbejde mellem de fire selvstændige institutioner De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS), Institut for Geoscience ved Aarhus Universitet samt Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning, samt Geologisk Museum (Statens Naturhistoriske Museum) begge ved Københavns Universitet. Geocenter Danmark er et center for geovidenskabelig forskning, uddannelse, rådgivning, innovation og formidling på højt internationalt niveau.

UDGIVER

Geocenter Danmark.

ISSN 1604-6935 (PAPIR)

ISSN 1604-8172 (ELEKTRONISK)

REDAKTION

Geviden – Geologi og Geografi redigeres af Seniorforsker Merete Binderup (ansvarshavende) fra GEUS i samarbejde med en redaktionsgruppe.

Geviden – Geologi og Geografi udkommer fire gange om året og abonnement er gratis. Det kan bestilles ved henvendelse til Annette Thy, tlf.: 91 33 35 03, e-mail: athy@geus.dk og på www.geocenter.dk, hvor man også kan læse den elektroniske udgave af bladet.

Produktion: Annabeth Andersen, GEUS.

Tryk: Rosendahls - Schultz Grafisk A/S.

Forsidefoto: Emile Argand, Alphonse Jeannet, Rudolf Staub og Maurice Lugeon synger Glarusalpernes pris ved Lochseite: Portalen til forståelsen af Alperne og fire mænd som tilhørte den første generation, som 'så lyset'.

Kilde: Eclogae Geologicae Helvetiae.

Reprografisk arbejde: Benny Schark, GEUS.

Illustrationer: Forfattere og Grafisk, GEUS.

Eftertryk er tilladt med kildeangivelse.



DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND (GEUS)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 38 14 20 00
E-mail: geus@geus.dk



INSTITUT FOR GEOVIDENSKAB OG
NATURFORVALTNING (IGN)

Øster Voldgade 10
1350 København K
Tlf: 35 32 25 00
E-mail: sl@life.ku.dk



INSTITUT FOR GEOSCIENCE

Aarhus Universitet
Høegh-Guldbergs Gade 2, B.1670
8000 Århus C
Tlf: 89 42 94 00
E-mail: geologi@au.dk

GEOLOGISK MUSEUM (SNM)

Øster Voldgade 5-7
1350 København K
Tlf: 35 32 23 45
E-mail: rcp@snm.ku.dk

DANMARK

PP

Magasinpost UMM
ID-nr. 46439