

ALTIPLANO-PUNA HØJSLETTEN

DANNELSESHISTORIE – EN OPDATERET MODEL

Anders Tychsen

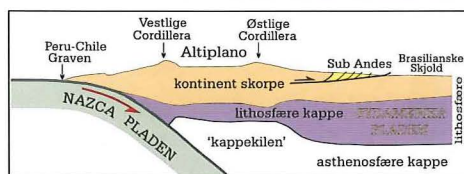
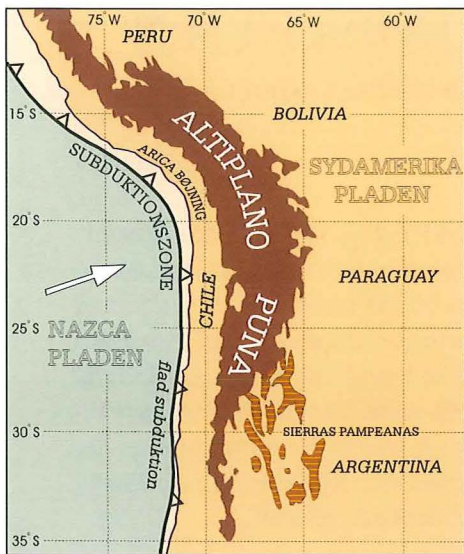
Andesbjergene er et af Jordens smukkeste områder. Regionen er endnu så uciviliseret, at geologer der er interesseret i området kan være tvunget til at bruge heste eller egen fremdrift for at nå frem til de bedste blotninger, hvilket er en konstant udfordring. Midt i det centrale Andes ligger Altiplano-Puna Højsletten (figur 1), eller Centralandes Plateauet, et stykke bjergkæde fladt som Holland med en udstrækning på over en tredjedel af en million kvadratkilometer. Plateauet er klemmt inde mellem to bjergkæder, der er skabt af de enorme kræfter der opstår, når Stillehavets skorpe tvinges ned under den Sydamerikanske Plade. Disse bjergkæder har tilsyneladende beskyttet det flade plateau.

ALTIPLANO-PUNA HØJSLETTEN

Altiplano-Puna Højsletten er det næststørste højlandsplateau på Jorden, kun overgået af Det Tibetanske Plateau i Asien. Plateauet har en gennemsnitlig højde på 3,6-4,0 kilometer, afhængigt af hvor stort et område man medregner til plateauet. Det ligger mellem 16°S og 23°S i det Centrale Andes. Plateauet består overordnet af to segmenter, Altiplano Højsletten i Bolivia og Peru samt Puna Højsletten i det sydlige Bolivia og nordlige Argentina. Længere mod sydsydvest danner Sierras Pampeanas den sydlige del af plateauet (figur 1). Alle regionerne er relativt flade, specielt sammenlignet med det øvrige Andes.

Dannelsen af højsletter er en problemstilling, der har udfordret geologer i flere årtier, og Altiplanoet er ingen undtagelse. Spørgsmålet har været, hvordan kan det flade plateau dannes og bevares, uden at blive påvirket af de kompressive (sammentrykkende) kræfter, der skabes som følge af Nazca Pladens kontakt med Det Brasilianske Skjold. Kræfter der er store nok til at bøje jordskorpen og danne bjergkæder. Spørgsmålet er først blevet besvaret indenfor de sidste 10-15 år. Som en sidegevinst har forskningen øget vores forståelse af struktur og udvikling i de områder, hvor oceanbundsskorpe bliver presset ned under kontinentalskorpe (subduktionszoner).

Mens den generelle ramme for dannelsen af plateauer og dermed også Centralandes Plateauet er mere eller mindre etableret, er der imidlertid stor uenighed om betydningen af de involverede tektoniske processer, såsom hævnning af skorpen og ændringer i skorpetykkelsen, gennem tid og rum. I denne artikel præsenteres den nyeste viden i form af en model for Altiplano-Puna Højslettens dannelse.



Figur 1. A: Skitsekort visende placeringen af Altiplano Højsletten, Puna Plateauet og Sierras Pampeanas. Højder over 3000 m er mørkebrune. Subduktionszonen ses i jordoverfladen som Peru-Chile Graven (se B).

B: Tværsnit gennem Andes ved Arica-bøjningen visende Nazca pladens nedglidning (subduktion) under Andes, beliggenheden af de Vestlige og Østlige Cordillera, Altiplano og Sub Andes. Bemærk 'kappekilen' d.v.s. den del af asthenosfæren som ligger mellem den neddykkende- og overridende plade. Ved Arica-bøjningen subduceres Nazca med en vinkel på ca. 30° grader; mens den kun er 5-10° grader ind under Sierras Pampeanas. Den flade hældning medfører, at der stort set ikke findes en kappekile (= ingen vulkanisme) og, at Andesbjergenes bredde, målt fra Peru-Chile Graven, reduceres fra cirka 700 km ved 27° S til 350 km ved 32° S. Figur A er baseret på de Urreiztieta et. al. [1996].

OPBYGNINGEN AF CENTRALANDES

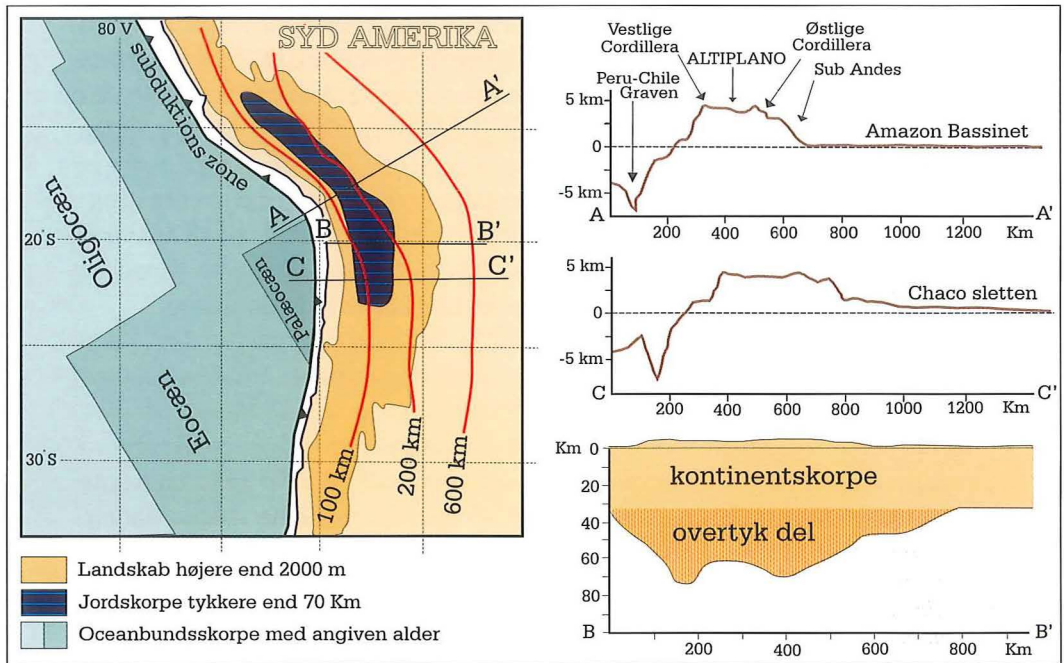
Andes ligger langs en af verdens største aktive pladegrænser og omfatter et bjergkædesystem der rækker over 5.000 kilometer fra Det Caribiske Hav til Kap Horn i Sydamerika. Det er generelt accepteret, at pladegrænsen er en del af et grænseforløb, der strækker sig fra det vestlige Antarktis, under Scotiahavet op langs den sydamerikanske og nordamerikanske kyst. Hvor den Vestamerikanske Cordillera (en cordillera er en bjergkæde) i Nordamerika, inklusive Rocky Mountains, er dannet ved, at kontinentfragmenter er påhæftet Nordamerika efterhånden som Stillehavets litosfære er dykket ind under (blevet subduceret) kontinentet, skyldes udseendet af Andes den irregulære subduktion af Nazca Pladen (tidligere Farralon Pladen) (figur 1) under den af flere mindre stykker sammensatte Sydamerikanske Plade. Der er altså ikke påhæftet fremmede kontinentalskorpefragmenter til den sydamerikanske del af marginen.

Centralandes er en op til 800 kilometer bred region, der visse steder er hævet mere end 6.000 meter over havniveau. Den østlige grænse udgøres af Peru-Chile Graven (figur 2a), en smal, men meget dyb zone skabt af den neddykkende Nazca Plade. Mod øst afgrænses Centralandes af Amazonbassinet og Chacosletten i Brasilien.

Regionen er højest og bredest langs Arica-bøjningen (figur 1); fra 16°S til 23°S. Aricabøjningen er både en strukturel og en topografisk bøjning af kontakten mellem de to plader, fra en orientering nordvest-sydøst nord for bøjningen til en orientering nord-syd syd for bøjningen. De to plader skubbes hvert år cirka 85 millimeter

mod hinanden, men hastigheden har varieret væsentligt siden subduktionen begyndte i Kridt. Aricabøjningens vestvendte konkave geometri har medført, at de kompressive kræfter skabt mellem pladerne har flere retninger, hvilket har muliggjort hævnningen af to bjergkæder, henholdsvis den Vestlige Cordillera og den Østlige Cordillera. Begge bjergkæder smelter sammen nord og syd for bøjningszonen. Mellem dem ligger det 200-250 kilometer brede Centralandes Plateau, som i det store og hele er dannet som et sedimentært bassin tidligt i Kænozoikum, og som er blevet gradvist hævet gennem de sidste knap 60 millioner år og dermed omformet til et højlandsplateau.

Begge de to store dele af Centralandes Plateauet, Altiplano Højsletten og Puna Højsletten, er yderligere inddelt i flere mindre områder, som alle har deres egen dannelseshistorie, der er forskellig fra naboområdernes. Forskellene kan for eksempel være foldningsmønstre eller andre tektoniske deformationer.



Figur 2: Til venstre: Den tektoniske setting af Centralandes ved den vestlige rand af Sydamerika. Dybde-kurverne for toppen af den underliggende Nazca Plade er afbilledet med kraftige røde linier. Desuden fremgår regionens topografi over 2000 m, samt skorpe tykkelse større end 70 km. Til højre: Landskabet er illustreret i to topografiske profiler (AA' og CC'), mens Profil BB' viser variationen i skorpe tykkelsen gennem de Bolivianske Andesbjerge. Bemærk den betragtelige tykkelse i forhold til den gennemsnitlige tykkelse for kontinentsskorpen. Figuren er baseret på: Lamb et al. [1997].

CENTRALANDES PLATEAUETS TEKTONISKE UDVIKLING

Udviklingen af Centralandes består af tre overordnede cykler. De to første er direkte skabt af vandringen af skorpens plader, mens den tredje indbefatter hævnningen af Centralandes Plateauet og dannelsen af plateauet som det fremstår i dag.

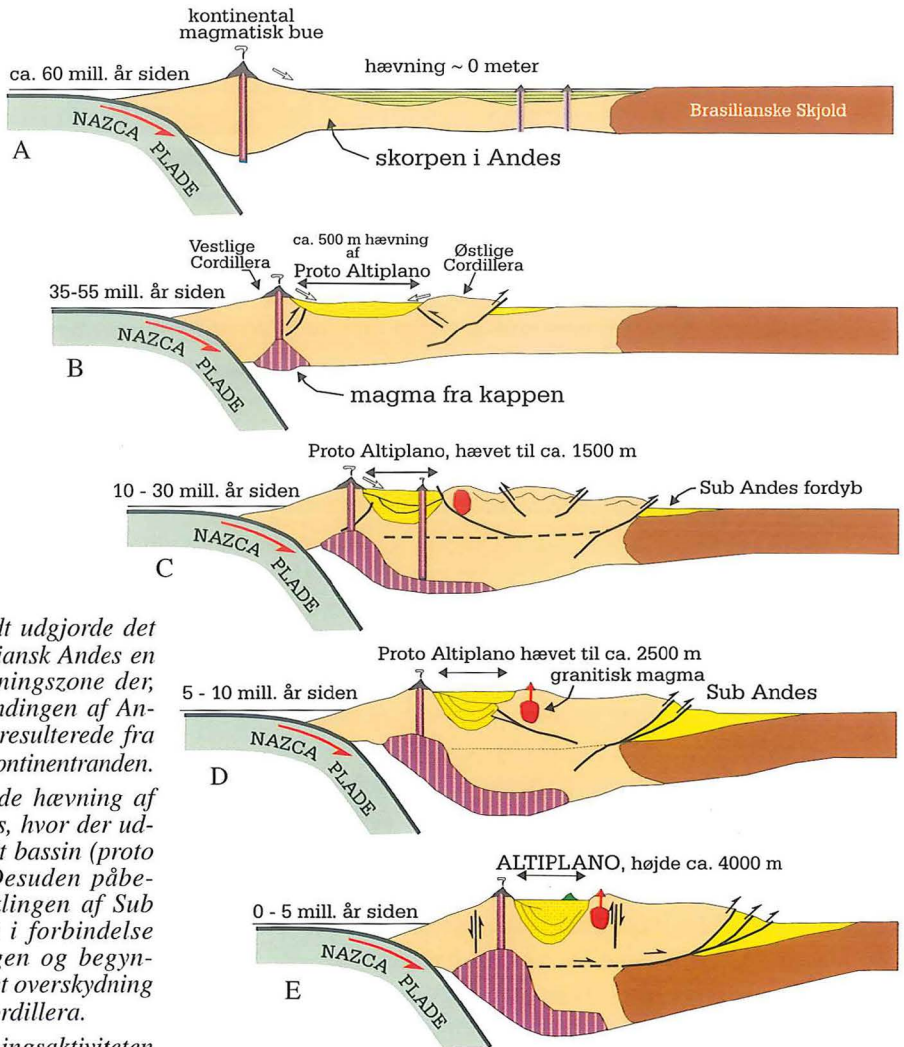
Den Palæozoiske Cyklus (Palæozoikum-Trias): Den klassiske rekonstruktion af superkontinentet Pangaea placerer proto-Andes på den yderste, vestlige rand af Gondwanaland. Her dannede Andes en del af Samfrau Orogenet (bjergkæden), der rakte over hele Pangaeas vestlige rand. Den palæozoiske kontinent rand bestod overordnet af sen proterozoiske til sen palæozoiske sedimentære og vulkanske aflejringer. Gennem tre opfoldningsfaser med tilhørende episoder af metamorfose og granitdannelse omdannedes kontinental randen. Disse bjergarter indgår nu i den Østlige Cordillera, som imidlertid ikke var hævet meget over havniveau før Trias, hvor den anden cyklus begyndte.

Den Mesozoiske Cyklus (Trias-Kridt): I Trias var opsprækningen af Pangaea godt i gang, hvilket betød at strækningstektoniske processer, skabt af pladernes drift væk fra hinanden, var den mest udprægede geologiske deformationstype i Sydamerika gennem Mellem Mesozoikum. Den Sydamerikanske Plade og Nazca Pladen begyndte at bevæge sig imod hinanden i Kridt (for cirka 89 millioner år siden). Bevægelsen medførte erosion af de tidligere dannede palæozoiske strukturer. Den magmatiske aktivitet udviklede en rand af vulkaner langs hele den 7.500 kilometer lange Stillehavseand fra 5°S til 56°S. Vulkanerne dannedes som resultat af de magmadannelser, der sker langs en subduktionszone.

Samtidig udvikledes en serie af forbundne sedimentære bassiner langs den endnu flade kontinentrand. Bassinerne dannede grundlaget for den Vestlige Cordillera, og de udvikledes under en strækningspræget situation, hvor der blev dannet horst- og grabenstrukturer. I Trias-Jura aflejredes karbonatsedimenter i bassinerne, og marginen var overordnet set rolig, indtil der for alvor begyndte en hævning i Mellem Kridt, og dermed udvikledes den 'moderne' Andes Margin.

Centralandes Plateauets dannelse (Kridt-Nutiden) (figur 3): I Mellem Kridt havde deformationen af marginen samlet de usammenhængende sedimentære bassiner til ét stort, sammenhængende bassin fanget mellem de to bjergkæder, der hævede sig konstant. Præcis hvornår dette 'Proto-Altiplanobasin' var etableret er usikkert, forskellige kilder giver det en alder på mellem 100 og 45 millioner år (figur 3a). De fleste forfattere er imidlertid enige om, at bassinet dannedes gennem den sidste halvdel af Kridt. Palæogene vulkanske sekvenser antyder, at hævnningen fortsatte ved den Vestlige Cordillera i denne periode. Vulkansk materiale dannet som følge af magmaproduktion ved den subducerede oceanskorpe fra Nazca Pladen mangler for perioden 35-25 millioner år siden

Figur 3. Udviklingen af Centralandes med Altiplano gennem de sidste 60 mio. år. Skønnede hævnings for proto-Altiplano regionen er angivet for de forskellige tidsperioder:



A: I Sen Kridt udgjorde det mest af Boliviansk Andes en bred indsynkningszone der, ligesom udtyndingen af Andes skorpen, resulterede fra strækning af kontinentranden.

B: Begyndende hævnning af Central Andes, hvor der udvikles et smalt bassin (proto Altiplano). Desuden påbegyndes udviklingen af Sub Andes truget i forbindelse med hævnningen og begyndende østrettet overskydning af Østlige Cordillera.

C: Overskydningsaktiviteten øges. De Østlige Cordillera skydes indover Altiplanobassinets rand og mod øst over Sub Andes.

D: Det Brasilianske Skjold begynder for alvor at glide ind under Østandes, hvilket medfører dannelsen af et veludviklet folde- og overskydningsbælte i Sub Andes.

E: Skorpeforkortelsen er koncentreret til Sub Andes, der akkomoderer underskydningen af det Brasilianske Skjold. Hævning af Altiplanoet er måske knyttet til plastiske sammenpresning i den dybere jordskorpe. Udbredt vulkanisme ses bag den kontinentale magmatiske bue; måske i tilknytning til konvektions-erosion af litosfærens bund. Efter Lamb et. al. [1997].

(figur 3b - c), hvilket tyder på, at kollisionshastigheden var lav eller neddykning-svinkelen lille i dette tidsrum (se senere). Indtil Palæocæn var det meste af den bolivianske del af Andes stadig nær havniveau, men en øgning af erosions-hastigheden, der begyndte for 45 millioner år siden, medførte en hævnning af den Østlige Cordillera. Dette skyldes, at skorpen på grund af erosionen blev lettere, efterhånden som materiale og dermed masse blev fjernet fra cordilleraen.

Igennem Eocæn og Oligocæn blev regionalt udbredte sedimentære aflejringer af Kridt og Palæocæn alder deformeret. Den dybeste del af Altiplano-bassinet omdannedes til en omtrent nord-syd orienteret hævningsregion, hvor den vestlige side af den Østlige Cordillera er placeret. Den vestlige del af bassinet udgjordes af hævet prækambrisk grundfjeld, der blottedes nær den Vestlige Cordillera. Bassinet blev støt og roligt presset mere og mere sammen langs den smalle (øst-vest orienterede) akse. I Oligocæn betød fornyet foldning omkring den etablerede længdeakse, at fortsat sedimentation mere eller mindre stoppede, undtagen i Altiplanoet.

I Sen Oligocæn-Tidlig Miocæn fungerede Altiplano-Puna som et drænings-system. Ældre folde- og forkastningsstrukturer blev gradvist eroderet til groft, konglomeratisk materiale, og topografien udjævnedes. I Sen Oligocæn skete en fornyet aktivitet af granitisk magmatisme, måske som resultat af introduktionen af kappesmelter i dybden. Der dannedes endvidere for mellem 25-9 millioner år siden op til 8 kilometer af kontinentale rødfarvede klastiske sedimenter, såkaldte 'red beds'.

For 11 millioner år siden stoppede deformationen langs den østlige side af Altiplano-bassinet, den Østlige Cordillera var efterhånden for vanskelig at presse sammen blandt andet på grund af de hårde granitiske plutoner. Dette medførte en vestlig forskydning af grænsen for deformation (figur 3d). Den resulterende sammenpresning og forkortning af Altiplanobassinet afsluttede den intensive sedimentation. For 7 millioner år siden stoppede forkortningen af bassinet, og en regional udjævning af terrænet (peneplanisering) var afsluttet for omkring 5 millioner år siden efter fornyet intensiv erosion. I Sen Pliocæn til Pleistocæn dannedes udbredte systemer af sideværts forkastninger ved den Østlige Cordillera, ligesom der dannedes nappestrukturer (figur 3e). Forkastningerne forskyder Pliocæne og yngre aflejringer med op til en kilometer.

BJERGKÆDEHÆVNING I CENTRALANDES

Udviklingen af Centralandes karakteriseres ved dannelsen af Centralandes Plateauet og mangelen på de marginale bassiner, der er almindelige ved subduktionszonerne langs det vestlige Stillehav. De enorme kræfter, der blev skabt ved etableringen af subduktion i Trias, foldede de to cordilleraer op, men grundet



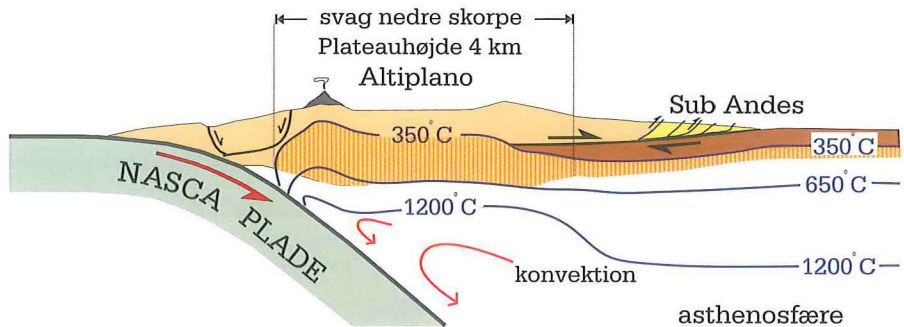
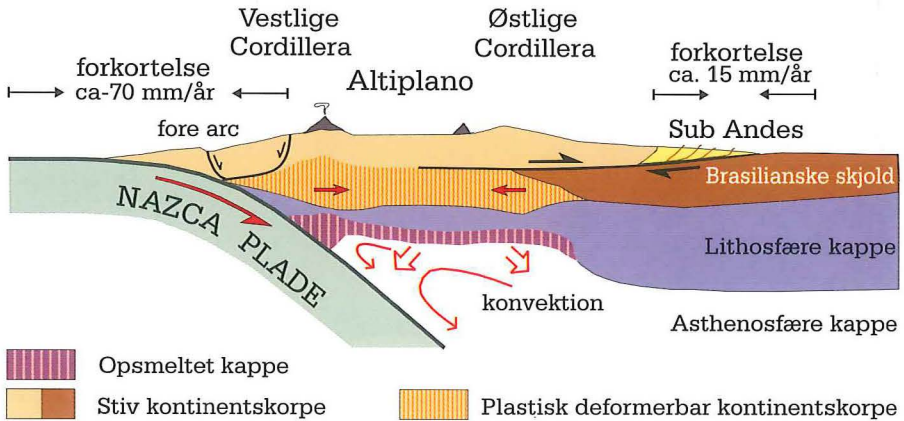
De vestlige Cordillera på vejen fra minebyen Coroico til Sucre. Billedet er taget i omkring to kilometers højde, hvor erosionen har afrundet bjergene. Bjergene bliver langsomt lavere mod kysten, hvor Andesbjergene pludseligt bliver lavere og når det tynde stykke lavland ud mod Stillehavet.

Aricabøjningen blev disse kompressionskræfter rettet i forskellige retninger med forskellig styrke, hvilket forhindrede, at de to bjergkæder ,smeltede sammen‘ ligesom nord og syd for Centralandes.

De kompressive kræfter formåede dog at komprimere Centralandes med over 200 kilometer hen over Altiplano Højsletten, og yderligere 150 kilometer ved Forlandet (figur 2a). Denne skorpeforkortning resulterede i en øgning af skorpe-tykkelsen, hvilket igen øgede marginens masse. Den øgede masse betød et øget tryk på toppen af astenosfæren under Andesbjergene. Astenosfæren har her form som en kile mellem kontinentalskorpen og den subducerende Nasza Plade (figur 4). Effekten kan sammenlignes med en spand i en balje vand. Jo flere sten der lægges i spanden, des mere vil den synke. I det aktuelle tilfælde skal spanden blot erstattes med skorpen ved Centralandes, der konstant blev presset sammen og fortykket, dens masse yderligere øget via granittiske intrusioner og lavaekstrusioner.

På trods af den ekstremt tykke kontinentalskorpe er Centralandes Plateauet i dag hævet omkring 4 kilometer over havniveau. Med dette i baghovedet begyndte geologerne i slutningen af 1980'erne at lede efter forklaringen på, hvor-

dan 80 kilometer kontinentalskorpe kunne holdes 'kunstigt' hævet. De ansvarlige kræfter, under ét omtalt som kompensationsprocesser, holder således kontinentalskorpen i, hvad man kalder isostatisk uligevægt. Før man fandt forklaringen, var man dog nødt til at forstå, hvordan skorpen i Centralandes blev dannet.



Figur 4. Diagram der illustrerer den formodede litosfærestruktur i Centralandes ved det nordlige Bolivia og Chile. Et Ø-V orienteret profil ved 20° S viser placeringen af den subducerende Nasca Plade og strukturen af den overliggende Sydamerikanske Plade. Øverst: Mægtigheden af den sydamerikanske litosfære er delvist baseret på en fortolkning af helium data og topografi. Nederst: Diagram som skematisk viser de formodede termale strukturer: 350°C isotermerne formodes, at bestemme placeringen af overgangen mellem stiv og plastisk deformation i skorpen. Grænsen menes at ligge langt inde i skorpen under arken og Altiplanoet, samt den vestlige margin af Den Østlige Cordillera, hvor det er muligt at den øvre skorpe flyder på den bløde nedre skorpe. Fra: Lamb & Hoke [1997].

SKORPEDANNELSE

De tre vigtigste faktorer involveret i dannelsen af skorpen i Centralandes er (1) øgning af skorpen tykkelse, (2) forkortelse af skorpen og endelig (3) kompensation af skorpen vægt. De første to faktorer er nødvendige for at skabe den nuværende exceptionelt tykke kontinentalskorpe (figur 2b), den tredje er nødvendig for at holde - specielt den østlige del af - Centralandes hævet. Skorpen siges at være i isostatisk uligevægt.

Indenfor de senere år har geofysiske undersøgelser afsløret, at der langs subduktionszonen ved Centralandes er variationer i Nazca Pladens subduktionsvinkel: Mellem 2 – 15°S og 28 – 33°S (figur 2) subducerer Nazca Pladen med en vinkel på 5-10°. Det er en vigtig konstatering, da en lille subduktionsvinkel betyder at den aktive Andes rand bliver smal. I områderne med lille subduktionsvinkel er der næsten ingen Miocæn-Holocæn vulkanisme, som ellers dominerer i Altiplano og Puna domænerne, hvor subduktionsvinkelen er cirka 30°, Subduktionsvinkelens størrelse er bestemmende for mængden af astenosfære (kappekilen i figur 2), der er plads til mellem den dykkende litosfæreplade (Nazca Pladen) og overliggende (Sydamerika Pladen). Øget astenosfære betyder øget opsmeltning i kappen og dermed øget vulkanisme i litosfæren ovenover (baggrund for dannelsen af den Vestlige Cordillera) (figur 4), og påhæftning af magma til undersiden af skorpen. Den øgede vulkanisme i Altiplano-Puna regionerne betyder, at Andesranden i dette område blev betydelig mere udbygget end i de to regioner med lille subduktionsvinkel.

I områderne med lille subduktionsvinkel er den kompensation, Nazca Pladen yder mod litosfæren ovenover, til gengæld væsentligt større end i områderne med stor subduktionsvinkel.

Forkortelse/strækning af skorpen: Den relative betydning af de forskellige skorpeforkortningsprocesser er et af de centrale emner i debatten om Andesbjergenes oprindelse. En af de oftest foreslåede forkortningsprocesser er effekten af den komprimering, Det Brasilianske Skjold og den neddykkende Nazca Plade yder i modsatte retninger. Denne deformationsproces er af primær betydning for regionens udseende, og er den vigtigste årsag til at der overhovedet er noget der hedder Andesbjergene. De to pladers kollision bøjer simpelthen kontinentalskorpen op som var den lavet af gummi, hvilket sammen med den vulkanske aktivitet i marginen udvikler de to cordilleraer.

Nappe- og overskydningstektonik i Sub Andes har også været foreslået, og undersøgelser af Calazaya Nappen ved den Vestlige Cordillera indikerer, at overskydninger har spillet en primær rolle i opbygningen af skorpetykkelsen i denne del af Central Andes. Foldninger og blokrotationer forårsaget af de kompressive kræfter er blandt de foreslåede processer af sekundær betydning.

I kappekilezonen (figur 4) under Altiplano-Puna Højsletten kan strækning af skorpen i forbindelse med en jordskorpeudvidelse, der skyldes en temperaturøgning knyttet til en varmetilførsel fra den varme astenosfære i kappekilen (termal udvidelse), have skabt et væsentligt tryk rettet imod de kompressive kræfter. Specielt i den plastiske del af skorpen kan processen have været vigtig. Termal udvidelse er afhængig af temperaturen - jo højere temperatur des større udvidelse - og af skorpens sammensætning. Nogle mineraler udvides mindre ved høj temperatur end andre. Da såvel temperaturen som mineralsammensætningen af den nedre skorpe er relativt ukendte, er termal udvidelse en faktor Andesgeologerne har haft svært ved at bestemme størrelsen af.

Skorpeopbygning/skorpenedbrydning: Man regner med, at skorpens tykkelse før begyndelsen af den tredje cyklus var 30-35 kilometer. I overvejelserne indgår marginens sammensatte natur og det faktum, at Andes er udviklet over en meget bred marginal zone. Tallet medfører, at der siden Kridt er tilført omkring 40 kilometer skorpe under den Vestlige Cordillera, hvilket mindskes til 25-30 kilometer under Altiplano-Puna Højsletten og den Østlige Cordillera. Omkring 60% af opbygningen i skorpens tykkelse er skabt ved påhæftning af magma på undersiden af kontinentalskorpen, mens resten er skabt af skorpeforkortningsprocesser som foldning og overskydning. Beregningen er baseret på formodninger om skorpens sammensætning og ensartethed, men er bredt støttet i litteraturen.

Den Vestlige Cordillera ligger omkring 115 kilometer over den subducerende Nazca Plade. I dette område flyder 1.000-1.200 °C varm astenosfære ind imellem Nazca Pladen og litosfæren og danner en kappekile (figur 4). Den varme astenosfære medfører, at de øvre lag af den neddykkende oceansbundsplade delvist smelter. Den delvise opsmeltning hjælpes på vej af den cirkulationscelle (konvektionscelle), der er etableret i kappekilen, og som konstant fører varm, frisk astenosfære hen til den subducerende plade, mens varm, volatilrig (væske/gasrig) smelte, der er dannet nær pladen fjernes. Det volatile magma er meget varmt og let og bevæger sig hurtigt op gennem kappekilen, indtil det møder skorpen. Skorpen er - grundet skorpeforkortelsesprocesser og sammentrykning - meget massiv, og mindre end 10% af magmaet kan trænge op igennem den. Størstedelen af magmaet bliver gradvist hæftet på undersiden af kontinentalskorpen.

Skorpeopbygnings-/skorpenedbrydningsprocesser af mindre betydning inkluderer erosion og følgende sedimentation. Sådanne processer har fjernet de øverste cirka 2 kilometer af cordilleraerne og resulteret i aflejringen af op til 12 kilometer sediment - iblandet ekstrusiver fra de utallige vulkaner - på Altiplano-Puna Højsletten. Selvom den tektoniske effekt af de 12 kilometer sediment, altså trykket af sedimentpakken, er lille i forhold til de øvrige geologiske proces-

ser nævnt ovenfor, kan de være en medvirkende faktor til, at Altiplano-Puna ligger cirka 700-1.000 meter under højden af cordilleraerne. Sedimenterne øger massen af skorpen ved Altiplano-Puna Højsletten, mens cordilleraerne, der oplever større sammentrykkende kræfter, bliver til gengæld hele tiden lettet for deres topvægt, hvilket øger deres hævnning. Normalt er erosion over en vis højde forholdsvis ubetydelig, fordi der ikke falder nedbør, og fordi luften er så tynd, at vinderosion bliver af underordnet betydning. Takket være de centrale Andesbjerges placering nær Ækvator kan fluviale miljøer eksistere i stor højde, hvilket bevises i de massive fluvial/glaciale aflejringer, der ses i op til 5 kilometers højde. De ses i dag spektakulære orgelpibeformationer (se figur på forsiden) i Bolivia. Igennem flere tusind år har små vandløb fra de højtliggende gletschere boret op til 100 meter dybe sprækker og kløfter ned i de bløde – delvist glaciale – sedimenter, hvilket giver geologerne en uovertruffen mulighed for at studere aflejringerne i tre dimensioner, og turisterne en fantastisk oplevelse i et landskab der mest af alt ligner noget fra en science-fiction film.

Kompensationsprocesser: Blandt de vigtigste skorpekompensationsprocesser er fleksural støtte ydet af Nazca Pladen nær den reelle plademargin. Flexural støtte betyder, at Nazca Pladen fysisk holder kontinentalskorpen kunstigt hævet. Nazca Pladen forsøger at trænge opad, da den er lettere end de underliggende dele af Jorden, og derved skubber den marginen op. Det foregår specielt i de to regioner hvor subduktionsvinkelen er lille. Nazca Pladen holder simpelthen den overliggende litosfære oppe, ligesom en korkplade ville holde spanden i eksemplet fra tidligere hævet, selvom spanden normalt ville synke. Det Brasilianske Skjold yder formentligt en lignende støtte for Subandes og den Østlige Cordillera (figur 4). Hvis det viser sig, at overskydnings- og nappetektonik i den østlige del af Centralandes har været så omfattende, som nogle geologer mener, kan skjoldets støtte have været af sekundær betydning. Andre geologer mener, at dette ikke er sandsynligt, da størrelsen af den isostatiske uligevægt i den østlige del af Centralandes er så stor, at kun Det Brasilianske Skjold har en størrelse der kan skabe det.

En anden kompensations-effekt er erosion i basis af litosfæren. Hvis litosfæren eroderes, bliver den tyndere og dermed lettere. Processens effektivitet afhænger af skabelsen af store mængder af smelte under Altiplanoet og det nordlige Puna sat i gang af en pludselig øgning i Nazca Pladens subduktionsvinkel. Dette medfører en øgning i tilstrømningen af astenosfære, hvilket kan øge temperaturen nok til at smelte den litosfære, der med den øgede neddykningsvinkel bliver blottet for astenosfæren. Det isostatiske svar på erosion af basal litosfære og dets replacering med let, varm astenosfære er en hævnning af overfladen. Problemet er igen at sammensætningen og egenskaberne af den subkontinentale kappe

er delvist ukendt, og effekten af erosion i litosfæren er derfor vanskelig at vurdere.

Andre foreslåede erosive processer inkluderer gravitativ instabilitet, og de massive skævvridninger af skorpen i områderne med lav subduktionsvinkel.

EN SIKKER TOLKNING?

De forskellige teorier for dannelse og vedligeholdelse af Centralandes Plateauet er yderst konsistente, men visse formodninger om sammensætningen af den nedre skorpe – såvel den kontinentale som den marine – er usikre, og ældre litteratur er i dag ikke relevant

Flere processer involveret i skorpeforkortning og skorpeopbygning har været foreslået, og alle synes de at have fungeret under den andeanske bjergkædedannelse. Processerne har formentligt været af skiftende vigtighed igennem den geologiske historie, og der kan have været perioder, hvor de ikke fungerede eller alternativt dominerede. Centralandes Plateauet er overordnet set en sekundær struktur, der er dannet som et oprindeligt flere hundrede kilometer bredt dræningsbassin mellem cordilleraerne. De primære processer, der har påvirket dannelsen af Centralandes Plateauet, er dem, der har domineret udviklingen af Andesbjergene. Af forskellige årsager, vigtigst Aricabøjningens geometri, har Altiplano-Puna Højsletten været delvist beskyttet. Det har ikke forhindret et par hundrede kilometers sammentrykning af bassinet, og det er endnu uvist, hvorvidt plateauet med tiden vil blive udslettet af de kompressive kræfter, eller om erosion, en ændring i subduktionsmiljøet eller lignende når at eliminere Andesbjergene før det bliver muligt. Midt i alle teorierne står det dog fast, at de forskellige mekanismer for skorpeopbygning, der har skabt en tyk og komprimeringsresistent skorpe, og Aricabøjningens geometri er de to vigtigste faktorer bag beskyttelsen af Altiplano-Puna Højsletten, og dermed de to effekter, der gør Centralandes til en unik region uden sidestykke blandt Jordens subduktionsskabte bjergkæder.