

Bolivias Altiplano

- et geologisk overfløddighedshorn



Udsigt over Salar de Uyuni fra toppen af Isla de Pescadores. Kaktusserne er op til 1.000 år gamle. Det må være omtrent denne udsigt, man har haft, hvis man stod på Ringkøbing Fyn-Højderyggen og så ud over Permbassinene for 260 millioner år siden. (Foto: Forfatteren)

Af efterforskningsgeolog Johan Byskov Svendsen, DENERCO OIL A/S, Holte

Bolivias Altiplano kaldes med rette Sydamerikas Tibet. Her findes laguner i alverdens farver, sneklædte vulkaner og aktive geysersletter.

Denne fantastiske geologi krydres med et enestående dyreliv, hvor lamaer, alpachaer, kondorer og flamingoer lever side om side. Midt i dette naturens overfløddighedshorn ligger Salar de Uyuni, verdens største saltsø.

Andesbjergene

Andesbjergene strækker sig langs hele det sydamerikanske kontinent, fra Tiarro del Fuego i syd, over de næsten 7.000 meter høje tinder i det mellemste Chile (Aconcagua, 6.960 m), til Ecuador og Venezuela i nord. Den enorme udstrækning betyder, at bjergkæden passerer gennem flere forskellige klimazoner, fra de isbjergerfyldte skærgårde i syd, over tempererede regnskove i det sydlige Chile og de ekstremt tørre områder i den chilenske og bolivian-

ske Atacama Ørken, til tropiske regnskove i Ecuador, Colombia og Venezuela. Andesbjergene er en relativt ung bjergkæde dannet som følge af Nazcaplades subduktion under Den Sydamerikanske Plade gennem Kridt- og Tertiær-perioderne (de sidste 100 millioner år).

Altiplanobassinet

Mellem Andesbjergenes tinder findes et utal af intramontane bassiner. Et af disse bassiner er Altiplanobassinet, der strækker sig fra Titicacasøen på grænsen mellem Bolivia og Peru i nord til de bolivianske saltsøer i syd. Altiplanobassinet, der afgrænses mod øst af Cordillera Oriental og mod vest af Cordillera Occidental, er beliggende i 3.600 - 3.800 meters højde. Bassinet præges af flere klimazoner, hvilket betyder, at den nordlige del modtager 1.300 mm nedbør om året, mens den sydlige del kun modtager 150-200 mm om året. Den sydlige del af Altiplanobassinet domineres af saltsøer, der spænder over hele farvepaletten, fra den grønne Laguna Verde, den røde Laguna Colorado til den hvide Salar de Uyuni. Nogle af disse saltsøer er permanent vandfyldte, mens andre tørrer ud i tørke-tiden (april-oktober).

Gennem den sidste del af Kvartæret har globale klimasvingninger skabt meget store variationer i mængden af vand, der tilføres



Sydamerikakort med Bolivia i rødt. (Grafik: Forfatteren)



Flamingoer i saltsø ved foden af Andesbjergene. (Foto: Forfatteren)

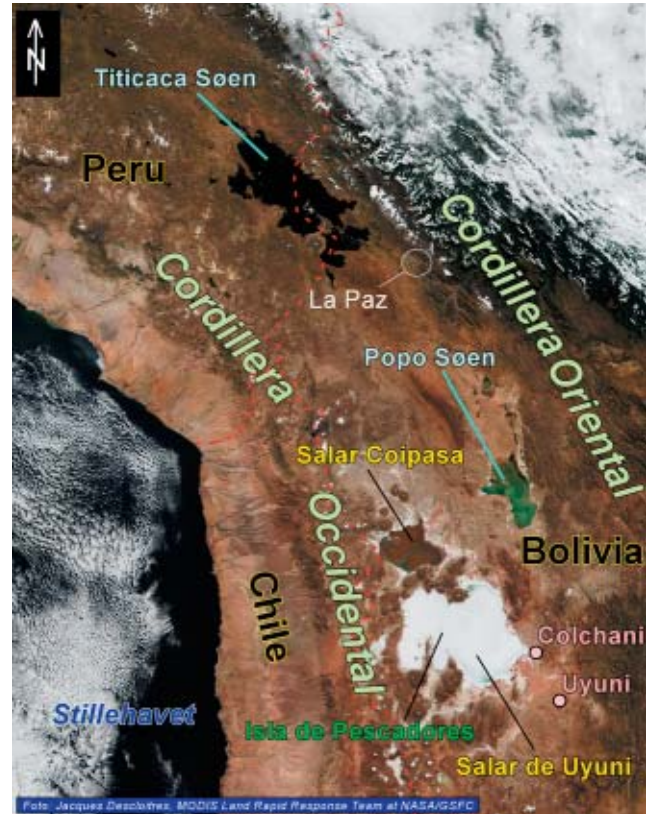
Altiplanobassinet. I øjeblikket befinder området sig i en lavstand, og de enkelte søer, Titicaca, Popo og Uyuni, er ikke forbundne. Et 121 m dybt borehul i Salar de Uyuni boret i 1997 viste en gentaget cyklus af evaporitter og lerlag fra mindst fem søer. Rester fra disse søer kan ses i hele området. Den sidste store sø, som eksisterede for cirka 14.000 år siden, benævnes Tauca. Op til 10 cm tykke lag af koraller fra denne Taucasø kan ses langs kysten af Salar de Uyuni samt på Isla de Pescadores, en ø beliggende midt i Salar de Uyuni.

Salar de Uyuni

Salar de Uyuni er med sine 10.000 km² verdens største saltsø. I en stor del af året er søen helt udtørret, og en fantastisk saltoverflade på størrelse med Sjælland kan observeres. I våd-tiden (maj-september) er dele af saltoverfladen (normalt den østlige del) dækket af vand, hvilket er et fantastisk skue, hvor himmel og jord går i ét. Transport på Salar de Uyuni foregår i firhjulstrukne jeeps. Da saltskorpen flere steder kun er få centimeter tyk, kan man ikke færdes overalt på søen, men en tur ud på den farbare del af saltsøen er en fantastisk oplevelse, hvor begrebet "salt-blind" skal tages



Den røde Laguna Colorado. De store hvide områder er udfældet Borax (Natrium-Bor-salt). De lyserøde prikker er flamingoer. (Foto: Forfatteren)



Satellit-foto af Altiplano Bassinet i Bolivia. Bassinet afgrænses af de to bjergkæder Cordillera Occidental og Cordillera Oriental. (Foto: Nasa)

alvorligt. I den sydøstlige del af Salar de Uyuni skrubes saltet af overfladen og sælges som konsum-salt. Der er selvsagt ikke mange indbyggere på Salar de Uyuni. Der findes et mindre hotel og en tilhørende kiosk på Isla de Pescadores, og så findes der det enestående Hotel de Sal, hvor ALT (med undtagelse af det stråtekte tag og madrasserne) er bygget af saltblokke gravet op af salaren.

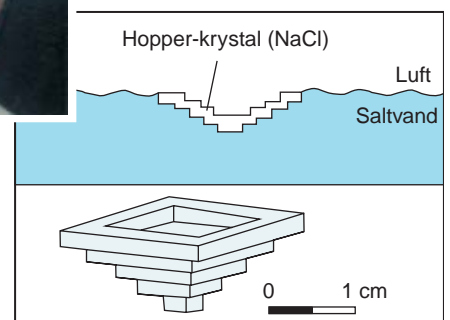
Saltaflejringer

Dannelsen af salt (evaporitter) adskiller sig markant fra dannelsen af andre sedimen-

tære aflejringer, da salt er et kemisk sediment i modsætning til de fleste andre sedimenttyper, der er fysiske. Erosion af landområder transporterer ler, sand og grus til de omkringliggende søer og have, men der sker også en udvaskning af ioner (Na⁺, Ca²⁺, K⁺ m.fl.), der ligeledes tilføres de omkringliggende bassiner. Hvilke ioner, der tilføres, afhænger udelukkende af den kemiske/mineralogiske sammensætning af erosionsområderne (kildeområderne). I små bassiner med begrænset kildeområde vil de tilførte ioner nøje afspejle den lokale geologi, mens der i større bassiner vil ske en



Hopper-krystaller fra Salar de Uyuni. (Foto: Forfatteren)



Udfældning af halit (NaCl) på Salar de Uyuni sker som hopper-krystaller, der dannes på overfladen af det meget salte vand. (Grafik: Forfatteren)



Parabel-klit dannet af salt. Disse vinddannede samlinger af salt kan observeres flere steder på Salar de Uyuni.



Ojos Pequeños dannes, hvor fersk grundvand opløser saltet, som genudfældes på overfladen (hammer som skala).



Klitfelt af hestesko-formede parabel-klitter dannet af salt. Målebåndet midt i billedet er 1 meter.

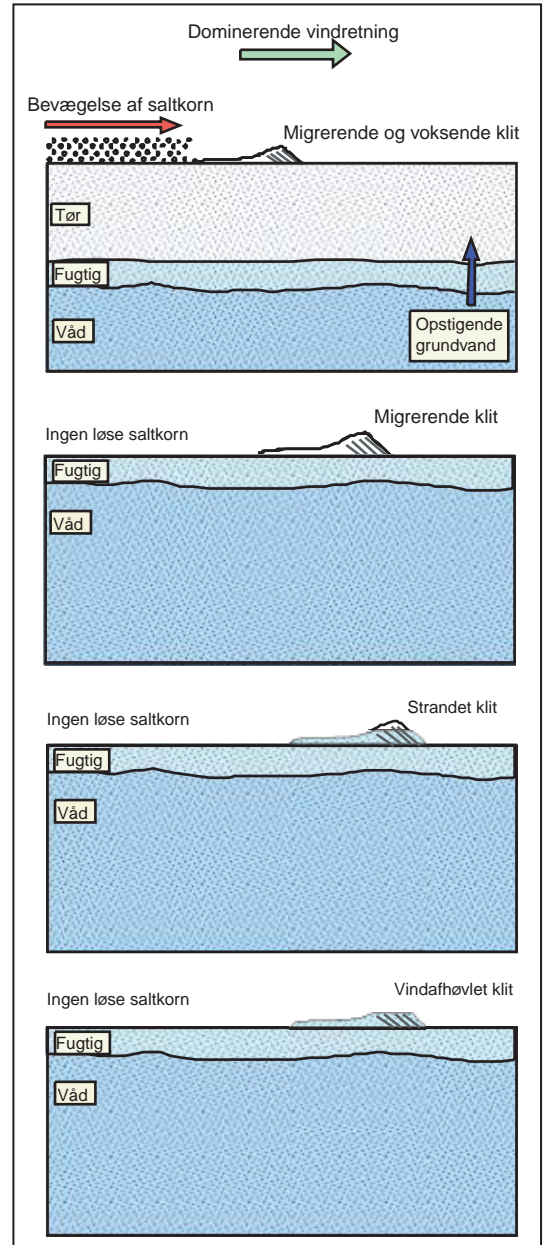


Polygonale saltrygge på Salar de Uyuni. Disse strukturer ses over stort set hele salaren.



Ojos Grande dannet hvor store mængder fersk grundvand strømmer ud på salt-overfladen og opløser saltet. Det strømmende vand aflejrer en del ler, som er opslemmet nede i saltskorpen. (Alle fotos: Forfatteren)

Dannelse af de hestesko-formede parabel-klitter på Salar de Uyuni. (Grafik: Forfatteren)



betydelig sammenblanding fra forskellige kildeområder.

I områder, hvor fordampningen overstiger mængden af nedbør og tilført overfladevand, vil vandstanden i bassinet falde, og de forskellige ioner vil udfældes som salte (evaporitter). Princippet er det samme, som hvis man koger en grydefuld saltvand. Når alt vandet er kogt væk (fordampet), vil der tilbage i gryden være en skorpe (evaporitter) af stensalt (NaCl) og kalk (CaCO_3), da det meste postevand indeholder Ca^{2+} - og CO_3^{2-} -ioner.

Når evaporitter dannes, sker det typisk ved fordampning af det overfladenære vand, hvorved ion-koncentrationen i vandet stiger. Når koncentrationen af ioner overstiger opløseligheden, vil der ske udfældning af forskellige salte. Udfældningen af halit (NaCl) sker på luft-vand-kontakten ved dannelse af "hopper-krystaller", der er omvendte pyramider af meget tyndt salt. Når disse krystaller bliver så store (5-20

mm), at de ikke kan opholdes af overfladespændingen, synker de til bunds, og evaporitdannelsen er i gang.

Strukturer i salt

Foruden sin dannelsesproces adskiller salt sig også fra andre sedimentter ved at mangle sedimentære strukturer. Kun i enkelte tilfælde fra saltminer og observationer fra Dødehavet, er der beskrevet strukturer i salt. Opkoncentration af ioner i vandet med efterfølgende evaporitdannelse vil typisk ske, hvor vandstanden er lav, og de fleste saltannelser sker derfor i randen af bassinerne/kysterne. Netop i kystområderne burde der være rig mulighed for dannelse af sedimentære former, såvel dem dannet af strømmende vand som dem dannet af vind. Grunden til, at sådanne strukturer ikke er observeret i saltminer og borekerner, kan være, at de under den fortsatte begravelse er blevet opløst og genudfældet utallige gange. En anden mulighed er, at

man ikke har været klar over, hvad man skulle se efter, fordi sedimentære strukturer i evaporitter er så sjældne.

Saltaflejringer – før og nu

Dannelse af evaporitter sker idag flere steder på Jorden. De kendeste steder er Salt Lake i USA, Dødehavet i Jordan og Israel og Salar de Uyuni i Bolivia, men i mange ørkenområder finder mindre evaporitdannelser sted.

Igennem geologisk tid har der været flere perioder med intensiv evaporitdannelse. Mest imponerende er vel saltaflejringerne fra Perm (290-250 mio. år siden) i Nordvesteuropa. Op til en kilometer mægtige saltaflejringer blev afsat på få millioner år. Randen af de to store Perm-bassiner kan have set ud som Salar de Uyuni gør idag. Således kan en gåtur på Isla de Pescadores give en meget god fornemmelse af hvordan Ringkøbing Fyn-Højdyrgegen så ud for 260 mio. år siden.



Salar de Uyuni i sommerperioden, hvor store dele af saltskorpens er vanddækket. På grund af saltskorpens flade natur, kan hundredevis af km² være dækket af blot 5-10 centimeter vand. (Foto: Forfatteren)

En bedre forståelse for de processer, der finder sted på Salar de Uyuni i dag, kan derfor være med til at forklare, hvordan Danmark og Nordsøen så ud og blev formet for en kvart milliard år siden.

Sedimentære former på Salar de Uyuni

Hvis sedimentære bundformer og strukturer skal findes i recente evaporitter, må Salar de Uyuni i Bolivia være et af de bedste steder at lede. Saltsøen er utroligt flad, med en maksimal niveauforskel på under en meter, således at hele søen repræsenterer lavvandede dele af bassinet. Da saltsøen som regel tørrer helt eller delvist ud i tørke-tiden, er der mulighed for at obser-

vere både vanddannede (sub-akvatiske) og vinddannede (sub-æriske) bundformer. Endvidere er tørketiden kendetegnet ved én dominerende vindretning, hvilket muliggør dannelse af egentlige klitfelter.

På Salar de Uyuni kan mindst fem forskellige sedimentære bundformer observeres, hvoraf kun nogle kan forklares ud fra almindelige sedimentære processer. Alle er de dog med til at gøre Salar de Uyuni til en oplevelse ud over det sædvanlige.

Parabel-klitter

Blandt de bedst forståede sedimentære bundformer på Salar de Uyuni er nogle meter store hestesko-formede saltforhøj-

ninger midt på saltoverfladen. Disse strukturer er dannet ved sammenblæsning af salt (hopper-krystaller), der i tørke-tiden er blevet blottet på saltoverfladen. Da saltoverfladen er delvis fugtig, blæser saltet

Fakta om Bolivia

Geografi:

Areal: 1.098.581 km² (dobbelt så stort som Frankrig)

Befolkningstal: 8 millioner

Bolivia kan inddeles i to overordnede zoner: Altiplano mod vest – højsletten i Andesbjergene (3.000-4.000 m.o.h.) og Lavlandet mod øst – den bolivianske del af Amazonregnskoven (0-500 m.o.h.)

Herudover findes der to mindre zoner: Cordillera – de to langstrakte bjergkæder i det vestlige Bolivia (5.500 m.o.h.) og Yungas – overgangen mellem højlandet og lavlandet

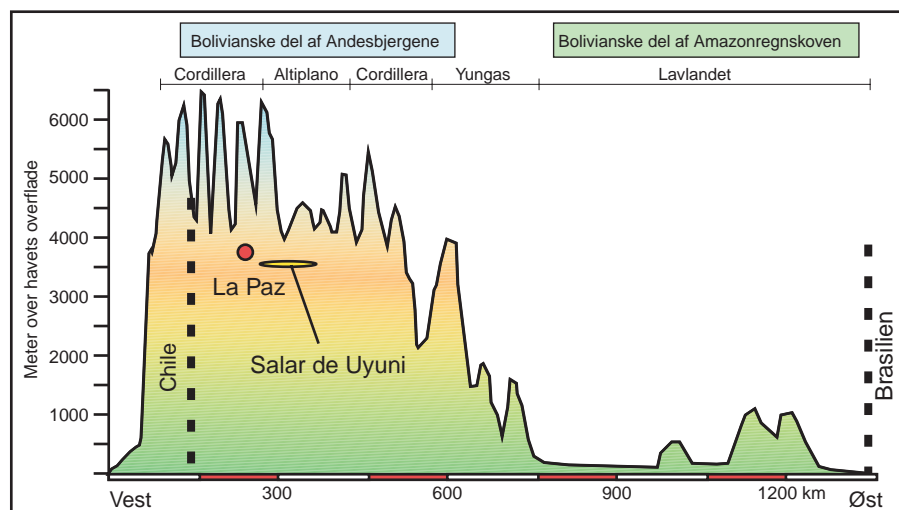
Klima:

Klimaet varierer, alt efter hvilken region man befinder sig i. Regnskoven er tropisk-subtropisk, mens højlandet typisk er tempereret. Den sydligste del af Altiplano er dog ørken.

Sprog: Spansk

Religion: Katolicisme

Hovedstad: Sucre (La Paz er de facto hovedstad)



Skematisk øst-vest tværsnit gennem Bolivia. Man ser tydeligt todelingen af Bolivia i et højland og et lavland. (Grafik: Forfatteren)

sammen som parabel-klitter. Flere steder på saltoverfladen er der observeret egentlige klitfelter, bestående af flere hundrede parabel-klitter. Mest udtalt var et klitfelt vest for Isla de Pescadores, observeret i foråret 2000. Klitterne dannes, når saltoverfladen er så tør, at hopper-krystallerne kan flyttes af den stærke nordenvind. Så længe der er saltkrystaller til rådighed, vil klitterne vokse og migrere. Når våd-tiden begynder, bliver saltoverfladen fugtig, og dele af klitten opløses og rekrystalliserer, hvorved klitten kommer til at sidde fast på saltoverfladen. Når klitterne sidder fast på saltoverfladen, vil den stærke vind blæse toppen af klitterne, hvorved de ender som relativt flade hestesko-formede saltforhøjninger.

Ojos de Sal

Adskillige steder på saltsøen findes der "huller" og "buler". Disse huller og buler kaldes ojos (spansk for øjne) af de lokale bolivianere. Ojos opstår, når relativt fersk grundvand strømmer gennem saltoverfladen og dermed opløser dele af saltskorpen. Mest iøjnefaldende er Ojos Grande, der fremstår som meterstore huller i saltskorpen, hvor relativt fersk grundvand strømmer op. Vandet opløser saltet længere nede i saltskorpen samt opslemmer de lerlag, der findes dernede. Leret aflejres herefter ovenpå saltskorpen, hvilket gør Ojos Grande til et besynderligt syn. De mest udviklede Ojos Grande findes i den østlige del af Salar de Uyuni 20 km vest for Colchani.

De lidt mindre, men meget mere almindelige Ojos Pequeños findes over store dele af salaren. De ses som regel som små "saltmuldvarpeskud", der ligeledes dannes, hvor relativt ferskt grundvand bobler igennem saltskorpen og afsætter de salte, som



Den fantastisk smukke Laguna Verde på grænsen mellem Bolivia og Chile. Lagunen ligger i 5.000 meters højde. Lagunen kan under de rette vejrforhold skifte farve fra blå til grøn på under en time. (Foto: Forfatteren)

blev opløst længere nede. Saltopløsningen er dog beskedent, og kun meget sjældent findes der leraflejringer i forbindelse med Ojos Pequeños.

Saltrygge

Når man ser billeder fra saltsøer eller andre stærkt saltholdige sedimentter, er de ofte kendetegnet ved polygonale former, der ved første øjekast kan få en til at tænke på tørresprækker. Der er dog tale om det modsatte, nemlig tørrerygge. Efterhånden som saltudfældningen finder sted, vil der dannes en saltskorpe. Når det sidste vand fordamper, er der ikke plads til de dannede saltkrystaller, og den skabte pladsmangel resulterer i dannelse af saltrygge, der i enkelte tilfælde kan udvikle sig til over-

skydninger. Da der mangler plads i alle retninger, vil der dannes polygonale systemer af saltrygge. De polygonale saltrygge findes over stort set hele Salar de Uyuni. Tilsvarende saltrygge kan ses i sandede ørkenaflejringer fra flodlejer og søer, hvor pladsmanglen resulterer i opskydningen af sand-saltrygge.

Saltbarrer

I våd-tiden er store dele af salaren dækket af vand (5-30 cm). I dette vand udfældes hopper-krystaller som omtalt tidligere. Når vinden blæser hen over salaren, vil den generere en strøm i det lave vand, hvorved saltkrystallerne sættes i bevægelse. Dette danner en suite af såvel store (2-8 m) som små (10-50 cm) bundformer, der både fore-

Historisk oversigt

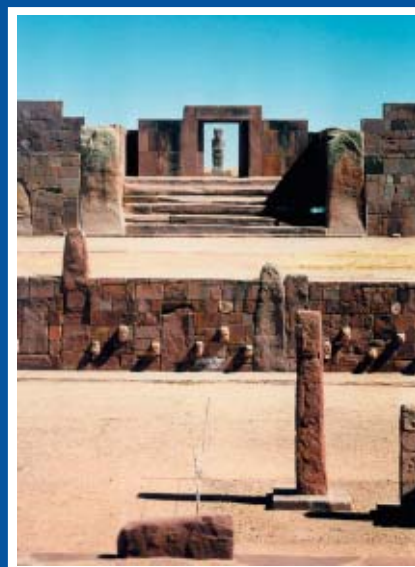
Længe før europæerne invaderede Sydamerika, var der højtstående civilisationer i Bolivia. Disse civilisationer var koncentreret ved området omkring Titicacasøen, og allerede 600 år f.Kr. var der civilisationer ved Tiahuanaco. I 1200-1500-tallet var Titicaca området domineret af det mægtige Incarige.

I 1545 blev der i Potosí gjort et gigantisk sølvfund ved bjerget Cerro Rico (det rige bjerg). Desværre for Bolivia og bolivianerne var de spanske imperialister netop ankommet til Sydamerika, og de grundlagde store dele af deres velstand, med sølvet fra Cerro Rico.

Befolkningstallet i Potosí eksploderede, og i løbet af få årtier voksede indbyggertallet til 200.000, hvilket gjorde

Potosí til den næststørste by i verden, kun overgået af London. I de følgende 300 år døde op mod 8 mio. minearbejdere under de umenneskelige forhold, der herskede i minerne. Det var ikke ualmindeligt, at arbejderne boede nede i minerne i 4 måneder ad gangen, og de måtte have dækket øjnene til, når de kom op i det skarpe sollys for ikke at få ødelagt nethinderne.

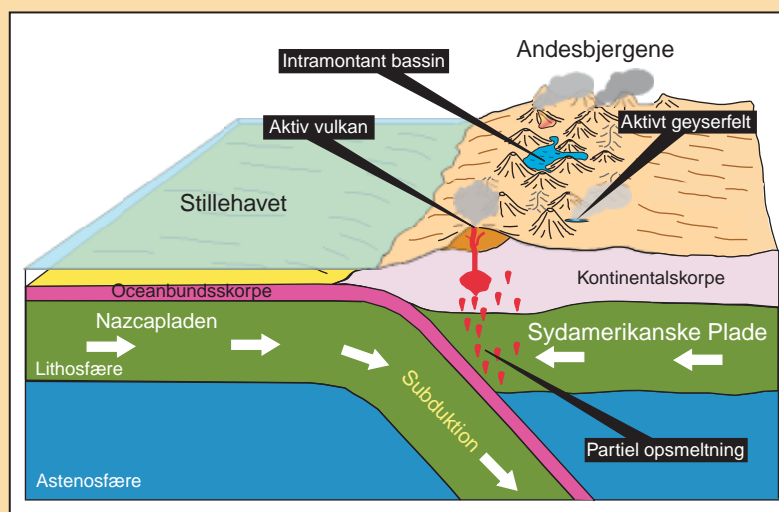
I 1800- og 1900-tallet udkæmpedes blodige uafhængighedskrige med både spanierne og nabolandene. I 1967 blev revolutionæren Che Guevara dræbt af den bolivianske hær. Idag er Bolivia et af de fattigste lande i Sydamerika. De vigtigste eksportvarer er tin, zink og andre metaller, landbrugsvarer og i stigende grad olie og naturgas.



Tiahuanaco-templet ved Titicacasøen. Templet kan dateres tilbage til 600 år f.Kr. Statuen i baggrunden er tre meter høj. (Foto: Forfatteren)

Subduktion af Nazcapladen

De imponerende Andesbjergene er dannet ved subduktion af Nazcapladen under Den sydamerikanske Plade. Der er tale om en kollision mellem den tunge basaltiske oceaniske Nazcaplade og den lettere granitiske kontinentale Sydamerikanske Plade, hvor Nazcapladen presses ned under Den Sydamerikanske Plade (subduktion). Ved en sådan subduktion sker en partiel opsmeltning af den subducerede plade med dannelse af magmatiske smelter til følge. Når disse nærmer sig overfladen, giver de ophav til vulkanudbrud og kogende geysersfelter. Et andet resultat af kollisionen er en ekstrem tektonik, præget af foldninger og overskydninger (fold-and-thrust). Det er denne tektonik, der sammen med de mange vulkaner skaber Andesbjergene. Imellem vulkaner og opskudte bjergmassiver dannes der små lokale, intramontane bassiner. Da disse bassiner er afgrænset af bjerge, kan det tilstrømmende vand sjældent løbe væk, og vandet forsvinder i stedet ved fordamning, hvorved der udfældes salte (evaporitter).



Skematisk figur af subduktionen af Nazcapladen under Den Sydamerikanske Plade. (Grafik: Forfatteren)

kommer isolerede og i grupper. Da disse bundformer er dannet i våd-tiden, er de ofte mellemljret af tynde lerlag, der skylles ud på salaren i våd-tiden. Formerne kan bedst sammenlignes med de barrer og revler, man finder på en sandstrand.

Problematica de Sal

På et område syd for Isla de Pescadores findes nogle af de mere forunderlige bundformer på Salar de Uyuni. Der er tale om små hule saltbobler (30-50 cm i diameter), der er sammenkoblet af lange saltryg-arme (10-30 m), der udspringer radiale fra boblerne. Fra hver saltboble udgår der tre arme med en vinkel mellem hver arm på ca. 120 grader. Det er stadig en gåde, hvordan disse salt-tripple-junctions er dannet,

En anden problematisk sedimentær bundform er de meget store (11-16 m) el-

lipsoide strukturer, hvor det ene brændpunkt i ellipsen fremstår som en lille 10 cm forhøjning. På den ene side af denne meget store bundform, sidder en suite af små bundformer, alle orienteret vinkelret på den store ellipsoide bundform. Hvordan disse ellipser er dannet, er ligeledes uvist. De ser ud til at være resultatet af sedimentære processer, men hvorvidt de er dannet af vand eller vind eller en kombination, vides endnu ikke.

Bolivia – En verden af muligheder

Hvad enten man ønsker at fordybe sig i de forunderlige sedimentære strukturer, der kan dannes på overfladen af en saltsø, eller blot vil lade sig imponere af Andesbjergenes overdådige geologi, er Bolivia bestemt et besøg værd. Bolivias Altiplano udgør geografisk kun ca. 30 % af landet, og store

dele af det bolivianske lavland står med sine frodige regnskove i skarp kontrast til det gølle landskab, man møder i højderne.

Det bolivianske Altiplano er i sandhed et geologisk overflødhedshorn, der på fornemste vis illustrerer de processer og resultater, som findes i en aktiv subduktionszone.

Litteratur:

Om sedimentære processer på Salar de Uyuni

Svensen, J. B. (2003): *Parabolic halite dunes on the Salar de Uyuni, Bolivia, Sedimentary Geology, 155, 147-156pp*

Om Bolivia generelt

Swaney, D. (2001): *Bolivia, Lonely Planet Publications, 4th Edition*



Sol de Mañana i 5 kilometers højde er verdens højst beliggende geysersfelt. Geysersfeltet skal helst ses ved solopgang, hvor det dampende og kogende mudder er mest imponerende. På dette tidspunkt af dagen er temperaturen cirka -15 grader. (Foto: Forfatteren)



Et skoleeksempel på en keglevulkan – Volcán Licancabur (5.960 m) beliggende ved Laguna Verde. Billedet er taget i februar (sommer på den sydlige halvkugle), hvor snegrænsen ligger i cirka 5.800 meters højde. (Foto: Forfatteren)