



af Eckart Håkansson og Lena Madsen

Jordskælvet i San Francisco 17/10 1989 satte atter engang dramatisk focus på en af klodens mest fascinerende pladegrænser. Byen ligger i et af de mest aktive områder på Jorden, og hele den sydlige del af Californien har en meget høj jordskælvsfrekvens knyttet til bevægelsen langs en pladegrænse.

I San Francisco regionen har det været ventet, at et større jordskælv ville finde sted hen mod slutningen af dette århundrede, og meget har naturligvis været gjort i forsøg på at forudsige, hvornår det ville ske. Alligevel kom også dette jordskælv som en overraskelse (læs i VARV 1985, nr. 3 om mere succesrige forudsigelser af jordskælv), og måske var det endda slet ikke det frygtede 'big one'.

Vi vil benytte den aktuelle lejlighed til at se lidt på San Andreas forkastningen - den geologiske baggrund for denne højst ubehagelige jordskælvsrisiko.

San Andreas forkastningen strækker sig fra områderne ud for kysten i den nordlige del af Californien ned gennem landet til den Californiske Bugt, og den udgør på denne strækning grænsen imellem den Pacifiske og den Nordamerikanske plade. Langs denne *transforme forkastning* glider den Pacifiske plade mod nord og den Nordamerikanske plade mod syd - en såkaldt *dekstral*, sideværts bevægelse - med en relativ hastighed på omkring 3 cm/år for hver plade. Mod nord går San Andreas forkastningen over i en *triple junction* ved Mendocino fraktur-zonen (der ligeledes er en transform forkastning), medens den mod syd ender i den Californiske Bugt i en serie af meget korte spredningsrygge, der inden for de sidste få millioner år har revet den Californiske Halvø løs fra Mexico.

De historiske optegnelser om Californiens jordskælv går jo ikke langt tilbage, men som det fremgår af kortet (fig. 1) er tætheden af registrerede jordskælv ganske betydelig. Langt fra alle jordskælv forekommer dog på selve San Andreas forkastningen. Hele Californien er gennemsat af en mosaik af forkastninger, og det er den stadige, sideværts bevægelse langs San Andreas forkastningen,

der er den drivende kraft bag den tektoniske uro, som præger både Californien og store dele af det vestlige USA iøvrigt.

Hvis den modsat rettede, sideværts bevægelse imellem to plader er fuldstændig parallel, kan processen foregå kontinuert og ganske fredsommeligt, men hvis der bare er den mindste smule 'slinger i valsen', vil der næsten uvægerligt opstå spændinger (se fig. 2). Når disse spændinger overskrider en grænseværdi (der kan variere meget, afhængig af de lokale forhold), sker der et brud, og man får et jordskælv. Jo større spænding inden bruddet, jo større jordskælv.

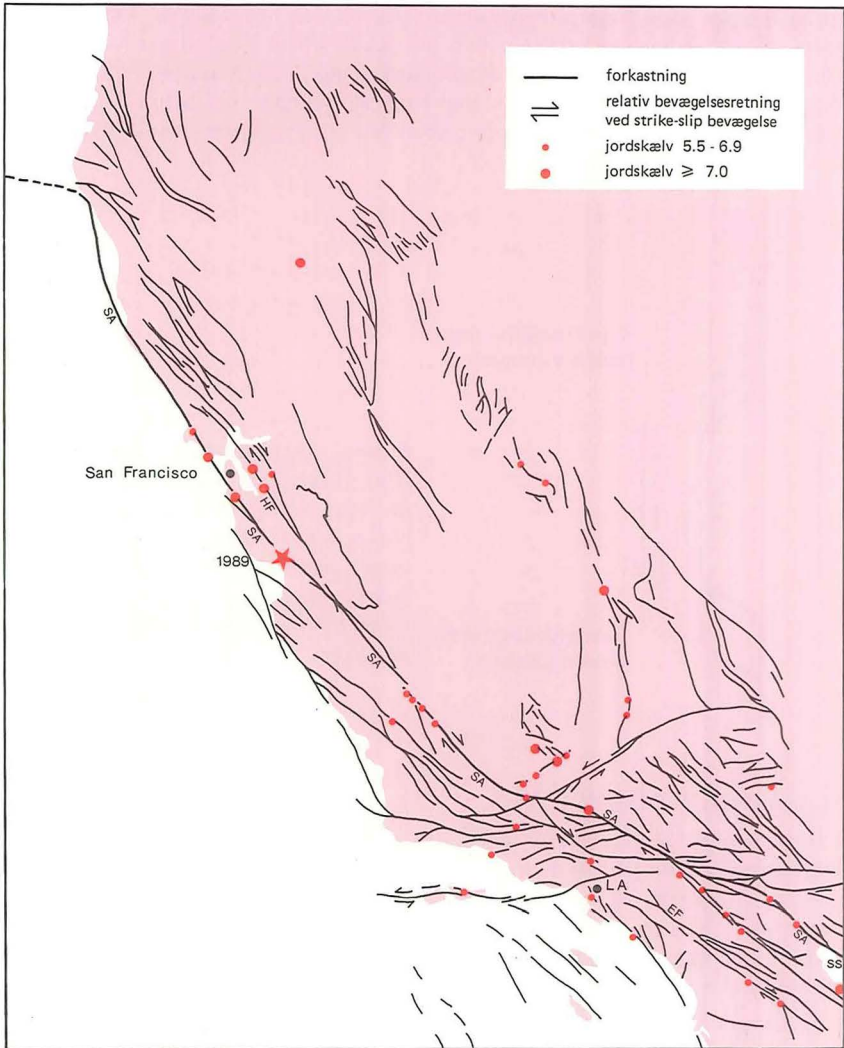
De geologiske forhold i områderne omkring jordskælvets *epicentrum* har i høj grad betydning for omfanget af skader i forbindelse med jordskælvet. For eksempel vil der være meget stor forskel på overflade-effekten af samme jordskælv i områder med krystalline bjergarter og områder med løse sedimenter, idet forskellige bjergarter transmitterer jordskælvsbølgerne meget forskelligt. Og hvis sedimenterne oven i købet er vandholdige, kan det gå gruligt galt.

Så af flere grunde opfører de forskellige afsnit af San Andreas forkastningen sig vidt forskelligt, både med hensyn til hyppighed og karakter af jordskælv. Mønstret afhænger således dels af de fysiske egenskaber af de bjergarter, der indgår, dels af de allerede eksisterende forkastningers form og forløb.

Forholdsvis rolige afsnit af San Andreas forkastningen findes for eksempel på det lange, lige stræk nogenlunde midt imellem San Francisco og Los Angeles. Her er de relative bevægelser stort set parallelle, og de har fortrinsvis givet anledning til ret svage jordskælv. Kun centralt på denne strækning, i forbindelse med et mindre spring i forkastningens forløb, har kraftigere jordskælv været hyppige. Denne tendens ses måske endnu tydeligere, hvor San Andreas forkastningen får et decideret kurvet forløb. Således er jordskælvshyppigheden i det sydligste Californien usædvanlig høj, selv efter lokal målestok. På grund af forkastningens kurvede forløb resulterer pladebevægelserne her i et *transpressions* regime, der involverer både *strike-slip* bevægelser og overskydninger (fig. 2).

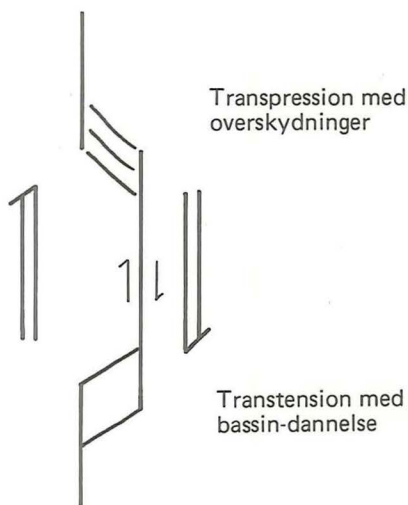
Af samme årsag er regionen omkring San Francisco udsat for en stærkt forøget tektonisk aktivitet, til dels med meget voldsomme jordskælv. Det velkendte jordskælv ved San Francisco i 1906 medførte således en sideværts bevægelse på helt op til 6 m i et spring! Dette jordskælv er nok det kraftigste, der er forekommet i forbindelse med San Andreas forkastningen inden for historisk tid, og ved denne spændingsudløsning brød forkastningen op over en strækning på mindst 300 km.

Man kan også iagttage, hvordan San Andreas forkastningssystemet udvikler sig hen mod så gnidningsløse situationer som muligt. Både ved San Francisco og Los Angeles er meget unge forkastningsspor (*by-pass forkastninger*), der udjævner forløbet af den overordnede pladegrænse, under udvikling. Syd for Los Angeles løber de vest for San Andreas forkastningen med Elsinore forkastningen som den mest markante, og ved San Francisco løber de øst for San Andreas



Figur 1. De overordnede forkastningssystemer i Californien afspejler bevægelsen imellem den Pacifiske plade og den Nordamerikanske plade. Med rødt er angivet epicentrene for de kraftigere jordskælv (over 5.5 på Richter-skalaen) gennem de sidste 150 år. SA = San Andreas forkastningen, HF = Hayward forkastningen, EF = Elsinore forkastningen og SS = Salton Sea.

forkastningen med Hayward forkastningen som den betydeligste. I forbindelse med disse by-pass forkastninger kan der lokalt opstå strækning i jordskorpen (*transtension*, se fig. 2), således at der dannes små sedimentations-bassiner med meget hurtig indsynkning (f. eks. San Francisco bugten og Salton Sea truget). Tilsvarende transtension i områderne nord for San Francisco giver stedvis ophav til varme kilder og geysir aktivitet.



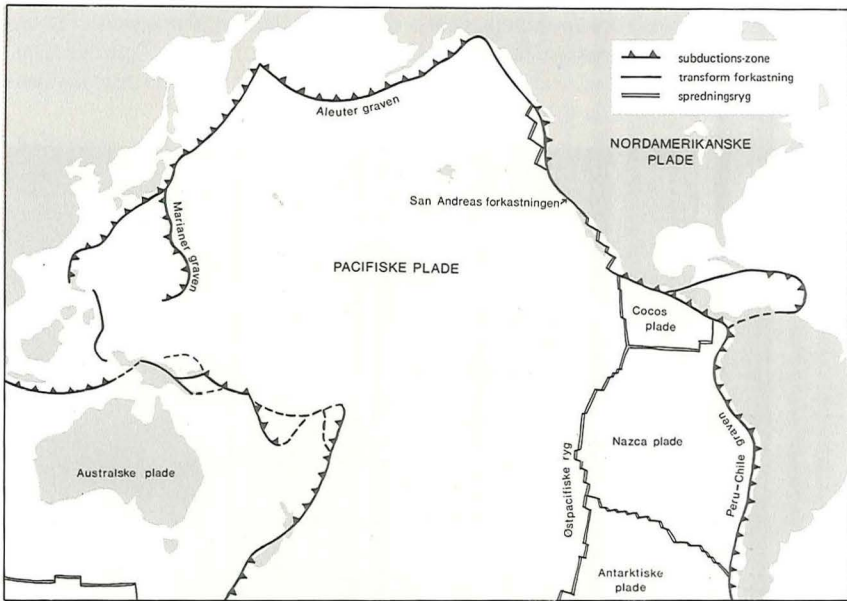
Figur 2. Dextral (højre-gående) strike-slip forkastning. (Hvis pilene vendes, får man en sinistral (venstre-gående) forkastning). I forbindelse med uregelmæssigheder i forløbet opstår lokale spændingsområder med strækning (*tension*) eller sammenpresning (*kompression*).

PLADER OG PLADEGRÆNSER

I følge den moderne pladetektonik, der jo indeholder væsentlige elementer af Wegeners kontinentaldrift teori, er jordens skorpe opdelt i en række større og mindre plader (fig. 3), som bevæger sig i forhold til hinanden. Pladegrænserne kan bedst lokaliseres ved at se på fordelingen af jordskælv på kloden, idet den meget store koncentration af jordskælv i bestemte zoner er resultatet af pladerens indbyrdes gnidninger (fig. 4).

I princippet findes der tre typer pladegrænser (fig. 5). Ved *konstruktive* eller *divergente* pladegrænser nydannes oceanbunds-skorpe i forbindelse med en spredningsryg samtidig med at de to plader glider væk fra hinanden med jævn hastighed. De jordskælv, der forekommer i forbindelse med konstruktive pladegrænser, er overfladenære og ikke særligt voldsomme.

Destruktive eller *konvergente* pladegrænser findes, hvor to plader støder sammen. Hvis begge plader består af oceanbund, vil den ene plade subduceres, og der dannes en dybgrav og en vulkansk øbue over subduktionszonen. Hvis kun den ene pladerand er dannet af oceanbund, medens den anden udgøres af et



Figur 3. Lithosfærepladernes nuværende fordeling i det Pacifiske Ocean.

kontinent, resulterer kollisionen ligeledes i en subduktion af oceanbundspladen, men herudover dannes en større, noget asymmetrisk bjergkæde med omfattende magmatisk aktivitet (som på fig. 5). Begge disse typer af destruktive pladegrænser er karakteriseret af talrige, til tider voldsomme jordskælv, med *hypocentrum* helt ned til 700 km dybde. Hvis begge de kolliderende plader derimod har kontinental skorpe i randen, bliver resultatet en omfattende, mere eller mindre symmetrisk udviklet bjergkædedannelse, hvor de dybe jordskælv mangler.

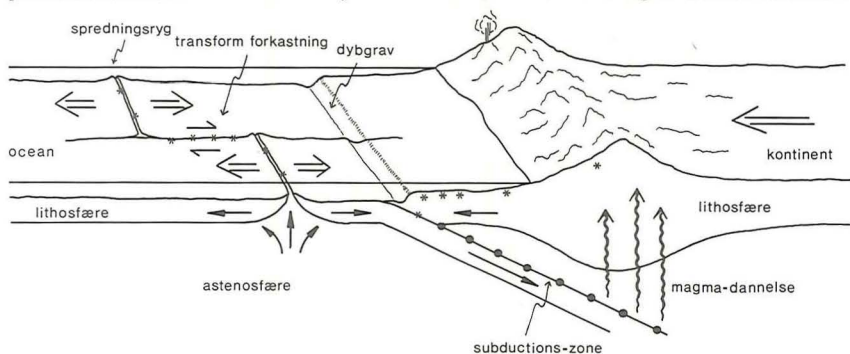
Endelig har man de såkaldte *passive* eller *konservative* grænser, hvor to plader 'blot' glider forbi hinanden langs en transform forkastning. Som tidligere nævnt tilhører San Andreas forkastningen denne kategori. Jordskælv i forbindelse med passive pladegrænser har alle deres *hypocentrum* liggende meget højt i jordskorpen - i Californien stort set aldrig dybere end 15 km - og deres voldsomhed er i store træk afhængig af pladernes indbyrdes bevægelsesretning samt af en række helt lokale forhold.

Hastigheden i dannelsen og dermed bevægelsen af disse plader er imidlertid hverken konstant eller ensartet alle steder, og ved et samspil af disse faktorer vil

nogle plader derfor forsvinde helt igen. I denne proces kan pladegrænserne også 'pludselig' skifte karakter, ligesom mindre dele af en plade kan 'springe over' til en naboplade. Som vi skal se i næste afsnit, indeholder San Andreas forkastningens dannelseshistorie alle disse elementer.



Figur 4. Fordelingen af jordskælv i det Pacifiske område omfattende alle jordskælv (større end 4.5 på Richter skalaen) i perioden 1978 - 1985. Den meget udtalte koncentration har været medvirkende til at fastlægge lithosfærepladernes grænser. (Illustrationen er et skærbillede fra et undervisningsprogram om pladetektonik, der er udviklet af T.Andersen, T.Albertsen og E. Schou Jensen).



Figur 5. Diagram visende forskellige relationer mellem lithosfæreplader. Pletter angiver dybe jordskælv og stjerner angiver overfladenære jordskælvs placering.

UDVIKLINGEN I DET VESTLIGE NORDAMERIKA SIDEN ØVRE KRIDT

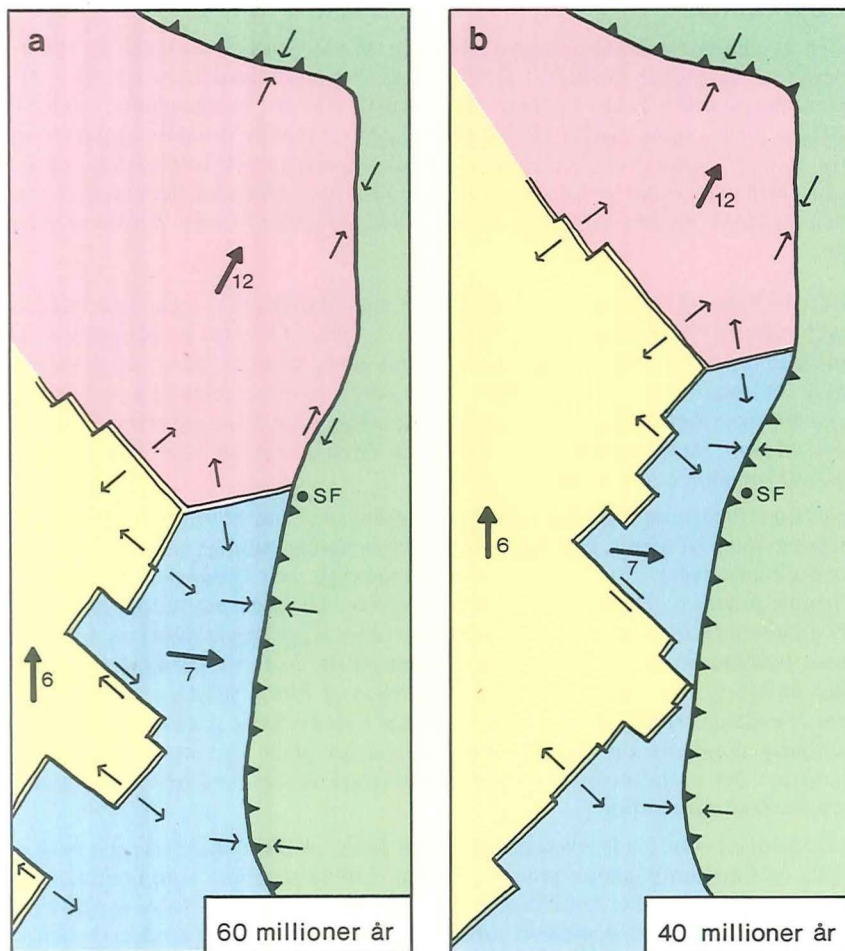
Den geologiske udvikling langs vestranden af det Nordamerikanske kontinent beror på samspillet imellem i alt fire store lithosfæreplader, hvoraf kun den Nordamerikanske plade rummer et kontinent. De tre øvrige plader - den Pacifiske plade, Kula pladen og Farallon pladen - er rene oceanbundsplader (se fig. 6a). Af de tre oceanbundsplader er Kula pladen nu helt forsvundet, medens små, isolerede rester af Farallon pladen endnu kan erkendes flere steder. Kun den Pacifiske og den Nordamerikanske plade eksisterer fortsat i bedste velgående.

Udredningen af det meget komplicerede hændelsesforløb, som disse pladers indbyrdes bevægelser har resulteret i, er overvejende baseret på det mønster af magnetiske anomalier, der findes på oceanbunden. Ganske vist er det jo næsten kun information fra den Pacifiske plade, der er bevaret, men på grund af den symmetriske opbygning af oceanbund på begge sider af en spredningsryg, har det alligevel været muligt, at rekonstruere bevægelserne af alle de fire plader, selv om en enkelt af dem er helt væk.

Så langt tilbage som de palæomagnetiske data fra den nuværende oceanbund tillader os at 'se' (d.v.s. fra engang midt i Øvre Kridt), mødtes de tre oprindelige oceanbundsplader i et system af spredningsrygge, der tilsammen dannede en 'triple junction'. Den relative bevægelse af hver af disse plader i forhold til den Nordamerikanske plade har tilsyneladende været nogenlunde konstant siden da, med hastigheder og retninger som angivet på fig. 6. Dette bevægelsesmønster har medført, at Farallon pladen til stadighed er blevet subduceret ned under den Nordamerikanske plade langs en simpel, konvergent grænse. Kula pladen derimod grænsede op til den Nordamerikanske plade i et mere kompliceret mønster, der omfatter både en passiv, transform forkastning og en konvergent grænse med subduktion.

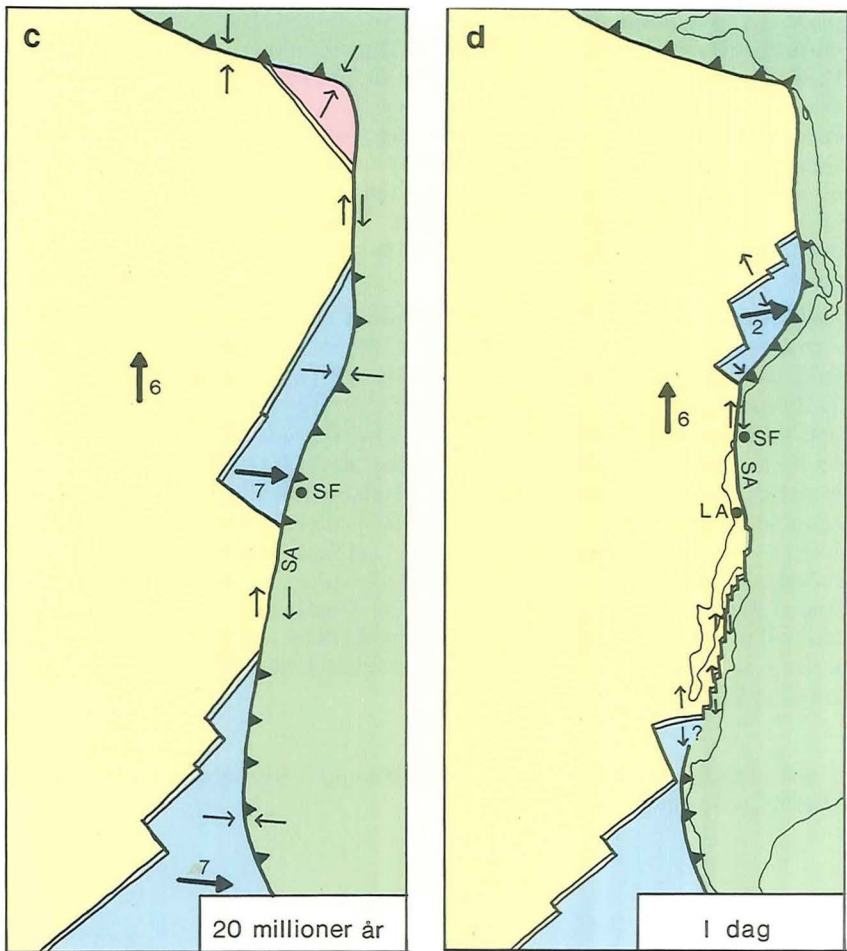
Efterhånden som pladebevægelserne skred frem, gled spredningsryggen mellem Kula og Farallon pladerne mod nord. Den 'triple junction' som fandtes, hvor disse to plader mødte den Nordamerikanske plade, flyttedes følgelig også mod nord, hvorved Farallon pladens subduktionszone efterhånden strakte sig længere og længere op langs den Nordamerikanske plades rand. For omkring 60 mill. år siden (fig. 6a) var denne 'triple junction' nået op til San Francisco regionen, der indtil dette tidspunkt havde ligget ved den transforme del af grænsen mellem Kula pladen og Nordamerika. Igennem de næste ca. 50 mill. år fortsatte Farallon pladens subduktion ind under denne del af Californien, medens den Pacifiske plade hastigt nærmede sig Nordamerika.

For omkring 40 mill. år siden (fig. 6b) strakte subduktionszonen sig næsten op til den Canadiske grænse. På samme tidspunkt kom den Pacifiske plade for første gang i direkte kontakt med den Nordamerikanske plade, idet det fremskudte hjørne - forårsaget af Mendozino transform forkastningen - nåede subduktionszonen omtrent ved den nuværende Mexicanske grænse. Skiftet fra Faral-



Figur 6. Tegneserie, der viser de rekonstruerede pladebevægelser langs vestsiden af den Nordamerikanske plade gennem de sidste 60 millioner år. Farvekode: Grøn = Nordamerikanske plade, Rød = Kula pladen, Blå = Farallon pladen, og Gul = Pacifiske plade. SF = San Francisco, LA = Los Angeles, SA = San Andreas forkastning.

lon plade til Pacifisk plade betød, at den relative bevægelse på dette sted ændrede sig fra at være konvergent til at blive overvejende strike-slip domineret (se retningspilene på fig. 6b). Hermed var grunden lagt til den nuværende San Andreas forkastning.



Ved de fortsatte pladebevægelser forlængedes San Andreas forkastningen gradvis mod nord, medens Kula pladen og de nu adskilte dele af Farallon pladen ved den stadige subduktion blev mindre og mindre (fig. 6c). Først for omkring 10 mill. år siden var San Andreas forkastningen nået op til San Francisco, og på nogenlunde samme tidspunkt var de sidste rester af Kula pladen ved at blive opslugt i Aleuter graven.


Frem til idag er disse processer fortsat, men de isolerede rester af Farallon pladen er efterhånden blevet så små, at nogle af dem er ved at ændre karakter. Ved Juan de Fuca pladen (det nugældende navn for den nordlige rest af Farallon

pladen) er subduktionen måske ved at ebbe ud, idet dybe jordskælv åbenbart mangler fuldstændigt i denne region, samtidig med at hastigheden er faldet markant (fig. 6d). Områderne inden for Juan de Fuca pladen udgør dog stadig en overordentlig aktiv vulkansk provins - man kan blot nævne Mt. St. Helens i denne sammenhæng. Den lille Rivera plade (der er navnet på det fragment, der ligger lige syd for den Californiske Halvø) har tilsyneladende helt tabt gejsten, og meget tyder på, at denne rest af Farallon pladen nu er smeltet fuldstændig sammen med den Nordamerikanske plade. Som det fremgår af jordskælvsfordelingen på fig. 4, er begge de tilhørende spredningsrygge dog fortsat i fuld aktivitet.

Medens disse rester af Farallon pladen således er ved at ophøre som selvstændige (Cocos pladen er stadig intakt, se fig. 3), har den Californiske Halvø og de dele af Californien, der ligger vest for San Andreas forkastningen simpelthen 'skiftet side' inden for de sidste få millioner år (fig. 6d). Disse løsrevne dele af det Nordamerikanske kontinent ligger nu på den Pacifiske plade, og de bevæger sig derfor op mod Alaska med en hastighed på ca. 6 cm/år. Alt andet lige, ville det betyde, at Los Angeles om ca. 30 mill. år kan blive forstad til San Francisco (eller omvendt om man vil). Imidlertid må man forvente, at 'pladeskift' fortsat vil influere på udviklingens forløb. I forbindelse med de såkaldte by-pass forkastninger vil små pladestykker jo efterhånden skifte side. En videreudvikling af Hayward forkastningen (fig. 1) kan således betyde, at hovedparten af strike-slip bevægelsen langs den Nordamerikanske pladerand efterhånden vil komme til at foregå her. Når - eller hvis - det sker, vil også San Francisco komme til at ligge på den Pacifiske plade.

I den aktuelle anledning har Geologisk Museum i København netop åbnet en udstilling om jordskælv !

NY GEOLOGI

Geologi er kommet i søgelyset, det ses blandt andet af mængden af bøger, som beskriver mineraler, krystaller, forsteninger og sten. Inden for det sidste års tid er der blandt mange udkommet: 

STEN I FARVER, Politikens forlag, 152 sider - paperback, pris 129 kr. Denne 5. udgave er bearbejdet af Lars Skov Andersen, der har revideret og moderniseret teksten, som i forhold til 1. udgaven fra 1960 er ændret meget. Til gengæld er de allerfleste af de 266 sten, der er afbildet i farver, ganske de samme, som i 1960-udgaven, de gengivelser, der var uskarpe dengang, er det stadigvæk. Bogen har i mere end 25 år været populær og anvendt på mange forskellige niveauer. Det vil denne udgave uden tvivl også blive.

STEN OG MINERALER, Høst & Søns Forlag, 64 sider - indbundet, pris 178 kr. Bogen er oversat og bearbejdet af Erik Schou Jensen og Ole Johnsen. Her er angrebsvinklen en anden, idet der i hvert sideopslag søges fortalt en afsluttet historie, f. eks. 'Kalkstenshuler', 'Magmabjergarter' eller 'Farvepigmenter' for at nævne nogle af overskrifterne. Utraditionelt, men afgjort ikke kedelig. Som opslagsbog er den næppe egnet, men vinder ved de mange fine farveplancer.

MINERALER, Hernov's Forlag, 246 sider - indbundet, pris 258 kr. Bogen er til dansk bearbejdet af Gorm Jessen, og kan på mange måder betragtes som en afløser af den forlængst udsolgte Noe-Nygaards: Mineralogi. Omfanget af mineraler er nogenlunde det samme, men i denne nye bog også med en masse udmærkede farvebilleder. Bogen har omkring 40 siders indføring før den systematiske del. Bogen egner sig fortrinlig som opslagsværk. For den mere erfarne samler er teksten sikkert let, for nybegynderen kræver det nok en grundig gennemlæsning af indledningsafsnittet, før man får fuldt udbytte af billedteksten.

KRYSTALLERNES VERDEN, Geologisk Museums Støttefond, 64 sider - paperback, pris 68 kr. Bogen er forfattet af Ole Johnsen, der også har fotograferet de godt 20 farveoptagelser af flotte krystaller. Der gives en sober og klar indføring i krystallografiens grundbegreber, hvorefter de enkelte krystalklasser behandles systematisk og særdeles sagligt. Til støtte for teksten er der et stort antal fine stregtegninger af karakteristiske krystaller.

VÆRD AT VIDE OM FORSTENINGER, Høst og Søns Forlag, 94 sider - indbundet, pris 198 kr. Bogen er forfattet af Palle Gravesen, der har benyttet en del af Christian Rasmussens fine tegninger, der er kendt fra H. Wienberg Rasmussens 'Palæontologi' og 'Danmarks Geologi', og hertil kommer så en lang række fotografier af forsteneringer fra forfatterens egen samling suppleret med billeder af forsteneringer fra Geologisk Museum. Forsteneringerne behandles efter de tidsperioder, hvor de er mest karakteristiske, hvorved der også opbygges en biostratigrafi. I tilgift får man en række turforslag til lokaliteter, hvor man kan samle forsteneringer. En let læselig og velillustreret bog for den interesserede samler.

GLETSCHERE I SYDGRØNLAND, Grønlands Geologiske Undersøgelse, 80 sider - indbundet, pris 119,55 kr. Bogen er forfattet af Anker Weidick, der giver en spændende indføring og præcis oversigt over de glacialgeologiske forhold før og nu. Bogen indeholder en lang række både gamle og nye billeder fra Sydgrønland, og kan formodentlig ligefrem anvendes som rejsefører i området.