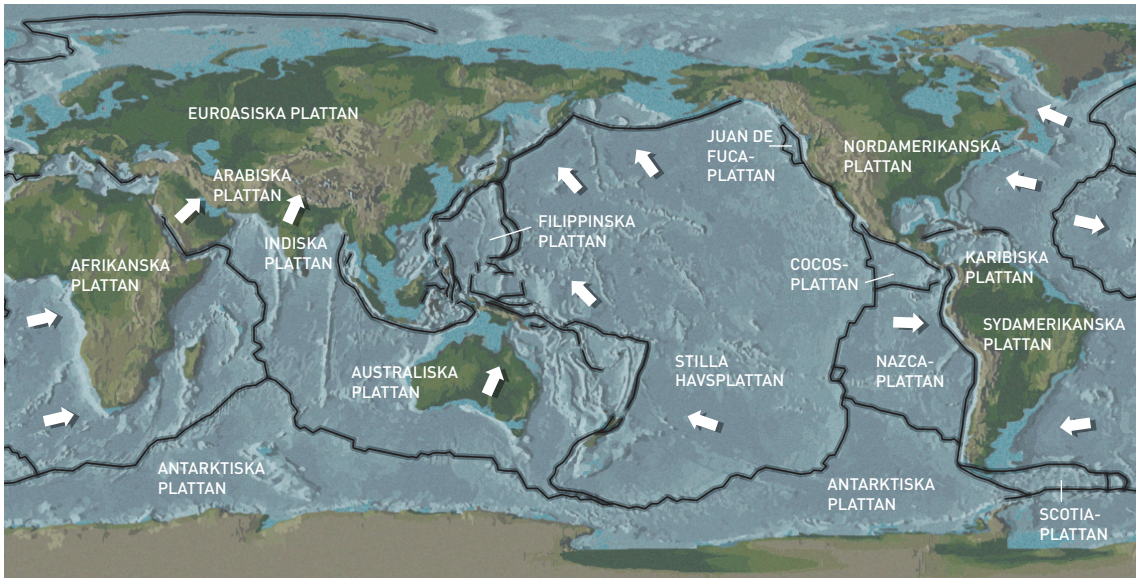
Bergens mysterier

Crafoordpriset i geovetenskaper 2014 går till ***Peter Molnar*** *för hans bidrag till kunskapen om vad som händer när kontinenter kolliderar med varandra och till förståelsen av bergskedjors dynamik. Med geofysiken som utgångspunkt har han bidragit till banbrytande kunskaper om drivkrafter till plattrörelser och om kontinenternas roll i den plattektoniska modellen av jordens utveckling. Genom att innovativt kombinera olika geologiska och geofysiska undersökningsmetoder, integrerat med satellitdata och modellering, har pristagaren med detta också banat väg för en ny syn på bergskedjors bildning och hela jordklotets dynamik.*

Geofysikern Peter Molnars tidiga forskarkarriär sammanföll med tiden då teorin om plattektoniken fick sitt genombrott på 1960-talet. Tillsammans med Bryan Isacks (1969) lämnade Peter Molnar ett bestående bidrag inte bara till kartläggningen av plattornas rörelser i förhållande till varandra, utan även till förståelsen av drivkrafterna till plattornas rörelser. Med hjälp av seismologiska studier i subduktionszoner kunde de visa att när en oceanbottenplatta glider ner under en annan platta ger den nedåtgående oceanbottenplattans egen tyngd en dragkraft som till största delen driver plattrörelsen. Denna dragkraft dominerar över tryckkraften från de aktiva mittoceanryggarna, där rörelser i manteln driver oceanbottenspridningen.

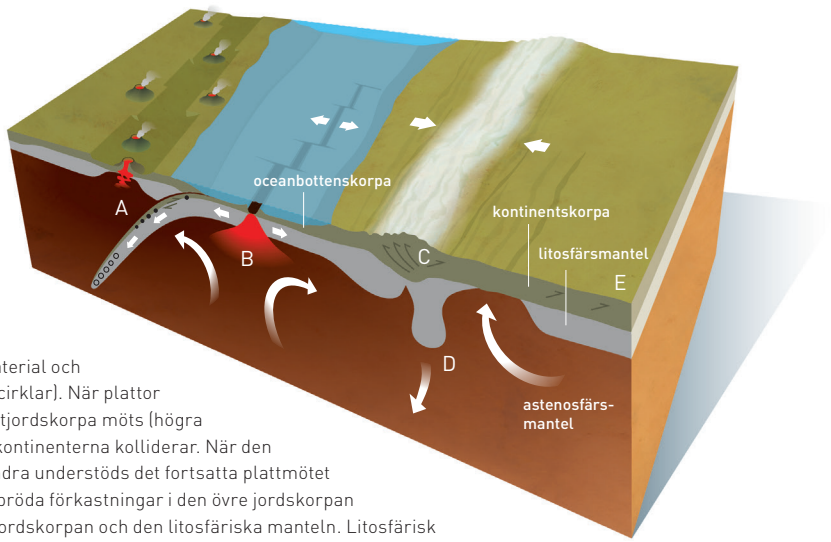
Fokus på kontinenterna

Peter Molnar lämnade därefter frågan om vad som drev plattornas rörelser och kom i stället att studera zoner där kontinenter kolliderar. Molnar insåg tidigt att plattektonikens förklaringar av den kontinentala tektoniken, baserade på antagandet att alla plattor är stela kroppar som glider på en plastisk mantel, inte var tillräckliga för att förklara de komplexa deformationsmönster som kan observeras i kontinentjordskorpan. För den som studerade kontinenterna med dess bergskedjor, höjdplatåer och vidsträckta inland, var det uppenbart att många frågor fanns kvar att besvara. Hur hängde bildningen



Den yttre delen av jordklotet utgörs av ett antal plattor som rör sig i förhållande till varandra. Ny oceanisk jordskorpa bildas där plattorna går isär vid mittoceaniska ryggar. Vid de plattgränser där plattorna går emot varandra leder neddykningen (subduktionen) av gammal oceanisk jordskorpa till jordbävningar och vulkanisk aktivitet, medan kollisionen mellan två kontinenter (såsom vid den eurasiska och indiska plattgränsen) leder till vidsträckta bergskedjor och höga platåer. Förändringar i plattmönster under geologisk tid inverkar på jordens klimat, där öppning och stängning av havsvägar påverkar flödet av vattenmassor mellan världshaven (såsom i Sydostasien och Karibien) medan höga platåer och bergskedjor påverkar cirkulationsmönster i atmosfären.

av de många strukturer och förkastningar som geologerna på olika sätt kunde se och kartlägga på kontinenterna samman med plattektonikens hittills ganska enkla förklaringsmodell? Det faktum att kontinentskorpan, med sin övervägande granitiska sammansättning, är lättare än den mer homogena oceanbottenskorpan, hade lett till det missvisande antagandet att kontinentskorpan inte kan pressas ner i manteln. Konceptet att kontinenter krockar, med omfattande förtjockning av jordskorpan som följd, var väletablerat liksom att detta medför att den ena kontinentplattan pressas ner under den andra. Däremot var konsekvenserna av denna nerpressning inte klargjorda. Bergskedjor som bildats som resultat av kontinent-kontinentkollisioner tilldrog sig uppmärksamhet från många forskare, men förståelsen av dynamiken i denna långvariga konvergens och upplyftning förblev ett mysterium. När Molnar och andra utgick från att den övre delen av jordskorpan är stel och den nedre delen plastisk, kunde de med kontinuummekanisk modellering göra avgörande upptäckter.



Plattor och deras gränser. Ny, varm och lätt oceanbottenjordskorpa bildas kontinuerligt vid mittoceaniska ryggar (B) genom att astenosfärisk mantel väller upp i plattgränsen allt medan oceanbottenplattorna rör sig bort från ryggen. När den är äldre, kallare och tyngre sjunker oceanbottenplattan ner i manteln (vänstra sidan av bilden). Jordbävningsmekanismer visar att den övre delen av den nedåtgående plattan (A) blir uttänjd (fyllda cirklar), samtidigt som plattrörelsen drivs genom att den nedåtgående plattdelens egen vikt blir en dragkraft på plattan. På djupet möter plattan motstånd från styvare material och jordbävningarna visar på kompression (öppna cirklar). När plattor som består av både oceanbotten- och kontinentjordskorpa möts (högra sidan av diagrammet) avtar subduktionen när kontinenterna kolliderar. När den ena kontinentplattan pressas ner under den andra understöds det fortsatta plattmötet av intern deformation som karaktäriseras av spröda förkastningar i den övre jordskorpan och plastisk deformation i den nedre delen av jordskorpan och den litosfäriska manteln. Litosfärisk förtjockning sker över en stor yta (från C till E) vilket leder till bergskedje- och platåbildning. Gravitativ instabilitet i den förtjockade litosfären gör att litosfären kan sjunka in i manteln (D) och uppvällande astenosfärisk mantel bidrar då ytterligare till upphöjningen av den överliggande platån.

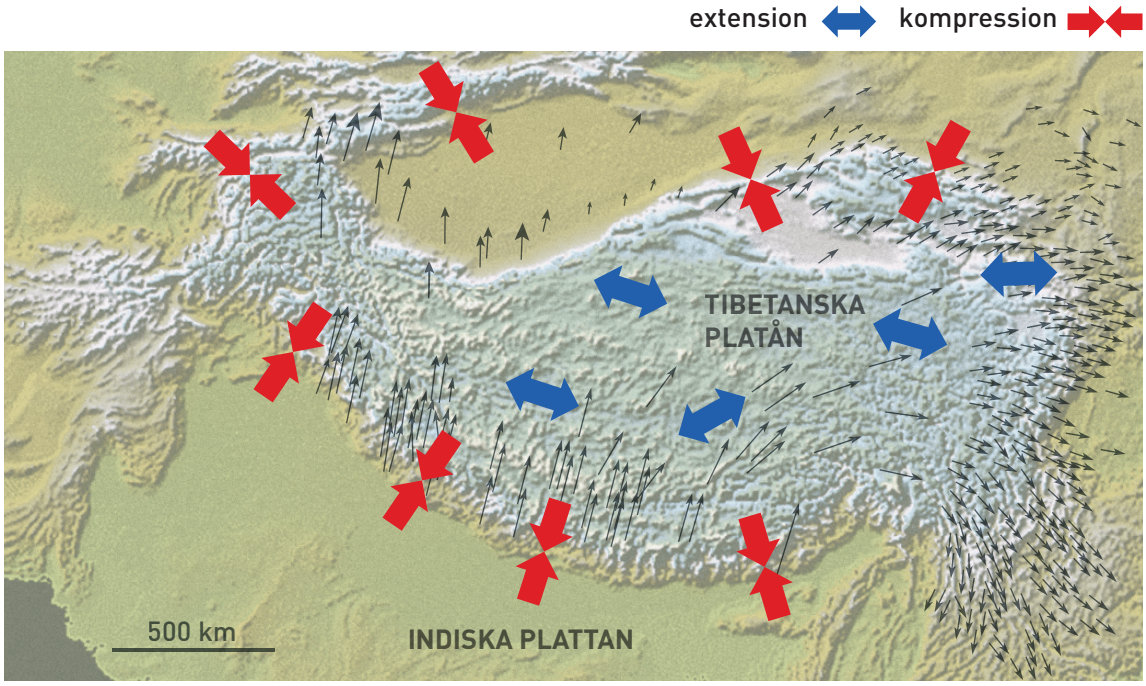
Bergskedjornas dynamik

Peter Molnar valde att studera Asien med den vidsträckta bergskedjan Himalaya och den tibetanska platån, där kollisionen mellan Indien och Eurasien som började för ca 50 miljoner år sedan är en aktiv, pågående process. Genom att framförallt använda satellitbilder och seismiska data kunde Peter Molnar och Paul Tapponnier (1975) visa att deformationsfältet över en mycket stor del av södra Asien är resultatet av denna kollision. Detta inkluderar flera stora förkastningszoner som löper parallellt med bergskedjan och är relaterade till den laterala utsträckningen av den höga Tibetanska platån. Molnars och Tapponniers forskning lyfte fram att deformationsmönstret för kontinent-kontinentkollision, som till exempel i Himalaya-Tibet, skiljer sig från deformationsmönstret vid ocean-kontinentkollision, som till exempel i Anderna. I det sistnämnda fallet koncentreras deformationen till de mötande plattkanterna och ovanpå en svagt lutande subduktionszon. När kontinenter kolliderar med varandra blir deformationen istället spridd och utsträckt i tid och rum, understött av plasticiteten i den nedre delen av kontinentjordskorpan. Denna forskning om kontinentaldynamik hade stor vetenskaplig genomslagskraft. Den förändrade synen på hur bergskedjor bildas och deras betydelse för den globala plattektoniken.

Med hjälp av seismiska profiler och andra geofysiska undersökningar, framförallt med koppling till kollisionen mellan Indien och Eurasien, fortsatte Molnar och hans kollegor att studera litosfärens egenskaper och att kasta nytt ljus på bergskedjorna med deras djupare strukturer såväl som höjd-

Med cirka 2 500 kilometers längd, 100–200 kilometers bredd och fjorton toppar över 8 000 tusen meters höjd är Himalaya en imponerande bergskedja. Himalaya är ett resultat av kollisionen mellan den indiska och den eurasiska kontinentplattan som inleddes för cirka 50 miljoner år sedan. I området pågår fortfarande aktiv deformation och bergskedjebildning, vilket gör Himalaya till ett utmärkt naturligt laboratorium för studier av kontinentaltektonik. Foto: J-P Dalbéra.

platåer. De kunde till exempel visa hur kall, tung och därför gravitativt instabil litosfärisk mantel kan avskiljas och sjunka, för att ersättas av varm, uppvällande astenosfärisk mantel. Denna så kallade delaminationsprocess gör att höjdplatåer bildas och den orsakar vulkanism samt leder till stora förkastningar i den övre jordskorpan, men också till plastisk deformation på djupet. Studier på 2000-talet, utförda med hjälp av modern GPS-teknik, bekräftar mycket av det som Molnar och hans kollegor från 1970-talet och framåt påvisat rörande kontinenternas dynamik och plattornas rörelser.



Himalayas och Tibetanska platåns rörelsemönster. Tjocka pilar visar horisontella spänningar, baserat på studier av jordbävningar i regionen. Spänningarna beror på sammantryckning (kompression) vid platåns kanter och utdragning (extension) i mitten av platån, som ett resultat av platåns pågående upphöjning. Smala pilar visar hastigheten på jordskorpans rörelse, baserat på GPS-mätningar (pilens längd är proportionell mot hastigheten).

KONTINENTALDRIFT och PLATTEKTONIK

Tankegångar om att kontinenterna rör sig kan spåras minst ett par hundra år bakåt i tiden, men det var inte förrän 1910 som en väldefinierad hypotes hade arbetats fram.

Ett par decennier senare presenterades en teori om att det var konvektion i den underliggande manteln, som orsakade dessa rörelser. Dock var det först under andra världskriget och därefter som olika geofysiska undersökningar av havsbottnarna gav avgörande bevis för hur och varför kontinenterna rör sig. De avslöjade ett mönster av sammanhängande oceanryggar, djuphavsgravar och variationer i magnetisering.

På 1960-talet gjordes tolkningen att ryggarna är ett resultat av divergerande plattrörelser med bildning av ny oceanbottenjordskorpa (oceanbottenspridning). Djuphavsgravarna förklarades höra samman med områden där äldre, kall oceanbottenjordskorpa sjunker ner i manteln (subduktion). Hypotesen om oceanbottenspridning, tillsammans med subduktionszonernas konvergens och transforma plattrörelser, förklarade på ett elegant vis stora delar av det globala tektonikpusslet, som senare bekräftades genom resultaten från ett omfattande program med borrning och provtagning i oceanbottnarna. Den yttre delen av jordklotet, litosfären, utgörs av ett antal plattor, bestående av oceanbotten- och kontinentjordskorpa tillsammans med ett lager av den övre delen av manteln. Plattorna skiljs åt av smala, jordbävningsbenägna rörelsezoner där det också är vanligt med vulkanisk aktivitet.

Den plattektoniska modellen växte fram under 1960-talet, främst tack vare studierna av oceanbottenplattornas egenskaper och rörelser; rörelsemönster som senare kunde bekräftas med hjälp av GPS-mätningar. Plattgränser som involverar kontinent-kontinent-kollision var emellertid mycket mer komplexa i sin vidspridda deformation, jämfört med plattgränser som inkluderar oceanbottenplattor. Det är genom studierna av zoner där kontinenter kolliderar med varandra, som 2014 års Crafoordpristagares forskning har haft sin största betydelse.

Alltid ett känsligt samspel

Geofysikern Peter Molnar har en sällsynt förmåga att få till stånd fruktbara samarbeten med framstående forskare inom andra discipliner. Hans innovativa forskning har inkluderat såväl processer i astenosfär och litosfär som kopplingar mellan litosfär, hydrosfär och atmosfär. Detta har bidragit till inte bara kunskaperna om hur bergskedjor bildas och vidsträckta landområden höjs, utan också om hur havs- och landvägar öppnas och stängs, samt hur detta förändrar cirkulationsmönster i havs- och luftmassor med koppling till klimatförändringar.

Forskningen har ibland resulterat i nya och oväntade perspektiv. Som exempel kan nämnas att Peter Molnar tillsammans med Philip England och Joseph Martinod (1993) förklarade hur en för cirka åtta miljoner år sedan plötslig upphöjning av den redan befintliga och vidsträckta Tibetanska platån till dess nuvarande höjd, cirka 5 000 meter över havet, resulterade i en förstärkning av den regionala monsunen. Författarna initierade med detta också en diskussion om detta i sin tur startade återkopplingsmekanismer som ökad erosion och silikatvittring i Himalaya, med ökad bindning av koldioxid från atmosfären och påverkan på det globala klimatet som följd. Diskussionen om hur bergskedjan Himalaya och den tibetanska platån påverkar monsunen har inspirerat många forskare och debatten pågår än idag.

Ett annat exempel är Mark Canes och Peter Molnars resonemang (2001) kring hur det globala klimatet kan ha påverkats av stängningen av den indonesiska havsvägen för 3–4 miljoner år sedan, då varmt vatten från Stilla havet inte längre kunde flöda in i Indiska oceanen. Afrika som helhet fick enligt denna hypotes ett torrare klimat, med mindre regn i Östafrika, vilket potentiellt kan ha inverkat på exempelvis människans utveckling. Den minskade värmetransporten i atmosfären, från tropikerna till nordligare breddgrader, kan så småningom även ha varit orsaken till ett under globalt kallare klimat med istider under Pleistocen (2,6 miljoner–12 000 år sedan).

Statistik och riskbedömning i samhällets tjänst

Crafoordpristagarens forskning har också bidragit till ökad kunskap om seismiska risker, bland annat i de tätbefolkade områdena i södra Himalaya och i östra Tibet. Sammanställning av olika mätdata och statistik från tidigare skalv påvisar att de större jordbävningar som inträffar i detta område sannolikt är ett resultat av Indiens pågående nerpressning under Eurasien och den laterala utsträckningen av den tibetanska platån. De riskbedömningar som görs kan användas i samhällsplaneringen, för att ta fram bättre prognosverktyg och varningssystem.

LÄNKAR OCH LÄSTIPS

Mer information om årets pris finns på Kungl. Vetenskapsakademiens webbplats,
http: www.crafoordprize.se och på //kva.se/crafoordpriset

Animation

India-Asia Continental Collision. *http://emvc.geol.ucsb.edu/2_infopgs/IP1GTect/dContCollision.html*

Bok om plattektonik

Plate Tectonics. An Insider's History of the Modern Theory of the Earth. Naomi Oreske, 2003: Westview Press Inc. 448 sidor. Kapitel 17 är skrivet av Peter Molnar: *From Plate Tectonics to Continental Tectonics*.

Urval av pristagarens vetenskapliga artiklar

Mantle Earthquake Mechanisms and Sinking of Lithosphere. Isacks, B; Molnar, P: *Nature*, 1969.
Cenozoic Tectonics of Asia – Effects of a Continental Collision. Molnar P; Tapponnier. P: *Science,* 1975.
Structure and tectonics of the Himalaya. Constraints and Implications of Geophysical Data. Molnar, P; *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 1984.
Mantle Dynamics, Uplift of the Tibetan Plateau, and the Indian Monsoon. Molnar, P; England. P; Martionod, J: *Reviews of Geophysics*, 1993.
Active Deformation of Asia: From Kinematics to Dynamics. England, P; Molnar, P: *Science*, 1997.
Earthquakes – Himalayan Seismic Hazard. Bilham, R; Gaur, VK: Molnar, P: *Science*, 2001.
Closing of the Indonesian Seaway as a Precursor to East African Aridification Around 3–4 Million Years Ago. Cane, A; Molnar, P: *Nature*, 2001.
Continuous Deformation of the Tibetan Plateau from Global Position System Data. Zhang, PZ; Shen, Z; Wang, M; Gan, WJ; Burgmann, R; Molnar, P: *Geology*, 2004.

PRISTAGARE

PETER MOLNAR

Amerikansk medborgare. Fil.dr. 1970 vid Columbia University, NY, USA.
Professor in Geological Sciences vid University of Colorado Boulder, CO, USA.

http://cires.colorado.edu/science/groups/molnar/

Redaktion:
Sakkunniga: ledamöter från Kungl. Vetenskapsakademien
Text: Anna Kim-Andersson
Illustrationer: Johan Jarnestad/Swedish Graphics
Redaktör: Perina Stjernlöf
©Kungl. Vetenskapsakademien