

# Bjergenes højde styres af klima

*Aiguille-du-Midi i de franske alper.*

*Klimaet har en stor indflydelse på fordelingen af de højeste bjergtinder på Jordens overflade. Kun få bjergtinder rejser sig mere end 1500 meter over snegrænsen, da gletschere er særdeles effektive til at høvle toppen af bjergene.*

Af David Lundbek Egholm

■ Da teorien om pladetektonik blev etableret og anerkendt i sidste halvdel af det tyvende århundrede, forestillede de fleste geologer sig en forholdsvis enkel sammenhæng mellem de tektoniske kræfter og bjergkædernes størrelse.

De højeste og bredeste bjergkæder blev skabt af den voldsomste tektonik og tilsvarende blev små, men aktive, bjergkæder forbundet med langsomme pladebevægelser. Der kan heller

ikke være tvivl om, at Himalayas enorme bjergmasser og ekstremt høje tinder er en direkte konsekvens af en nylig voldsom kollision mellem Indien og Asien, og at f.eks. de europæiske Alper er mindre bl.a. fordi kollisionen mellem Europa og Afrika var knap så voldsom og forårsagede langsommere tektonisk landhævning.

Men alligevel ved vi i dag, at sammenhængen mellem bjergkædernes størrelse og pladetek-

tonisk aktivitet er mere kompleks, og at klimaet også har stor indflydelse på bjergkædernes størrelse. Klimaet påvirker nemlig de nedbrydningsprocesser, som fører til erosion af bjergkæderne, og som modarbejder den tektoniske landhævning. Faktisk tyder meget på, at klimavariationer, ved at påvirke nedbrydningens hastighed, har større betydning for bjergkædernes højde end hastigheden af den tektoniske landhævning.

## **Snegrænsen og Jordens arealfordeling**

Tektonisk hævning skaber bjergkæder, mens erosionsprocesser nedbryder dem. Det er derfor balancen mellem tektonik og erosion, som bestemmer en bjergkædes endelige højde. Hvis erosionsprocesserne er ineffektive bliver en bjergkæde generelt både høj og bred, mens hurtig nedbrydning bedre kan følge med den tektoniske hævning og begrænse bjergkædens størrelse.

Klimaet påvirker erosionsprocesserne af flere grunde. Først og fremmest bestemmer mængden af nedbør, hvor meget vand der bliver transporteret igennem bjergene, og dermed også hvor meget sediment, der kan føres væk til lavtliggende områder. Dernæst synes gletschere, at være bedre til at nedbryde bjerge end floder, og det betyder, at erosionen generelt er mere effektiv i kolde egne med mange gletschere.

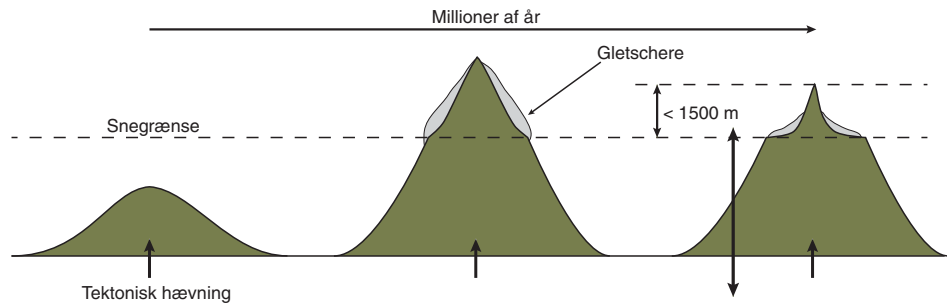
Gletschere opstår, hvis en bjergkæde er højere end snegrænsen, for over snegrænsen falder nedbøren hele året som sne, der samler sig som is i gletschere. I dale kan gletscherne flyde ned til højder under snegrænsen før de endeligt smelter, men det er i sidste ende arealerne over snegrænsen, der leverer den is, som danner gletschere. Klimaet spiller her en vigtig rolle fordi højden af snegrænsen både afhænger af temperaturen ved havniveau og af nedbørsraten.

I bjergkæder på de kolde, høje breddegrader, som f.eks. i Norge eller Alaska, findes snegrænsen derfor ca. 1500 meter over havets overflade, mens den i bjergkæder under varmere himmelstrøg, tættere på ækvator, findes i næsten 6000 meters højde.

Hvis gletschere over snegrænsen virkelig er meget bedre til at nedbryde bjerge end floder under snegrænsen, kan det betyde, at klimaforskelle, gennem variationer i højden til snegrænsen, har en direkte betydning for højden af bjergkæder rundt omkring på Jorden.

Denne hypotese bekræftes af studier af Jordens arealfordeling. Specielt når man betragter overfladearealet som funktion af breddegrad og højde over havniveau fremstår mønstre, som understreger sammenhængen mellem klima og bjergkædernes højde (se figur 1). Højden til snegrænsen varierer på tværs af breddegraderne primært pga. temperaturforskellene, men også nedbørsforholdene spiller ind. Ved høje breddegrader (omkring +/- 60 grader) tæt på polerne mod

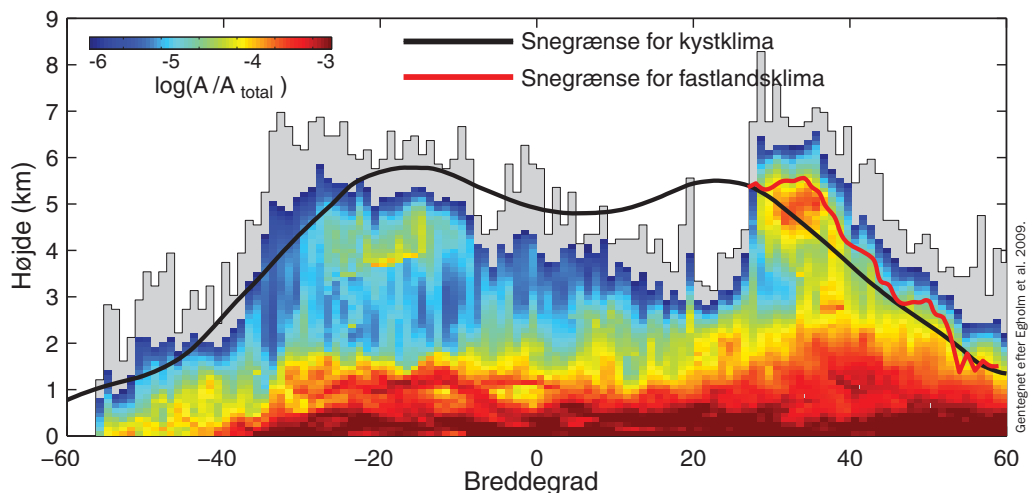
### Den glaciare rundsav



Princippet bag "den glaciare rundsav", som over tid begrænser bjergenes højde. Figuren viser, hvordan en bjergkæde vokser nedefra pga. tektonisk landhævning. Så snart bjergkæden hæver sig over omgivelserne, begynder nedbrydningsprocesserne at

modvirke landhævningen. Men for mange bjergkæder opstår der først balance mellem hævnning og nedbrydning, når bjergkæden krydser højden til snegrænsen, og gletschere begynder at bidrage til nedbrydningen. Gletscherne effektivitet forårsager, at overflade-

arealet ophobes i højder svarende til snegrænsen, mens der over snegrænsen kun er meget lidt overfladeareal tilbage. Data viser, at de fleste tinder kun når højder på under 1500 meter over snegrænsen, selvom der også findes adskillige undtagelser til denne regel.



Figur 1. Jordens arealfordeling som funktion af breddegrad og højde. De røde farver repræsenterer stor arealkoncentration, mens de blå farver indikerer, at kun lidt areal er til stede i en given højde og på en given breddegrad. De grå kasser viser den maksimale højde for hver breddegrad, mens de sorte og røde kurver viser den nutidige snegrænse for henholdsvis kystklima og fastlandsklima. Læg mærke til hvordan overgangen mellem de blå og grå farver følger højden til den nutidige snegrænse. Data stammer fra NASAs Shuttle Radar Topography Mission database.

syd og nord findes snegrænsen i under 1000 meters højde, mens den i ørkenbælterne tæt på ækvator (+/- 20-25 grader) topper ca. 6000 meter over havet. Selvom det er endnu varmere ved selve ækvator er snegrænsen en smule lavere her (ca. 5000 meter) pga. øgede nedbørsmængder.

Betragtes samtidigt Jordens arealfordeling langs breddegraderne og som funktion af højden over havet, ser man straks,

at det meste landareal er koncentreret omkring havniveau, og særligt på den nordlige halvkugle hvor de største kontinentmasser befinder sig.

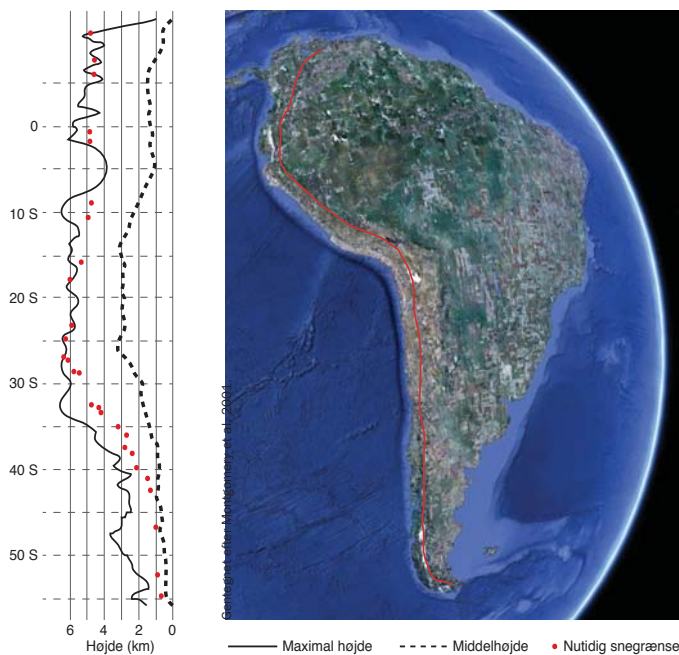
Den procentvise del af Jordens overfladeareal falder generelt med højden over havniveau. Dette er der ikke i sig selv noget overraskende i, idet mange processer pga. tyngdekraften vil forsøge at udjævne topografi, og specielt floder vil over millioner af år sænke

højere tektonisk inaktive landskaber til havniveau. Men i højder svarende til snegrænsen sker faldet i arealfordelingen meget pludseligt, og forsvindende lidt areal kan findes over snegrænsen. Dette tyder på, at nedbrydningsprocessernes effektivitet generelt er højere over snegrænsen end under, og peger på gletschere og tilhørende fryse-tø processer som de primære erosionsmekanismer. Selv i de tektonisk mest aktive



Foto: Nic McPhee

Mount McKinley i Alaska er en markant undtagelse for regelen om, at bjerge ikke er meget højere end snegrænsen. Med sine 6.196 meter over havets overflade rager dets tinde mere end 5.000 meter over den lokale snegrænse. Årsagen er formentlig et meget koldt klima i området kombineret med, at bjerget består af meget hårde bjergarter, der er modstandsdygtige overfor frostsprængninger.



Figur 2. Sammenhængen mellem middelhøjde, maksimal højde og højden til snegrænsen langs Andesbjergene i Sydamerika.

områder som New Zealand og Tibet, hvor pladetektoniske kræfter løfter bjergarterne op mod overfladen med geologisk kræftsvimlende hastigheder på flere mm per år, kan de glaciale erosionsmekanismer tilsyneladende følge med, og begrænse andelen af overfladeareal over snegrænsen.

I sidste ende medfører det, at bjergkædernes toppe kun når et stykke over snegrænsen, før de bliver for stejle og styrter sammen. Resultatet er, at klimaet, gennem indflydelsen på snegrænsens højde over havniveauet, ikke blot påvirker arealfordelingen i bjergkæderne, men også højden af de allerhøjeste tinder. En særlig klar sammenhæng kan ses i Andesbjergene, som krydser næsten 60 breddegrader og dermed adskillige klimazoner (se figur 2).

### Bjergenes højde

Det er altså ikke tilfældigt, at de højeste bjerge findes i Himalaya og Andesbjergene på forholdsvis lave breddegrader, hvor det er varmt og højden til snegrænsen er stor. Der er dog vigtige undtagelser. F.eks. ser man i Andesbjergene og andre steder, at vulkaner, i forhold til andre bjerge, kan vokse sig langt højere end snegrænsen, formodentligt fordi de dannes for hurtigt til at erosionsprocesserne kan følge med. Der er også flere meget høje undtagelser på Antarktis og i Alaska, hvor det er så koldt at gletscherne er bundfrosne, og derfor ikke så effektive til at erodere bjergene. Mount McKinley (som også kaldes Denali) er således Nordamerikas højeste bjerg og en prominent undtagelse. Det ligger et sted i Alaska, hvor kli-

maet er meget koldt. Derudover er dette bjerg lavet af specielt hårde bjergarter, som er modstandsdygtige overfor frostsprængninger. Dets top er 6.196 meter over havets overflade, hvilket svarer til næsten 5.000 meter over den lokale snegrænse, og det er langt mere end for noget andet bjerg på Jorden.

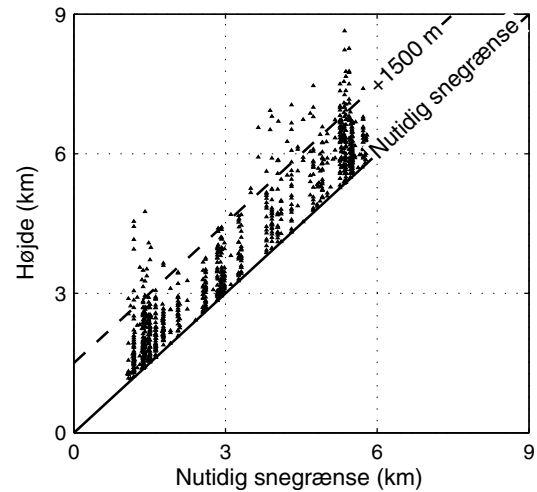
Men selv om disse prominente undtagelser findes, så er de statistisk set så få, at de ikke kompromitterer den generelle sammenhæng mellem højden til snegrænsen og højden af bjergenes toppe. Langt de fleste ikke-vulkanske bjergtoppe når højst 1500 meter over snegrænsen (se figur 3) og det har fået mange til ligefrem at tale om en glacial rundsav ("glacial buzzsaw"), som over millioner af år "saver" bjergtoppene af et stykke over snegrænsen.

### Klimavariationer og pladetektonik

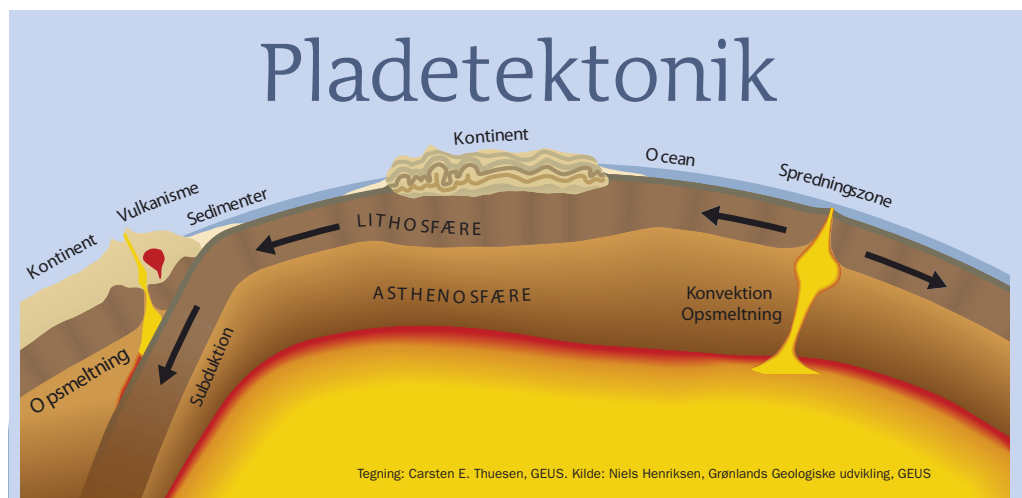
At de glacial erosionsprocesser synes at være langt mere effektive end andre processer, som virker under snegrænsen, er interessant også set i lyset af det mere generelle forhold mellem pladetektonik og klima. Det har længe været anerkendt, at bjergkædedannelse som følge af pladetektonisk aktivitet kan påvirke det globale klima. Teoretisk set kan tektonisk hævnning af Jordens overflade nemlig forårsage global afkøling på tre forskellige måder:

- 1) Hvis store landområder bliver hævet højt over havets overflade bliver det her koldere og vintrene bliver længere. Det fører til afkøling fordi et voksende snedække hæver Jordens albedo.
- 2) Skabelsen af høje plateauer vil påvirke de globale atmosfæriske cirkulationsmønstre. De fleste modeller peger på, at global afkøling af denne grund særligt fulgte dannelsen af de højtliggende landområder i Tibet og det vestlige Nordamerika.
- 3) Tektonisk landhævning vil føre til øget erosion og kemisk nedbrydning af bjergarter i højtliggende kolde områder, som derefter transporteres til laverliggende varmere områ-

*Figur 3. Højden af bjergtinder over den nutidige snegrænse. Langt de fleste bjergtinder når højst 1500 meter over højden til den lokale snegrænse, selvom højden til snegrænsen varierer med cirka 5000 meter. Nogle bjergtinder når dog højder på 3000-5000 meter over snegrænsen, men de fleste af disse er aktive vulkaner, som kan vokse for hurtigt til, at erosionsprocesserne følger med.*



Gentegnet efter Egholm et al., 2009.



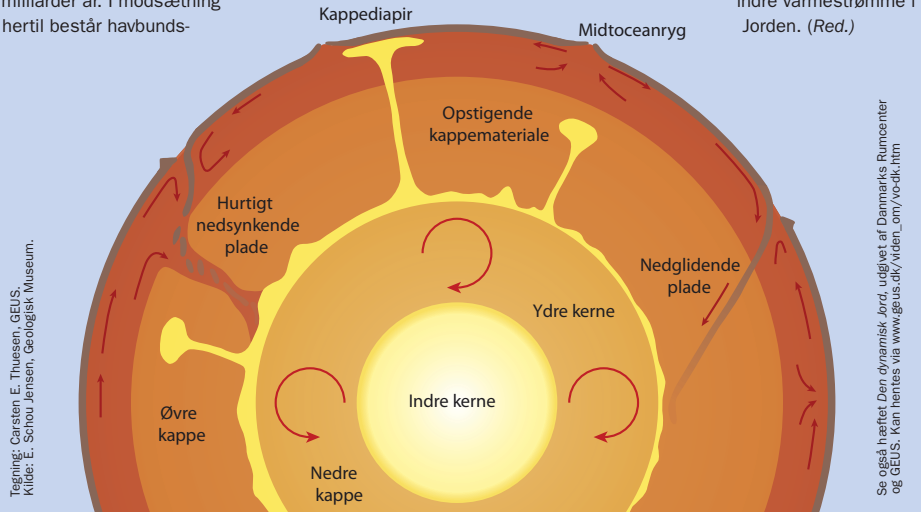
Tegning: Carsten E. Thuesen, GEUS. Kilde: Niels Henriksen, Grønlands Geologiske udvikling, GEUS

Den moderne forståelse af pladetektonikkens principper er illustreret i denne figur. Traditionelt er Jorden overordnet inddelt i 3 zoner – kernen, kappen og skorpen. Men de store tektoniske plader består ikke kun af skorpen, som man umiddelbart skulle tro. I stedet består disse plader både af skorpen og den øverste del af den underliggende kappe. Samlet kalder man dette "pladelag" for lithosfæren, som bevæger sig oven på den mere plastiske del af kappen kaldet asthenosfæren.

Kontinenter består af relativt lette materialer, og derfor har de en tendens til "at flyde ovenpå" og kontinenternes kerner er derfor ofte ældgamle – dvs. flere milliarder år. I modsætning hertil består havbunds-

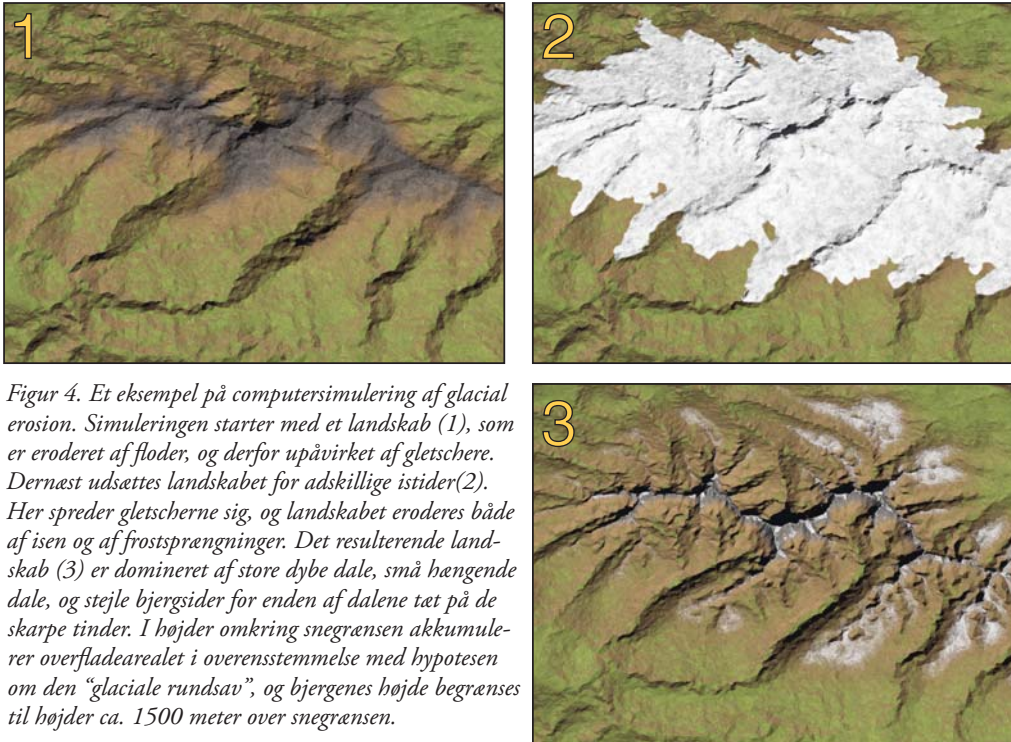
skorpen primært af den noget tungere basalt, som derfor tvinges ned under kontinenterne ved en kollision mellem plader (og dermed ikke opnår så lang en levetid som kontinenter). En tektonisk plade består således både af havbunds-skorpe og kontinent.

Den primære drivkraft bag pladernes bevægelse menes at være aktiviteten ved de såkaldt midt-oceaniske rygge – et gigantisk system af vulkaner midt i oceanerne. Her dannes ny oceanbundsskorpe ved at magma stiger op fra kappen. Dette tvinger samtidig pladerne fra hinanden. Derudover menes tyngdekraften også at spille en rolle, når pladerne "trækkes" ned under hinanden. Ultimativer er motoren i systemet de indre varmestrømme i Jorden. (Red.)



Tegning: Carsten E. Thuesen, GEUS. Kilder: E. Schou Jensen, Geologisk Museum.

Se også hæftet Den dynamiske Jord, udgivet af Danmarks Rumcenter og GEUS. Kan findes via [www.geus.dk/viden\\_smy/voksklim](http://www.geus.dk/viden_smy/voksklim)



Figur 4. Et eksempel på computersimulering af glacial erosion. Simuleringen starter med et landskab (1), som er eroderet af floder, og derfor upåvirket af gletschere. Dernæst udsættes landskabet for adskillige istider (2). Her spreder gletscherne sig, og landskabet eroderes både af isen og af frostsprængninger. Det resulterende landskab (3) er domineret af store dybe dale, små hængende dale, og stejle bjergsider for enden af dalene tæt på de skarpe tinder. I højder omkring snegrænsen akkumulerer overfladearealet i overensstemmelse med hypotesen om den "glaciale rundsav", og bjergenes højde begrænses til højder ca. 1500 meter over snegrænsen.

der. Denne proces absorberer  $\text{CO}_2$  fra atmosfæren, og reducerer den naturlige drivhuseffekt, og derigennem måske også de globale temperaturer. Flere forskere har peget på, at tiltagende tektonisk aktivitet og bjergkædedannelse i Kænozoikum muligvis bidrog til omfattende global afkøling for ca. 50 millioner år siden. Her ændrede Jordens klima sig radikalt, og den langvarige kolde og klimatisk ustabile periode, som vi stadig befinder os i, begyndte.

Men eksistensen af den "glaciale rundsav" peger på en tilsvarende påvirkning den anden vej. Altså, at global afkøling og tiltagende udbredelse af gletschere i bjergområderne accelererer nedbrydningen af bjergkæder, og dermed aflaster kollisionszonerne mellem de tektoniske plader. Dette kan måske forstærke den globale tektoniske aktivitet, fordi høje bjergkæder ellers modarbejder kollision mellem plader. Der er altså, teoretisk set, tale om gensidig påvirkning mellem klimavariationer og pladetektonik med indbyggede selvforstærkende effekter. Desværre er det i denne forbindelse yderst svært at skelne mellem årsag og virkning i den geologi-

ske fortid, idet øget erosion pga. global afkøling og tektonisk landhævning pga. pladetektonik typisk erkendes igennem de samme nutidige observationer af fortidens geologiske aflejringer.

Både global afkøling og tektonisk landhævning fører til aflejring af store mængder sediment foran bjergkæderne og vipning af ældre, underliggende aflejringer. Den sidstnævnte effekt opstår i begge tilfælde fordi erosion aflaster bjergkæderne, som derefter hæves, mens omkringliggende områder synker under vægten af de nye sedimenter.

### Computersimuleringer sætter fokus på processerne

Som det ofte er tilfældet i geologien, tillader kvaliteten og mængden af observationer ikke entydig bestemmelse af de styrende processer. Derfor er computersimuleringer, hvor f.eks. gletschernes dannelse og bevægelse i bjerglandskabet genskabes matematisk, nyttige værktøjer, fordi de langvarige geologiske processer herigennem forbindes til alment gyldige fysiske og kemiske principper.

F.eks. består gletschere af is, som i princippet opfører sig som en tyktflydende væske, der bevæger sig ned igennem bjergkædernes dale pga. tyngdekraften. Newtons love om bevægelse og kræfter danner et solidt fundament for både at forstå og simulere, hvordan denne bevægelse må foregå.

I forbindelse med "den glaciale rundsav" og klimaets indflydelse på bjergkædernes højde har netop computersimuleringer bidraget til at forstå de fundamentale mekanismer bag fænomenet. Simuleringerne viser, at mens gletscherne eroderer en bjergkæde og skaber velkendte glaciale landskaber, mindskes bjergkædernes areal over snegrænsen. Fordi nedbøren over snegrænsen falder i form af sne, er det samlede areal over snegrænsen helt kritisk for gletschernes eksistens. Der opstår derfor hurtigt selvforstærkende effekter, hvor igennem gletscherne bliver mere og mere begrænset af snegrænsen og erosionen bliver fokuseret i højder lige over snegrænsen. Simuleringerne viser altså, at den "glaciale rundsav" er en naturlig konsekvens af gletscheres udbredelse og bevægelse. ■

### Om forfatteren



David Lundbek Egholm er lektor ved Institut for Geoscience Aarhus Universitet david@geo.au.dk

### Mere læsning

Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H. & Lee, B., 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414, 738-742.

Egholm, D. L., Nielsen, S. B., Pedersen, V. K. & Lesemann, J.-E., 2009. Glacial effects limiting mountain height. *Nature*, 460, 884-887.

Molnar, P. & England, P., 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg? *Nature*, 346, 29-34.

Whipple, K. X., 2009. The influence of climate on the tectonic evolution of mountain belts. *Nature Geoscience*, 2, 97-104.