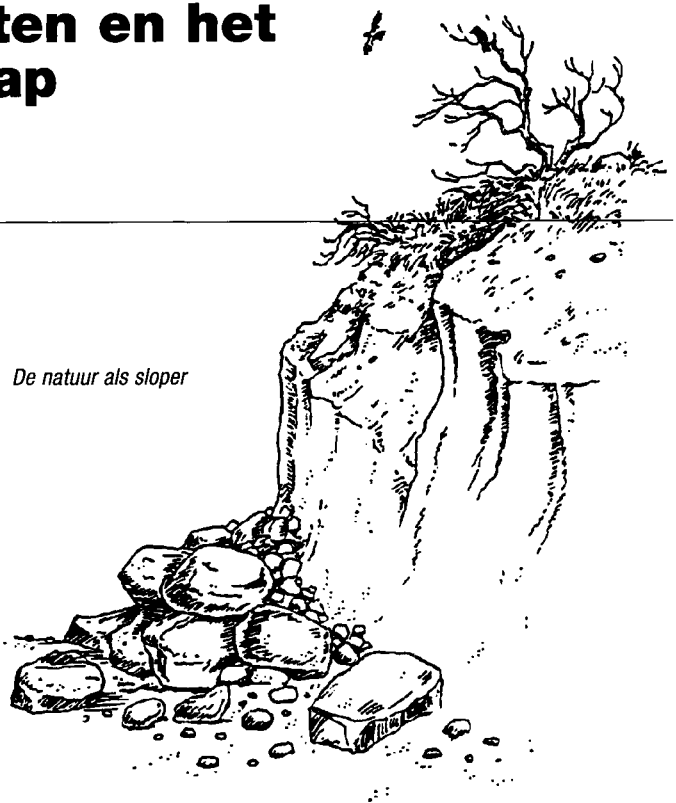


De afbraak van gesteenten en het resultaat in het landschap

door Drs. W.C.P. de Vries

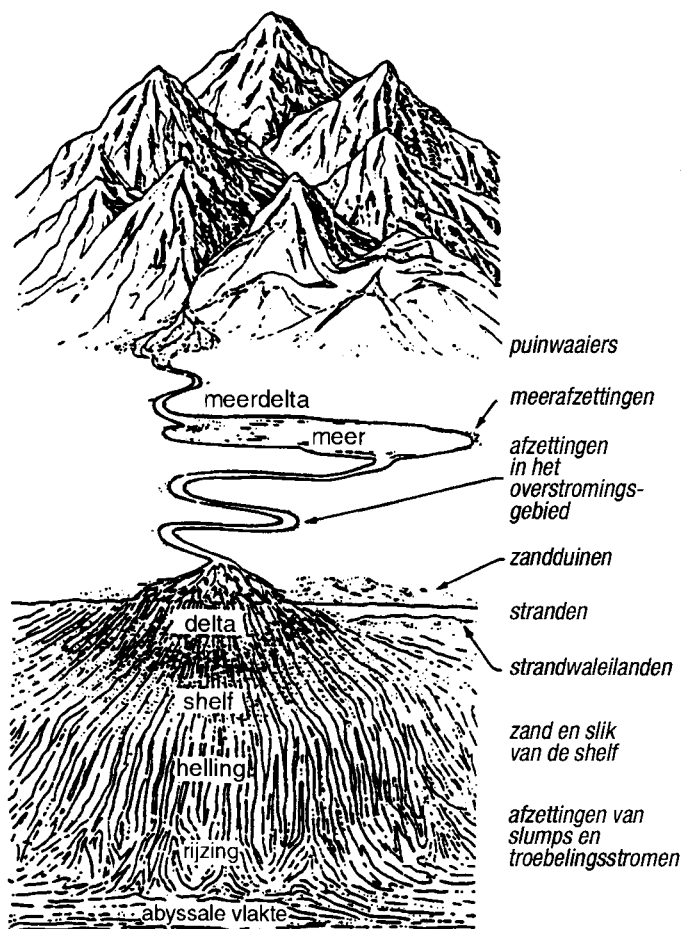
De meeste landschappen op aarde zijn ontstaan door de werking van de krachten van het klimaat op de materialen van het aardoppervlak. Dit betekent dat landschapsvormen ontstaan door afbraak: waar een dal aanwezig is, werd voor de vorming van dat dal materiaal weggevoerd. Bergen zijn de overblijfselen van dikke pakketten gesteenten waarvan reeds een zeer groot gedeelte is verdwenen. Een groot gedeelte van Nederland vormt op deze uitspraak een uitzondering: Nederland ontstond voor een belangrijk deel door aanslibbing van materiaal dat door de grote rivieren en door de zee werd aangebracht en bezonk. Op enkele plaatsen, zoals in Zuid-Limburg, zijn de resultaten van het op aarde algemene proces van landschapsvorming door afbraak te zien.

In principe kan, bij de verklaring van de vormen van vele landschappen, uitgegaan worden van een vlak landgebied dat uit zee oprijst. De landschapsvormende krachten gaan dan aan het werk om dit vlakke landoppervlak te modelleren tot een 'landschap'. Het landschap verandert in de loop van de tijd: de afbrekende krachten zullen hoogteverschillen in het landschap aanpakken, het landschap wordt vervlakt en verlaagd. Het eindstadium van het landschap is een vlakke die nabij het zeeniveau ligt. Deze landschapsontwikkeling voltrekt zich ook



De natuur als sloper

als een continue cyclus van verplaatsing van gesteentemateriaal op aarde, van afbraak (dat voornamelijk plaatsvindt op het landoppervlak) en opbouw (dat voor een belangrijk deel gebeurt door het afzetten van sedimenten op de zeebodem). Afb. 1.



Afb. 1. Verwerking, transport en afzetting.

Van deze 'gesteentecyclus' kunnen wij een klein deel zien: de afbraak voltrekt zich voor onze ogen. Veelal gaat het proces onmerkbaar langzaam, soms ook spectaculair en onheilspellend snel. Omgekeerd kunnen we aan de hand van de landschapsvormen de processen die zorgen voor de afbraak volgen. Dit deel van de gesteentecyclus speelt zich af aan het aardoppervlak en voltrekt zich doordat er krachten van buiten af op het aardoppervlak inwerken. Deze processen worden dan ook tot de externe of *exogene* processen gerekend. De 'omvorming' van neergelegd zacht slib tot harde gesteenten en andere veranderingen die gesteenten op hun tocht diep door de aardkorst kunnen ondergaan, zijn processen die zich aan onze waarneming onttrekken en soms heel moeilijk voor te stellen zijn. Dit zijn processen die zich voltrekken in het inwendige van de aardkorst, zij behoren tot de zogenoemde interne of *endogene* processen van de aarde.

Voor de vorming van een landschap, bijvoorbeeld door het uitslijpen van rivierdalen, is het nodig dat het gesteente van het landoppervlak kapot gemaakt wordt en dat het gesteente 'puin' dat zo ontstaat wordt weggevoerd. Hierbij spelen twee afzonderlijke processen een rol, te weten de **verwerking** en de **erosie**. Verwerking en erosie zijn belangrijke geologische processen, zij zijn onderdelen van een veel groter, cyclisch verlopend proces. Een resultaat van de afbraak van het landoppervlak is te zien als een rivier in zee uitkomt: het rivierwater is geladen met slib en daardoor troebel en gelig, bruinig of grijs gekleurd; het is duidelijk te onderscheiden van het heldere zeewater. De rivieren brengen niet alleen zand en klei maar ook mineralen in oplossing naar zee. Het zoete rivierwater bevat altijd zouten als gevolg van de verwerkingsprocessen van de gesteenten op het land.

Rivieren transporteren enorme hoeveelheden afbraakmateriaal, gruis, los materiaal, slib, veelal in de vorm van zand en klei, van het land naar zee. Soms blijft een deel achter op het landoppervlak, bijvoorbeeld in rivierdelta's, zoals in Nederland. Uit het Hol-

lands Diep moeten elk jaar enkele tientallen miljoenen tonnen slib worden weggebaggerd om de rivier bevaarbaar te houden. Per jaar wordt over de gehele aarde ruwweg 8000 miljoen ton aardkorstmateriaal in de vorm van zandig tot kleiig slib door de grote rivieren naar zee gebracht. Daar komt nog bij een jaarlijkse hoeveelheid van rond de 2500 miljoen ton materiaal dat in oplossing wordt afgevoerd. Daardoor wordt het gehele aardoppervlak vele millimeters tot enkele centimeters per eeuw 'afgeschaafd'.

Het continentale oppervlak heeft een gemiddelde hoogte van slechts 800 meter. Door het wegvoeren van het materiaal door de rivieren kan in een periode van 50 tot 150 miljoen jaar alle continentale oppervlak in zee verdwenen zijn. Het continent zal dan gereduceerd zijn tot een platte vlakte die net boven of net onder water ligt en uiteindelijk geheel onder water verdwijnt. Dit is een, geologisch gezien, zéér korte periode. De aarde is veel en veel ouder dan een honderdtal miljoenen jaren. Het zou dus voor de hand liggen dat het continentale oppervlak volkomen afgesleten en vlak zou zijn en zelfs voor het overgrote deel onder water zou liggen. We kunnen echter duidelijk zien dat dit beslist niet het geval is. De aarde vertoont zelfs op het ogenblik veel gebieden met een sterk reliëf.

Uit de snelle afbraak van het continent en het feit dat er blijkbaar telkens weer nieuw reliëf op het aardoppervlak ontstaat moeten we wel concluderen dat er ook een doorlopend proces van opbouw van de aardkorst werkzaam is. De opbouw van het continent wordt onder meer verzorgd door de zogenoemde tektonische processen, waarvan de gebergtevorming de belangrijkste is. Zo wordt ook het proces van landschapsvorming een onderdeel van een voor de aardbol karakteristieke eigenschap: die van het bewegen van de aardkorststukken, verklaard door de theorie van de plaattektoniek.

De afbraak

Verwerking

De verwerking omvat een aantal processen die gesteenten ter plaatse kapotmaken. We onderscheiden mechanische (fysische) en chemische verweringsprocessen.

- Mechanische processen

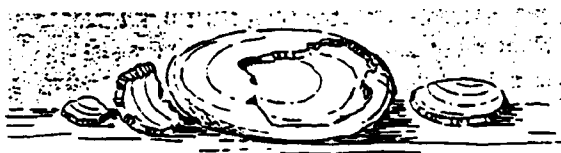
Eén van de mechanische verweringsprocessen is de *insolatie*: een gesteente wordt overdag door de zon verwarmd, waardoor het uitzet. 's Nachts koelt het gesteente weer af en daardoor krimpt het. Door dit uitzetten en inkrimpen ontstaan grote spanningen, waardoor ook het meest harde en massieve gesteente eens breekt.

Een gesteente bestaat vaak uit verschillende mineralen die niet op dezelfde wijze uitzetten en krimpen. Zo kan een gesteente door de insolatie tot gruis (= losse kristallen of korrels) uiteenvallen. Het proces van insolatie is zeer effectief in de woestijn, hier komen extreme temperatuurverschillen voor: overdag wordt het gesteente verhit tot wel 80°C, 's nachts kan het vriezen. Hierdoor springen de rotsen en de knallen hiervan zijn dan ook in de woestijn regelmatig te horen. Een grote hulp is een koude regenbui. Het gesteente schrikt zich (letterlijk) te barsten; het water dringt in scheurtjes van het gesteente en tussen de mineralen het gesteente binnen. Zo wordt de buitenste laag van het gesteenteoppervlak poreus. Het oppervlak kan uiteenvallen in de afzonderlijke kristallen of korrels, maar ook kunnen hele schillen van het gesteente los raken. Op de wijze als bij een ui kunnen van de gesteenten centimeter-dikke schalen afgepeld worden. Dit proces is de *bolschaalverwerking* of *exfoliatie*. Deze vorm van verwerking komt vooral voor in subtropisch klimaat bij massieve gesteenten, dat wil zeggen dat zij geen gelaagdheid hebben. Afb. 2.

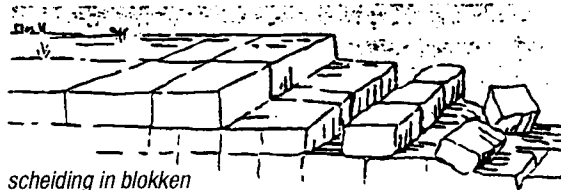
Niet alleen in de woestijn werkt de insolatie, ook in koude gebieden splijten gesteenten door de temperatuurverschillen: koude



uiteenvallende korrels



bolschaalverwerking



scheiding in blokken



versplintering

Afb. 2. Mechanische verwerking.

en nog veel sterker extreme koude hebben hetzelfde effect als verwarming: gesteenten versplinteren.

In koude gebieden wordt deze vorm van verwerking geholpen door een nog veel effectievere stenenbreker: het bevriezen van barsten van het gesteente. Ijs heeft een volume dat 10% groter is dan dat van water en bevriezend water wrikt massieve gesteenten uiteen.

Door insolatie en vorstwerking ontstaat zeer grof, hoekig, scherpgerand puin (*scree*), dat een dikke laag kan vormen aan het oppervlak van veel bergketens en steile puinwaaiers aan de voet van bergen. De toppen van een bergketen in het hooggebergte krijgen door dit type verwerking hun karakteristieke scherpe uiterlijk als van een zaag.

- Chemische processen

Regenwater is van nature altijd enigszins zuur door opgenomen koolzuurgas uit de atmosfeer. Het zure regenwater tast gesteenten aan. Door chemische reacties met het zuur verandert een gesteente of wordt zelfs gedeeltelijk of geheel opgelost.

Daarnaast bevinden zich in de bodem ook humuszuren en andere organische, zure producten die door de begroeiing en het dierlijk leven in de grond worden gebracht. Zo heeft grondwater vrijwel altijd een zure reactie.

De zuurgraad van een oplossing wordt aangegeven door de dissociatie van water bij aanwezigheid van zuren. Dissociatie betekent dat water (H₂O) wordt 'gesplitst' in ionen die een elektrische lading hebben: H₂O → H⁺ + (OH)⁻. De concentratie van de H⁺-ionen wordt aangegeven door de z.g. pH *).

Water dat neutraal reageert heeft een pH-waarde van 7. Een lager getal geeft aan dat het water zuur is; een hoger getal betekent een basische reactie van het water. In regenwater varieert de pH van 7 tot 5.

*) De hoeveelheid aanwezige H⁺-ionen bepalen de zuurgraad van het water, de pH wordt dan gedefinieerd als de negatieve logaritme van de 10de macht van de concentratie aan H⁺-ionen in een oplossing. Is de concentratie aan H⁺-ionen 10⁻⁷ mol/liter dan wordt gezegd dat het water neutraal reageert, niet zuur, noch basisch. Een H⁺-hoeveelheid van 10⁻⁷ mol/liter betekent een pH van 7. Reageert water zuur dan is de hoeveelheid H⁺-ionen groter, bijv. 10⁻⁶ mol/liter (dus 10x zo groot); de pH bedraagt dan 6.

Een veel sterkere zure reactie treedt op in bijvoorbeeld veenwater en andere gebieden van stagnerend water. De hoeveelheid in het water opgeloste zuurstof wordt snel opgebruikt door het vergaan van afgestorven plantenmateriaal, waardoor er veel zuren in het water ontstaan.

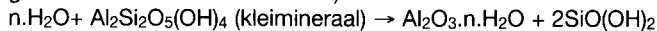
Enkele veel voorkomende chemische reacties zijn:

- volledig oplossen van kalksteen in zuur regenwater. Dit geeft aanleiding tot een groot aantal verschillende verweringsvormen en een karakteristiek landoppervlak in kalksteengebieden. De verweringsvormen in kalksteengebieden worden *karstverschijnselen* genoemd, waar we later op terugkomen.
- veranderen van de veldspaten in kleimineralen. De groep van de veldspaatmineralen is de belangrijkste groep van gesteentevormende mineralen, meer dan de helft van de gehele aardkorst bestaat uit veldspaat. Een graniet bijvoorbeeld bestaat voor een groot gedeelte uit twee vertegenwoordigers van de veldspaatgroep.

De reactie tussen zuur water en een van de veldspaten, in dit voorbeeld de kaliumhoudende orthoklaas, verloopt als volgt:
 $6\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{K}[\text{Si}_3\text{AlO}_8] (= \text{de orthoklaas}) \rightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
 (= een kleimineraal) + $4\text{SiO}(\text{OH})_2$ (kieselzuur) + K_2CO_3 (oplosbaar).
 Deze reactie met albiet (een natriumhoudende veldspaat) geeft opgeloste soda. Die met anorthiet, een calciumhoudende veldspaat, geeft opgeloste calciumbicarbonaat ('kalkwater').

De kleimineralen zijn plaatjes die slechts enkele m (duizendste mm) groot zijn. Zij worden als een colloïdale oplossing vervoerd. De oplosbare natrium-verbindingen worden afgevoerd naar zee; de kalium-verbindingen worden grotendeels in de grond vastgehouden. Chemische verweringsreacties zijn aldus de voornaamste bron van het zout in de oceanen.

Dan volgt in een warm klimaat een verdere hydrolisering (toevoegen van water aan de mineralen):



Nu ontstaat er uit het kleimineraal aluminiumoxide. Dit mineraal is onoplosbaar en slaat neer in de grond. Eenzelfde reactie vindt plaats met ijzerhoudende mineralen (bv. biotiet) en hier wordt de onoplosbare ijzer-'roest' gevormd.

In tropische- en subtropische gebieden met een afwisseling van zware regens en droge perioden vindt een concentratie plaats van chemische bestanddelen dicht onder het oppervlak. Door de sterke verdamping van het water in de droge perioden beweegt het grondwater omhoog om het verdampende water aan het oppervlak aan te vullen. Met het grondwater worden mineralen meegevoerd waarvan de minst oplosbare bestanddelen dicht onder het oppervlak neerslaan. De slecht oplosbare aluminium- en ijzeroxiden vormen zo een harde, ondoordringbare korst aan het aardoppervlak: de zogenoemde laterietbodern. De grond boven de laterietlaag krijgt geen water met voedingsstoffen meer aangevoerd uit de diepte en wordt onvruchtbaar. De laterietlaag laat geen water meer door en de erop liggende grond spoelt weg. Enorme gebieden in de warme streken op aarde zijn onbruikbaar voor iedere vorm van cultivatie door de aanwezigheid van de lateriet.

Als de lateriet veel aluminiumoxide bevat dan kan deze een waardevol aluminiumerts zijn: bauxiet.

In warme, vochtige gebieden verlopen chemische reacties snel. In het tropisch regengebied, de savannegebieden en de subtropische streken overheerst de chemische verwerking. In een vochtig, warm klimaat kan de verwerking zeer diep in de gesteenten doordringen; massieve gesteenten zijn tot tientallen meters diepte 'verrot'.

Rivieren in vochtige tropische gebieden zien bruin en geel van kleilig slib. De modder komt vooral van de kleimineralen die het resultaat zijn van de chemische verwerking van veldspaten. Chemische verwerking is minder belangrijk in een droger en kouder klimaat.

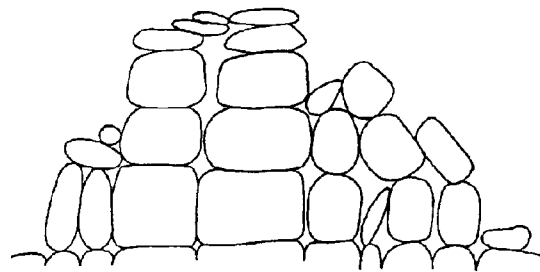
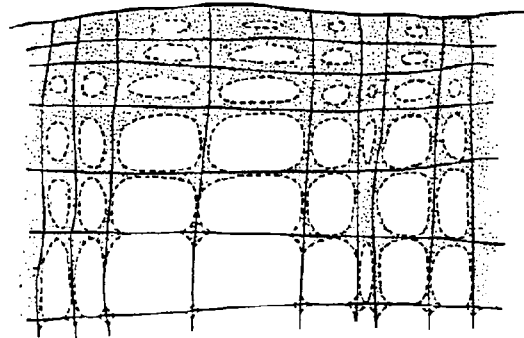
Alle mineralen kunnen worden geoxideerd, gehydrateerd of gehy-

droliseerd en opgelost, behalve kwarts en sericiet-achtige glimmer, deze mineralen zijn bestand tegen chemische verwerking.

Massieve gesteenten (bijvoorbeeld graniet) en kalksteen (een hard en bros gesteente) hebben vrijwel altijd barstensystemen, die ontstaan door relatief geringe spanningen in de aardkorst. Er ontstaan vaak netwerken van barsten, waarlangs nauwelijks of geen beweging optreedt, de *diaklazen*.

Langs diaklazen dringt water het gesteente binnen en zorgt daar voor verweringsreacties. Nog sneller gaat de aantasting langs kruispunten van barsten. Hier verweert het gesteente sneller en zo worden de hoeken van de delen tussen de barsten afgerond. Zo zullen er afgeronde delen en soms prachtige ronde ballen overblijven. We spreken in het laatste geval van *sferoïdale verwerking*, of *wolzakverwerking*. Het is een karakteristiek verweringsbeeld voor graniet in warmere streken.

Stapels wolzakken heten *tors*. Hoewel de tor is genoemd naar typerende verweringsvormen in Zuidwest-Engeland, vindt de verwerking tot tors niet plaats onder het gematigde klimaat aldaar. Het is een vorm van chemische verwerking die hogere temperaturen nodig heeft en dit verwerkingstype is karakteristiek voor subtropische omstandigheden. Afb. 3.



Afb. 3. Vorming van de "tor". Graniet wordt langs de diaklazen verweerd. Onderaan: niet verweerde graniet met zijn diaklazensysteem; naar boven, naar het aardoppervlak toe gaande worden de fragmenten van de graniet steeds kleiner. Bij wegspoelen van het verweringsgruis blijven de vele meters hoge stapels van ronde granietblokken achter, de "tors".

Karstverwerking

In kalksteengebieden komen vele verweringsstructuren voor die typerend zijn voor de chemische verwerking van het kalkgesteente. De oorzaak is het oplossen van kalksteen door water. Kalksteen lost echter beslist niet op in gewoon water, echter wel in zuur water en het koolzuurhoudende regenwater kan kalksteen snel oplossen. De reactie is: CaCO_3 (kalk) + H_2O + $\text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}[\text{HCO}_3]_2$, de laatste verbinding is oplosbaar in water. Het is een chemisch proces dat, zoals iedere chemische reactie, sneller verloopt bij hogere temperatuur. Het zijn de warmere gebieden op aarde, zoals de mediterrane en subtropische klimaatgordels, waar spectaculaire resultaten van deze kalkverwerking te zien zijn.

Ook voor kalksteen geldt dat de oplossing langs de barsten, de diaklazen, het snelst verloopt. Er ontstaat een oppervlak met een netwerk van decimeters tot meters diepe geulen, gescheiden

door soms vlijmscherpe randen. Dit wordt een *karrenoppervlak* genoemd. Regenwater dat over een massief kalkoppervlak loopt lost dit ook op en er kan een stelsel van evenwijdige smalle richeltjes ontstaan: de *lapies*.

Grotten ontstaan door grootschalige oplossing van kalk door onderaards stromend water. Door de onderaardse oplossing van de kalk kunnen trechtervormige inzakkingen aan het oppervlak ontstaan: *dolines*.

Een *doline* is enkele meters tot enkele honderden meters in doorsnede; een doline van grotere afmetingen heet een *polje*. Doline en polje bieden vaak de enige mogelijkheden tot landbouw in de veelal kale en droge kalkgebieden. In de doline worden zand en klei samengespoeld die altijd wel in geringe hoeveelheden in de kalk aanwezig zijn en die achterblijven als de kalk oplost.

Kalk lost op in regenwater doch kan even snel uit de oplossing weer neerslaan als er water verdampt. De reactie verloopt dan andersom als bij het oplossen: $\text{Ca}[\text{HCO}_3]_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$. Dit wordt gedemonstreerd aan de afzettingen van kalksinter of travertijn uit het warme water van een bron in een kalksteengebied.

Daarnaast vindt kalksintervorming op grote schaal plaats in warme gebieden op aarde waar regenwater met opgeloste kalk loopt over het gesteenteoppervlak dat vlak voor een regenbui nog werd beschenen door de felle zon: het water verdampt op het warme gesteente en er slaat kalksinter neer aan het oppervlak. Zo ontstaan de zogenoemde *caliche-afzettingen*: korsten van kalksinter die grote gebieden bedekken, onder meer in de mediterrane landen.

Hulp van organismen

Ook het leven helpt mee aan de vertering van gesteenten; veel organismen scheiden zuren af die het gesteente aantasten. Een spectaculair voorbeeld van de kracht van een teer plantworteltje is het grote rotsblok dat gespleten is door een boomwortel.

We hebben uitgebreid aandacht besteed aan verteringsprocessen omdat de resultaten van vertering in de natuur op vele plaatsen heel illustratief te zien zijn. Daarnaast kunnen we ook aan door de mens gebouwde kunstwerken de invloed van verterende krachten bemerken.

Tezamen met de tweede serie van afbrekende krachten die hieronder aan de orde komen wordt het overgrote deel van de landschappen op aarde gevormd. Vertering en erosie behoren tot de meest aanschouwelijke en begrijpelijke geologische processen.

Erosie

Door de verteringsprocessen ontstaat een grote variatie aan afbraakproducten: van huizengrote brokken gesteente tot zeer fijne slibdeeltjes die in water zweven; zelfs wordt een deel van de aardkorstgesteenten opgelost.

De verteringsproducten blijven niet liggen op de plaats waar zij ontstaan, er is een veelheid van krachten op het aardoppervlak aan het werk die het materiaal opnemen, vervoeren, sorteren en tegelijkertijd verkleinen. De transporterende krachten zijn: de waaiende wind, het stromende water en het voortschuivende ijs. Een belangrijke aandrijvende kracht voor de laatste twee transporteurs is de zwaartekracht, die zijn vervoerend werk ook alleen doet.

Tijdens het vervoer worden de brokstukken verkleind en afgerond, onder meer doordat zij tegen elkaar aan botsen. Het transporterende medium heeft daarnaast nog een zeer belangrijke functie: met zijn 'lading' aan meegevoerde stenen of zandkorrels wordt het vaste gesteente van het landoppervlak weggeslepen. Alleen met behulp van deze 'tanden' kan de rivier zijn kloofdal vormen en de gletsjer zijn U-vormige gletsjerdal.

De afbraak van het landoppervlak door de transporterende krachten met behulp van het meegevoerde verteringspuin is de erosie.

Erosieprocessen hebben een meervoudig effect:

- het door vertering geproduceerde materiaal wordt weggevoerd,
- tijdens het transport wordt het meegevoerde materiaal verder verkleind en worden de fragmenten afgerond,
- met behulp van het meegevoerde materiaal worden vaste gesteenten van het aardoppervlak afgeslepen,
- het afbraakmateriaal wordt weggevoerd en daardoor krijgen de verterende krachten de mogelijkheid tot verdere afbraak van de gesteenten van het landoppervlak.

NB: Er is een belangrijk onderscheid tussen vertering en erosie:

- vertering (de term verwijst naar de invloed van het weer – vertering; in het Engels is het duidelijk: *weathering*) voltrekt zich ter plaatse,
- erosie (het '*eruit wegvreten*') gaat altijd met transport gepaard!

- Water, de belangrijkste transporteur

Het over het landoppervlak stromende water neemt het leeuwendeel van het transport van afbraakmateriaal voor zijn rekening. Het water dat na een regenbui als een film over het oppervlak wegloopt, zich in kleine stroompjes verzamelt en aangroeit tot een machtige rivier, voert afbraakmateriaal met zich mee. Er worden grote brokken verplaatst in de snelstromende bergbeek; de grote, brede, traag stromende rivieren van het laagland vervoeren fijn-zandig en zeer fijn-kleilig slib. De transportcapaciteit van een rivier is voornamelijk afhankelijk van de hoeveelheid water. Het transport vindt plaats door oplossing, zwevend in suspensie, door *saltatie* (springend) en rollend over de bodem.

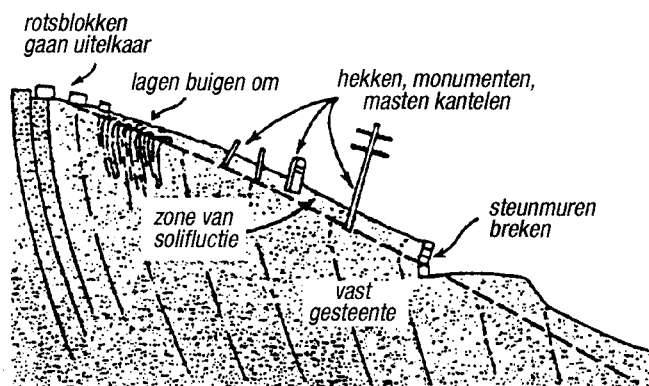
Rivieren zijn de belangrijkste transporteurs van afbraakmateriaal. Zuiver water, ook al stroomt het nog zo hard, heeft vrijwel geen mogelijkheden tot het wegslijpen van gesteente. Alleen water dat slib vervoert en aldus 'gewapend' is met de 'tanden van zijn lading' is in staat gesteenten af te slijpen. De slijpende werking van water noemt men *corrasie*.

- Zwaartekracht

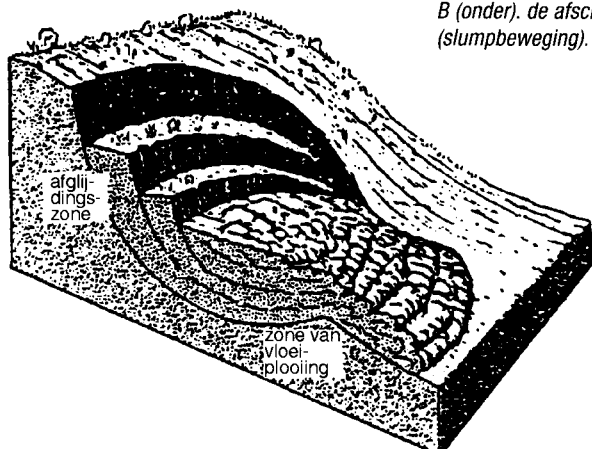
De zwaartekracht moet eigenlijk in de eerste plaats worden genoemd, het is in veel gevallen de eerste erosiefactor waarmee veel fragmenten te maken krijgen. Daarnaast is het de aandrijving voor andere erosiekrachten: water en ijs stromen onder invloed van de zwaartekracht. Gesteentebrokken die van een bergtop of helling beschikbaar komen door de vertering vallen naar beneden en op dat moment is de erosie al aan het werk in de vorm van de zwaartekracht. Tijdens het vallen of rollen springen er al fragmenten van zowel het vallende rotsblok als van reeds op de helling liggende stukken af en zo wordt aan alle voorwaarden voor een erosieproces voldaan.

Zeer belangrijk zijn de zogenoemde *hellingprocessen*: alle materiaal dat op een helling ligt beweegt zich hellingafwaarts. Dit gebeurt overal, op de hellingen van ongeconsolideerd zand van de Utrechtse Heuvelrug en de massieve gesteentemuren van de Himalaya. Deze beweging kan uiterst langzaam gaan, er kunnen ook plotseling grote massa's materiaal van een helling afstorten. Hellingprocessen zorgen voor een vlakker worden van hellingen in het landschap. Duidelijk zichtbaar is de beweging van de bodemlaag, van de verteringslaag, waarbij vaak ook het onderliggende vaste gesteente wordt meegenomen. Dit is de kruip (*creep*) van de bodem, zichtbaar aan het scheefstaan van bomen en palen.

Een karakteristiek resultaat van de creep van met gras begroeide hellingen is het 'rimpelen' van de grond, vaak in de vorm van de zogenoemde *schapenpaadjes*. Afb. 4 A.



Afb. 4. A. Resultaten van de kruip (creep); B (onder). de afschuiving (slumpbeweging).



Bij een snellere beweging raakt het verband uit de grondlaag; er ontstaan scheuren en grote delen kunnen dan wegzakken langs lepelvormige breukvlakken. Van de kusten van Het Kanaal tot de zijanten van een opgespoten dijk voor een Nederlandse weg zijn deze zogenoemde *slump*-bewegingen te zien. Afb. 4 B. Spectaculair is het afstorten van grote massa's gesteente van een steile helling: de *bergstorting*.

- Wind

Wind heeft een veel beperktere mogelijkheid tot transport dan water, de wind kan alleen fijn zand en kleiner materiaal vervoeren. Wel kan fijn stof zeer hoog de lucht in gaan en over enorme afstanden vervoerd worden. Het rode Sahara-stof bereikt enkele malen per jaar ook Nederland.

Fijn zand wordt tot rond de twee meter hoogte opgenomen en voornamelijk door *saltatie* voortbewogen. Kameel en dromedaris zijn zo groot dat ze van het grootste deel van het voortstuwend zand geen last ondervinden.

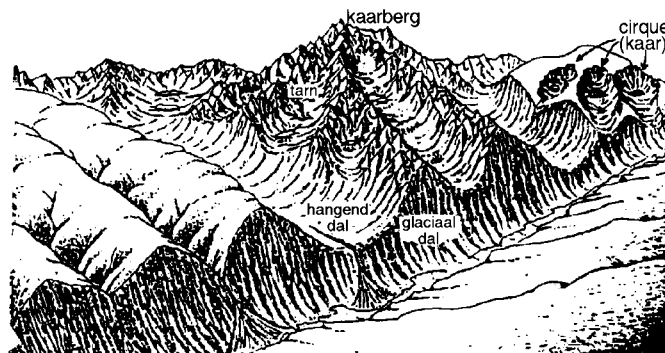
De woestijnwind met zijn 'lading' van fijn zand 'zandstraalt' rotten even boven de grond. Zo ontstaat de paddestoelvorm die karakteristiek is voor winderosie.

- Ijs; de gletsjer

Een gletsjer is een ijsstroom die onder invloed van de zwaartekracht een helling af beweegt. Ijs beweegt zeer langzaam maar is daarnaast wel de meest effectieve eroderende kracht die er op aarde bestaat. Het voortschuivende ijs duwt niet alleen het losse materiaal van het aardoppervlak rigoreus weg, zoals de bodem met de begroeiing, de losse stukken steen die door de verwerking uit de vaste rotsformaties waren ontstaan, alsmede het verweerde gesteente, maar ook niet-verweerd, vers gesteente: grote brokken worden losgewrikt langs de diaklazen. Het ijs laat een kaal, glad tot gepolijst rotsoppervlak achter, dat vaak evenwijdig lopende groeven en krassen vertoont: *gletsjerkrassen*.

Door het ijs worden enorme hoeveelheden materiaal vervoerd,

zowel huizengrote stukken als uiterst fijn vermalen gesteente (= gesteentemeel), alles door elkaar en tegelijk. Ook voor het gletsjerijs geldt, op dezelfde wijze als voor water, dat zuiver ijs alleen weinig kan uitrichten tegen het gesteente waar het overheen stroomt. De intensieve schurende en slijpende werking van de gletsjer wordt dan ook verzorgd door brokken gesteente die door het ijs worden meegevoerd en die over de rotsbodemschrapen. Afb. 5. Gletsjers en ijskappen hebben een zeer grote invloed op het



Afb. 5. Glaciale vormen: gletsjerdalen.

landschap. Hoewel het grote ijsdek van de Pleistocene 'Ijstijd' reeds vele duizenden jaren verdwenen is, tonen landschapsvormen in Noord-Europa en rond de gebergtegebieden in heel Europa nog altijd heel duidelijk de sporen van het ijs met de 'U'-vormige dalen en gladgeslepen gesteenten.

- De mens

Zeer korte tijd geleden, geologisch gezien nog 'vandaag', is er een belangrijke verweringskracht bijgekomen die aanzet geeft tot de meeste intensieve, snelle en spectaculaire erosieprocessen: de mens. Zoals in alle bemoeienissen van de mens met de natuur gebruikt de mens natuurlijke processen of zet processen in gang die zonder zijn tussenkomst zich ook voltrekken. Het grote verschil is echter dat deze processen door de mens worden versneld, vaak zodanig dat de natuur zijn grip op het proces gaat kwijtraken. De mens heeft in de meeste gevallen niet geleerd om natuurlijke processen te gebruiken om ontspoorde aardse ontwikkelingen weer in het gareel terug te brengen. Een zeer belangrijke factor voor een sterke toename van de erosie is ontbossing in de warmere klimaatgebieden op aarde, al dan niet om landbouwgrond of weiden te verkrijgen. Door de ontbossing wordt de bescherming van de bodem door de vegetatie weggenomen. Onoordeelkundig grondbeheer, vaak in combinatie met begrazing door schapen en geiten of overbegrazing door ander vee geeft desastreuze resultaten die op zoveel plaatsen te zien zijn: de grond wordt weggespoeld, er ontstaan imposante erosielandschappen, de zogenoemde *badlands*, en uiteindelijk komt de kale rotsbodems te voorschijn.

Door het verdwijnen van de vegetatie wordt het klimaat extremer. Het regulerend effect van de vegetatie op regenval en temperatuur verdwijnt, het klimaat kan droger worden omdat de verdamping door de vegetatie wagt (dit is een belangrijke factor voor het vochtige klimaat in het tropisch oerwoud). Een kaal landoppervlak wordt overdag veel en veel heter dan een begroeide bodem, bewegingen in de atmosfeer worden daardoor sterker en zo ontstaan er heviger buien die met nog meer kracht de grond bewerken, waardoor de afspoeling alleen maar toeneemt.

Landschapsvormen die door erosieprocessen ontstaan

Dalvormen

We leerden het op school: een rivierdal heeft in doorsnede een

V-vorm en een gletsjerdal een U-vorm. De eerste stelling is niet waar, de tweede slechts ten dele.

- Het rivierdal

Een rivier stroomt in een rivierdal; dit dal heeft de rivier ingesneden in het landoppervlak. De vorm van een rivierdal wordt in het algemeen aangeduid als een V-vorm, met veelal rechte hellingen die een hoek maken van rond de 30° als de grond zacht is en die veel steiler kunnen zijn als er harde rotsbodemplakken in de dalhellingen aanwezig is. Waar de wanden van het dal in een punt bijeenkomen stroomt de rivier in zijn bedding.

Het zal niet moeilijk zijn om in te zien dat dit 'karakteristieke' V-vormige rivierdal niet kan worden gemaakt door de rivier alleen. Een rivier is slechts in staat om een smalle kloof met verticale wanden uit te slijpen ter breedte van de waterloop zelf.

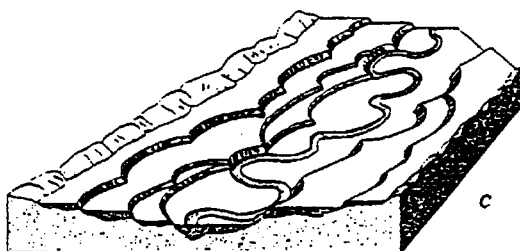
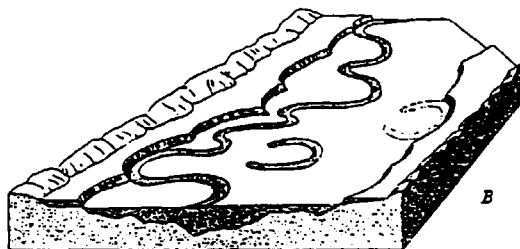
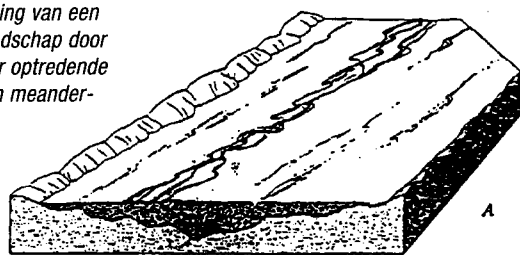
De vorming van een kloofdal is vooral in gebieden met harde rotsen fraai te zien. De wanden van de Aare-schlucht tonen door de gladde, hol-geslepen nissen hoe het kolkende water de kloof eens heeft uitgeslepen. 'Karakteristieke' riviererosie beperkt zich dus tot vorming van een verticale kloof. Dit hoeft niet eens in harde rots te gebeuren, ook de Geul in Zuid-Limburg slijpt een kloof uit, al bereikt deze slechts een diepte van twee meter voordat de wanden inzakken.

Het inzakken van de wanden van het Geuldal geeft dan meteen aan wat de belangrijkste factor voor de vorming van het V-vormige dal is. De V-vorm ontstaat alleen met hulp van andere geologische verwerings- en erosieprocessen, dus de hellingprocessen, d.w.z.: door afspoelen en inzakken van de helling door kruip, slumping, aardverschuiving, bergstorting, enz. Dit gebeurt zowel in zachte grond alsook in harde gesteenteseries. De taak van de rivier is om het van de helling naar beneden schuivende en rollende materiaal weg te voeren.

Een rivierdal ontstaat alleen als de rivier kracht genoeg heeft om zich in het landoppervlak in te snijden. Dit is dus een algemeen verschijnsel in gebieden met veel reliëf: in gebergtegebieden en heuvellanden. Komt de rivier uit in een vlak laagland dan vermindert de stroomsnelheid. De rivier heeft nu geen kracht meer tot verticaal insnijden.

Een belangrijke factor die het verdere verloop van de riviererosie

Afb. 7. Vorming van een terrassenlandschap door telkens weer optredende insnijding en meander-vorming.

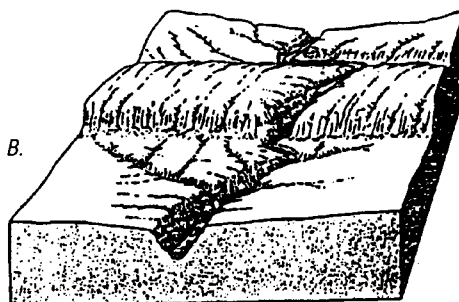
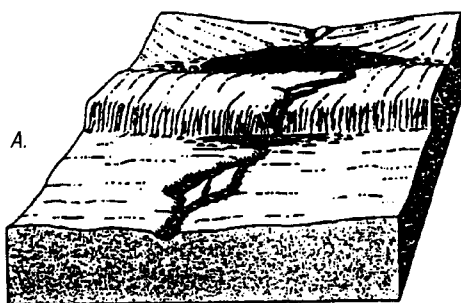


bepaalt is, dat water echter nooit rechtuit stroomt, maar altijd gaat slingeren. Dit gebeurt in zowel verticale als in horizontale zin. De horizontale slingerbeweging van de waterstroom zorgt voor wegslijpen van de rivieroever op bepaalde plaatsen.

De rivier zal zijn loop nu, in plaats van in verticale richting, in horizontale richting gaan verleggen door te meanderen. Afb. 6. Door de vorming van meanders ontstaat een brede riviervlakte die vele tientallen kilometers breed kan worden. Tijdens het

meanderen verplaatst de rivier voortdurend het sediment van zijn meandervlakte, zoals grind, zand of kleislib, en zo ontstaan uitgestrekte pakketten van riviersedimenten. Een meandergordel ontstaat niet alleen in het mondingsgebied van de rivier. Ook elders in zijn stroomgebied kan de rivier een obstakel ontmoeten waardoor de hoogteverschillen wegvallen, de stroomsnelheid afneemt en - tijdelijk - de insnijdende werking stopt. Ook achter een dergelijk plaatselijk erosiebasisniveau kan de rivier dan een meandergordel vormen. Een voorbeeld is de brede meandergordel van de Bovenrijnse vlakte ten zuiden van Frankfurt en Mainz, waar de Rijn door het harde massief van het Rijnleisteengebergte werd belemmerd in zijn insnijdingswerk.

Als door bewegingen in de aardkorst, zoals een opheffing van het vlakke gebied, de hoogteverschillen toenemen en de rivier weer kracht krijgt om in te snijden dan kan in de meandervlakte op een lager niveau weer een meanderdal ontstaan. De overblijfselen van de vroegere

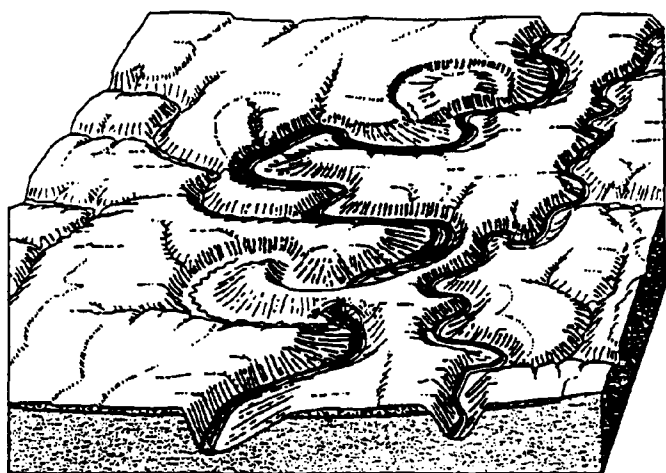


Afb. 6. Landschapsvormen als resultaat van opheffing en riviererosie: A. Een landgebied met een rand van hard gesteente. B. Het gebied wordt opgeheven en de rivieren gaan zich insnijden. C. De hoofdriever snijdt niet verder in en gaat meanderen. D. Het dal van de hoofdriever en dat van enkele zijrivieren zijn meandervlakten geworden.

meandervlakte die nu als vlakke gedeelten aan de randen van de nieuwe meandervlakte aanwezig zijn, heten *riverterrassen*. Er zijn vele plaatsen op aarde bekend waar een groot aantal terrassen boven elkaar voorkomen. Mooie voorbeelden vinden we ook in Nederland: de terrassen van de Maas en die in het dal van de Geul in Zuid-Limburg. Afb. 7.

Een meanderende rivier is dus typerend voor een laagland of voor een gebied met zeer weinig hoogteverschillen. Een meanderende rivier in een diep dal met steile hellingen is dus een abnormale situatie. Toch komt dit veel voor: in de Eifel de Lieser; de Rijn in het Rijnleisteengebergte; in de Ardennen een van de fraaiste voorbeelden: de Semois.

Deze rivieren stroomden, geologisch gezien zeer kort geleden, nog met brede meanders over een vlak, laagliggend gebied. Dit gebied werd opgeheven en wel met een relatief grote snelheid. De rivier kreeg geen gelegenheid om zich aan te passen en kon



Afb. 8. Ingesneden meanders in een hoogvlakte.

niet anders dan zich, met zijn bestaande loop, insnijden in het oprijzende vlakke land. Dit is bepaald een weinig efficiënte zaak: de rivier moet onnodig veel materiaal wegslijpen door zijn veel te lange kronkelloop. Dat de rivier nog kort geleden over een vlakke stroomde is in de genoemde gebieden vaak te zien: als men in de Ardennen uit een imposant diep rivierdal omhoog klimt kijkt men uit over een vlak landschap. Dit is dan de rest van een landoppervlak dat, veelal nog in het jongere deel van het Tertiair, op een veel geringere hoogte lag en tijdens de afgelopen paar miljoen jaar is opgeheven, tot vele honderden meters hoogte. Afb. 8.

- Het gletsjerdal

Het gletsjerdal wordt gemaakt door de gletsjer zelf: het toont gladde, steile, geslepen wanden en een gelijkmatig rondlopende bodem. Vorm en wanden van het dal worden gemaakt door het schuren van het ijs met stukken gesteente langs de wanden. Vaak is het verschil met de wanden boven de - vroegere - ijsstroom duidelijk: daar zien we ruwe vormen door de vorstverwerking.

Diepte en grootte van het gletsjerdal zijn evenredig met de grootte van de gletsjer. Veel gletsjerdalen hebben geen echte U-vorm, maar een ondiepe komvorm. De aanduiding *kettingprofiel* voor de verschillende vormen van doorsneden van gletsjerdalen is dan ook meer op zijn plaats.

Glaciale landvormen

Wanneer een grote ijskap een landoppervlak bedekt zal het ijs dit afschaven tot op de harde rotsbodem. Het landoppervlak krijgt een golvend karakter: harde gesteenten steken als afgeronde bulten omhoog, zachte formaties worden tot grote diepte uitgeslepen.

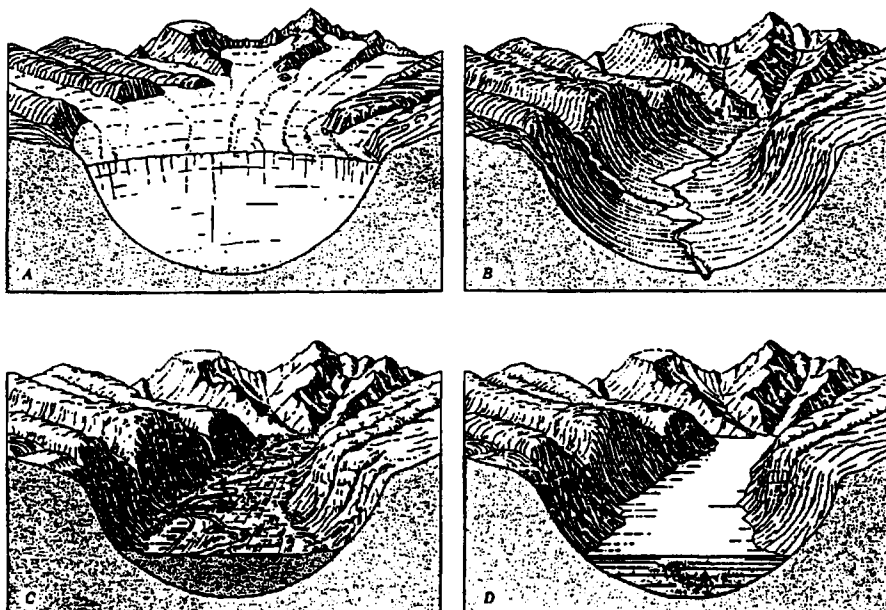
Een landschap dat onder het ijs vandaan komt heeft een zeer onregelmatige vorm; de door het ijs uitgeslepen depressies worden gevuld met water en zo ontstaan de zeer onregelmatige merengebieden van delen van Scandinavië, het noorden van Polen, het noordwesten van Rusland, enz. Ook de grote meren van Zwitserland zijn door gletsjertongen uitgeslepen kuilen in het landoppervlak.

Een gletsjer die door een rivierdal omlaag stroomt verandert dit dal sterk van vorm, het V-vormige rivierdal dat vrij steile, rechte hellingen vertoont zal, naast verdiept, vooral sterk verbreed worden en de typerende kettingvorm krijgen.

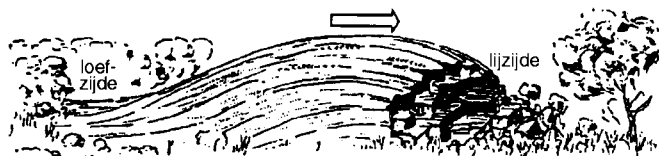
Omdat de erosiemogelijkheden van de gletsjer sterk afhangen van de dikte van de ijsstroom, zal een kleine zijgletsjer nooit zo diep in het landoppervlak insnijden als een grote hoofdgletsjer. De zijgletsjer komt dan ook vaak op een veel hoger niveau in het hoofddal uit. Dit verschijnsel van de zogenoemde 'hangende dalen' is karakteristiek voor een gletsjerlandschap; het verschijnsel zal bij een rivier vrijwel nooit optreden. Zie afb. 5.

Een kleine gletsjer die tegen een rotswand aan blijft zitten, zal deze wand uitslijpen. Hierbij ontstaat een zeer steile nis in een rotswand, waarvan het hogere gedeelte van de helling zeer steil en vaak verticaal is. Aan de onderzijde van de nis is vaak een depressie gevormd en is vaak een wal aanwezig van door de gletsjer neergelegd puin. Achter deze wal kan water blijven staan en zo vormt zich in deze zogenoemde *kaarnis* of *cirque* een kaarmeertje; de cirque of kaarnis wordt gevormd door de kaargletsjer. Afb. 9 geeft enkele fasen van deze ontwikkeling weer.

Een rotsbodem waarover een gletsjer heeft gestroomd vertoont afgeronde vormen, heuvels van harde gesteenten zijn glad en afgerond. Deze heuvels hebben soms een langgerekte vorm, de lengteas loopt evenwijdig met de stroomrichting van het ijs, de voorzijde van de rotsbult (dus de richting waarvandaan het ijs kwam aanstromen) is glooiend; aan de achterzijde kan het ijs gesteentebrokken wegrukken en kan een ruwe, brokkelige steilwand ontstaan. Dit is een *roche moutonnée*. Afb. 10.



Afb. 9. Ontwikkelingsfasen van een gletsjerdal



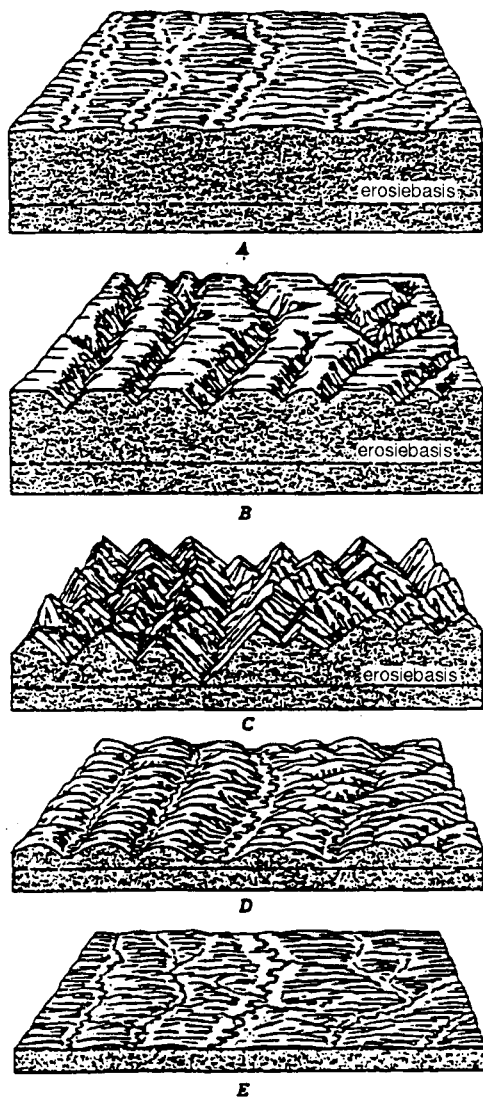
Afb. 10. Roche moutonnée

Een steile of vlakke dalhelling?

Het klimaat is in sterke mate bepalend voor de vorm van hellingen: zacht glooiend of steil.

In een vochtig klimaat, waar veel regen gelijkmatig valt, zoals in een gematigd klimaat, is de bodem tot grote diepte met water verzadigd en zal het kruipen van de bodem een zeer belangrijk proces zijn. Door de smerende werking van het vele water tussen korrels en fragmenten van de grondlaag kan deze over een groot gebied 'uitlopen' en een zeer vlakke helling vormen. waardoor een golvend landschap ontstaat met zwak glooiende hellingen. Een voorbeeld van dit type van landschapontwikkeling geeft de serie figuren van afb. 11.

Denudatie in de gematigde klimaatzone voltrekt zich dan ook grotendeels door het gelijkmatig verlagen van de hellingshoek van hellingen.



Afb. 11. Ontwikkeling van een opgeheven erosievlakte (A) tot een nieuwe erosievlakte op een veel lager gelegen niveau (E).

In een warm, vochtig, tropisch klimaat is de chemische verweering zeer belangrijk en zal een dikke laag van sterk verweerd gesteente ontstaan. Door het enorm vochtige klimaat zou verwacht mogen worden dat ook hier de kruip zeer belangrijk is en dat er een glooiend landschap ontstaat. Toch geven vele gebieden in de tropen soms een uiterst sterk reliëf te zien doordat wegspoelen van het verweringsmateriaal door de grote regenval overheerst boven de kruip. De Andes is een karakteristiek voorbeeld.

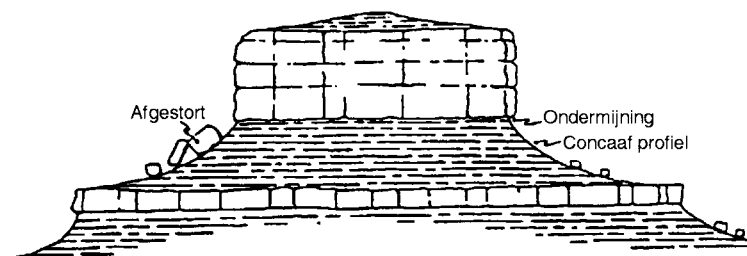
In een meer aride klimaat, bijvoorbeeld het mediterrane klimaat en dat van woestijnen, valt regen in korte, maar uiterst hevige stortbuien. Hier dringt het regenwater nauwelijks of niet in de uitgedroogde bodem en verdwijnt vrijwel alle regenwater door wegstromen over het oppervlak. Slechts een dunne, losse oppervlaktelaag wordt weggespoeld en met de grote snelheden van stroming blijven de hellingen steil; verlagen van de hellingshoek door kruip komt weinig of niet voor.

Denudatie voltrekt zich in een dergelijk klimaat doordat de steile hellingen zich evenwijdig aan zichzelf verplaatsen. Dit wordt wel aangeduid als het *parallele-wand erosietype*. Voorbeelden zijn te zien in *badland*-landschappen van de landen rond de Middellandse Zee.

Steilwanden

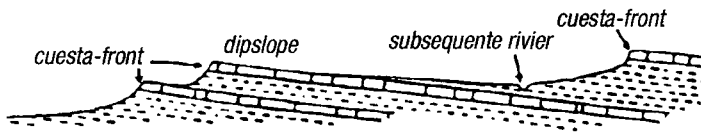
Een steilwand is een zeer steil hellende tot loodrechte, veelal kale rotswand die een hoogte kan bereiken van vele honderden meters. Voorbeelden van steilwanden vinden we aan klifkusten, maar zij komen ook op veel andere plaatsen op aarde voor. Een steilwand ontstaat in het algemeen waar een zachte laag bedekt wordt door een harde gesteentelaag. De onderliggende laag zal sneller eroderen, waardoor de hardere bovenliggende laag ondergraven wordt en er delen instorten; zo zal een steile gesteentemuur ontstaan. De vorming van de steile wand kan worden bevorderd door het voorkomen van vele verticale barsten in het gesteente, de *diaklazen*.

Voor de vorming van de steilwand is het echter niet altijd nodig dat er een onderliggende zachtere laag aanwezig is. Aan de kust is het de branding die een gesteentelaag kan ondergraven. Een voorwaarde voor het blijven bestaan van het kustklif is wel dat het gesteentepuin dat van het klif neerstort door zeestromingen wordt weggevoerd. Dit geldt ook voor een steilwand ergens in het binnenland. Ook hier geldt als voorwaarde voor het voortbestaan van de steilwand dat de rivier aan de basis van de wand het door instorting aangevoerde materiaal kan blijven afvoeren. Anders zal de steilwand veranderen in een glooiende helling. Als een vlak liggende harde laag aan alle kanten ondergraven wordt ontstaat een berg met een platte top die aan alle kanten omringd wordt door steilwanden; dit is een *mesa* of *tafelberg*. Afb. 12.



Afb. 12. Een mesa of tafelberg.

Als het laagpakket helt dan zal er een berg ontstaan die aan één kant een steilwand vertoont terwijl de andere zijde een vlakke helling heeft die min of meer overeenkomt met de helling van de gesteentelaag zelf. Dit is een *cuesta*. Een bekend *cuesta*-landschap vinden we in Noordoost-Frankrijk, waar lagen uit de Jura met een geringe helling naar het zuidwesten hellen; de rivieren die hier in noordwestelijke richting stromen, zoals de Maas, heb-



Afb. 13. Verticaal profiel van een cuesta-landschap, met subsequente rivier; deze stroomt evenwijdig aan de strekking van de gesteentelagen.

ben een dal met een steile westelijke dalwand en een veel geringere helling van de oostelijke dalwand. De oostelijke dalwand wordt min of meer gevormd door een laagvlak, dit wordt een *dip slope* genoemd. Afb. 13.

Landschapontwikkeling in de tijd

Het oppervlak van de continenten krijgt zijn vormenrijkdom grotendeels door de werking van vertering en erosie. Landschapsvormen veranderen in de loop van de tijd door de doorgaande afbraakprocessen. We hebben gezien hoe bijvoorbeeld een rivierdal zich onder een bepaald klimaat in de loop van de tijd ontwikkelt. In het algemeen zullen in de loop van de tijd scherpe toppen afgerond worden en reliëfverschillen verdwijnen. Het landschap wordt vlakker en de vormen glooier. De gemiddelde hoogte van het landoppervlak wordt steeds lager.

Een landschap waarvan de vorming - geologisch gezien - kort geleden is begonnen, zal rivierkloven, steile hellingen en scherpe rotspieken vertonen. Dit wordt een 'jong' landschap genoemd. Als verterings- en erosieprocessen lang voort kunnen gaan, bijvoorbeeld enkele miljoenen jaren, ontstaat een zwak golvend landschap met uitgestrekte riviervlakten die bestaan uit brede meandergordels. Een dergelijk landschap wordt een 'oud' landschap genoemd. Er zijn verschillende typen van oude landschappen. Deze zijn voor een belangrijk deel afhankelijk van het klimaat. De mogelijkheden zijn:

- *penepain* met *monadnock*: een zwak golvende erosievlaakte met een enkele grotere heuvel die uit dit vlakke landschap omhoog steekt. Een penepain is het overblijfsel van een geaccidentieerd landschap door de erosiewijze in een gematigd, vochtig klimaat. In dit klimaat zijn *creep* en *slumping* de belangrijkste hellingprocessen.
- *pediplain*: een uitgesproken vlak landschap tot soms opvallend eindeloze vlakke. Er komen verspreide heuvels of bergen voor met steile hellingen of begrensd door steilwanden. Dit is een restberg of *getuigenisberg*. Deze getuigt van het vroeger zoveel hoger gelegen verdwenen landoppervlak. Deze landschapsvorm is een resultaat van een erosieproces waarbij hellingen steil blijven en zich evenwijdig aan zichzelf blijven verplaatsen; het verschijnsel is karakteristiek voor een aride klimaat.
- *panplain*: deze bestaat uit aaneengesloten riviervlakten.
- *abrasievlaakte*: een opvallend vlak, afgeschaafd gebied ontstaat ook door de werking van golven en zeestromingen vlak onder het zeewateroppervlak, dus in zeer ondiep water.

Een nieuwe cyclus van landschapsvorming kan beginnen als een erosievlaakte (een penepain, pediplain, abrasievlaakte) wordt opgeheven. Dan ontstaan er hoogteverschillen, de rivieren gaan sneller stromen en krijgen weer kracht om zich in te snijden in het landoppervlak.

Ook vinden we vlakke plateau-landschappen waarin verspreid rivierdalen voorkomen met vaak steile hellingen. Deze rivieren kunnen een vrij rechte loop hebben. Dit wijst op een vlak gebied dat uit zee oprijst en waar de rivieren kunnen beginnen aan hun eroderende werk zonder dat zij gehinderd zijn door een vroegere loop. Daarnaast kunnen deze rivieren in een diep, meandervormig dal in het plateau zijn ingesneden. Deze vorm is duidelijk gedictieerd door de loop van de rivier toen hij nog op het erosievlaakte stroomde en geeft dus aan dat het gebied een landgebied was dat werd opgeheven.

In Europa vinden we vele voorbeelden van opgeheven aardkorststukken die vóór het moment van opheffing tot vlakke

gebieden waren afgesloten. Voor mooie, duidelijke voorbeelden hoeven we niet ver van huis te gaan: bijvoorbeeld de Ardennen (een enkele honderden meters opgeheven schiervlaakte met ingesneden meanders) en Bretagne (enkele tientallen meters opgeheven abrasievlaakte). In veel van de gebieden met deze landschapsstructuur in Europa komen delen van de afgesloten romp van vroegere gebergten aan de oppervlaakte, zoals bij de bovengenoemde voorbeelden delen van het Carbonische Variscische gebergte.

GEOCOMpositie 4

Samenstelling en temperatuur van aardkern berekend

Over de aardkern is nog steeds weinig bekend. Het is zelfs pas zo'n 90 jaar geleden dat, dankzij geofysisch onderzoek, duidelijk werd dat er een aardkern bestaat. Nu weten we, ook weer dankzij de interpretatie van de schokgolven die bij grote en diepe aardbevingen ontstaan, dat er een vaste binnenkern is en een vloeibare buitenkern. De samenstelling daarvan is, evenals de daar heersende temperaturen, echter nog steeds een punt van discussie. Wel wordt sinds een jaar of vijftig algemeen aangenomen dat de kern voornamelijk uit ijzer bestaat, met een veel kleinere hoeveelheid (10-12%: alle percentages zijn in moles) nikkel. Daarnaast moeten er nog diverse andere 'verontreinigingen' in de kern voorkomen, want de dichtheid van de binnenkern - zoals die seismisch wordt geïnterpreteerd - is zo'n 2-3% lager dan voor zuiver ijzer, en de dichtheid van de buitenkern is daarvoor zelfs zo'n 5-10% te laag.

Aardwetenschappers en fysici van het University College in Londen hebben nu een berekeningsmethode uitgevoerd (een zogeheten *ab initio* berekening) voor de thermodynamische functies voor zowel de binnen- als de buitenkern, uitgaande van verschillende ijzertemperaturen in de kern. Door te kijken welke berekeningen resultaten opleveren die overeenstemmen met de bekende gegevens, konden ze vaststellen welke legeringen aanwezig moeten zijn. Rekening houdend met de druk ter plaatse konden ze vervolgens ook de temperatuur op de grens tussen binnen- en buitenkern berekenen, uitgaande van de vrij algemeen aanvaarde hypothese dat de vloeibare buiten- en de vaste binnenkern vele honderden miljoenen jaren nodig hebben gehad om zich als zodanig los van elkaar te ontwikkelen.

In principe is het aantal legeringen in de aardkern natuurlijk onbeperkt, wat ook tot een oneindig groot aantal berekeningen zou leiden. Daarom hebben de onderzoekers gebruik gemaakt van gegevens die bekend zijn over de samenstelling van andere hemellichamen, en die gegevens gecombineerd met wat er bekend is over de aardgeschiedenis. Ze kwamen daarbij tot de conclusie dat de 'verontreinigingen' vooral moeten bestaan uit zwavel, zuurstof en silicium. Met de waarschijnlijk vrijwel verwaarloosbare hoeveelheden koolstof en waterstof in de kern hebben ze bij hun berekeningen geen rekening gehouden. Dit type berekeningen vraagt namelijk enorm veel rekencapaciteit. Het resultaat van hun berekeningen is dat de temperatuur op de grens tussen binnen- en buitenkern zo'n 5600 K moet zijn. Verder blijkt eruit dat er in de buitenkern ongeveer 8% zuurstof aanwezig moet zijn en een iets grotere hoeveelheid zwavel en/of silicium. Zuurstof blijkt om allerlei redenen een interessant bestanddeel. Zo lijkt dit element thermodynamisch niet even stabiel in binnen- en buitenkern. Daardoor verdwijnt er meer zuurstof uit de binnenkern dan zwavel en silicium (het zuurstofgehalte in de binnenkern is volgens de onderzoekers nog zo'n 0,3%). Dat levert verschillen op die bijdragen aan de mede door de samenstelling bepaalde convectiestromen die zorgen voor het aardmagnetisch veld.

Alfè, D., Gillan, M.J. & Price, G.D., 2002. Composition and temperature of the Earth's core constrained by combining *ab initio* calculations and seismic data. *Earth and Planet. Sc. Letters* 197, p. 91-98.

A.J. van Loon