

Amarant cursussen

Wat stenen ons vertellen

Geologie van de natuurstenen

Antwerpen, 18.3.2019

Gent, 29.3.2019

Michiel Duser

wetenschappelijk medewerker Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen

gewezen hoofd Belgische Geologische Dienst

gewezen docent UHasselt Fac. Architectuur en Kunst

Inhoudstafel

INLEIDING, verantwoording voor deze cursus	5
De interne dynamiek van de planeet Aarde.....	6
Organisatie van het aardoppervlak : plaattektoniek.....	7
Spreidingsruggen.....	7
Convergerende plaatranden	9
Langs elkaar glijdende platen.....	10
Grote aardbevingen en vulkanisme	11
Gebergtevorming, epirogenese en isostasie.....	11
STENEN EN MINERALEN	12
MINERALEN	12
Definitie	12
Enkele voor de bouw belangrijke mineralen.....	13
Pyriet - FeS_2 sulfiden	13
Hematiet - Fe_2O_3 oxiden	14
Goethiet, Lepidocrociet - FeOOH	14
Calciet - CaCO_3 carbonaten.....	14
Dolomiet - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	14
Gips - $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sulfaten	14
Kwarts - SiO_2 silicaten	15
Veldspaat Kaliveldspaat (Orthoklaas) - KAlSi_3O_8	15
Plagioklaas - van $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ (Albiet) tot $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ (Anorthiet)	15
Klei - bladsilicaten = SiO_4 tetraëders aaneengesloten tot platen	15
GESTEENTEN.....	17
Hoofdindeling.....	17
Magmatische gesteenten (stollingsgesteenten)	19
Sedimenten (afzettingsgesteenten)	21
Sedimenten, verkitting en diagenese.....	21
Sedimentatiebekkens	21
Diagenese	22
Indeling van de afzettingsgesteenten	24
Zeer grove sedimenten.....	24
Zand en zandsteen	25
Loess en leem	29
Slib, klei en schiefer	29
Kalksteen en dolomiet.....	31

Belgisch of buitenlands?	34
Uitdampingsgesteenten	35
Organische afzettingen.....	36
Metamorfe gesteenten (omzettingsgesteenten).....	37
Metamorfe sedimentgesteenten	37
Metamorfe stollingsgesteenten	40
Contactmetamorfisme	41
Vervorming van gesteenten	45
Breuken	46
Plooien.....	47
Spleting: diaklazen.....	48
Case study: Het doorbuigen van dunne gevelbekledingen uit marmer.....	48
Grondstof voor onze samenleving	50
VERWERING VAN GESTEENTEN en bodemvorming.....	51
Verwerking	51
Chemische verwerking	52
Mechanische verwerking of fragmentatie	53
Regoliet.....	54
Bioreceptiviteit	56
Karstwerking en druipsteenvorming.....	56
Bodemvorming.....	58
Bodemprofiel.....	59
De Kempische bodem : podzolbodems.....	60
Duurzaam bodembeheer	61
EROSIE	64
Snelle erosieprocessen.....	64
Verglijdingen in de Vlaamse heuvels.....	65
Kruip en solifluctie.....	66
Erosie en transport.....	67
Bodemerosie	68
Asymmetrische dalen in Midden België.....	69
WATER IN DE ONDERGROND	71
De watercyclus	71
Porositeit en doorlatendheid	72
De grondwaterkwaliteit.....	73
Hoeveel water?	74

ORDENEN VAN GESTEENTELAGEN IN RUIMTE EN TIJD: DE STRATIGRAFIE	75
Het belang van de stratigrafische ordening	75
Gelijkvormigheid en actualisme	75
Geologische tijdschalen.....	76
De absolute tijdschaal: hoeveel jaren?	76
De relatieve tijdschaal: ouder of jonger?	77
Lithostratigrafie	78
Biostratigrafie	78
Paleogeografie.....	78
Tijd en Evolutie	79
Fossielen	79
Geologisch belang van de biosfeer.....	80
Het grote uitsterven: de ondergang van de dinosauriërs, ramp of zegen?	81
Het jongste geologische tijdperk.....	83
VIJFHONDERD MILJOEN JAAR GEOLOGISCHE GESCHIEDENIS.....	85
Hoe de geologische geschiedenis wordt aangestuurd.....	85
De oudste geschiedenis van België: het Onder Paleozoïcum (Cambrium - Ordovicium - Siluur) of de Caledonische cyclus.....	87
Het Boven Paleozoïcum (Devoon - Carboon) of de Hercynische cyclus	88
Van Pangea tot de opening van de Atlantische Oceaan of de Kimmerische cyclus (Perm – Trias - Jura)	91
De nieuwe geschiedenis of de Atlantische cyclus: een relatief kalme periode (Krijt - Cenozoïcum)	92
De recente geschiedenis van België: landschapsvorming onder invloed van de ijstijden (Quartaire)	95
GEODIVERSITEIT OP VERPLAATSING : HISTORISCHE GEBOUWEN ALS GEOLOGISCH ERFGOED.....	99
Geodiversiteit in beeld gebracht.....	99
Natuursteen definitie	100
Natuursteen als stedelijk spoor.....	100
De bouwgeschiedenis, opbouw en evolutie van de natuursteen-geodiversiteit in Vlaanderen	101
Natuursteen-geodiversiteit als geotoeristische trekpleister.....	103
Streek-eigen natuursteen, een kennismaking.....	104
Ijzerzandsteen, erfgoedsteen van het Hageland	104
Vlaamse witsteen	105
“Witstenen” uit Frankrijk - de Franse steen.....	107
Rood, zwart en grijs, de kenmerkende kleuren van Belgisch marmer.....	108
Keihard bedreigd erfgoed - de kassei : de geschiedenis van onze steden met de voeten getreden	109
Referenties: geologie m.b.t. natuursteen in Vlaanderen, sinds 2000 + enkele STANDAARDwerken.	113

INLEIDING, VERANTWOORDING VOOR DEZE CURSUS

De Aarde is haar eigen geschiedenisboek en daar is er maar één van (Salle Kroonenberg).

The evolution of life and the ascent of humanity are inextricably linked to Earth history, as are the formation and location of food, mineral and energy resources, without which modern societies could not function. The consequences of exploiting these resources are only partially understood. The Earth's memory shows us that surface environments on our planet are the result of a self-regulating system involving processes in the atmosphere, oceans, the solid Earth - and life itself. It also shows that environmental change is the rule, not the exception. Over time spans of tens of millions of years, the planet has several times slowly changed from a 'greenhouse' to an 'icehouse' state. We know that climatic changes during the present icehouse condition have been extremely rapid, and that human activities made possible by the exploitation of physical resources are modifying natural systems at a rate almost unparalleled in Earth history (The Malvern International Task Force for Earth Heritage Conservation).

“Telkens wanneer ik door Rome wandel, intrigeert het me hoe glorieus de Romeinse schoonheid het verval blijft doorstaan en zelfs het meest verbrokkelde kapiteel zich boven op zijn zuil waardig toont boven de meute selfiestickzwaaiers. Of hoe de Romeinen met verbeelding, fijngevoeligheid en vakmanschap de innerlijke en uiterlijke nobelheid van de mens uit ruwe blokken marmer tot leven hakten, kerfden en polijstten. Alsof ze wilden zeggen dat ook de sterfelijke schepper een beetje onsterfelijk kan worden in het streven naar wat mooi, goed en edel is.

Kan een samenleving hoegenaamd overleven zonder die kracht van schoonheid en sensitiviteit?”

Jonathan Holslag, Tussen Mars en Venus. Column Knack 16 januari 2019, blz. 75.

Architectuur is gebaseerd op materiaalgebruik maar er is verrassend weinig inzicht in de natuurlijke materialen, inzonderheid natuurlijke bouwstenen en marmers.

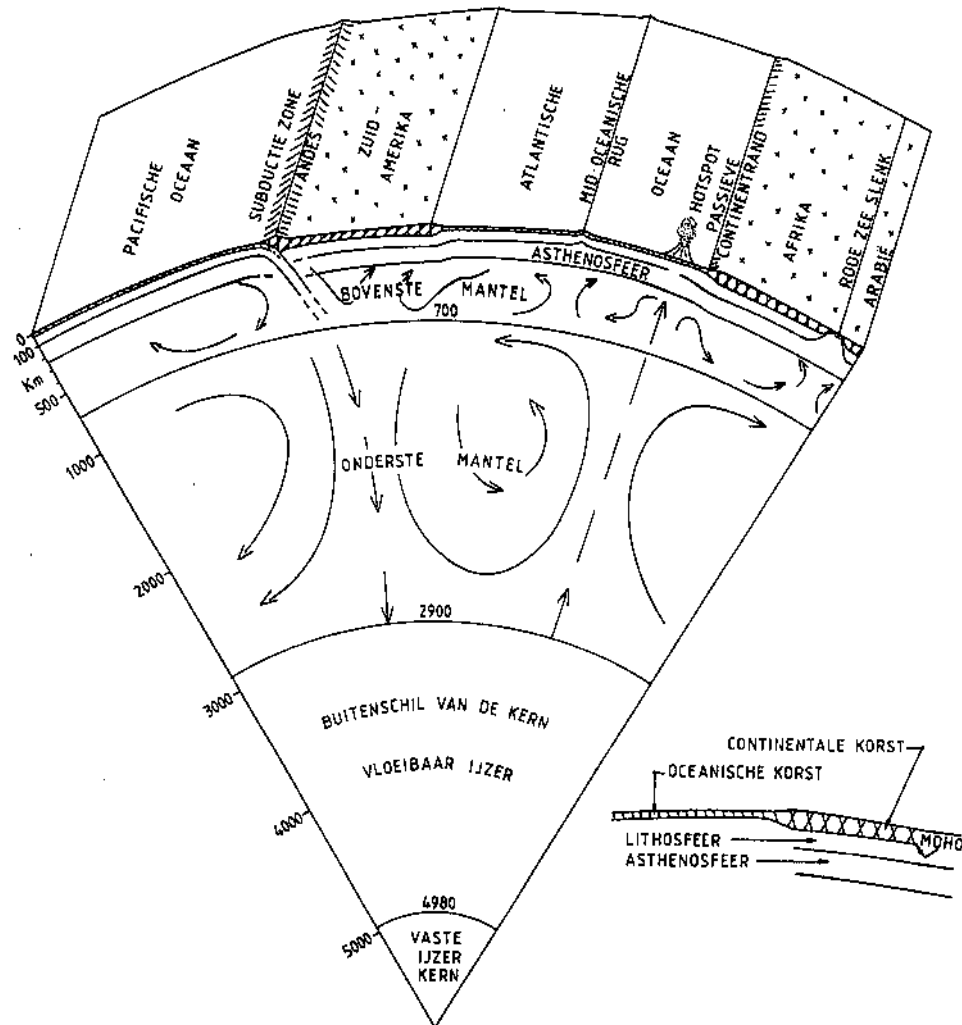
Historische bouwstenen zijn natuurproducten, ontgonnen in een groeve, vormgegeven door bouwmeesters, vervolgens blootgesteld aan de tand des tijds en menselijk ingrepen in gebruik of instandhouding van het bouwwerk. Het zijn daardoor getuigen zowel van de geologische voorgeschiedenis als van de evolutie van het bouwwerk. Van groeve tot bouwwerk blijven natuur en cultuur in de natuursteen met elkaar verbonden, elk met hun eigen verhaal.

Deze cursus wordt niet opgevat als een gecondenseerde cursus geologie maar heeft als opzet op een andere wijze leren kijken naar een gebouw. De tijd is onze leidraad bij de analyse van het natuursteengebruik aan de hand van concrete voorbeelden. We bespreken het wat, waar en waarvandaan, wanneer, hoe en waarom van de natuursteen om zo tot een beter begrip over de natuursteendiversiteit te komen. Van de aangehaalde natuurstenen bespreken we de identificatiekenmerken die iedereen moet kunnen waarnemen (wat en hoe), geven toelichting over de geologische voorgeschiedenis (waarvandaan en waarom) en over de omstandigheden die gebruik ervan stimuleerden of beletten (waar en wanneer). Dit wordt ondersteund door gebruik van handstukken om zelf de verschillende natuurstenen te leren ervaren en herkennen.

Wij gebruiken de cursus geologie voor 3Bach Architectuur UHasselt (laatste versie 2014) hierbij als achtergrondinformatie.

DE INTERNE DYNAMIEK VAN DE PLANEET AARDE

Bij de vorming van de planeet aarde door het condenseren van gas en stof uit de ruimte zo een 4,7 miljard jaar geleden liep de temperatuur in de opgestapelde massa sterk op. Deze warmte was afkomstig van de impact van die condenserende partikels op elkaar en van de compactie van die partikels die een slechte warmtegeleiding bezaten. Bovendien was er nog een aanvullende warmteproductie door de desintegratie van de aanwezige radio-actieve elementen. Simulaties tonen aan dat de temperaturen die door die processen bereikt werden voldoende waren om na enkele honderdduizenden jaren de smelttemperatuur te bereiken van ijzer, waaruit de aarde voor zo een 35 gewichtsprocent bestaat.



Schematische doorsnede door de aarde. De trage kruipbewegingen in de mantel die de plaatverschuivingen aandrijven zijn schematisch gesuggereerd. uit: Vandenberghe & Laga, 1991.

Het opgesmolten ijzer kon nu naar het zwaartekrachtscentrum van de nieuw gevormde planeet migreren, waardoor er nog eens een grote hoeveelheid zwaartekrachtsenergie onder de vorm van warmte vrijkwam. De nu bereikte temperaturen waren voldoende hoog om de ganse planeet op te smelten. In die gesmolten toestand kon er een scheiding optreden van de verschillende componenten op basis van hun densiteit. Aldus ontstond er na de afkoeling een binnenste kern die grotendeels bestaat uit vast ijzer, een buitenste kernschil uit vloeibaar ijzer dat verantwoordelijk is voor het magnetisch veld van de roterende aarde, een mantel die opgebouwd is uit ijzerrijke zware silicaten en een buitenste korst waarin

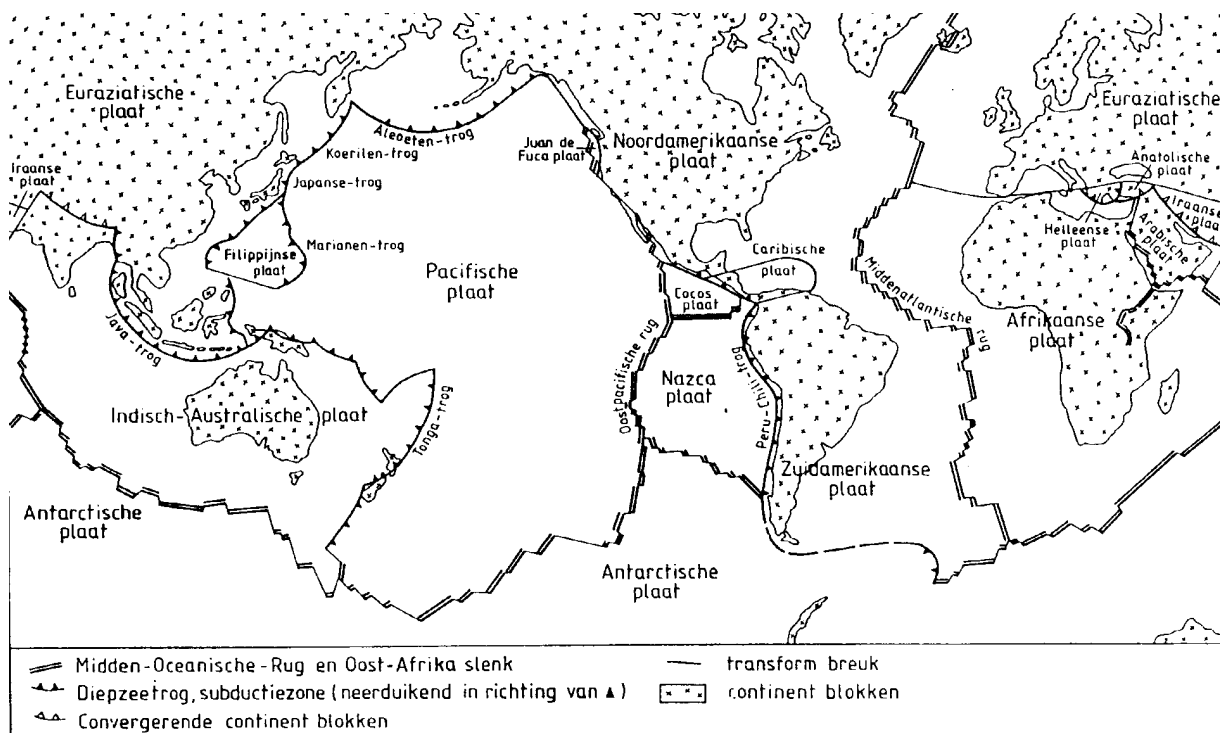
de lichte aluminiumsilicaten zijn geconcentreerd. De densiteit van de korst is gemiddeld $2,85 \text{ g/cm}^3$, tegenover een densiteit van $5,5 \text{ g/cm}^3$ van de aarde in haar geheel.

De korst en een gedeelte van de bovenste mantel gedragen zich als een rigiede lithosferische plaat van een 150 km dik, die ontkoppeld is van de onderliggende asthenosfeer, een 200 km dikke schil in de mantel waarin een aantal mineralen in gesmolten toestand voorkomen.

Organisatie van het aardoppervlak : plaattektoniek

Nu is het oppervlak van de aarde niet opgebouwd uit een continue aaneengesloten lithosferische plaat maar uit een zestal grote en meerdere kleine platen die bovendien niet rustig in een puzzel naast elkaar liggen maar voortdurend in beweging zijn ten opzichte van elkaar in een tempo van enkele centimeters per jaar.

De relatieve beweging van twee naburige platen kan constructief, destructief of neutraal zijn. Een constructieve plaatrand is een spreidingsrand waar permanent nieuwe lithosfeer gevormd wordt tussen zich van elkaar verwijderende platen. Een plaatrand is destructief wanneer twee platen naar elkaar toe verschuiven en er dus lithosfeer moet verdwijnen. Een plaatrand is ten slotte neutraal wanneer twee platen langs elkaar heen schuiven zonder dat op die plaats lithosfeer bijgevormd wordt of verdwijnt.

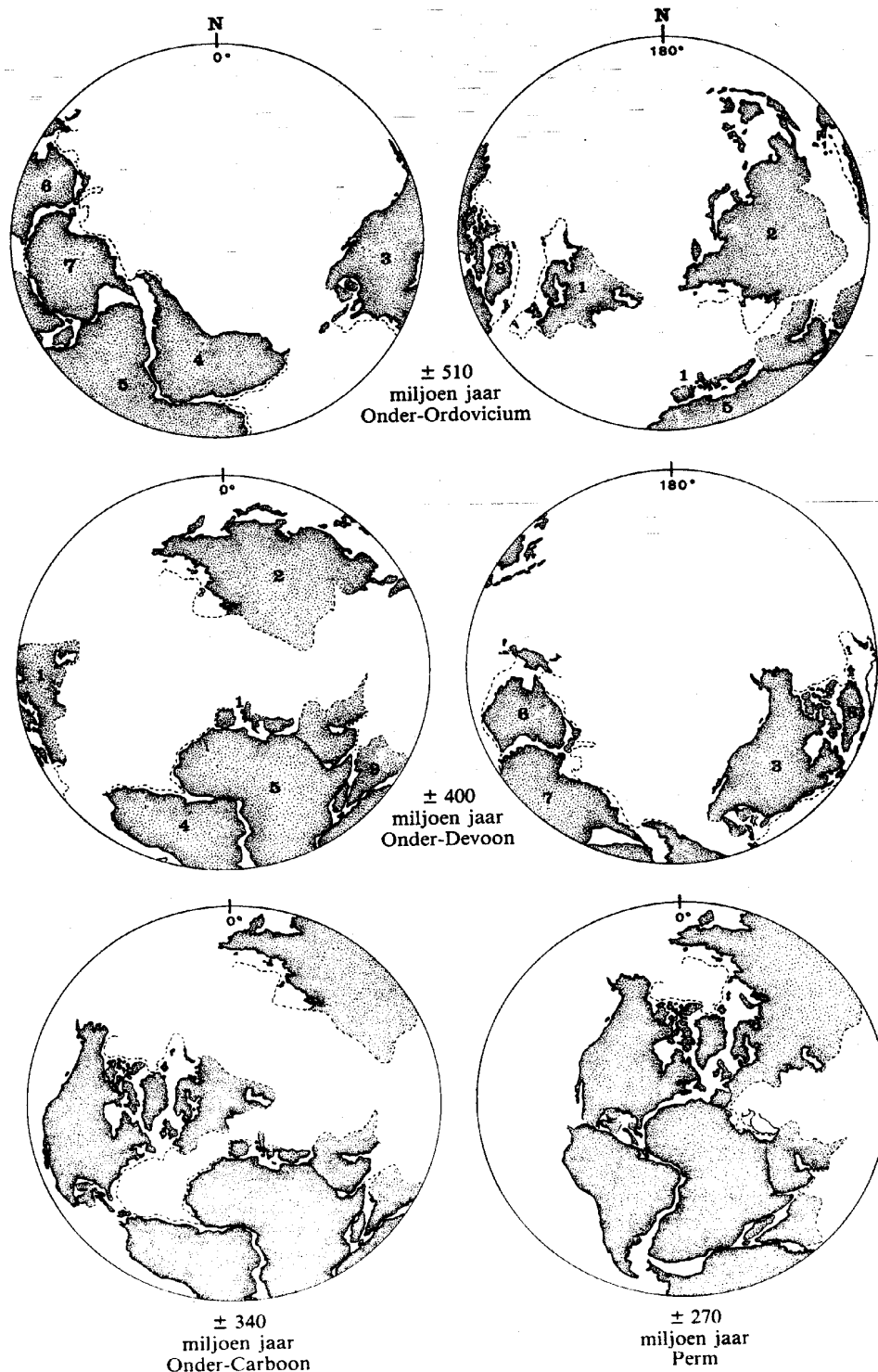


Voorstelling van het aardoppervlak opgedeeld in tektonische platen. uit: Vandenberghe & Laga, 1991.

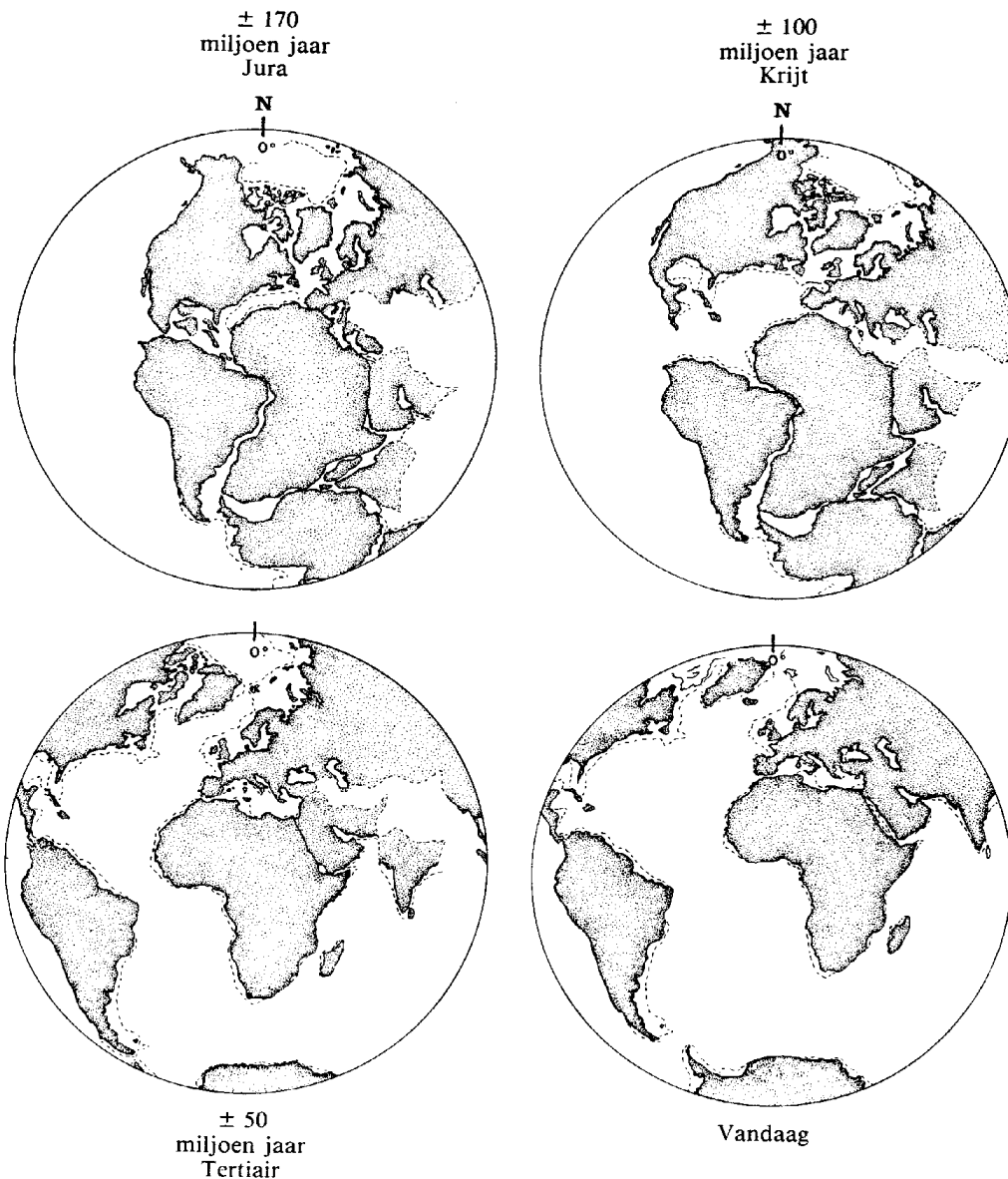
Spreidingsruggen

De constructieve plaatranden of spreidingsranden komen overeen met de mid-oceanische ruggen. Het centrum van deze langgerekte topografische verhevenheden in de grote oceanen is immers de plaats waar magma actief oprijst uit de asthenosfeer. Het uitedrijven van de beide kanten van de mid-oceanische ruggen wordt veroorzaakt door de stolling van dat magma en het aanzetten van de stollingsproducten aan de beide plaatranden. Op die manier wordt er voortdurend nieuwe lithosfeer

bijgemaakt tussen zich van elkaar verwijderende platen. Aangezien het magma uit de asthenosfeer relatief arm is aan lichte kiezel en relatief rijk aan zwaarder ijzer, zullen de nieuw gevormde platen zwaar zijn en, ten opzichte van de continentblokken die grotendeels uit lichtere kiezelrijke gesteenten bestaan, de laagste topografische posities innemen op aarde. Dat verklaart waarom de oceanen boven de nieuw gevormde platen liggen, een gemiddelde diepte van 4,5 km bereiken, en de spreidingsruggen zich midden in de oceanen bevinden.



Ligging van de continenten op verschillende tijdstippen in de geschiedenis van de aarde (naar Briden, Drewry & Smith, 1974). Godfroid & Dhondt (KBIN).



www.scotese.com <www.plates.uchicago.edu> <jan.ucc.nau.edu/~rcb7/global_history.html>

Wanneer continentblokken gaan splitsen en van elkaar wegdrijven dan speelt het eerste stadium zich uiteraard op de continenten zelf af. De grote breuklijnen waarlangs blokken continent zich van elkaar kunnen verwijderen noemt men slenken, of graben. Deze slenken vormen in het landschap langgerekte depressies zoals de Rijnslenk tussen de Vogezen en het Zwarte Woud of de met meren gevulde slenken in Oost Afrika. Deze slenken kunnen na de beginfase terug passief worden, zoals bijvoorbeeld gebeurd is met de slenk die in de Noordzee ligt en waarin de Noordzee-olie geaccumuleerd werd, of kunnen hun spreiding verder zetten waardoor ze ten slotte evolueren naar een nieuw oceaانبekken. Het meest sprekende voorbeeld van een beginnende oceaan is de huidige Rode Zee.

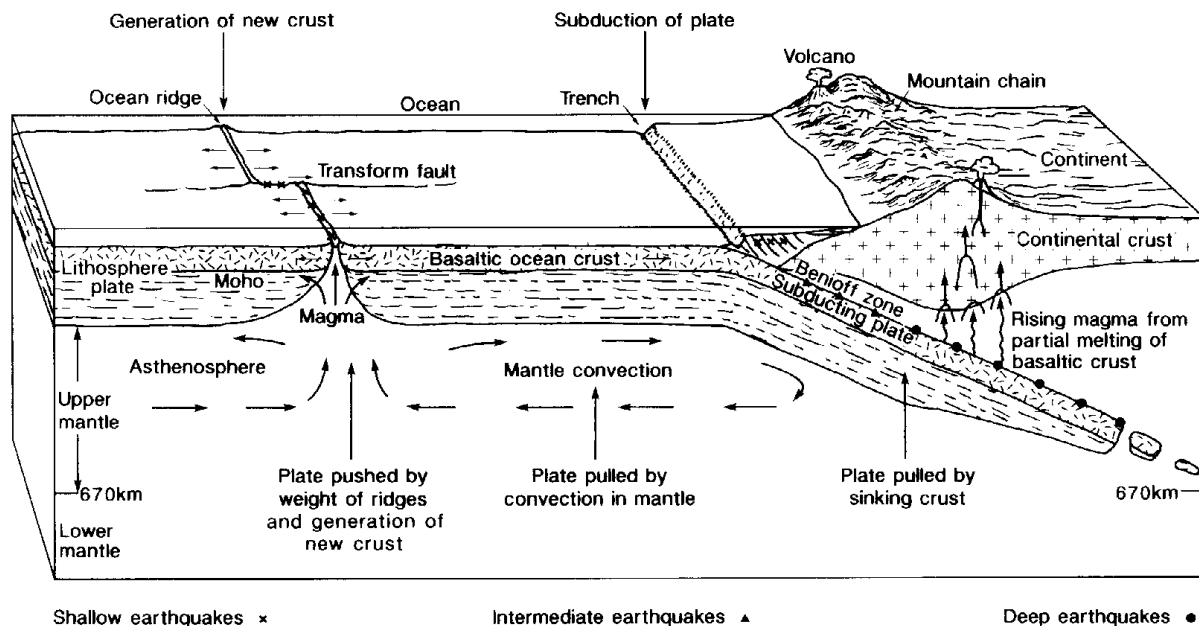
Convergerende plaatranden

Wanneer er tussen spreidende platen nieuwe lithosfeer wordt gevormd dan moet er noodzakelijkerwijze op andere plaatsen lithosfeer verdwijnen om de oppervlakte van de aarde constant te houden. De consumptie van lithosferische plaat gebeurt waar platen naar elkaar toe verschuiven doordat een plaat er onder de andere duikt tot een 700 km diepte (dit heet subductie). Op die diepte is de onderduikende plaat door de opwarming volledig opgegaan in het omringende gesteente. Deze diepte komt overeen met de grootste diepte waarop aardbevingen geregistreerd worden. De positie van de subductiezones komt

overeen met de diepzee-troggen in de oceanen. Deze troggen zijn langgerekte depressies in de oceaانبodem met dieptes tot 10000 meter onder het zeeoppervlak (bijv. diepzee-troggen ten oosten van de Filipijnen en Japan).

Wanneer op de buurplaat ook een continentale blok komt aangedreven naar de subductiezone zullen alle gesteenten aan de rand van de beide blokken opgeperst en over elkaar geschoven worden. Dit is de meest spectaculaire wijze waarop gebergteketens zich vormen. Zo is het Himalaya gebergte ontstaan wanneer een dertig miljoen jaar geleden het Indische en het Aziatische continentale blok tegen elkaar kwamen te liggen boven een vroegere subductiezone waarin het oceanische lithosfeergedeelte van de Indische plaat, dat zich voor het Indische continentale blok bevond, volledig ondergedoken en geconsumeerd was. De collisie tussen beide blokken gaat nog steeds door, en de Himalaya blijft in opwaartse beweging. De Alpen en de Karpaten zijn een ander voorbeeld van een gebergtevorming door een collisie van twee continentblokken, ditmaal het Europese en het Afrikaanse, doch in dit geval is de collisie nog niet volledig aangezien er zich nog oceanische lithosfeer tussen beide in bevindt, in het Middellandse Zeegebied.

Door de snelheid van de productie-consumptie van de oceanische lithosfeer te combineren met de hoeveelheid bestaande oceanische lithosfeer kan aangetoond worden dat de ganse oceanische lithosfeer ongeveer om de 200 miljoen jaar vernieuwd wordt.



Structuur van de bovenste aardlagen op basis van plaattektoniek. Uit Pickering & Owen. An introduction to global environmental issues. Routledge, London, 1994: p. 227.

Langs elkaar glijdende platen

Naast de productieve en de destructieve plaatranden bestaat er ook een plaatrand type waarbij twee platen langs elkaar heen schuiven via zeer diepe verticale en over honderden kilometer te vervolgen breuken, transform breuken genoemd.

De meest bekende transform breuk is de San Andreas breuk in Californië. De San Andreas breuk is zo goed bekend omdat die geassocieerd wordt met het aardbevingsgevaar dat grote steden zoals San Francisco en Los Angeles voortdurend bedreigt. De Noord-Anatolische breuk is een transformbreuk die zware aardbevingen heeft veroorzaakt in Turkije. Transformbreuken bewegen in segmenten met tientallen kilometers lengte. Bij iedere zware aardbeving die optreedt over één of meerdere segmenten worden tussenliggende of aangrenzende segmenten op hun beurt onder druk gezet, zodat aardbevingen er met enige regelmaat voorkomen en statistisch voorspelbaar zijn.

Grote aardbevingen en vulkanisme

Dat het gevaar voor grote aardbevingen precies gelokaliseerd is op de plaatranden is geen toeval. Door het onderling verschuiven van de rigide platen zijn het vooral de randzones die aan grote wrijvingen onderhevig zijn wat de directe aanleiding is voor aardbevingen. Wanneer men op de wereldkaart de verspreiding uittekent van verwoestende aardbevingen bekomt men een lijnenpatroon dat precies samenvalt met de grenzen van de lithosferische platen. Hetzelfde is waar wanneer men de distributie van actieve vulkanen uitzet op een wereldkaart. De anormale voorkomens van vulkanen die op de wereldkaart zullen vastgesteld worden hebben te maken met het gelokaliseerd voorkomen van vulkanen op zogenaamde 'hot spots'. Goed bekende voorbeelden daarvan zijn de eilandengroepen van Hawaï en de Canarische eilanden die niet op een plaatrand voorkomen of IJsland waar de hot spot stabiel onder een spreidingsrug zit. Deze hotspots of mantelpluimen worden toegeschreven aan hete stromingen die vanuit de diepe mantel naar de aardoppervlakte rijzen. Dit mechanisme brengt in herinnering dat convectie in de mantel aan de basis van de plaattektoniek ligt. Door de hoge druk en temperatuur in het binnenste van de aarde vertonen de gesteenten een langzame kruipbeweging. Deze kruip zorgt voor convectiecellen die de spreiding van de platen bepalen.

Gebergtevorming, epirogenese en isostasie

De activiteit en dynamiek aan de plaatranden komt nog op een andere manier tot uiting, namelijk door de locatie van bergketens. Het zijn de processen die gepaard gaan met het naar elkaar toeschuiven van platen die gesteenten en sedimenten aan de plaatranden verzamelen, oppersen, plooien, over elkaar schuiven en opheffen tot bergketens. Dit verklaart de positie en de langgerekte vorm van de jongere gebergten.

De bergvorming is een spectaculaire vorm van verticale bewegingen. Er bestaan ook verticale bewegingen die minder opvallend gebeuren en ook plaatsgrijpen binnen de rigide platen. Er zijn vooreerst de *epirogenetische* bewegingen. Dit zijn langzame opheffingen of dalingen van uitgestrekte gebieden die veroorzaakt zijn door inwendige krachten in de aarde zoals mantelkruip of uitzetting door warmte-opbouw onder weinig conductieve gesteentelagen / uitrekking van de aardkorst door juist betere warmte-convectie.

Rijzende gebieden kunnen zorgen voor opheffen plateaus met hernieuwde rivierinsnijding zoals bijvoorbeeld de vroeger afgevlakte Ardennen die sinds een 30 miljoen jaar terug aan het stijgen zijn resulterend in 700 m opheffing t.o.v. het huidig zeepeil en 1000 m t.o.v. de gelijktijdig ingezakte lagen in het noorden van België. Het zuiden van België werd zo buiten het bereik van zeetransgressies gehouden. Dalende gebieden kunnen evolueren naar een steeds verder zakkend sedimentatiebekken, bijvoorbeeld Nederland en het Noordzeegebied, waarin sinds ongeveer twee miljoen jaar lokaal zelfs voldoende ruimte geschapen werd voor de opvulling door 600 meter sediment.

Verticale bewegingen kunnen ook geïnduceerd zijn door uitwendige veranderingen aan het aardoppervlak. Wanneer bovenop het aardoppervlak massa bijgevoegd wordt, zoals bij een gebergtevorming, of weggenomen wordt, zoals bij het afsmelten van dikke ijskappen, dan treden er *isostatische* compensatiebewegingen op die ernaar streven om steeds overal eenzelfde massa, een combinatie van volume en densiteit van gesteenten te bekomen. Zo is het te verklaren dat gebergtes een diepe wortel van lichte gesteenten bezitten. Zo zorgt de sedimentopstapeling in een subsiderend bekken, bijvoorbeeld in delta's, precies door haar eigen gewicht nog eens voor extra subsidentie. Daardoor is het ook te verklaren dat Scandinavië dat 40.000 jaar geleden nog bedekt was met een dikke ijskap nu aan het stijgen is aan een tempo van ongeveer een centimeter per jaar.

(naar Vandenbergh & Laga, 1991)

STENEN EN MINERALEN

MINERALEN

Definitie

Mineralen zijn **vaste stoffen** die de basiscomponenten vormen van de aarde en andere rotsachtige hemellichamen. Naast de mineralen die door **natuurlijke** anorganische processen worden gevormd, komen ook mineralen van natuurlijke organische oorsprong voor (steenkool, suiker, galstenen...) en synthetische mineralen die door de mens in industriële processen worden geproduceerd. Synthetische mineralen ontstaan door verhitting (keramiek, cement), door synthese (het abrasief korund) of als bijproduct (gips).

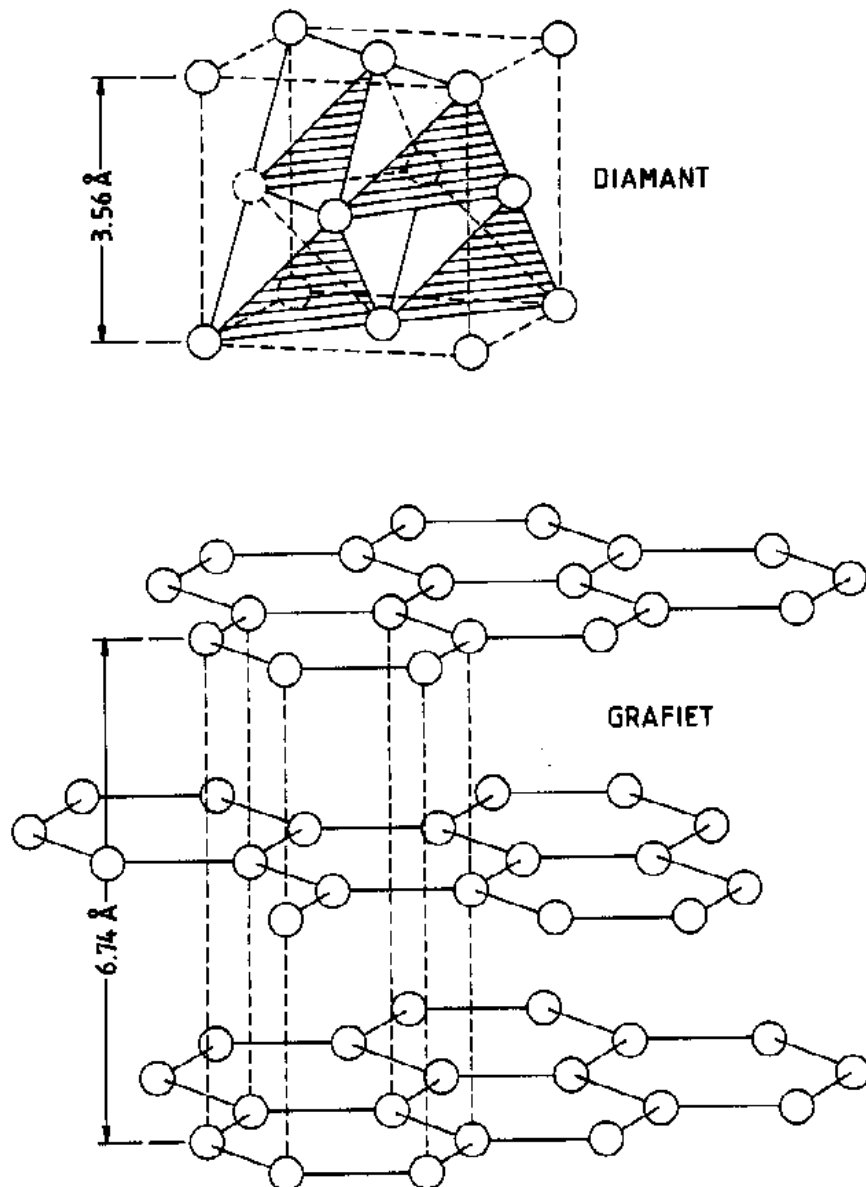
Mineralen worden gekenmerkt door specifieke **fysische eigenschappen**, door een duidelijke **scheikundige samenstelling**, die binnen bepaalde grenzen variabel kan zijn, en bovenal door het feit dat zij een **atoomstructuur** (*kristalrooster*) bezitten die altijd vast ligt en specifiek is voor elk mineraal. De geometrie van de atoomroosterrangschikking is de meest karakteriserende eigenschap van een mineraal; de scheikundige samenstelling komt als identificatiemiddel pas op de tweede plaats.

De atomen zijn in regelmatige rijen gerangschikt in bepaalde richtingen en bepaalde vlakken; het gevolg is een kenmerkende geometrische structuur die met de term *kristal* wordt aangeduid. Uit deze structuur vloeit voort dat de fysische eigenschappen afhankelijk kunnen zijn van de richting (z.g. *anisotropie*) omdat de atoomopbouw niet in alle richtingen gelijk hoeft te zijn. Daar het aantal mogelijke rangschikkingen van de atomen niet onbegrensd is en gebonden is aan enkele basisregels (het elementair kristalrooster moet zich steeds kunnen herhalen), zijn de mogelijke kristalsoorten in de mineraalwereld vrij beperkt. De weinige grondvormen kunnen zich echter op verschillende wijzen verbinden en bovendien bij kristalgroei onregelmatig ontwikkelen. Hierdoor wordt herkenning bemoeilijkt.

Het gebeurt dat een bepaalde positie in het atoomrooster die normaal door een welbepaald chemisch element wordt ingenomen, onder invloed van specifieke vormingscondities van het mineraal niet wordt ingenomen (vacante posities), of eerder bezet wordt door een ander element met een gelijkaardige ionenstraal en gelijkaardige chemische eigenschappen. Zo zijn er bijvoorbeeld substituties van Fe^{2+} door Mn^{2+} en Mg^{2+} , van Si^{4+} door Al^{3+} . Dergelijke *substituties* kunnen in een beperkte mate voorkomen (z.g. onzuiverheden) terwijl het ook mogelijk is dat twee elementen in alle verhoudingen kunnen voorkomen tussen twee eindsamenstellingen van een mineraal (bijvoorbeeld Na/Ca verhouding in het mineraal plagioklaas). Bij kristallisatie volgens een vergelijkbaar atoomrooster spreekt men van *isomorfie*.

Het komt ook voor dat dezelfde chemische elementen in dezelfde atomaire verhoudingen op verschillende manieren gestapeld worden, in een andere atoomroostergeometrie dus, waardoor het verschillende mineralen worden met andere eigenschappen niettegenstaande de identieke scheikundige samenstelling. Dergelijke chemisch identieke mineralen worden *polymorfen* genoemd. Gekende voorbeelden zijn de polymorfen van koolstof: grafiet en diamant (C)- (zie figuur volgende bladzijde).

Identificatie van mineralen gebeurt met behulp van laboratoriumtechnieken maar eenvoudige hulpmiddelen geven al een goede indicatie, zoals kleur, glans, kristalvorm, splijting, hardheid (H volgens Mohs index), soortelijk gewicht (S.G.), zoutzuurtest.



De verschillende atoomroosterstapeling van de C-atomen in de polymorfen diamant en grafiet

Enkele voor de bouw belangrijke mineralen

Pyriet - FeS₂ sulfiden

- kubusvorm
- H 6-6.5; S.G. 5; gele bronskleur; metaalglans, donker tot roestkleurig door oxidatie
- in veel gesteenten, ofwel als duidelijk herkenbare kristallen, ofwel fijn verdeeld in het gesteente, of nog in nodule vorm of als verkitting van fossielen in een sediment
- bij oxidatie door blootstelling aan de lucht of zuurstofrijk water zullen sulfaten ontstaan en Fe³⁺. Door de oplosbaarheid van Fe³⁺ in water zullen roestbruine neerslagen gevormd worden. Uiteraard kan daarom het voorkomen van pyriet in dakleien en sierstenen ongunstig zijn, alhoewel de reactiviteit van pyriet voor oxidatie erg verschillend kan zijn.

Hematiet - Fe₂O₃ oxiden

- massief, bladerig, niervormige aggregaten
- H 5.5-6.5; S.G. 5.26; bruinrood tot zwart; metaalglans
- in veel roodkleurige gesteenten
- belangrijkste ijzererts

Goethiet, Lepidocrociet - FeOOH

- amorf, aardeachtig
- H niet te bepalen; S.G. 3.6-4; bruine kleur; aardeachtig
- verweringsmineraal

Limoniet is een veldterm voor de ijzerroestbruine aardeachtige substanties, korsten op gesteentevlakken, filmen rond mineraalkorrels, neerslagen uit uitlopend grondwater. Limoniet bestaat uit verbindingen van Fe³⁺, meestal een mengsel van amorfe gehydrateerde ijzeroxiden en hydroxiden, goethiet en lepidocrociet. Limoniet is het cement dat de bruine ijzerzandstenen aaneenkit die vooral in het Hageland werden gebruikt als bouwsteen. Het vormt moerasijzersteen die vroeger werd ontgonnen in de Nete en Demervalleien, ontstaan door de oxidatie van gereduceerd ijzer (Fe²⁺), wel oplosbaar in water, dat samen met het grondwater uitsijpelt in de laaggelegen drassige alluviale vlakte waar het in contact komt met de oxiderende lucht.

Calciet - CaCO₃ carbonaten

- rhomboëdrisch, met verschillende kristalvormen
- H 3; S.G. 2.7; kleurloos, wit of gekleurd door onzuiverheden; parelmoer- tot zijdeglans; reageert met koude HCl
- belangrijk sediment gesteente, vaak bestaande uit een opstapeling van kalkskeletten van fossielen; hoofdbestanddeel van kalk-, krijt- en marmergesteenten

Dolomiet - CaMg(CO₃)₂

- rhomboëdervorm, zadelvormige kristalvlakken
- H 3.5-4; S.G. 2.8; wit tot grijsbruin; wasglans; reageert met warme HCl
- dolomietgesteenten; kalkstenen kunnen in verschillende mate omgezet zijn naar dolomiet; Ca en Mg maar ook Mg en Fe kunnen elkaar in onbeperkte mate substitueren
- bouwmaterialen, cement (let op ijzergehalte!), ballast en wegverhardingsmateriaal

Gips - CaSO₄·2H₂O sulfaten

- prismatische kristallen
- H 2; S.G. 2.3; goede splijting; kleurloos tot wit; parelmoerlans
- in fijnkorrelige sedimenten zoals kalkhoudende kleien waar de oxidatie van pyriet voor de sulfaationen zorgt en zo de klei verzuurt waardoor de kalk oplost en Ca ionen vrijkomen die dan met de sulfaten combineren tot gips. Albast is een massieve fijnkorrelige variëteit die als doorschijnende siersteen bewerkt kan worden

- in de bouwnijverheid gebruikt als grondstof voor plaaster, die bekomen wordt door gips te verwarmen. Door toevoeging van water aan plaaster zal terug gips gevormd worden in een dooreengeweven vlechtwerk van kristallen, wat sterkte en samenhang geeft aan het pleisterwerk.

Op kalkhoudende bouwstenen zal een gipskorst gevormd worden aan de oppervlakte waar het calciet reageert met een vochtige zwavelhoudende atmosfeer (afkomstig van uitlaatgassen, verbranding van fossiele brandstoffen = zure regen). Vermits gips wateroplosbaar is zal het op beregende oppervlakken worden weggespoeld wat tot leidt tot materiaalverlies. In het nieuw gevormde gips op beschutte oppervlakken zullen stofdeeltjes of roet als onzuiverheden ingesloten worden. Door de gipsvorming versnelt de verwerking en de afbrokkeling van de gesteenten sterk. Doordat gips een groter volume inneemt dan de calciet dat het vervangt zal het immers de buitenkant van het gesteente in het gebouw doen afschilferen, waardoor het verweringsproces nog versnelt. Veel waardevolle monumenten zijn op die wijze in de laatste tientallen jaren in een snel tempo aangetast.

Gips en de niet of minder gehydrateerde verwante mineralen hemihydraat en anhydriet worden als bijproduct verkregen uit een groot aantal industriële processen zoals bijvoorbeeld de fosforzuurproductie ('fosfogips'), waardoor hun evacuatie of verwerking problematisch wordt. Fosfogips lijdt trouwens onder de aanwezigheid van fosfaat, fluor en radium in het rooster, afkomstig van de oorspronkelijke grondstof.

Kwarts - SiO₂ silicaten

De basiscel van het atoomrooster van silicaatmineralen is een viervlak of tetraëder waarvan de hoekpunten uit zuurstofionen bestaan waarbinnen zich het silicium-ion bevindt (structuurformule SiO₄)⁴⁻. Het mineraal kwarts bezit een driedimensionaal netwerk van tetraëders die alle in een hoekpunt aan elkaar grenzen. Doordat alle zuurstofionen zo deel uitmaken van twee tetraëders kan de chemische formule als SiO₂ geschreven worden

- prismatische kristallen met piramidale punten; een kryptokristallijne variëteit is chalcedoon waarvan agaat een doorgaans gebande siersteenvorm is; silex of vuursteen is een andere kryptokristallijne vorm

- H 7; S.G. 2.65; kleurloos of gekleurd door onzuiverheden; schelpachtige breuk met vetglans

- meest verspreid mineraal in de natuur

- zand, basisgrondstof voor glas, glaswol...

Veldspaat Kaliveldspaat (Orthoklaas) - KAlSi₃O₈

Plagioklaas - van NaAlSi₃O₈ (Albiet) tot CaAl₂Si₂O₈ (Anorthiet)

- prismatische kristallen

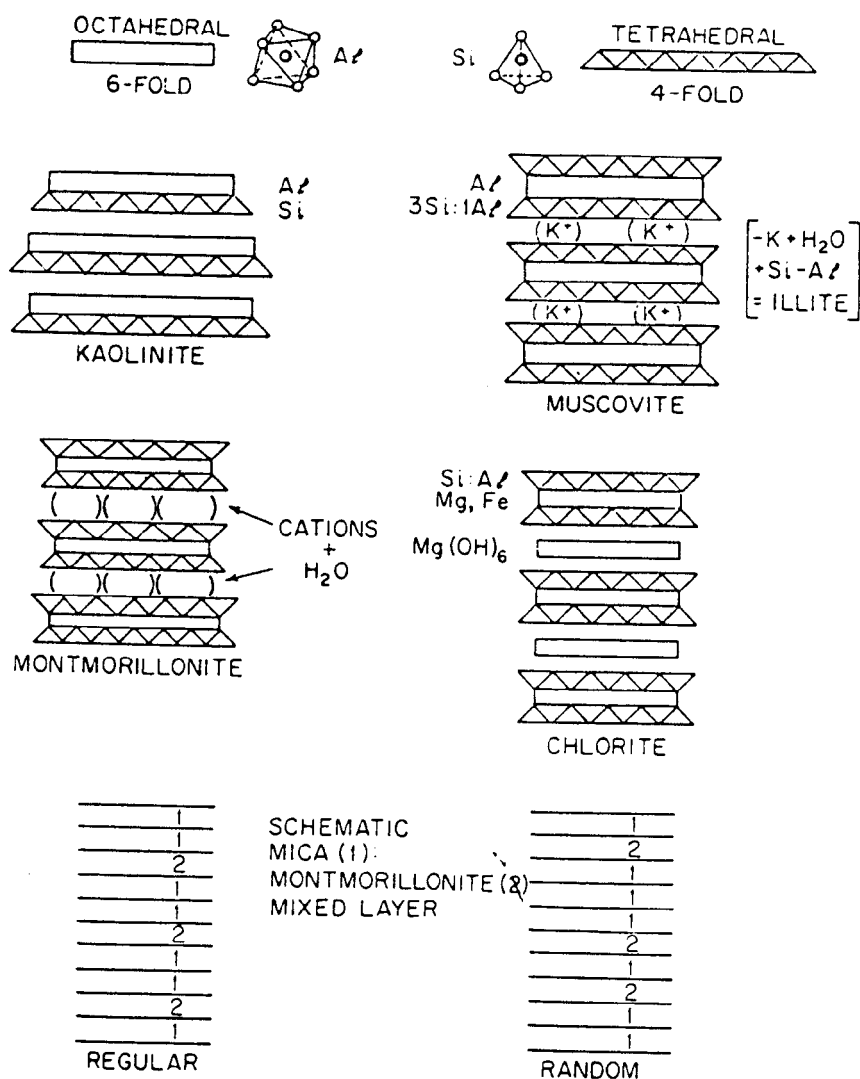
- H 6; S.G. 2.57-2.7; kleurloos, wit tot rozig (kaliveldspaat), wit tot grijs (plagioklaas); vetglans (kaliveldspaat) tot parelmoerglans (plagioklaas)

- meest voorkomende mineraalgroep in de natuur; echter minder in nieuwe sedimentgesteenten. Bij de vorming uit magmatische smelten is er een continue vaste oplossing tussen de drie eindtermen (substitutie van K, Na, Ca).

- klei is het verweringsproduct van veldspaten

Klei - bladsilicaten = SiO₄ tetraëders aaneengesloten tot platen

- structuur Het basismotief van de kristalroosteropbouw van de bladsilicaten is de combinatie van een laag aaneengesloten Si-tetraëders met daaraan gebonden een laag Al- of Mg-octaëders. Dit is het zich steeds herhalend motief van het twee-lagige kaoliniet. Bij de meeste andere drie-lagige bladsilicaten zit de octaëderlaag gesandwichd tussen twee Si-tetraëderlagen (zie figuur).



Terminologie en structuur van kleimineralen

Mica's zijn mineralen die in kristallen van normale grootte kunnen uitgroeien. De meeste bladsilicaten zijn echter in grootte beperkt tot afmetingen beneden 2 micrometer omdat ze in de kristalroosteropbouw te veel defecten vertonen in samenstelling en geometrische opbouw. Deze kleine bladsilicaten zijn de kleimineralen waarvan de meest voorkomende groepen kaolinit, smectiet en illiet zijn. Door de kleine afmetingen zijn er relatief veel verbroken verbindingen aan de randen van de partikels. In de tetraëders wordt een gedeelte van het silicium vervangen door aluminium en ook in de octaëders worden kationen met verschillende lading gesubstitueerd. Om aldus ontstane tekorten aan positieve ladingen te neutraliseren neemt een kleimineraal tussen de kristalblaadjes gehydrateerde kationen op, zoals K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , en ook H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+} . Hydratatie kan leiden tot het uiteenwaggen van de kristalblaadjes waardoor bepaalde kleimineralen zoals smectiet zullen zwellen

- eigenschappen De deeltjes blijven in water lang in suspensie, ze kunnen door elektrolyten worden uitgevlokt, ze kunnen ionen adsorberen, en zodra een klei is afgezet blijft deze lang plastisch doordat het water wordt vastgehouden en de plaatvormige deeltjes gemakkelijk over elkaar kunnen schuiven.

- reactiviteit De kationen van de kleimineralen zijn in grote mate uitwisselbaar met kationen in de oplossing waarin de kleimineralen zich bevinden, bijvoorbeeld poriënwater, rivierwater. Sommige zware elementen die vaak als polluenten in water voorkomen, worden reeds bij lage concentraties sterk geadsorbeerd op kleimineralen. Deze uitwisselingscapaciteit van de kleimineralen beschermt in grote

mate grondwater tegen doorsijpelend verontreinigd oppervlaktewater. Anderzijds is het slib van rivieren en beken precies daardoor dan weer zo vervuild dat het als giftig afval moet behandeld worden en dat de berging van baggerslib nu ernstige problemen stelt.

- soorten

kaoliniet - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$

- product van extreme verwerking met uitloging van alle elementen behalve Al en Si; komt vooral voor in tropische bodems die door het ontbreken van andere kationen erg onvruchtbaar zijn
- gebruikt in de porceleinfabricatie met baktemperatuur boven 1200° , als deklaag voor glanzend papier, vulstof voor rubber

smectieten o.a. montmorilloniet

- chemische samenstelling zeer variabel door het groot aantal substituties; daardoor ook grote zwelcapaciteit
- zelfs kleine hoeveelheden smectiet in een kleipakket beïnvloedt de geotechnische eigenschappen van die klei: weginsnijdingen behoeven extra zwakke hellingen, wat uiteraard een groter grondverzet noodzakelijk maakt

illiet

- drielagig kleimineraal met K^+ en andere kationen
- meest voorkomend kleimineraal
- geschikt voor het vervaardigen van grofkeramische producten (bakstenen, dakpannen) met baktemperaturen van 950° tot 1150°

glauconiet

- ijzerrijke illiet, soms met zwellende mineralen
- wordt gevormd als groene tot donkergroene gelobde korrels in een zand, door ontstaan in een zeebodem als opvalling van holtes nagelaten door weggrottende micro-organismen
- talrijk voorkomend in de van oorsprong mariene zandlagen en soms ook in kalksteenbanken van het Vlaamse land

GESTEENTEN

Hoofdindeling

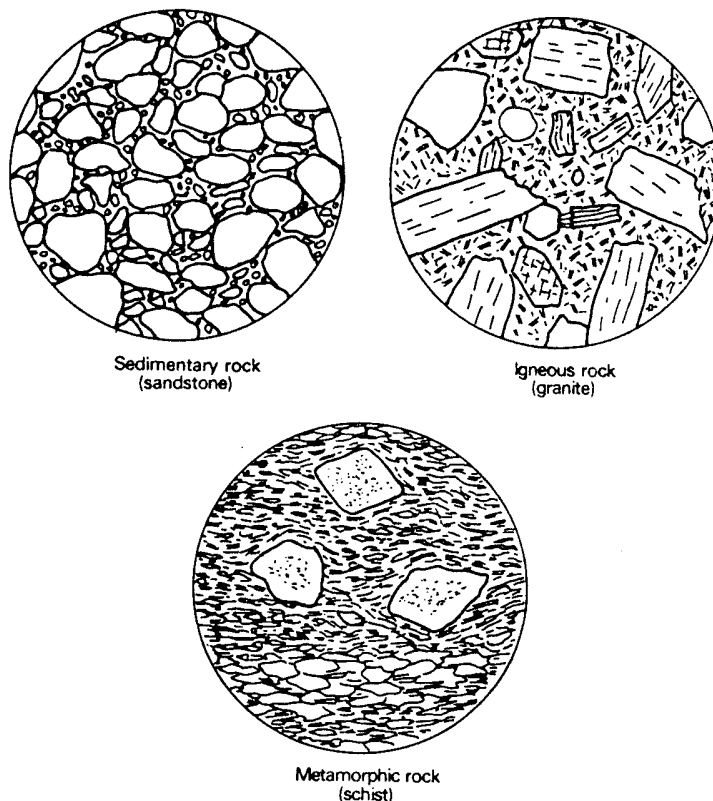
Gesteenten zijn in de natuur voorkomende aggregaten van één of meer mineralen. Het is niet zozeer de chemische samenstelling als wel de mineraalassociatie die het hoofdkenmerk en de basis voor de onderverdeling van de gesteenten vormt, omdat de mineraalassociatie de fysische omstandigheden weerspiegelt waaronder het gesteente gedurende zijn ontstaan (en vaak ook daarna) heeft verkeerd.

De mineralogische samenstelling speelt dus een belangrijke rol bij de classificatie van de gesteenten. Hierbij tellen vooral de hoofdcomponenten en niet zozeer de accessorische mineralen, zodat dit kenmerk relatief gemakkelijk is te bepalen. Daarnaast zijn vorm en korrelgrootte van de voorkomende mineralen (= textuur) en hun ordening in het gesteente (= structuur) factoren die samenhangen met hun

ontstaanswijze en mede bepalend voor hun uiterlijk. Ook deze factoren worden daarom veelal in het classificatiesysteem betrokken.

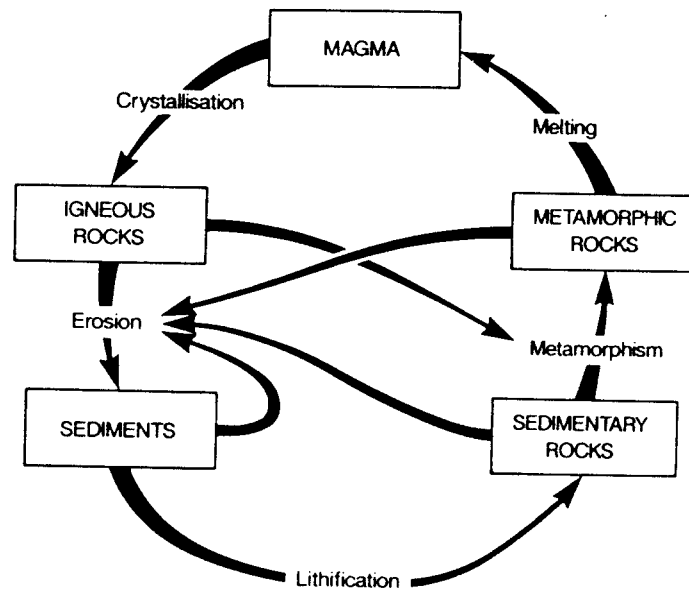
De hoofdindeling der gesteenten is genetisch. Men onderscheidt drie hoofdgroepen die door een feedback systeem (gesteentecyclus) verbonden zijn:

- magmatische of stollingsgesteenten - ontstaan door stolling van magma uit het binnenste der aarde, d.i. een silicaatsmelt omwille van zijn samenstelling
- sedimentgesteenten of afzettingsgesteenten - aan het aardoppervlak ontstaan door bezinking van aangevoerde minerale deeltjes als verweringsproduct van andere gesteenten (klastische gesteenten), of door chemische neerslag uit een oplossing (evaporieten), of door bezinking van resten van organismen (organogene gesteenten); door verkitting ontstaan vaste sedimentgesteenten
- metamorfe gesteenten - gesteenten die onder hoge druk en temperatuur een rekristallisatie of metamorfose hebben ondergaan op grotere diepte onder het aardoppervlak.



Gesteentesoorten: voorbeelden van elk hoofdtype, gezien door een microscoop (uit Harker)

Uiteindelijk kunnen alle gesteentegroepen door verwerking en erosie omgezet worden tot sedimenten, of terug omgesmolten worden tot magma ten gevolge van de plaattektoniek, waardoor de gesteentecyclus gesloten wordt.



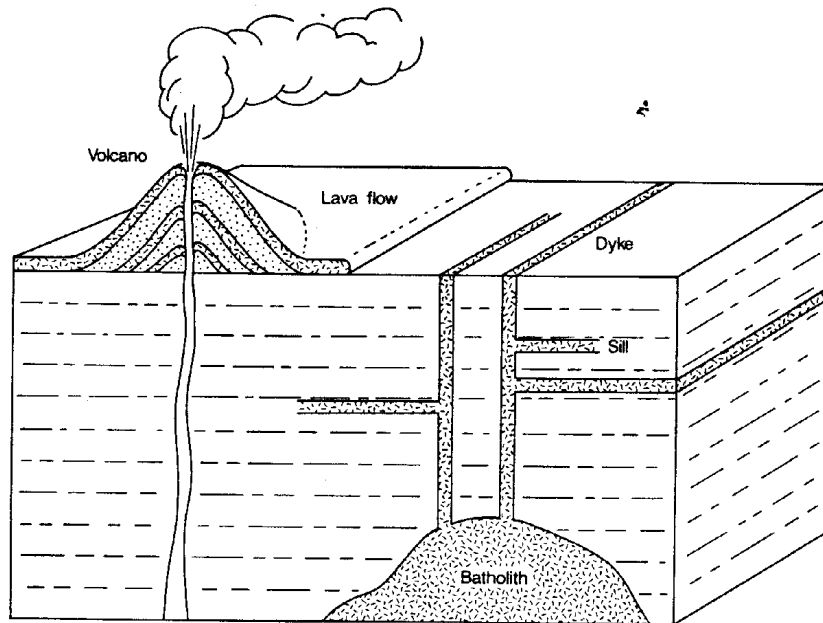
Gesteentecyclus, naar Doyle

Magmatische gesteenten (stollingsgesteenten)

Gesteenten kunnen opsmelten in de diepere korst of in de bovenste mantel van de aarde omdat de temperatuur op deze dieptes in de buurt komt van de smelttemperatuur van de gesteenten. De temperatuuroptename of *geothermische gradiënt* bedraagt normaal 2 à 4°C per 100 m dieptetoename. Bij temperaturen van 500 tot 2000° C smelten gesteenten en produceren zo *magma*.

Uit een afkoelende silicaatsmelt vormen zich afhankelijk van de chemische samenstelling eerst kristallen met een hoog smeltpunt. Geleidelijk kristalliseren meer mineralen uit, waarbij soms eerder gevormde mineralen weer geheel of gedeeltelijk door de smelt worden teruggenomen. Ten slotte kristalliseert ook de restsmelt, die meestal aangerijkt is aan kwarts. De eerst gevormde mineralen zijn vaak *idiomorf*, d.w.z. zij bezitten hun eigen kristalvorm, terwijl de laatstgevormde mineralen de overblijvende ruimte moeten opvullen en daardoor meestal *xenomorf* zijn, d.w.z. geen eigen kristalvorm vertonen.

Een belangrijke rol speelt ook de *afkoelingssnelheid* van het magma. Het ligt voor de hand dat dit relatief snel afkoelt wanneer de silicaatsmelt gedurende een vulkanische uitbarsting als *lava* aan de oppervlakte treedt. De snelle afkoeling leidt dan tot een zeer fijnkorrelig gesteente, of zelfs door onderkoeling van de smelt zonder dat het tot kristallisatie komt, tot een 'vulkanisch glas'. De gesteenten die aan het aardoppervlak zijn gestold worden uitvloeiingsgesteenten of *vulkanische gesteenten* genoemd, gesteenten die langzaam op grotere diepte (enige kilometer of meer) zijn gestold waar door de langzamere warmteafgifte grotere kristallen ontstaan, worden dieptegesteenten of *plutonieten* genoemd. Een intermediaire positie wordt ingenomen door gesteenten die in plaatvormige lichamen zijn gestold waar magma langs spleten of breukvlakken doorheen andere bestaande gesteenten opsteeg. De afkoelingssnelheid, en daarmee ook de korrelgrootte, ligt bij deze ganggesteenten tussen die van typische uitvloeiings- en dieptegesteenten in. *Pyroklastische* gesteenten zijn de producten van vulkaanuitbarstingen die gesteentefragmenten en stollende lava de lucht inslingeren en bij het neerkomen texturen vormen, vergelijkbaar met sedimentaire texturen. *Tufsteen* is fijnkorrelig en licht poreus met de textuur van een vuil zand, veel gebruikt als gemakkelijk verzaagbare bouwsteen in Duitsland. *Scorie* of *puimsteen* bevat grote holtes nagelaten door tijdens het stollen ingesloten gasbellen; bij puimsteen zijn deze bellen gesloten zodat het gesteente een laag soortelijk gewicht heeft en kan drijven op het water.



Het onderscheid tussen de plutonische, de gang-of vulkanische varianten van eenzelfde magma ligt dus niet in de samenstelling maar wel in de textuur die zeer gevoelig is voor het stollingsritme: plutonieten zijn gelijkmatig uitgekristalliseerd vol duidelijk zichtbare kristallen (bijvoorbeeld *graniet*), ganggesteenten bezitten een overwicht aan snel gekristalliseerde kristalletjes met soms grotere vroeger uitgekristalliseerde mineralen (deze textuur wordt *porfierisch* genoemd en is bekend uit de groengrijze kasseien van de profiergroeves te Quenast, Bierghes en Lessines), vulkanische gesteenten zijn zeer fijnkorrelig en bestaan grotendeels uit kristalkiemen (bijvoorbeeld *basalt*).

Magma's kunnen erg gevarieerd zijn in samenstelling omwille van de verschillende soorten gesteenten die kunnen opgesmolten worden. De verschillen in samenstelling tussen de stollingsgesteenten worden meestal aangegeven als variaties tussen een zure, een intermediaire en een basische samenstelling. In de zure stollingsgesteenten zijn veel kiezel (SiO_4 tetraëders) aanwezig en weinig ijzer- en magnesiumhoudende silicaatmineralen, zodanig dat vrij kiezel zal uitkristalliseren tot kwarts. Het typevoorbeeld van een zuur dieptegesteente is graniet, met enkele % kwarts, dominerend veldspaat en ten slotte enkele % mica's. Variaties in gehalte en samenstelling van de veldspaten bepalen het uitzicht van het graniet (overwegend grijs, wit, roos). In de intermediaire gesteenteserie komt geen vrij kiezel meer voor en reeds enkele tientallen % van de donker gekleurde ijzer- en magnesiumrijke mineralen (bijv. de diorietvorm larvikiet, beter bekend als labradoriet, bijna uitsluitend bestaande uit grote donkere Ca-Mg plagioklaaskristallen met iriserende glans). Bij de donkergekleurde basische gesteenten loopt dit gehalte op tot boven de veertig procent en komt geen kwarts meer voor. Basische plutonieten (bijv. *gabbro*) stollen het eerst, op grotere diepte en bij hogere temperatuur; zure plutonieten (bijv. *graniet*) zijn doorgaans bleker gekleurd en stollen op geringere temperatuur, wanneer het magma reeds dicht bij de aardoppervlakte genaderd is en doorheen andere gesteenten geïntrudeerd is. *Basalt* is een basisch uitvloeiingsgesteente dat de samenstelling van de oceaankorst of de diepere mantel weerspiegelt.

	uitvloeiing	gang	diepte
zuur	syeniet	porfier	graniet
intermediair	andesiet		dioriet
basisch	basalt	doleriet	gabbro

Classificatieschema van de stollingsgesteenten

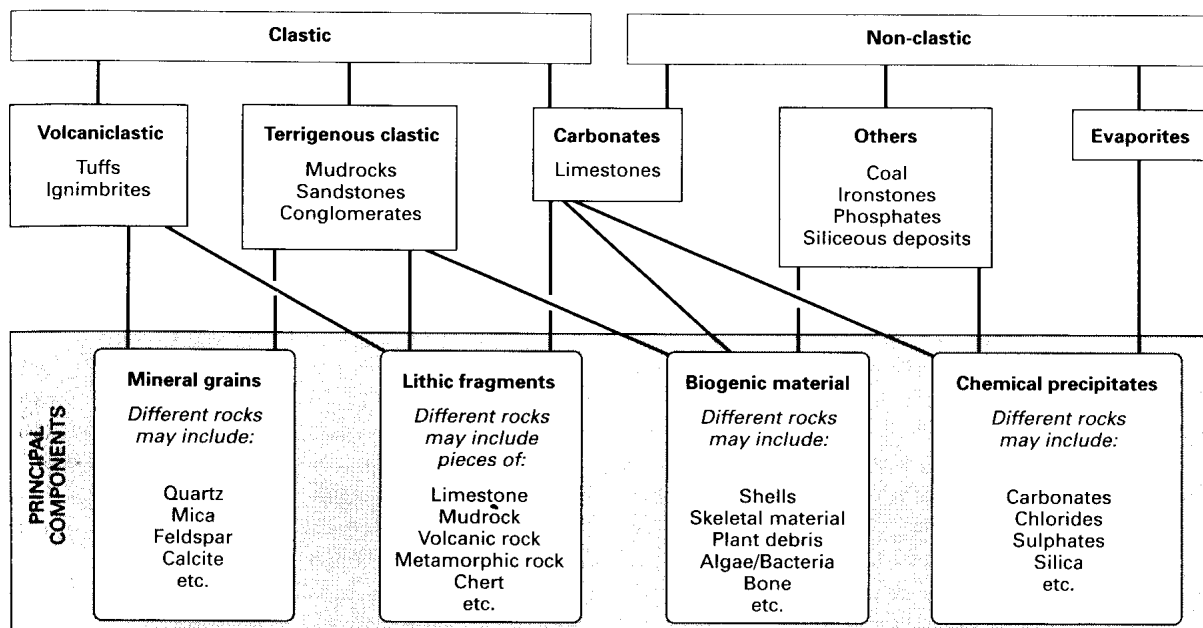
De classificatie van de magmatische gesteenten berust dus op twee kenmerken: eerst en vooral op de verhouding van de lichte bestanddelen (kwarts en veldspaten), gerangschikt volgens een overmaat tot een tekort aan SiO₂ (van zuur tot basisch), en vervolgens op de textuur of graad van kristalliniteit (afnemend van dieptegesteenten tot uitvloeiingsgesteenten). Deze classificatie weerspiegelt ook de volgorde waarin de stollingsgesteenten uit een smelt zullen uitkristalliseren.

In de handel worden alle korrelige stollingsgesteenten, soms ook donkere korrelige kalkstenen, onder graniet gerangschikt, ongeacht hun mineralogische samenstelling. Samenstelling en textuur bepalen nochtans de slijtvastheid en de zuurbestendigheid.

Sedimenten (afzettingsgesteenten)

Sedimenten, verkitting en diagenese

Sedimenten zijn deeltjes, met afmetingen van colloïdale partikels kleiner dan 1 µ tot grove zandkorrels van meer dan 1 mm en keien van meerdere dm groot. Sedimenten worden door de wind, het water van rivieren, zeeën en oceanen, of gletsjers getransporteerd tot ze uit de lucht of uit het water op de bodem bezinken. Samen met de getransporteerde, *detrietische* of *klastische* sedimenten zullen ook organismen begraven worden zoals de schelpen die op de bodem leven of micro-organismen die in het plankton leven en bij afsterven net als sedimentpartikels in het water bezinken.

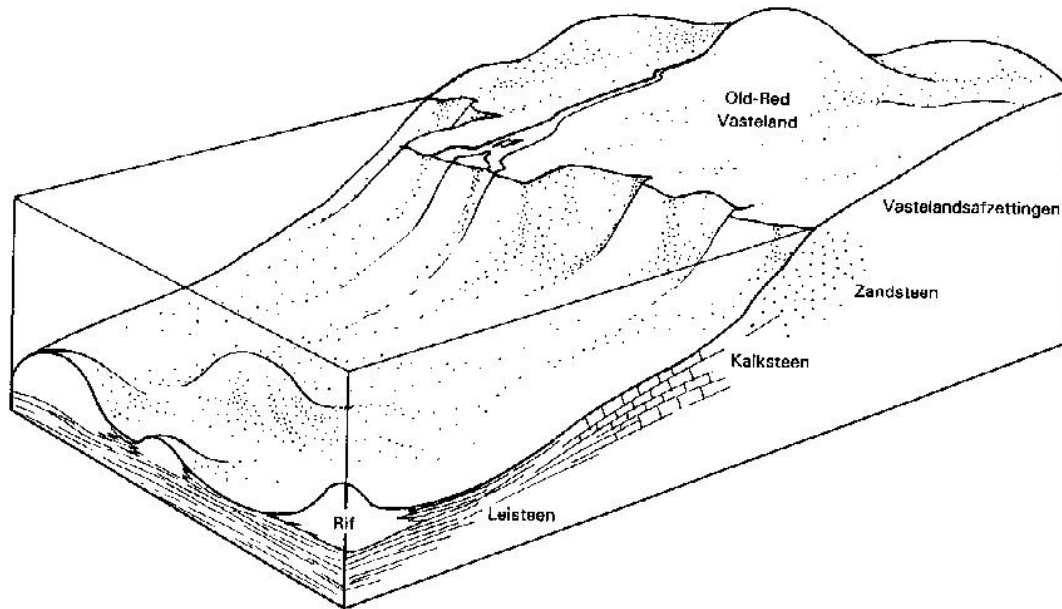


Voornaamste componenten in sedimentaire gesteenten (Nicholls: Sedimentology and stratigraphy. Blackwell Science)

Sedimentatiebekkens

In een sedimentatiemilieu worden de sedimenten onder de vorm van afzettingsgesteenten steeds dieper begraven onder de nieuwe, bovenop bezinkende sedimentpartikels (*superpositie principe*). De dikte van de sedimentkolom zal afhangen van de hoeveelheid aangevoerde sedimenten (gekoppeld aan erosiesnelheid en stromingspatroon) en van de beschikbare ruimte in het sedimentatiegebied om sedimenten op elkaar te blijven stapelen (door de oppervlakte van het sedimentatiebekken, diepte van de bodem, zakkingsritme of *subsidentie* van het bekken en compactiegraad van de oorspronkelijk

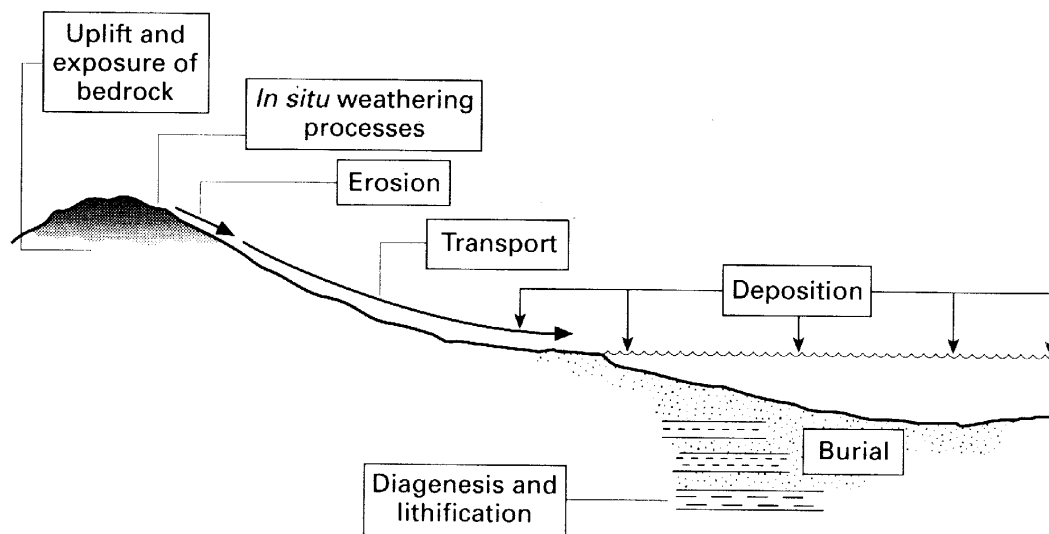
losgestapelde waterverzadigd slib en zand). In een sedimentair bekken zoals het Noordzeebekken, waarin meerdere grote rivieren met sediment beladen uitmonden, zijn in de laatste 65 miljoen jaar zo een 2000 m en in het centrum zelfs tot 3500 m dikke sedimenten bezonken. Dit kon alleen omdat het ganse Noordzeegebied gedurende die periode steeds voldoende diep wegzonk in de aarde om ruimte te scheppen voor die hoeveelheid sedimenten. Subsidentie en sedimentatie hielden elkaar al die tijd grotendeels in evenwicht zodat de diepte van de zeebodem nooit veel groter was dan nu het geval is.



Paleogeografische reconstructie van de kust van Zuid België tijdens het Devoon tijdperk. Tourneur, 1994. De riffen uit het Frasniaan van België. In: Cordy, J.-M., ed. Van bacterie tot Lucy, 4 miljard jaar leven op aarde. Belgische Vereniging voor Paleontologie N. 14, p. 107.

Diagenese

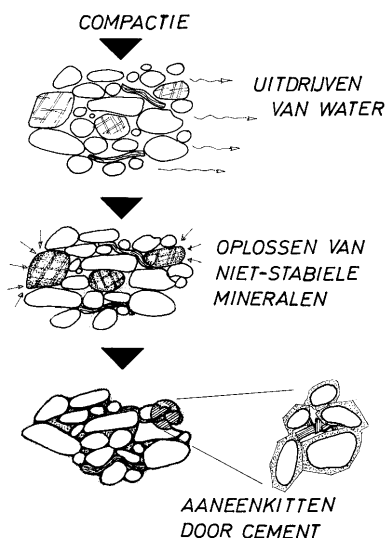
Wanneer sedimenten dieper bezinken zullen ze onder een steeds toenemende druk komen te staan, op de eerste plaats door het gewicht van de overliggende sedimentkolom, waardoor de korrels dichter op elkaar zullen gedrukt worden en de poriënruimte zal verkleinen. Ook de temperatuur zal toenemen met een gemiddelde geothermische gradiënt van 2 tot 4°C per 100 m dieptetoename. Tevens zal door reactie van het poriënwater met de sedimentkorrels de hoeveelheid opgeloste stoffen toenemen, zelfs in die mate dat het gehalte opgeloste stof in poriënwaters van 2 à 3000 meter diepgelegen sedimenten gemakkelijk tot vijfmaal het zoutgehalte van zeewater kan bedragen. Onder deze omstandigheden is het te verwachten dat nieuwe mineralen uit deze poriënwaters zullen neerslaan, voornamelijk carbonaat- en kiezelneerslagen als cement tussen de sedimentkorrels. Deze cementen zullen verder de porositeit reduceren en de sedimentpartikels aan elkaar kitten die reeds om drukredenen mechanisch harder in elkaar waren geperst. Tijdens de *diagenese*, de tijd die sedimenten in de ondergrond doorbrengen vooraleer ze door nog grotere druk en temperatuur volledig omgekristalliseerd worden tot metamorfe gesteenten, zullen losse sedimenten omgezet worden in hardere sedimentgesteenten. Het zou echter een grove misvatting zijn om hieruit af te leiden dat harde gesteentebanken enkel op grote diepte gevormd kunnen worden. Om klimaatsredenen of omwille van speciale ecologische omstandigheden kunnen specifieke organische resten in massale hoeveelheden in het sediment opgenomen worden. Zowel kiezel, afkomstig van bijvoorbeeld een belangrijke productie van sponsnaalden of van eencellige kiezelwiertjes, of kalk afkomstig van een uitzonderlijke planktonbloei of van dikke schelpenbanken, zullen zoveel extra kiezel en kalk in het poriënwater brengen dat de sedimentpartikels zeer snel, nauwelijks op enkele meter diepte onder de zeebodem, aan elkaar zullen gekit worden. Dit is ook mogelijk met limoniet, fosfaat en andere, meer uitzonderlijke cementen. Ook kunnen bodemprocessen tot harde korstvorming leiden.



Opeenvolgende processen die leiden tot de vorming van sedimentaire gesteenten (Nicholls: *Sedimentology and stratigraphy*. Blackwell Science)

In de Tertiaire afzettingen van Vlaanderen komen tussen de losse sedimenten meerdere harde gesteentebanken voor als continue lagen van decimeter dikte. Voorbeelden hiervan zijn de vele natuurlijke bouwstenen in Centraal en Noord België, zoals de Gobertange en Balegemse steen, die vroeger intensief werden ontgonnen. Versteningen komen ook voor in discontinue horizonten van concreties of knollen. De bekendste zijn de septaria in de Boomse Klei, zo genoemd omdat er in de broodvormige kalkknollen een net van verticale spleten, precies tussenschotten of septae, aanwezig is. Over deze septaria kan als bijzonderheid vermeld worden dat ze na verloop van tijd in limonietknollen verweren. Tijdens de diagenese zijn de poriënwaters van de klei rijk aan ijzer in gereduceerde toestand. Bij de remobilisatie van de kalk, die naar de septariavorming leidt, zal dat Fe^{2+} in het kristalrooster van calciet voor een gedeelte van het calcium substitueren. Daardoor zijn de septaria zo ijzerrijk en bij verwerking, oxidatie en kalkuitloging, zullen ze daarom omgezet worden naar limoniet.

Een andere bekende vorm van harde concretielagen in zachte sedimenten is het voorkomen van vuursteen of silex als concreties in krijtlagen.



Opeenvolgende stadia bij de omvorming van een zand naar een zandsteen als gevolg van begraving

De poriënruimte speelt een belangrijke rol bij de vorstgevoeligheid van een gesteente. Net zoals de korrels een grootteverdeling bezitten, hebben ook de poriën dat. Die kan gemeten worden door in het poreuse gesteente een vloeistof te injecteren en de druk te volgen die nodig is om alle poriën te verzadigen. Hoe kleiner de poriënruimte immers, hoe groter de injectiedruk zal zijn. Het lijkt logisch te stellen dat een poreus gesteente niet vorstgevoelig zal zijn indien er minstens zoveel poriënruimte overblijft als er expansie is van het poriënwater bij omzetting naar ijs, en indien daarbij de poriënafmeting voldoende groot is om die verplaatsing veroorzaakt door de expansie toe te laten (in de praktijk maximaal 10% van de poriën kleiner dan 2,5 μ).

Indeling van de afzettingsgesteenten

De soorten van losse en vaste afzettingsgesteenten worden om praktische redenen ingedeeld in afbraakgesteenten bestaande uit keien, blokken met fragmenten van andere gesteenten, siliciklastische sedimenten zoals de zanden en de kleien waarin de hoofdmineralen meestal kwarts, veldspaten en/of kleimineralen zijn, de biogene kalkstenen, de chemische sedimenten zoals steenzout, en de organische afzettingen zoals veen en steenkool.

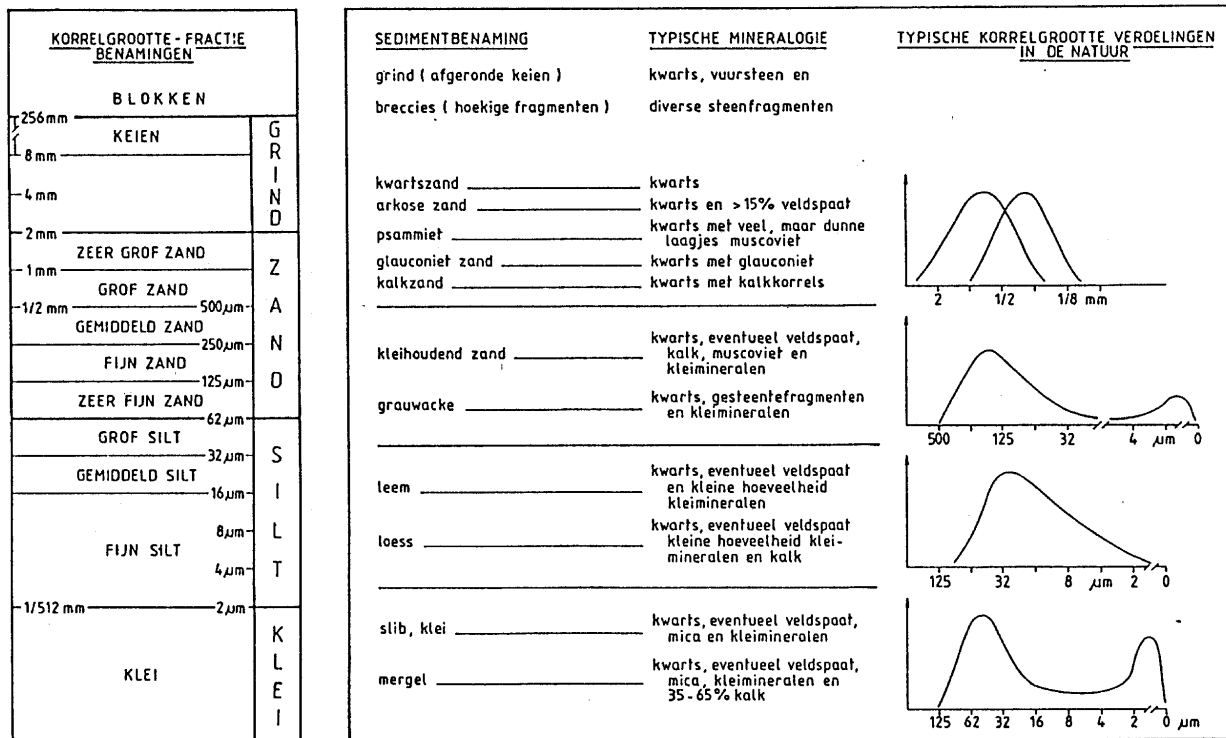
Zeer grove sedimenten

Het transporteren van keien of blokken met afmetingen die groter zijn dan enkele centimeter vereist zeer sterke stromingen of belangrijke terreinhellingen aan de voet waarvan het afbraakpuin zich dan opstapelt. Zo worden de vuursteen rolkeien die aan de basis van zandlagen voorkomen in de Tertiaire lagen gevormd doordat de vuursteenconcreties uit de krijtlagen in de klifkusten van de tertiaire zeeën door de erosie van de kustgolven worden vrijgemaakt en vervolgens in de branding kapotgeslagen en afgerond. Dit proces kan nu nog gevolgd worden aan de kusten van Normandië of Zuid Engeland. Ook rivieren zijn geschikte transporteurs van keien.

Zo heeft de Maas in de loop van haar 15 miljoen jaar geschiedenis enorme hoeveelheden keien, grotendeels afkomstig van de zich langzaam opheffende Ardennen naar het noorden getransporteerd. Daaronder zijn zelfs blokken van meerdere tonnen, waarvan algemeen wordt aangenomen dat ze met ijsschotsen zijn vervoerd tijdens de ijstijden. De keienlagen die bovenop het Kempisch Plateau voorkomen zijn oude Maasafzettingen. Naar de actuele vallei toe die 60 meter dieper ligt dan het Kempisch Plateau, worden nog meerdere jongere rivierterrasniveaus gevonden met grindafzettingen, terwijl ook in de recente rivierbedding grinden aanwezig zijn. De uitbating van de grindafzettingen als bouwaggregaat in de Maasvallei is een sprekend voorbeeld van de landschappelijke impact van uitbatingen van grondstoffen, met voortdurende tweestrijd tussen economische behoefte en behoud. De samenstelling van de grinden is afhankelijk van de gesteentesoorten in het brongebied. Tijdens het transport zal daarenboven een selectie gebeuren waarbij gemakkelijk verwerende gesteenten sneller zullen verkleinen en uiteindelijk ook volledig verdwijnen uit de grindsamenstelling waarin de meer verweringsresistente en hardere gesteentesoorten gaan domineren. De kwaliteit van de aggregaten en de daaruit vervaardigde producten zal mee bepaald worden door de gesteentetypes in het grind en hun verwerkingstoestand of vorstgevoeligheid.

Aaneengekitte grinden worden *conglomeraten* genoemd. Hoekige, niet gerolde gesteentefragmenten worden aangeduid als *puin*, of als *breccie* indien ze aaneengekit zijn. De oorsprong van breccies kan zeer verschillend zijn, tektonisch (vergruizing door breukwerking), door instorting in oplossingsholten (grotten) of als erosiepuin. Grove fragmenten die in een veel fijner tot kleiachtig sediment zweven zijn ofwel gevormd in morenen, gletsjerpuin dus, en worden dan *tilliet* of *keileem* genoemd, ofwel zijn ze hellingspuin ontstaan door bergstortingen in een landschap met een sterk uitgesproken reliëf. Tillieten komen in België niet voor maar zijn kenmerkend voor het rollende landschap in Noord Europa. Hellingspuin is kenmerkend voor berggebieden. Tijdens de ijstijden echter konden ook in België enorme

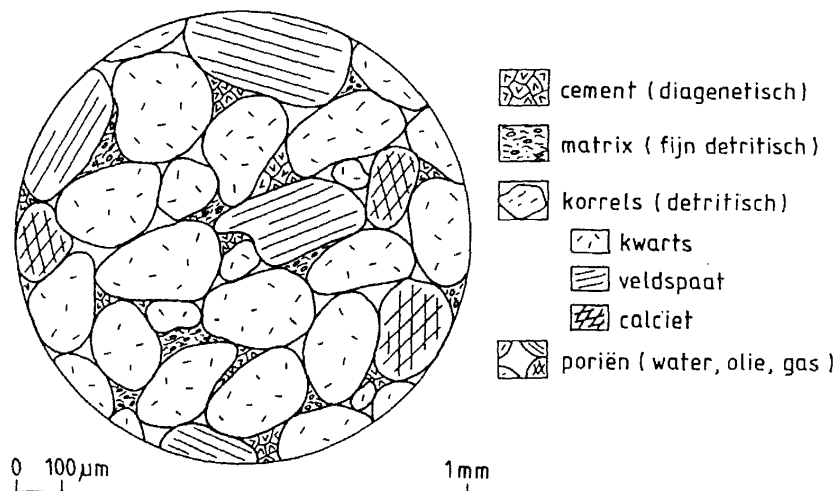
massa's bodemmateriaal en oppervlakkige gesteentelagen langzaam hellingafwaarts verschuiven langs veel zachtere hellingen (tot slechts 2°) bij opeenvolgende vorst-dooi cycli.



Korrelgrootteverdelingen en benaming van detritische sedimenten (Vandenberghe & Laga. De aarde als fundament)

Zand en zandsteen

Zanden worden eigenlijk gedefinieerd door het korrelgroottebereik van de sedimentpartikels. Zandkorrels hebben per definitie groottes tussen 2 mm en 0.062 mm (62 µ). Uiteraard is dergelijke definitie gekozen op basis van het korrelgroottebereik dat gewoonlijk gevonden wordt in natuurlijke sedimenten die als zand beschouwd worden. De mineralogische samenstelling van die sedimenten is niet essentieel in de definitie van een zand. Zo is de dominantie van kwarts in zand eigenlijk een resultaat van selectieve verwerking waarbij de weerstand tegen verwerking van kwarts groter is dan die van andere mineralen.



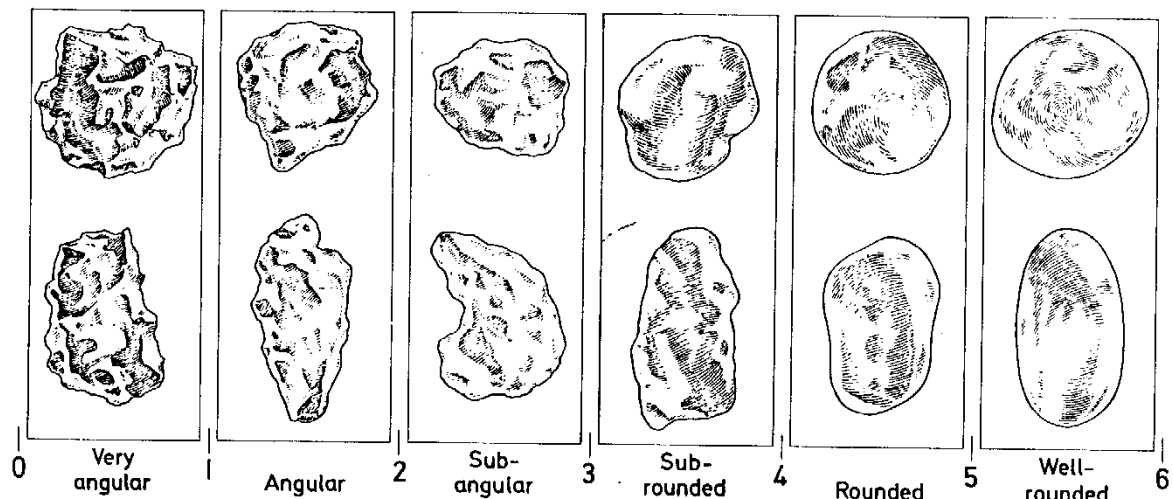
Microscopisch beeld van een zandsteen (Vandenberghe & Laga. De aarde als fundament)

Een zandsteen bestaat uit vier componenten:

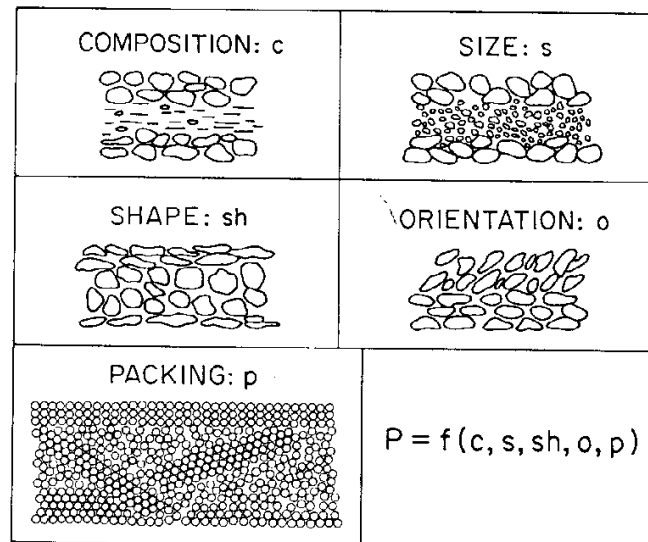
- de korrels zelf,
- kleinere partikeltjes die mee sedimenteerden en die nu tussen de grotere korrels in zitten en matrixkorrels genoemd worden,
- nieuwe mineralen die tijdens de diagenese tussen de oorspronkelijke korrels uitkristalliseren en cementen genoemd worden,
- de poriënruimte (met fluïda gevuld).

De mineralogie van de korrels wordt meestal gedomineerd door het mineraal kwarts omdat het zo weerstandig is aan verwerking. Zeer zuiver kwartzand, zoals het uitgebaat wordt te Mol, Lommel en Opgrimbie is dan weer zeer uitzonderlijk en daartoe moet naast een zeer verweerd brongebied dat reeds een kwartsaangerijkt sediment leverde ook nog een verdere uitloging in het afgezette zand plaatsvinden, onder invloed van grondwaters die verzuurd zijn door de percolatie door veen of bruinkoollagen. Voor de productie van hol wit glas bijvoorbeeld mag zand niet meer dan 0.05% Fe_2O_3 en 5 ppm Cr_2O_3 bevatten. Meestal komen naast kwarts ook nog veldspaatmineralen voor. Een zand waarin meer dan een vierde van de korrels uit veldspaat bestaan, naast kwarts, wordt een *arkose* genoemd.

Naast kwarts en veldspaat komt ook het stabiele kleimineraal *muscoviet* vaak als korrels voor. Vooral de getijdenwerking aan de kust is zeer effectief in het scheiden van de eerder ronde kwartskorrels van de platte muscovietblaadjes. Daardoor ontstaat er een zand dat zelfs op millimeterschaal een afwisseling te zien geeft van kwarts, met eventueel andere min of meer ronde korrels zoals veldspaat, en muscovietlaagjes. Door hun perfecte splijting en hun gelijke oriëntatie bij de sedimentatie zal een dergelijk gesteente een zeer goede splijting vertonen in de richting van de sedimentatiegelaagdheid. Deze zandstenen worden *psammieten* genoemd. De zandstenen van de Condroz, van Boven Famenniaan ouderdom, die nog intensief als bouwsteen of bouwaggregaat worden uitgebaat, zijn psammieten.



Afrondingsklassen voor sferische en langgerekte zandkorrels (Pettijohn et al., 1973)



Fundamentele eigenschappen van een zandlaag

Zanden bevatten bijna steeds een klein gehalte aan zware mineralen, meestal minder dan 1%, maar van gevarieerde mineralogische samenstelling. Zij zijn bijzonder informatief over de aard van het brongebied waaruit de zandkorrels afkomstig zijn. Ook kalk is vaak aanwezig in de zanden, als detrietische korrels, of als schelpengruis en fossielen. Sommige zanden afkomstig uit een brongebied zonder kwarts, bijvoorbeeld een complex van basische stollingsgesteenten of een vulkanische zone, zullen uiteraard een andere mineralogische samenstelling bezitten en zullen ook een andere, meestal donkere kleur vertonen.

Een speciale vermelding verdient zeker *glauconietzand*. Een glauconietzand bevat in de korrelfractie een gehalte, dat soms tot meerdere tientallen procenten kan oplopen, van donkergroene gelobde korrels bestaande uit het mineraal glauconiet. Deze glauconieten vormden zich waar ontbinding van organische stof in het bodemsediment lokaal een gereduceerd milieu veroorzaakte zoals binnenin de schelpjes van microfossielen; vandaar trouwens de gelobde buitenkant van veel frisse glauconietkorrels. De grote eigenaardigheid van glauconiet is dat het ondanks zijn zandkorrelafmetingen eigenlijk mineralogisch een klei is, met alle eigenschappen vandien. Het zal onder geringe druk kunnen vervormen, eventueel onder herhaalde belasting uit elkaar vallen tot een groene klei, zoals op een bouwwerf gebeurt wanneer vaak over een glauconietzand gereden wordt. Hierdoor wordt uiteraard de doorlatendheid van het zand gewijzigd. Glauconiet dat gereduceerd ijzer bevat zal ook oxideren. Het zal daardoor een limonietverkleuring krijgen en het is niet ongewoon dat zich in glauconietzanden *ijzerzandsteenbanken* ontwikkelen zoals dat het geval is in de Zanden van Diest op de Hagelandse heuveltoppen.

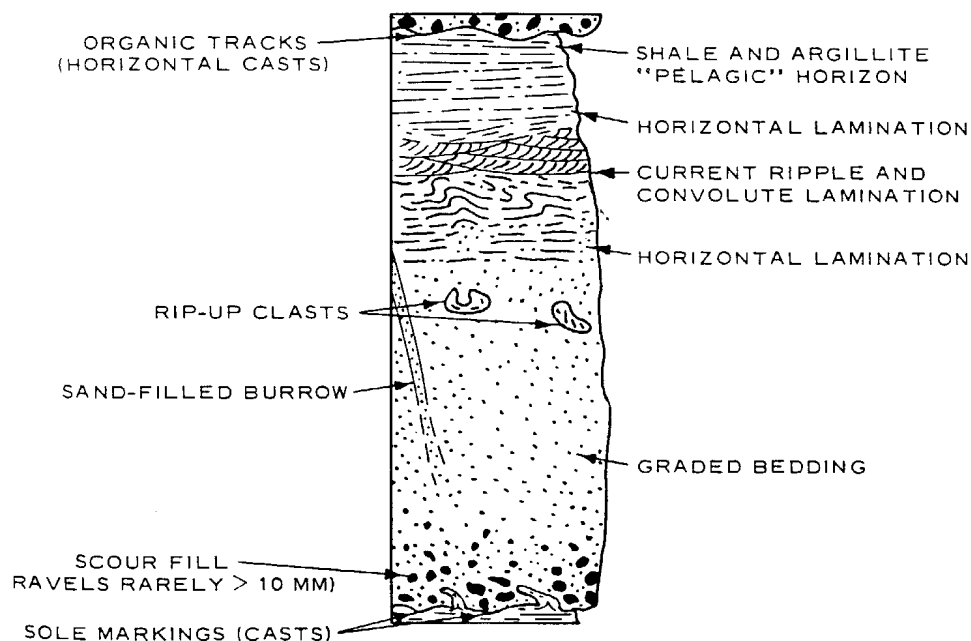
Het is mogelijk om zanden te vinden die uit een andere mineralogie bestaan. Denk bijvoorbeeld aan een brongebied dat bestaat uit stollingsgesteenten. In zo een brongebied is kwarts minder of niet aanwezig en is er een overmaat aan veldspaten of andere donker gekleurde Fe-Mg houdende silicaten. Zanden die als afbraakpuin van zo een gebied zullen ontstaan zijn bijvoorbeeld donker of rozerood gekleurd.

De mineralogische samenstelling van de fijnere sedimentpartikels is gelijkaardig aan deze van de grotere korrels behalve dat ook kleimineralen aanwezig kunnen zijn. Zanden kunnen meerdere procenten *klei* bevatten. Meestal wordt het kleigehalte gelijkgesteld met de korrelgroottefractie kleiner dan 0.002 mm. Een dergelijke granulometrische bepaling van het kleigehalte kan ook nog andere mineralen insluiten, vooral geplette kalk en organisch materiaal.

De spreiding van de korrelgrootte in een zand wordt bepaald door de afzettingscondities, maar is tevens van groot belang voor porositeit en doorlatendheid. Natuurlijke zanden benaderen een lognormale verdeling van de korrelgrootte. De sortering wordt gebruikt in de normenbeschrijving voor het aanwenden van zanden voor bouwdoeleinden.

De cementen die na begraving van het sediment uit het poriënwater neerslaan en de korrels aaneenkitten zijn voornamelijk kiezel (opaal, chalcedoon of kwarts), calciëet (ook Fe-Mg houdende carbonaten zoals sideriet en ankeriet), limoniet, en in mindere mate fosfaat, pyriet of nog andere mineralen. Door de cementatie en de compactie tijdens de diagenese zal geleidelijk de porositeit gereduceerd worden en uiteindelijk totaal verdwijnen. De beginporositeit van een net afgezet zand, net een losse bolstapeling, zal maximaal ongeveer een 45 % bedragen.

De poriën zijn gevuld met water dat met toenemende bezinkingsdiepte steeds meer opgeloste stof bevat, van NaCl-type of van bicarbonaat-type. In sommige omstandigheden kunnen de poriën ook gevuld zijn met aardgas of met olie. Aan de oppervlakte zal de poriënruimte tussen het maaiveld en de grondwatertafel grotendeels met lucht gevuld zijn. De typische gele kleur van zandafzettingen in ontsluitingen wordt veroorzaakt door een uiterst dunne film van limoniet rond de kwartskorrels, veroorzaakt door de neerslag van Fe^{2+} dat in het poriënwater aanwezig was en door oxidatie onoplosbaar wordt tot Fe^{3+} en daardoor moet neerslaan. Onder de watertafel worden trouwens alleen nog grijs getinte, gereduceerde, zanden aangetroffen.



Voorbeeld van een natuurlijke sedimentaire cyclus (Pettijohn et al., 1973)

Wanneer zanden getransporteerd worden zal het contactvlak tussen het water of de lucht geen horizontaal vlak zijn maar zullen er structuren zoals bijvoorbeeld ribbels gevormd worden, zoals ze op het strand of in de duinen kunnen geobserveerd worden. Het transport van het zand gebeurt door het verschuiven van die ribbels. De aangroei van de hellende vlakken zal in het latere sediment gedocumenteerd blijven als schuine gelaagdheidsvlakken. Er zijn verschillende soorten van schuine gelaagdheden en ze worden gebruikt om de fossiele afzettingscondities te reconstrueren. De gelaagdheden zijn zichtbaar doordat er tijdens het transport en de afzetting een selectie is van de korrelgroottes en eventueel ook de mineraalinhoud, naar massa en vorm. Een verstoring van het oorspronkelijke gelaagdheidspatroon gebeurt door de werking van organismen, voornamelijk wormen, die het sediment omwoelen en waarvan de sporen algemeen als *bioturbaties* aangeduid worden. Ze zijn

in het sediment te herkennen aan lichte variaties in de mineralogie, verschillende cementeringsgraden en soms door een specifieke vorm (*illustratie op vorige bladzijde*).

Uit de beschrijving van zanden en zandstenen moet het duidelijk zijn dat er zoveel verschillende soorten zandstenen zijn qua korrelgrootte, structuren, mineralogie, cementeringsgraad, porositeit dat hun geotechnische kwaliteiten erg uiteenlopend kunnen zijn. Bij veel zandstenen zijn de eigenschappen trouwens ook sterk anisotroop omwille van de gelaagde opbouw.
www.geologievannederland.nl/ondergrond/afzettingen-en-delfstoffen

Loess en leem

In het spraakgebruik van de geoloog worden de termen loess en leem voorbehouden voor de fijne bruinegekleurde windafzettingen die we nu aan de oppervlakte vinden in de leemstreek, grijs indien ze onder de watertafel te vinden zijn, en die er als een mantel het eerder gevormde reliëf toedekken. In de geotechniek wordt leem ook nog wel eens gebruikt om een kleirijk zand aan te duiden.

Loess is een zeer speciaal sediment omdat het voor het grootste gedeelte is opgebouwd uit kwartskorrels van siltafmetingen, tussen 0.062 en 0.002 mm, wat een speciale vormingsconditie vereist. Het is immers de pletting van puin door gletsjers dat bij machte is om massale hoeveelheden kwartssilt te produceren. Dat silt komt vrij wanneer de gletsjer zich terugtrekt en wordt dan opgewaaid om verder weg terug afgezet te worden. Zo komt er ten zuiden van de ijskap die zich in de laatste ijstijd in het noordelijk halfrond vormde een gordel voor van loess in Canada, en van West-Europa tot in China. Naast het silt bevat loess ook enkele procenten fijn zand en klei en ook kalk. Deze kalk geeft aan loess nog een extra cohesie. Loess is bekend omdat ondanks de afwezigheid van enige cementatie verticale wanden in loess toch stabiel zijn. Deze stabiliteit is al een stuk minder wanneer de loess ontkalkt is. Deze ontkalkte loess wordt als leem beschreven. In tegenstelling tot klei bezit leem een lage plasticiteit. De stabiliteit van leem wordt drastisch gereduceerd wanneer deze oppervlakte-afzetting met water verzadigd wordt. Dit verklaart waarom door regen bevochtigde leem zijn samenhang verliest en tot modder omgezet wordt, of aanleiding kan geven tot modderstromen.

Leem is ook het oudste bouw materiaal dat nog steeds mogelijkheden biedt.

Slib, klei en schiefer

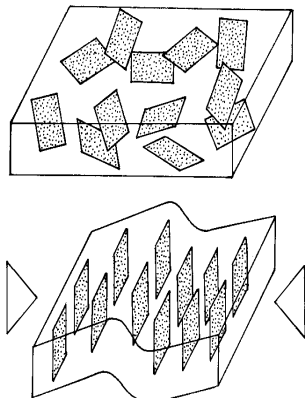
Daar waar voor het transport van zandpartikels stromingen van enige sterkte nodig zijn, zullen fijnere partikels bij veel zwakkere stroming langer getransporteerd worden in suspensie om tenslotte in zeer kalm water te sedimenteren en een sliblaag te vormen op de bodem. Slibafzettingen kunnen zich ook vormen waar grotere turbulentie heerst wanneer de concentratie aan slib maar groot genoeg wordt in het water. Dit is de verklaring voor de vorming van slibplaten aan kusten waar de klei, die door de rivieren vaak massaal wordt aangevoerd, door het complexe spel van de mariene kuststromingen niet dieper in zee wordt afgevoerd.

De samenstelling van het slib bestaat uit een mengsel van zeer fijn zand en silt, hoofdzakelijk kwarts, veldspaat, muscoviet, van een belangrijk gehalte aan kleimineralen, vaak ook carbonaat, en enkele procenten organische substanties en ook wel amorfe colloïdale deeltjes.

In zoet water zullen de repulsiekrachten tussen de kleimineralen overheersen waardoor de slibpartikels individueel zullen bezinken. In brak en zout water echter zullen de attractiekrachten tussen de kleipartikels domineren en zullen open vlokstructuren vormen van een tiental micrometer tot enkele millimeter groot. De vlokvorming van kleimineralen gebeurt massaal wanneer rivierwater met

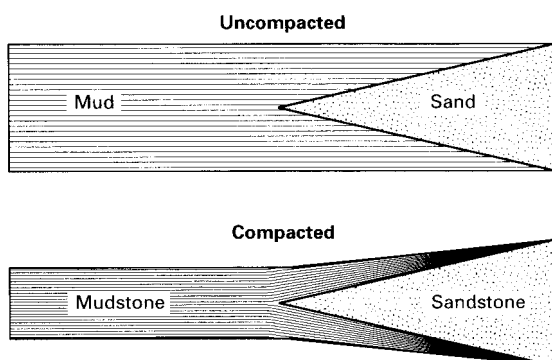
sedimenten beladen het brakke water in een estuarium bereikt en daardoor grijpt er daar een versnelde sedimentatie plaats. Om de estuaria bevaarbaar te houden dient dit slib uitgebaggerd te worden. Door de zeer hoge graad van vervuiling van de rivieren en het adsorberend karakter van de kleimineralen is het uitgebaggerde slib soms dermate gepollueerd dat het terugstorten van uitgebaggerd slib nu problematisch geworden is.

Wanneer het slib in de zee op de bodem bezinkt wordt er vaak meer water mee in het slib gevangen dan er vaste stof bezinkt. Bij verdere ondersedimentatie zal echter het grootste deel van dat water reeds na enkele meters uit de klei verdreven zijn. Even snel neemt uiteraard de mechanische sterkte van de bezonken klei toe.



Schematische voorstelling (zonder schaal) van de heroriëntatie der kleimineralen als gevolg van compactie (samendrukken) van het kleirijke sediment (R. Dreesen in Natuursteenatlas Limburgse monumenten).

Bij verdere ondersedimentatie zal het watergehalte nog verminderen en zal de interne partikelstructuur van de klei verder toegedrukt en daardoor georiënteerd en herschikt worden in domeinen van enkele micrometer groot. Tegen het einde van de diagenese, op een vier à vijfduizend meter diepte, bedraagt het watergehalte in de klei nog slechts 1 tot 2 %. Belangrijk bij deze evolutie van de kleicompactie is dat de partikelconfiguratie onomkeerbaar is. Dat betekent dat wanneer erosie van bovenliggende lagen een klei terug dicht bij de oppervlakte brengt, de consolidatie van de klei behouden blijft. Dergelijke kleien worden dan overgeconsolideerd genoemd. De textuur kan wel veranderd worden door verwering aan het oppervlak en veranderingen in het vochtgehalte. Het bedrag van de overconsolidatie kan uit samendrukkingproeven afgeleid worden terwijl historisch-geologische reconstructies kunnen helpen om ook te bepalen wanneer de consolidatie en de erosie gebeurden. Aan de oppervlakte is het nogal vanzelfsprekend dat constructies meestal in overgeconsolideerde kleien gebeuren.



Differentiële compactie in klei en zand (Nicholls)

Kleiafzettingen zijn bekend voor hun plasticiteit. De plasticiteit van een kleiafzetting heeft te maken met de ordening van het geadsorbeerde water tegen het kleimineraalrooster. De ordening in de waterlaag tegen het kleikristalliet kan verder doorgegeven worden aan een volgende waterlaag. De grootste plasticiteit wordt bekomen bij watergehaltes waar nog net alle water georiënteerd is en waar eventueel het eerste vrije water ook nog meehelpt tot de cohesie door capillaire aantrekkingskrachten in de zeer

fijne poriën. Bij verdere toename van het watergehalte wordt dit vrij of ongebonden en dus niet georiënteerd. De cohesie zal daardoor terug verminderen en uiteindelijk zal de vloeigrens bereikt worden. Wanneer klei bij progressieve compactie en ontwatering naar watergehaltes evolueert die in de buurt komen te liggen van de plasticiteitsgrens kan de klei reeds kleinere spleetjes en eventueel grotere scheuren vertonen. Deze spleetjes in de klei zullen de belangrijkste permeabiliteitsbanen zijn in een zware klei. Ze zullen meer of minder water doorlaten al naar gelang de druk waaronder ze dicht gehouden worden.

Een belangrijk kenmerk van kleiafzettingen is ook dat ze in een gereduceerde toestand voorkomen. De geringe hoeveelheid zuurstof die in het weinig turbulente water was opgelost bij de sedimentatie wordt al snel opgebruikt bij de oxidatie van een beetje organisch materiaal dat altijd wel in het slib mee afgezet werd. Daardoor wordt het poriënwater gereduceerd, zal het aanwezige ijzer gereduceerd worden en in oplossing gaan en kunnen mineraalfasen als pyriet gevormd worden. Pyriet is een zeer gewoon mineraal in kleiafzettingen. Wanneer kleien terug aan de oppervlakte gebracht worden zal dan uiteraard het tegenovergestelde gebeuren en zal de klei snel geoxideerd worden. De eigenschappen van de klei veranderen hierdoor en zo wordt de geoxideerde top laag van de kleien bijvoorbeeld speciaal opgezocht voor de vervaardiging van dunwandige keramische producten zoals bijvoorbeeld bloempotten.

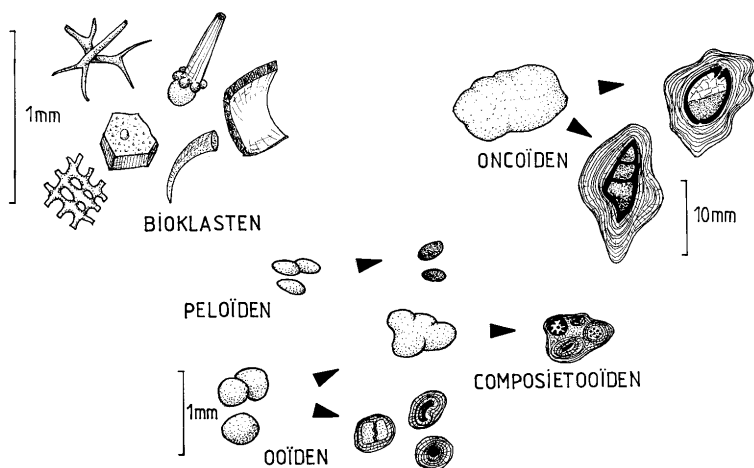
Zolang kleien enkel evolueren door compactie en wateruitdrijving zullen ze in water nog steeds in brokken van enkele centimeter groot uiteenvallen. Wanneer echter zoals dat tijdens de diagenese van zandstenen het geval is ook cementen gevormd worden in de poriën van de klei, zullen die de klei aaneenkitten zodat die ook na langdurige onderdompeling in water niet meer uiteenvalt. Tijdens de diagenetische evolutie van kleien zullen zich geleidelijk, door de oriëntatie van de kleimineralen tijdens de compactie, onregelmatige splijtvlakken ontwikkelen. Vanaf het ogenblik dat een dergelijke splijting zich ontwikkeld heeft wordt het gesteente aangeduid als een *schiefer*.

Tijdens de late diagenese zullen de kleimineralen naar nieuwe samenstellingen evolueren. De nieuw gevormde kleimineralen zijn voornamelijk illiet en chloriet. Dat laatste mineraal zal zich voornamelijk bij het begin van de metamorfose vormen. De kleimineralen die verdwijnen bij de vorming van illiet en chloriet zijn kaolinit en smectiet.

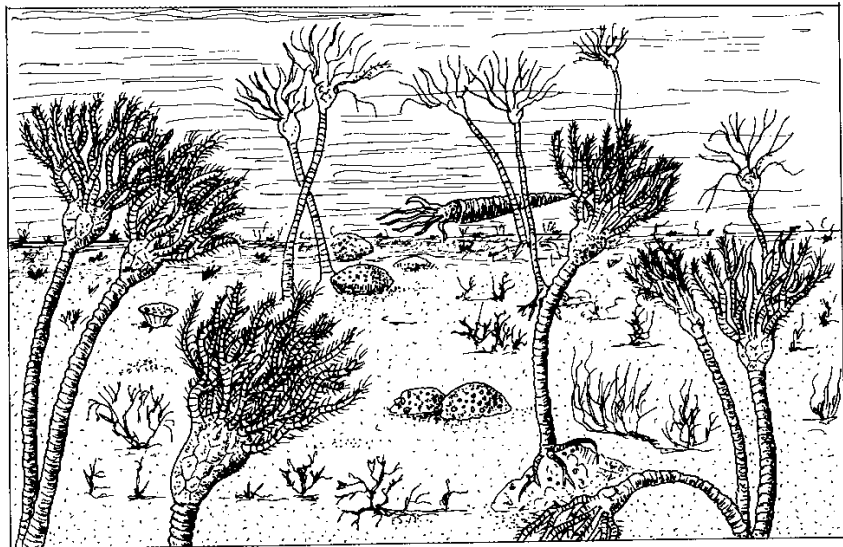
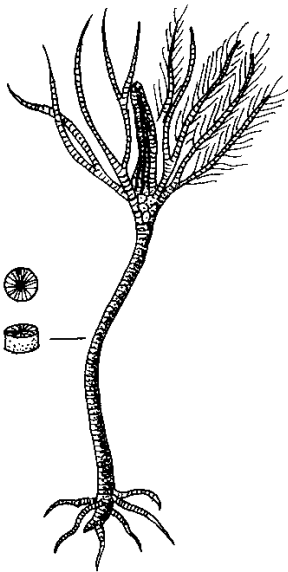
Kalksteen en dolomiet

Het typerende kenmerk van deze categorie van sedimentgesteenten is dat de mineralogische samenstelling gedomineerd wordt door carbonaatmineralen, calciet, aragoniet, dolomiet en in mindere mate sideriet.

De sedimentpartikels die kalkafzettingen vormen worden getransporteerd en afgezet zoals dat beschreven werd bij de vorming van zanden en kleien en daarom zullen ook gelaagdheden en korrelsorteringen aangetroffen worden in de kalksedimenten en zijn er ook eigenschappen aanwezig zoals porositeit en doorlatendheid. Alleen de oorsprong van de kalksedimentpartikels is speciaal. Deze partikels zijn namelijk van biologische oorsprong. Het zijn door golven en stromingen kapot geslagen skeletresten of kalkafscheidingen van organismen. Er leven bijvoorbeeld wieren in zee die in hun normale leefcyclus massale hoeveelheden fijne aragonietnaalden produceren. Uiteraard kunnen ook volledige fossielen en fossielbanken bewaard worden. Kalkresten van organismen kunnen bestaan uit aragoniet of uit calciet. Aragoniet is na fossilisatie onstabiel en zal omzetten naar calciet. Deze omzetting van het ene in het andere CaCO_3 polymorf gaat gepaard met een volumevermeerdering ; inderdaad de dichtheid van calciet en aragoniet is respectievelijk 2.71 en 2.93 gr/cm³. Daardoor verdwijnt de porositeit bij de omzetting en gebeurt de cementatie van kalkstenen snel. Er zullen veel verschillende soorten van kalkstenen bestaan, alleen al door de aard van de bijeengespoelde skeletresten.



Schematische voorstelling van biogene en organisch-chemische componenten van kalksteen: enerzijds afbraakproducten van schelpen en andere skeletten zoals bioklasten en anderzijds kalkbolletjes die het gevolg zijn van een directe precipitatie of van een organische binding van calciet, zoals: peloiden, ooiden en oncoïden.

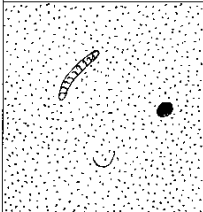
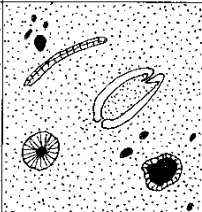
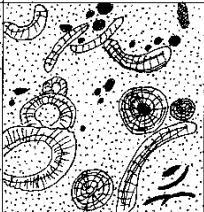
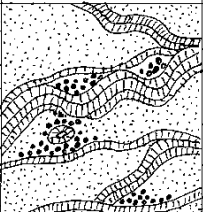
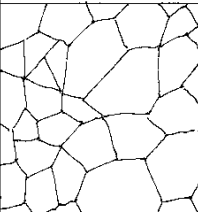


Tafereel op een zeebodem tijdens het Late Paleozoïcum, met weiden van zeelelies of crinoïden. Links: architectuur van deze stekelhuidige met detailbeeld van het kleinste onderdeelje - een stengelid.

Tekeningen overgenomen uit cursus "Sedimenten en sedimentaire gesteenten" LIKONA Werkgroep Geologie, 2002.

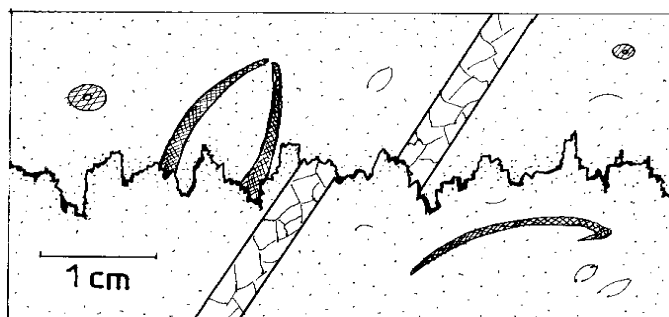
De blauwe hardsteen of arduin, die in ons land uitgebaat wordt in grote groeven tussen Ath en Soignies (Petit Granit), is bijvoorbeeld in zeer grote mate opgebouwd uit een opeenstapeling van de resten van zeelelies of crinoiden. Andere types van kalksteen zijn opgebouwd uit de opeenstapeling van schelpen, van koralen of nog andere organismen. Krijt is hoofdzakelijk opgebouwd uit microfossielen die in het plankton van de zee leefden en na hun afsterven door de waterkolom naar beneden dwarrelden. Deze microfossielen zijn opgebouwd uit calciet en zullen dus niet de omzettingsreactie kennen die hun porositeit vernietigt. De porositeit is echter niet effectief omdat de partikels en daardoor de poriënruimtes zo klein zijn. Tufkrijt (ook bekend als Maastrichtersteen of mergelsteen) bezit grotere partikels waardoor ook de poriënafmelingen toenemen en het tufkrijt goed watervoerend kan worden.

Naast deze allochtone, detrietische kalkstenen opgebouwd uit getransporteerde skeletresten van organismen, bestaan er ook autochtone kalkstenen opgebouwd uit skeletten die bewaard zijn op de plaats waar ze leefden op de zeebodem. Zo zijn er rif of bioherm kalkstenen die bewaarde fossiele riffen zijn. Belangrijke rifbouwers zijn koraalkolonies, sponsachtigen en algen, naast een rijke variëteit aan andere organismen. De beroemde rode kalkstenen uit de omgeving van Philippeville zijn afkomstig van paleozoïsche kleine rifkoepels die zich tussen een schiefermassa bevinden.

Met herkenbare originele textuur					
Originele componenten of korrels zijn niet aan elkaar gekit tijdens de afzetting					
Bevat kalkmodder		Bevat korrels als ondersteuning	Bevat geen kalkmodder meer	Originele componenten werden tijdens afzetting aan elkaar gekit	Zonder herkenbare originele textuur
Bevat uitsluitend of hoofdzakelijk kalkmodder					
Minder dan 10% korrels	Meer dan 10% korrels				
MUDSTONE	WACKESTONE	PACKSTONE	GRAINSTONE	BOUNDSTONE	KRISTALLIJN
					

Classificatieschema van kalkstenen op basis van de textuur volgens Dunham (1962). Determinerend hierbij is de manier van stapeling van de componenten en de aanwezigheid of afwezigheid van kalkmodder: wordt de kalksteen ondersteund door een "geraamte" of "gebinte" van korrels? Raken de korrels elkaar of worden ze door het effect van organismen samengehouden?(R. Dreesen in Natuursteenatlas Limburgse monumenten).

Wanneer kalkhoudende gesteenten begraven worden onder overliggende sedimenten zullen kalksedimenten gemakkelijk aan elkaar cementeren en dus snel harde gesteenten of gesteentebanken opleveren. Wanneer kalk samen met andere sedimenten bezinkt, zoals bijvoorbeeld het geval is bij mergel, een mengsel van klei en kalksediment, zal kalk gemakkelijk oplossen in het poriënwater en herverdeeld worden, zoals bijvoorbeeld bij de vorming van kalkknollen in schiefers of kleiige zanden. Bij toenemende druk zal calciet ook oplossen. Inderdaad ook in de diepste oceaan, beneden een diepte van 4000 m, zijn de sedimenten kalkloos omdat de bezinkende kalkdeeltjes er worden opgelost door de met de diepte toenemende hydrostatische druk. In kalkafzettingen die nauwelijks duizend meter diep begraven liggen worden ook reeds drukoplossingsverschijnselen aangetroffen onder de vorm van voegen, meestal ongeveer evenwijdig met de gelaagdheidsvlakken, waarin alle niet oplosbare partikels uit het opgeloste kalkgedeelte geconcentreerd zijn.



Microscopische opname van een styloliet met drukoplossing van de kalksteen, verduidelijkt door het gedeeltelijk weg-vreten van kalkschalen en calcietaadertjes (R. Dreesen in Natuursteenatlas Limburgse monumenten).

Deze voegen zijn sterk ondulerend, met golflengtes en amplitudo's van ongeveer een centimeter, en worden *stylolieten* genoemd. In de arduingesteenten, de Petit Granit of blauwe hardsteen, zijn ze bekend als zwarte voegen en worden de gesteenteblokken parallel eraan verwerkt omdat de stylolieten door de klei erin veel minder cohesie hebben dan het arduingesteente zelf.

Belgisch of buitenlands?

Belgische Blauwe Hardsteen (petit granit), van Carboon ouderdom, wordt verdrongen van de openbare markt in Vlaanderen door Chinese hardsteen, van Cambrium ouderdom. Verklaar vanuit de geschiedenis van de aarde hoe oude steensoorten van geheel verschillende herkomst toch gelijkaardige eigenschappen bezitten?

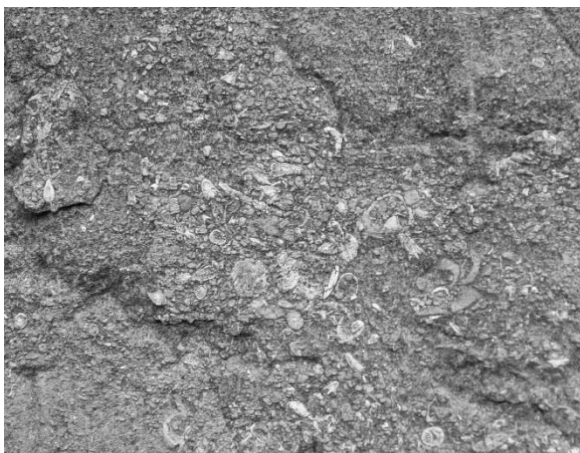
Het verband is plaattektoniek. Diachronisme had een alternatieve verklaring kunnen zijn, gaat enkel op voor lagen die in onderlinge geometrische continuïteit zijn afgezet. Belgische en Chinese steen zijn echter op grote afstand van elkaar afgezet en ook het tijdsverschil is te groot (afgerond 200 miljoen jaar) voor een geleidelijke (actualistische) overgang.

Het antwoord moet door deductie worden geconstrueerd: vermits er in China tijdens het Cambrium (afgerond 550 miljoen jaar geleden) een steensoort met dezelfde kenmerken en eigenschappen is ontstaan als tijdens het Carboon in België (afgerond 350 miljoen jaar geleden), moeten er in China tijdens het Cambrium dezelfde afzettingssomstandigheden hebben geheerst als tijdens het Carboon in België.

Een concreet vertrekpunt is dat beide steensoorten als massieve carbonaatafzettingen zijn ontstaan, in warm klimaat en in ondiepe randzee van het continent. Dit betekent dat het gebied tijdens de afzetting in een (sub)tropische omgeving lag (door plaattektoniek in die positie gebracht). Dit was voor België het geval tijdens het Carboon, met grootschalige kalksteenafzettingen (toen hier ook de steenkoollagen als tropische oerwouden zijn ontstaan). Het betekent niet dat het Carboon als dusdanig een warme periode was, integendeel het was een periode van ijstijden (maar niet merkbaar in de tropengordel).

Anderzijds was het Cambrium wel een relatief warmere periode, maar niet voor de Cambriumafzettingen die nu in België zijn terug te vinden want die zijn ontstaan toen wat nu België is zich dicht bij de Zuidpool bevond, dus desondanks toch koud en geen kalkafzetting. Maar China lag toen wel in een gunstige positie dicht bij de evenaar. Dus gelijktijdig in China warm met kalk en in België koud met zandsteen en schiefer.

Beide hardstenen zijn dus in het Paleozoïcum ontstaan, meer dan 300 miljoen jaar geleden, een tijdsduur die overeenkomt met de gemiddelde tijdsduur van een plaattektonische cyclus - van rifting (oceanvorming) tot afsluiting van de oceaan met bergvorming - en dus al het een en het ander hebben meegemaakt, met een fase van kilometerdiepe begraving en bergvorming, wat voor grote compactie en duurzaamheid heeft gezorgd.



Belgische blauwe hardsteen met crinoiden op uitgeëtst oppervlak (links), Chinese blauwe hardsteen met oolieten (rechts).

Een ander zeer belangrijk diagenetisch proces is de omzetting van het CaCO_3 naar dolomiet. Alhoewel ook dolomiet chemisch kan neerslaan in uitdampingsbekkens, is het overgrote deel van de dolomietgesteenten ontstaan door omzetting van kalkstenen, *dolomitatie*, tijdens de diagenese. Daardoor is het ook mogelijk om gesteenten aan te treffen die slechts ten dele uit dolomiet bestaan.

Door zijn grotere densiteit dan calciet zal deze omzetting nieuwe poriënruimte scheppen, meestal als kleine holtes in het gesteente.

Een speciale vorm van kalksteen is *travertijn*. Travertijn of kalktuf is meestal zeer poreus en bevat soms plantafdrukken. Ze worden gevormd in de beddingen van rivieren of bronnen die een kalkrijk gebied draineren en daardoor verzadigd zijn aan kalk. Wanneer in de rivierbedding planten groeien zullen die turbulentie veroorzaken waardoor het water meer kan ontgassen en, belangrijker nog, zullen de planten koolzuurgas uit het water opnemen voor hun groei en daardoor het carbonaatevenwicht verstoren en oververzadiging veroorzaken. Daarom vindt men in recente kalktuf, die men ze nog in meerdere riviertjes van de Condroz of bronnen in Haspengouw kan aantreffen, kalkneerslagen rond mossen, plantenstengels en bladeren. Een aanzienlijk deel der kalkneerslag gebeurt echter op louter fysicochemische wijze, eventueel gestimuleerd door eencellige wieren of bacteriën. De naam travertijn wordt eveneens gebruikt voor de neerslag van CaCO_3 uit warmwaterbronnen, zoals ze in een kleurrijke spectaculaire vorm gekend zijn in Pamukkale in Cappadocië.

Kalkstenen en dolomieten worden intensief ontgonnen voor verschillende doeleinden. Er is vooreerst de fabricatie van aggregaten. Zuivere kalkstenen en dolomieten worden ook ontgonnen voor de chemische industrie. Kalkstenen worden in ovens gebrand tot CaO , dat in de bouwsector verbruikt wordt als ongebluste kalk of in lange roterende buisovens tot cementklinker verwerkt.

Tenslotte mag uiteraard niet vergeten worden dat zeer veel kalkstenen ontgonnen zijn als bouwsteen of tot platen verwerkt worden om gepolijst als siersteen in de bouwsector gebruikt te worden. Door hun compacte textuur, zonder noemenswaardige poriën, zijn deze kalkstenen vorstvrij en door hun geringe hardheid zijn ze gemakkelijk te bewerken.

Uitdampingsgesteenten

Evaporieten vormen zich wanneer door de verdamping het water in een waterbekken zo geconcentreerd raakt aan zouten dat het oplosbaarheidsproduct ervan overschreden wordt. Bekende moderne voorbeelden van uitdampingsbekkens zijn de Dode Zee in Israël en het Salt Lake in de V.S.A.. De uitkristalliserende zouten in uitdampend zeewater zijn vooreerst calciet, gips, anhydriet, dan steenzout of haliet en daarna de magnesium- en kaliumzouten. De gevormde zoutafzettingen zijn in hoofdzaak chloriden en sulfaten van de kationen Na, K, Ca en Mg.

Zouten zijn gemakkelijk oplosbaar wanneer ze worden blootgesteld aan grondwater dat weinig opgeloste zouten bevat. Zouten kunnen echter ook zeer dikke lagen vormen. Wanneer ze bovendien op grotere diepte onder een dik sedimentpakket begraven liggen kunnen ze, omwille van hun plasticiteit en geringere, opgestuwd worden in cilindrische schouwen, *diapieren* genoemd, tot ze zelfs doorbreken aan het oppervlak. In vochtige klimaten zal dat zout aan de oppervlakte opgelost worden, en eventueel het oppervlaktewater verzilten. In woestijnklimaten kan het zout verder omhoogrijzen boven het oppervlak tot de kolom onstabiel wordt en zout als gletsjers naar beneden kruipt. Dergelijke zoutgletsjers zijn spectaculair ontwikkeld aan de zuidkust van Iran. In de diapiercilinders zelf, die diameters hebben van enkele honderden meters, zijn mijnen gegraven waarin het zout ontgonnen wordt voor verschillende doeleinden, van meststoffen tot tafelzout. De diapierstructuren komen ook in aanmerking voor de berging van hoog radioactief afval. Inderdaad zoutlagen zijn ondoorlatend omdat de uitkristalliserende zoutkorrels volledig in elkaar groeien zonder poriënruimte tussen de korrels te laten en omdat water dat het zout bereikt zich onmiddellijk zal verzadigen met zout waardoor het verder ieder oplossingsvermogen verliest. Bovendien heeft zout een goede warmtegeleiding om de afvalhitte te verspreiden in de ondergrond en zijn de mechanische eigenschappen van zout, nodig voor het uitgraven van de stockeringsruimte, goed bekend door de ervaring in de bestaande zoutmijnen. De ondoorlatendheid van dikke zoutafzettingen wordt ook aangetoond in Groningen door de afdichtende rol die het Zechsteinzout er speelt om de gasen die ontwikkeld zijn in de dieper gelegen steenkoollagen

te verhinderen verder naar de oppervlakte te ontsnappen. De zoutlagen vangen het gas in de zandsteenlagen tussen het zout en de steenkoollagen en zijn zo een onmisbaar element in de vorming van het immense Groningse gasveld.

Organische afzettingen

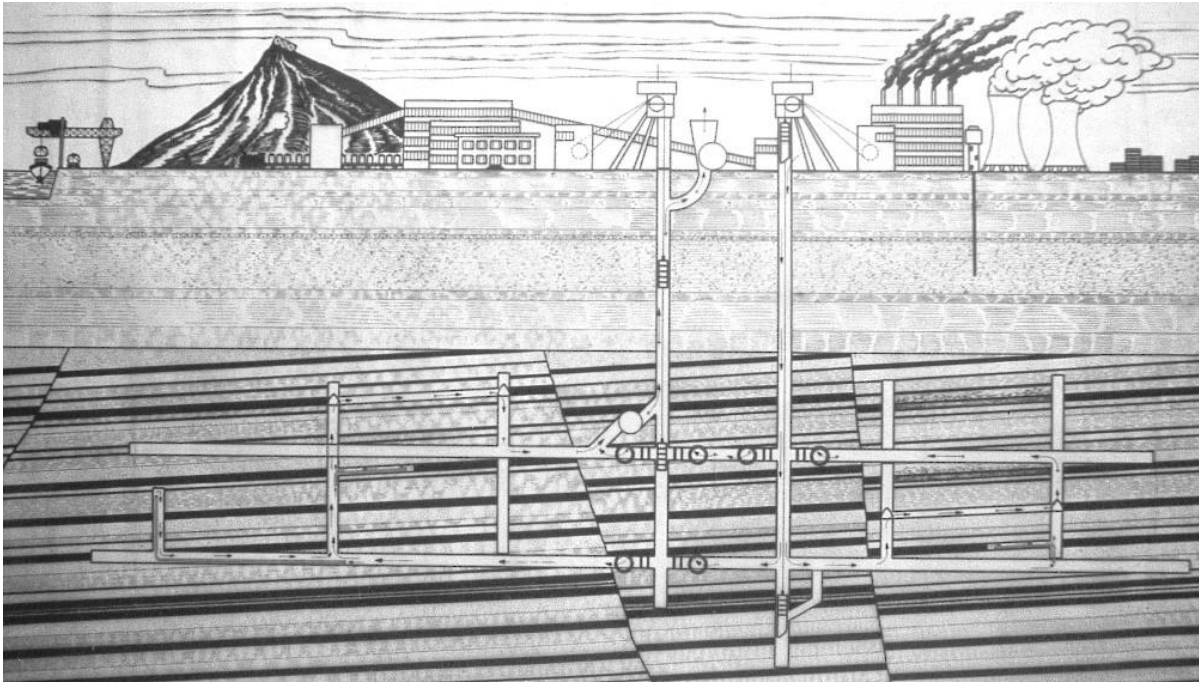
Op vochtige plaatsen op het land zal zich bij gunstige klimatologische omstandigheden een plantendek ontwikkelen. Opdat het plantendek zou bewaard worden moet het bovendien groeien op een gedeelte van het landschap dat van latere erosie zal gespaard worden. Dit zijn uiteraard de langzaam subsiderende gebieden waarin boven het plantendek dat in het zuurstofarm water wegzakt nieuwe planten groeien. Op die wijze kunnen veenlagen groeien die later bewaard zullen worden in de ondergrond. De vormingsmilieus bij uitstek zijn de kustgebieden en de alluviale vlaktes van rivieren. Bovendien kunnen dikke veenlagen zich ook vormen hoger in het landschap op een ondoordringbare ondergrond, zoals in de Hoge Venen. Dergelijke venen kunnen gevoed worden door grondwater of volledig afhankelijk zijn van het regenwater voor hun groei. Veen is zeer waterrijk en gemakkelijk compacteerbaar. De opeengestapelde planten geven vooreerst een macroskelet aan het veen dat zeer gemakkelijk ontwaterd kan worden maar ook een veel fijner netwerk van poriën dat bij langdurige drainage ook zal ontwaterd worden en verder compactie toelaten. De samendrukking kan 10 tot 75% bedragen van het oorspronkelijk volume. Deze compactie is bij rehydratatie niet omkeerbaar en eenmaal ontwaterde veenlagen zullen zich eerder als ondoordringbare lagen gedragen. Aangezien in een subsiderend gebied veenlagen zich continu over grote afstanden kunnen ontwikkelen moet bij droogzuigingen ermee rekening gehouden worden dat de gemakkelijke drainage van het macroskelet en de daarmee gepaard gaande belangrijke compactie zich over grote afstanden kan voordoen en niet alleen op de droogzuigplaats zelf, in tegenstelling tot bijv. zanden met een geringere doorlatendheid. Ook in de natuur zal bij steeds verdere begraving van het veen compactie en ontwatering optreden wat de aanzet is voor de evolutie van het veen naar ligniet, bruinkool en steenkool. Terwijl aanvankelijk bij deze omzettingen van veen vooral biochemische processen spelen zal bij de verdere evolutie van steenkool van vlamkolen over vetkolen naar anthraciet, de temperatuur de belangrijkste rol spelen. Die evolutie is er een van aanrijking van koolstof in de vaste stof en daarmee gepaard gaande afscheiding van gassen die O en H afvoeren uit de kool. Het bekende mijngas en aardgas, voor het overgrote deel bestaande uit methaangas, ontstaan door dit proces.

In sedimenten zoals kleien, maar ook in zanden en kalkstenen, kunnen kleine hoeveelheden organische stof voorkomen, gaande van enkele tienden van een procent tot enkele procenten. Deze organische stof kan afkomstig zijn van de erosie van organische lagen zoals venen, lignieten en kolen die op het land geërodeerd werden, maar ook van resten van organismen die in het sedimentatiebekken leefden, kunnen als partikels of als opgeloste stoffen mee met het bezinkende sediment begraven worden. De aanwezigheid van organische stof in kleilagen kan het grondmechanisch gedrag ervan beïnvloeden. Op geringe diepte zullen opnieuw biochemische processen voor methaangasproductie zorgen, dat zich trouwens in gasbellen kan verzamelen. De mariene organische stof zal met toenemende temperatuur op grotere diepte omgezet worden in aardolie die onder gunstige omstandigheden kan migreren en accumuleren in poreuze reservoirgesteenten waaruit het dan kan gewonnen worden.

Steenkool, aardolie en aardgas zijn uiteraard belangrijke fossiele energiedelfstoffen. Omwille van de omvang van de reserves is het te verwachten dat zowel steenkool, wellicht na industriële omzetting in waterstofgas en olie, als aardgas, eventueel ook na omzetting in waterstofgas, in de toekomst aan belang zullen winnen in vergelijking met aardolie. Het hoofdprobleem met de verbranding van fossiele brandstoffen is zowel klimaatsverandering als luchtverontreiniging, te wijten aan de omzetting naar en uitstoot van het broeikasgas CO₂, en de aanwezigheid van onzuiverheden die zwavelgassen in de lucht vrijzetten. Het asgehalte van kolen is te wijten aan sedimentpartikels die mee afgezet werden bij de veengroei in de moerassen. Deze asse kan als vliegias in de atmosfeer belanden. Deze emissies kunnen

efficiënt bestreden worden maar verplaatsen het probleem naar de berging van gips, het product van de ontzwaveling, en naar de berging van grote hoeveelheden vliegas. Vliegassen worden ook uitgetoet als bijmenging in bouwmaterialen. De CO₂ uitstoot kan beperkt worden door een overschakeling op waterstofgas als energiebron en/of door berging van opgevangen CO₂ in de ondergrond.

Tot slot kan nog aangestipt worden dat kolen en aardolie ook de bron zijn voor meerdere hoogwaardige chemicaliën.



Model steenkoolontginning in Kempisch bekken: toegang tot de steenkoollagen langs verticale schachten en horizontale steengangen; planmatige afbouw van de koollaag in een pijler, gecompenseerd door verzakking van de bovenliggende lagen: ontstaan mijnverzakkingen. cf. Vlaams Mijnmuseum: www.steenkool.be

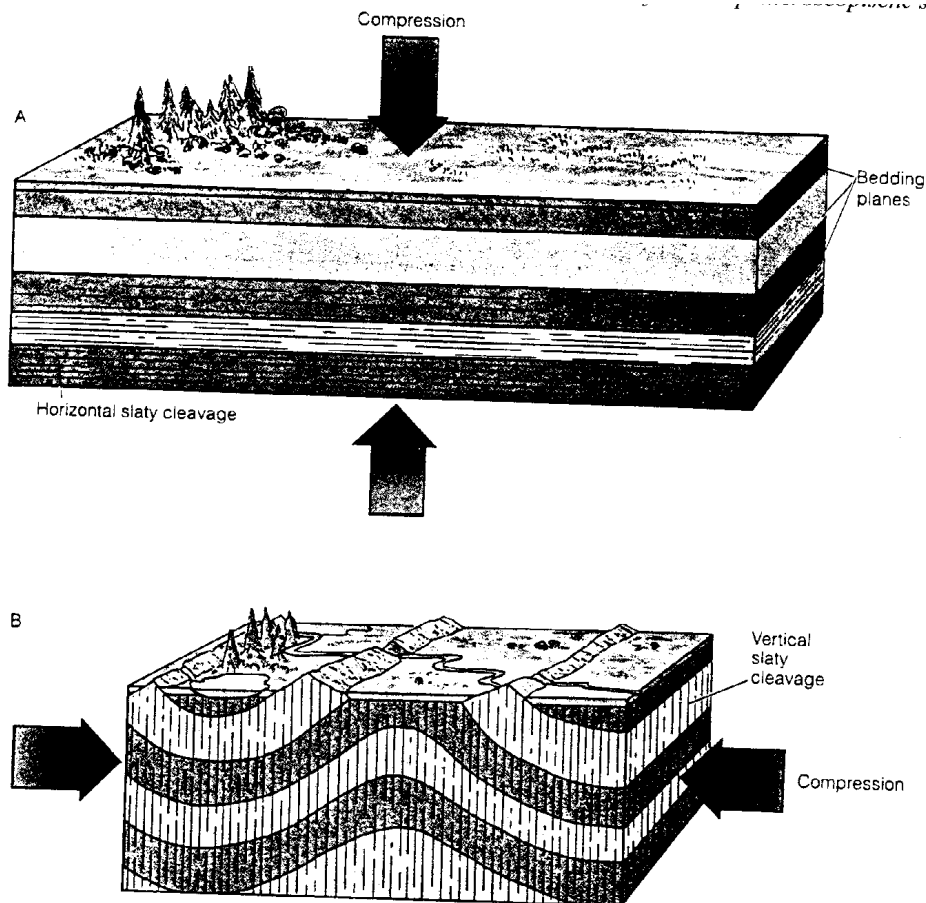
Metamorfe gesteenten (omzettingsgesteenten)

Wanneer gesteenten op grote dieptes begraven worden nemen de temperatuur en de druk in die mate toe dat de mineralen zullen omgekristalliseerd worden naar nieuwe mineralen die thermodynamisch in evenwicht zijn met de nieuwe in de diepte heersende druk en temperatuur. Kleine mineralen zullen eventueel uitgroeien tot grotere, zoals kleimineralen tot muscoviet en chloriet kunnen groeien, of nieuwe mineralen zullen ontstaan en groeien op basis van de chemische elementen die vrijkomen uit de onstabiel geworden mineralen. Metamorfe gesteenten vallen qua structuur uiteen in twee groepen, de gefolieerde waaronder gneiss, amfiboliet, schist, fyllade en de meer homogene zoals kwartsiet en marmer.

Metamorfe sedimentgesteenten

De zandstenen en kalkstenen die omkristalliseren verkrijgen hierdoor een korreltextuur zonder poriënruimte en korrelranden die volledig begrensd zijn door naburige korrels. De korrelranden zijn niet meer effen maar door de rekristallisatie gekarteld waardoor de korrels als het ware in elkaar pakken. Dit geeft een grote mechanische sterkte aan de *kwartsieten* en *marmers*, de metamorfe equivalenten van

respectievelijk de zandstenen en de kalkstenen. De sterkte van de binding tussen de korrels wordt geïllustreerd door de manier waarop een kwartsiet in brokken breekt. Kwartsieten zullen immers breken volgens een breuk die doorheen de korrels gaat terwijl een zandsteen langs de korrelcontacten heen breekt. Bij zandstenen is een breukvlak daarom korrelig terwijl het bij een kwartsiet glad is. Het dominante mineraal in kwartsiet is uiteraard kwarts en in marmer calciet. Er wordt terloops opgemerkt dat de benaming marmer zoals die hier gebruikt wordt niet de lading dekt van de gesteenten die in de handel als marmer aangeduid worden en daar in feite alle polijstbare zachte gesteenten kunnen zijn. De andere oorspronkelijke mineralen in de zandstenen en de kalkstenen zullen de chemische elementen leveren voor nieuwe metamorfe mineralen die in zandstenen en kalkstenen kunnen aangetroffen worden.

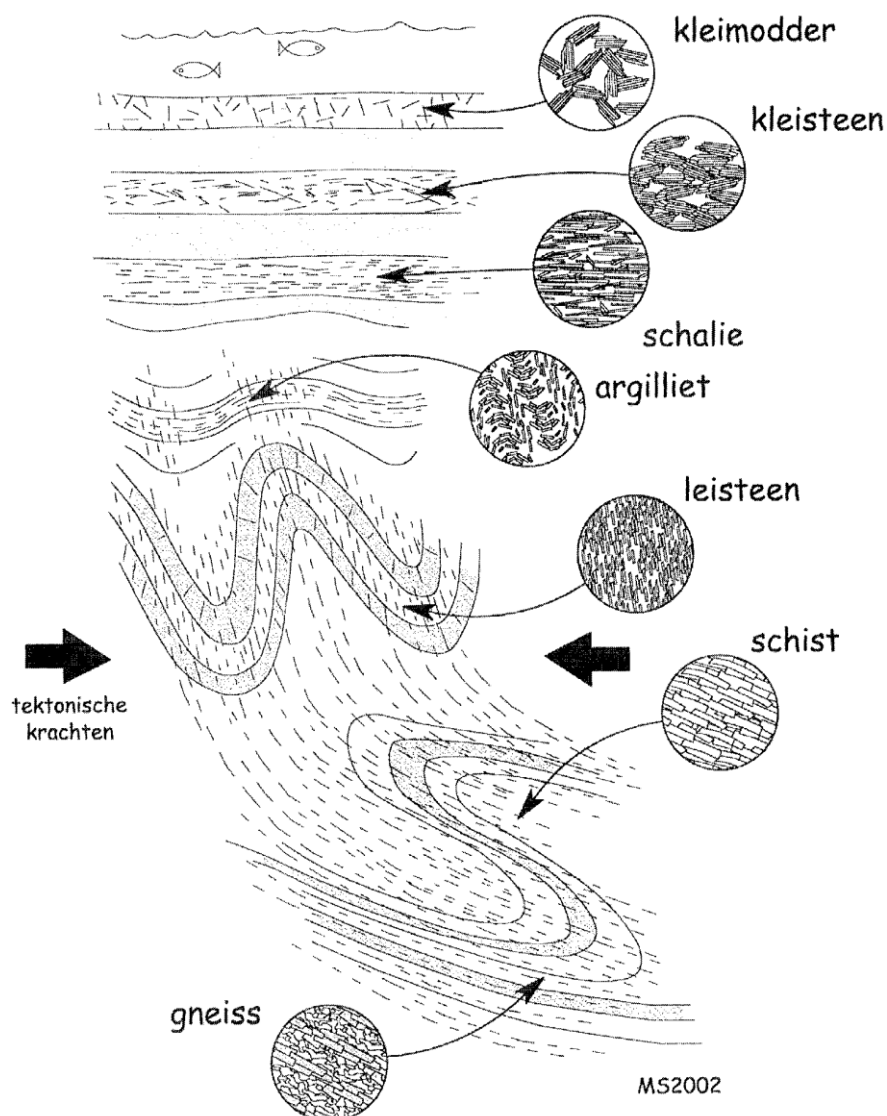


Druksplijting o.i.v. diepe begraving en compressie.

De *schiefers* die metamorf worden zullen bij de aanvang van het metamorfisme omzetten naar schalies of leistenen en fylladen voornamelijk door de aangroei van de kleine korrels illiet en chloriet tot grotere korrels sericiet, muscoviet en chloriet. Niet alleen zal er een vergroting zijn van de korrelafmetingen maar de aangroei zal bovendien gebeuren in een welbepaalde voorkeursrichting, namelijk loodrecht op de grootste drukrichting. In deze richting zal de geringste weerstand tegen die nieuwgroei optreden. Het gevolg van die georiënteerde nieuwgroei is uiteraard dat alle perfecte splijtingsvlakken van deze phyllosilicaten als het ware achter elkaar aaneengeschakeld zullen worden en daardoor resulteren in regelmatige splijtingsvlakken in het gesteente. Omwille van de oorsprong van de oriëntatie, door de druk, wordt deze splijting de *druksplijting* genoemd. Ze is veel regelmatiger dan de schieferige splijting die alleen door compactie was ontstaan. Wanneer regelmatige vlakken van een tiental vierkante centimeter of meer ontstaan in het gesteente wordt dit als *fyllade* aangeduid. Leistenen zijn variëteiten met een nog regelmatiger splijtvlak zodat ze als dakschalies of in grotere plakken als gevelsiersteen kunnen aangewend worden. Wanneer door de sedimentatieprocessen dunne kleilaagjes afwisselend met dunne zandlaagjes afgezet werden zullen bij de metamorfose afwisselend kwartsiet- en fylladebandjes

gevormd worden. Dit gesteente, dat erg veel voorkomt in de oudste gesteenten van ons land, wordt dan aangeduid als een *kwartsofyllade*. Bij verder schrijdend metamorfisme, onder nog toenemende druk en toenemende temperatuur, zullen grote muscovietblaadjes gevormd worden, eventueel grote biotiet- en chlorietblaadjes en ook specifieke mineralen zoals granaten, stauroliet en andaloësieet die tot grotere kristallen kunnen uitgroeien. Deze gesteenten worden aangeduid met de benaming *schist*, eventueel met een typisch mineraal als voorvoegsel, zoals bijvoorbeeld een *micaschist*.

Wanneer uiteindelijk de rekristallisatie totaal is kan het gesteente tot een *gneiss* omgevormd zijn. De mineralogie van gneiss bestaat uit kwarts, veldspaat en mica's (muscoviet en biotiet). De structuur van gneiss vertoont een oriëntatie van de mineralen en een concentratie van kwarts en veldspaat in banden die afwisselen met mica-rijke bandjes. Daarom komt gneiss voor als een gefolieerd gesteente. Gneiss kan dus het eindproduct zijn van metamorfe omzetting van een klei sediment.



Evolutie van de kleirijke sedimenten, van sedimentatie tot metamorfisme, van modder tot leisteen (Sintubin, 2002).

Bij de sedimentatie van een kleisuspensie vormt er zich een **kleimodder**. Doorgaans wordt zo'n modder gekenmerkt door een vrij open interne opbouw die het best kan worden vergeleken met een **kaartenhuisje**. De kleimineralen vertonen een willekeurige oriëntatieverdeling. Deze modder heeft een belangrijke porositeit. Vrij snel zal dat onstabiele kaartenhuisje onder invloed van het gewicht van de bovenliggende sedimenten ineenstorten. De plaatvormige kleimineralen ondergaan een mechanische

rotatie en leggen zich allemaal ongeveer horizontaal. De porositeit wordt sterk gereduceerd en het water wordt eruit geperst. Zo ontstaat een eerste zwakke anisotropie in het gesteente, parallel aan de gelaagdheid. Er wordt een **kleisteen** gevormd. Bij verder begraving van deze kleirijke sedimenten gaan diagenetische processen zorgen voor een lithificatie. Naast een verdere fysische compactie zal ook de kleimineralogie veranderen. Het resulterende gesteente is een **schalie**. Deze wordt gekenmerkt door een gelaagdhedeparallel anisotroop opbouw, dat een eerste gesteentespleijting vertegenwoordigt. Het gesteente vertoont een goede splijtbaarheid volgens deze vlakken (*zie illustratie op vorige bladzijde*).

In tegenstelling tot de kleirijke pakketten ondergaan de zandige pakketten niet zo'n dramatische veranderingen. Het zandige sediment wordt gecompacteerd en gelithifieerd ter vorming van een zandsteen. Er is geen uitgesproken interne anisotropie aanwezig.

De volgende stap in de evolutiegeschiedenis doet zich voor tijdens een gebergtevorming in laaggradige metamorfe omstandigheden (200 tot 400°C, 5 tot 15km diepte). Tektonische krachten gaan nu de gesteenten in het sedimentaire bekken vervormen. De plaatvormige kleimineralen, gelegen volgens de gelaagdheid, worden nu onder invloed van subhorizontale, compressieve tektonische krachten, onstabiel en gaan zich zodanig heroriënteren dat ze zoveel mogelijk loodrecht op de hoofdvervormingsrichting komen te liggen. Tal van processen, zoals het opplooiën van de micaplaatjes, het differentieel oplossen en neerslaan, of de nieuwigroei van mica's volgens de nieuwe oriëntatie, zullen een transformatie teweegbrengen van het volledige gesteente. Eerst zal het initiële schaliemaaksel worden vernietigd. Dit resulteert in een **argilliet** die geen duidelijke gesteentespleijting meer vertoont. Vervolgens wordt een nieuw, tektonisch gesteente gevormd doordat de mica's systematisch de nieuwe oriëntatie gaan aannemen. Zo ontstaat een nieuwe, tektonische gesteentespleijting. Deze gesteentespleijting is zeer uitgesproken door de bijna perfecte oplijning van de mica's. We noemen dit een **leisteenspleijting**. Het gevormde gesteente is een **leisteen**. Dit gesteente vertoont een uitstekende splijtbaarheid en wordt dan ook aangewend voor de aanmaak van natuurlijke dakleien. Deze splijtingsontwikkeling doet zich voornamelijk voor in de kleirijke gesteenten. In de zandstenen zal bij hogere metamorfe omstandigheden ook een omvorming voordoen ter vorming van een interne foliatie, gelijkaardig aan de leisteenspleijting.

Bij toenemende temperatuur gaan de mica's in het splijtingsmaaksel nu verder aangroeien. In een eerste stadium behoudt het gesteente zijn uitgesproken leisteenspleijting maar krijgen de splijtingsvlakken door de groter geworden mica's een zilverglans. Het resulterende gesteente noemen we een **fylliet**. Bij nog hogere temperaturen en drukken worden de mica's nog groter, en worden ze zelfs herkenbaar met het blote oog, en krijgt het gesteente een kristallijn karakter. Een **schist** is gevormd. Door de aangroei van de mica's en andere mineralen verliest dit gesteente de karakteristieke leisteenspleijting. Deze wordt vervangen door een **schistositeit**, gekenmerkt door golvende, onregelmatige splijtingsvlakken. Neemt het metamorfose nog toe, dan kan er zich een mineraalsegregatie voordoen ter vorming van een sterk gefolieerd kristallijn gesteente, welke we een **gneiss** noemen. Ook een gedeeltelijke opsmelting van het gesteente, **anatexis**, is verder mogelijk.

Naar de diepte toe neemt bovendien de vervorming sterk toe. Eerst komen er, al of niet symmetrische, plooiën voor. Hier staat de leisteenspleijting onder een relatief grote hoek met de gelaagdheid en zijn beide makkelijk te herkennen. Dieper worden de plooiën meer uitgesproken en zeer asymmetrisch. Schistositeit en gelaagdheid liggen zo goed als evenwijdig. Uiteindelijk is er van de oorspronkelijke gelaagdheid niets meer terug te vinden."

Manuel Sintubin, Structural Geology & Tectonics Group, KU Leuven. BVLG, 2002

Metamorfe stollingsgesteenten

Gneiss is echter ook het metamorfe equivalent van zure stollingsgesteenten zoals graniet. Dit is niet zo verwonderlijk omdat de gemiddelde scheikundige samenstelling van een zuur stollingsgesteente deze van een kleisediment benadert. Het visuele onderscheid tussen gneiss en graniet berust vooral op de foliatie; de kristalsamenstelling en -grootte is immers vergelijkbaar. Sterk geplooid gneiss staat bekend

als *migmatiet*. Basische stollingsgesteenten worden omgevormd tot *amfiboliet*, een groen gefolieerd gesteente met als belangrijkste mineralen veldspaat en Fe-Mg-houdende silicaten. Mergels, die een mengsediment van klei en kalk zijn, kunnen ook metamorfiseren tot amfiboliet. *Serpentinieten* zijn diepgroene intens gefolieerde metamorfe gesteenten die worden aangetroffen in bergketens en ontstaan wanneer basische oceanische korst en aansluitend aardmantelmateriaal wordt opgeperst bij sluiting van een oceaan tussen convergerende continentale plaatranden. Zij hebben een breccie uiterlijk door de talrijke barsten gevuld met bleke tot bleekgroene carbonaten en kalksilicaten.



*Serpentiniet
als vloertegel*

Contactmetamorfisme

Metamorfose van gesteenten treedt dus voornamelijk op als gevolg van begraving. Metamorfose kan ook optreden bij de intrusie van stollingsgesteenten in sedimenten, waarbij de contactzone over meerdere meters tot zelf tientallen meter totaal gerekristalliseerd wordt. Schievers zetten om naar *hoornfels*, een zwart zeer fijnkorrelig en bijzonder hard gesteente, zandstenen en kalkstenen vormen nog steeds kwartsieten en marmers, terwijl oudere stollingsgesteenten die zelf geïntroduceerd worden textuurvariaties laten zien. Bij contactmetamorfisme kunnen fluïda van magmatische oorsprong met het nevengeesteente reageren en speciale mineralen vormen, waarin lichte elementen zoals boor, fluor en lithium geconcentreerd worden. Nieuwe mineralen en gevlamde texturen maken deze metamorfe gesteenten erg attractief als intens gekleurde of veelkleurige siersteen. Kwartsarme variëteiten zijn doorgaans goed te polijsten.

Bron: Vandenberghe & Laga “De aarde als fundament”

‘Echte’ graniet (in de geologische betekenis) dat als siersteen wordt gebruikt is doorgaans vele honderden miljoenen tot over een miljard jaar oud; gneiss is vrijwel steeds meer dan een miljard jaar oud. Waarom zou dat zo zijn? Zoek een verklaring in de keten van vorming tot ontginning.

Graniet en gneiss behoren tot verschillende gesteentegroepen, respectievelijk de stollingsgesteenten en de metamorfe gesteenten. Graniet is een primair gesteente, ontstaan uit een magma, terwijl gneiss een omzettingsgesteente is, ontstaan door metamorfisme van een ander gesteente. Er zal dus altijd wel eerst graniet geweest zijn voordat er gneiss kon ontstaan. De vraagstelling gaat er echter van uit dat als natuursteen ontgonnen gneissen doorgaans ouder zijn dan granieten; er zijn dus andere mechanismen die meespelen.

De vraag gaat over graniet en gneiss die als siersteen worden gebruikt, dus afkomstig uit steengroeven aan het aardoppervlak. Voorkomen van graniet en gneiss aan het aardoppervlak is ver verwijderd van de plaatsen diep in de aarde waar ze ontstaan. Omwille van vergelijkbare minerale samenstelling en textuur kan worden gesteld dat ze ook onder vergelijkbare temperatuur zijn gevormd, dus in ieder geval op vele kilometers diepte. Om ze uit de diepte van de aarde tot aan het aardoppervlak te brengen moet er dus een fase van opheffing en erosie zijn geweest. Magmakamers worden opgeperst onder oprijzend gebergte, gneiss wordt samengeperst in zakkingszones, in de diepe wortel van continentale bergvorming. Granietmassieven zullen dus over het algemeen sneller door erosie worden blootgelegd dan gneiss. Er zal zo minder tijd verlopen tussen ontstaan in de diepte en blootstelling aan de aardoppervlakte, en daarom zal graniet doorgaans jonger zijn dan gneiss.

Daarenboven zullen de alleroudste gesteenten van de aarde, inclusief granieten - dus enkele miljarden jaren oud - door meerdere bergvormingsfasen zijn gegaan waarbij ze aan metamorfisme worden blootgesteld en in migmatiet (gneiss) worden omgezet. Latere en dus beduidend jongere graniet-intrusies kunnen door deze oude gesteentemassieven breken. Ontginning wereldwijd gebeurt bij voorkeur in deze oude en stabiele, door erosie afgesleten massieven (bijv. Finland), eerder dan in zones van actieve bergvorming.

Het is daarom merkwaardig hoe gezwind studenten hun interpretatie kunnen aanpassen. Zo leggen ze uit dat gneiss uit graniet zal voorkomen, dus later in de keten van gebeurtenissen komt (rigiede massa's zoals graniet-batholieten kunnen nochtans niet zomaar in intens geplooid migmatieten worden omgezet). Maar vermits de vraagstelling het tegenovergestelde beweert verbinden zij aan deze logische keten de tegenovergestelde conclusie: 'gneiss komt uit graniet voort, dus is het ouder'. Ik sta perplex hoevelen dit hebben neergeschreven, want er kan geen uitspraak worden gedaan over de tijdsduur van de vorming: intrusie van magma gebeurt niet noodzakelijkerwijs sneller dan diep metamorfisme onder actieve bergketens.

Een redenering in de goede richting gaat ervan uit dat gneiss het eindproduct van metamorfisme is en dat het bereiken van dit stadium meer tijd zal vergen. Het is echter de snelheid van opheffing en erosie die het grote verschil maakt.

Wit marmer

Wit marmer is nadrukkelijk aanwezig in prestigieuze interieurs, en dit in combinatie met rood, grijs en zwart marmer. Deze laatste kleurvariëteiten zijn alle Belgisch, het wit is een importproduct en Italiaans. Dit geografisch onderscheid belet echter niet dat witte en gekleurde marmers terzelfdertijd in zwang zijn gekomen tijdens de renaissance, de kunsthervorming op basis van de klassieke oudheid. Grieken en Romeinen gebruikten bij uitstek het wit marmer, dat zowat de standaard voor het begrip marmer vormt; denk maar aan de David van Michelangelo, de Akropolis in Athene of de Taj Mahal in Agra. Afzettingen van wit marmer zijn welbekend uit het Middellandse Zeegebied (meestal uit het huidige Italië, Griekenland, Turkije), maar niet uit Noordwest Europa. Fijn sculptuurwerk in witachtig materiaal was vooreerst van ivoor vanaf Karolingische tijden, en van albast in de gotiek. Hoe geschikt deze materialen ook zijn voor fijne sculpturen, ze zijn het minder voor meer grootschalige architectonische toepassingen zoals marmeren altaren, vloeren, grafmonumenten. Toepassingen zijn enkel gericht op het interieur, in tegenstelling met Italië dank zij het milder klimaat. De handel in wit marmer vanuit Ligurische en Toscaanse havens tot in Antwerpen, of na de afsluiting van de Schelde vanuit de Hollandse havens, was goed georganiseerd zodat wit marmer voluit kon wedijveren met de Belgische marmers.

Wit marmer onderscheidt zich van de gekleurde Belgische marmers in geologische oorsprong: metamorf vs. sedimentair. In wit marmer zal men tevergeefs naar fossielen zoeken, het is opgebouwd uit gelijkmatig gerekristalliseerde calciëtkristallen. Van oorsprong is dit nochtans een sedimentaire

kalksteen geweest, zij het diep begraven tijdens een actieve bergvormingsfase en terug blootgelegd door opheffing en erosie. Metamorfisme zal optreden in de wortel van het gebergte, minstens 10 km diep onder de aardoppervlakte waar de gesteenten onder verhoogde druk en temperatuur worden gebracht zodat mineralen instabiel worden en herkristalliseren zonder de voorwaarden te bereiken dat het gesteente gaat omsmelten tot magma en een geheel nieuw stollingsgesteente vormen. In geval van wit marmer worden klei- of metaalhoudende onzuiverheden afgescheiden van het calciumcarbonaat en als grillige strepen of aders tussen het sneeuw witte calciet geconcentreerd. Die zullen meestal zwart zijn als spoor van tot grafiet gerekristalliseerde organische koolstof, grijs als getuigenis van sericietische klei, oranje tot rood van hematiet, groen van chloriet, violet als aanwijzing voor ijzer met mangaan (Price, 2007). Vermits het metamorfisme onder invloed van een regionaal drukveld staat, treden er tal van breukvlakjes op of wordt het gesteente in verschuivende blokjes of schijfjes vergruisd, m.a.w. in een breccie omgezet, waarbij de gekleurde onzuiverheden in de (tijdelijk) open vlakjes worden geperst. Uitzicht van het marmer zal dus verschillen naargelang de oorspronkelijke sedimentaire samenstelling of stratigrafie en de intensiteit van de tektonische vervorming.



Microscopisch beeld van de gerekristalliseerde kristallen waaruit Carraramarmer is opgebouwd. Er is slechts één mineraal aanwezig, calciet (kalkspaat), met grillig in elkaar grijpende contacten tussen de korrels en met aanduiding van de interne kristalsplijtingsrichtingen (beeldbreedte 3,4 cm, hetzij een gemiddelde korrelgrootte van 3 mm voor de grotere korrels), © Harker (1932).

Wit marmer heeft met de andere metamorfe gesteenten een grote druk- en trekweerstand gemeen, gevolg van korrels die met elkaar verknoot zijn. De calciet-kristallen waaruit het marmer is opgebouwd hebben geen voorkeurrecht zodanig dat de korreltextuur gelijkmatig is in alle richtingen. Dit zijn eigenschappen die wit marmer bijzonder geschikt maken voor beeldhouwwerk. Het mineraal calciet is opgebouwd uit een regelmatig atoomrooster waarin drie perfecte kristalsplijtingsrichtingen volgens een rhomboëder (ruitvormig) patroon voorkomen. Indien de kristallen enkele millimeters groot zijn zullen de interne kristalsplijtvlakken eveneens goed zichtbaar zijn en licht weerkaatsen. Dit kenmerk geeft aan het wit marmer zijn bijzondere uitstraling; hoe grover de korrel hoe sterker de schittering. Dit komt het best tot zijn recht in combinatie met de matzwarte marmer van Belgische oorsprong. Fijnkorrelig wit marmer daarentegen zal het licht minder weerkaatsen en een eerder gelige glans vertonen. In alle gevallen wordt marmer glad bewerkt, geschuurd, soms gemasticeerd en gepolijst om de decoratieve textuur, kleurschakering en glans goed te doen uitkomen en te behouden (Lijdsman, 1944). Anderzijds maken de kristalsplijtvlakjes het marmer kwetsbaar voor verwerking en vervuiling: door temperatuurcontrasten of uitgeoefende druk worden de splijtvlakjes in de buitenste laag calcietkorrels microbarsten die water en vuil kunnen opnemen. Daardoor kunnen reactieve bestanddelen in de onzuiverheden zoals pyriet oxideren en het gesteente verkleuren, een fenomeen zoals plaatselijk in de kerkvloer van Averbode is waar te nemen.

Zuiver witte marmers zijn op zicht niet van elkaar te onderscheiden – geochemische analyses zijn nodig om herkomstgebieden te karakteriseren. Afgezien daarvan is de onderverdeling van witmarmersoorten gebaseerd op het decoratieve effect dat kleurschakeringen teweegbrengen. Benamingen zijn echter niet

gestandaardiseerd, zeker niet de specificaties die als een bijvoeglijk naamwoord worden toegevoegd. Bovendien kunnen geometrische patronen in de dooradering verschillen naargelang de zaagrichting, een kenmerk dat ten nutte wordt gemaakt bij openboek toepassingen. Ook in de vloertegels in de abdijkerk werden tegels gegroepeerd die uit eenzelfde steenblok zijn gezaagd.

De naamgeving die relevant is voor Averbode is die welke betrekking heeft op het marmerbekken van Carrara in de Apuanische Alpen (Alpi apuane), 75 km² groot en intens uitgebaat sinds de Romeinse tijden (Carmignani et al., 2007). Dit marmerbekken vormt de blootgelegde metamorfe kern (of Autochtoon Complex) van de Apennijnen met hoofdzakelijk carbonaten die tijdens het Trias – Jura – Krijt in zee zijn afgezet. De meeste marmer en zeker de witte marmers dateren van het Lias, Onder-Jura tijdperk, zo 'n 180 tot 200 miljoen jaar geleden. Tijdens Alpiene bergvorming gedurende het Oligoceen (zo 'n 25 miljoen jaar geleden) werd dit kalksteenmassief bedolven onder een 10 km dik pakket van dekbladen bestaande uit Flysch afzettingen (afgezet in snel verdiepende zeebekkens gelegen voor het bergvormingsfront). Tijdens het Mioceen (zo 'n 10 miljoen jaar geleden) werd dit pakket geosynclinaal geplooid tot op mogelijk 20 km diepte; het kalksteenmassief werd daarbij tot een antiform samengeperst en gemetamorfiseerd. Tijdens het Plio-Pleistoceen (sinds zo 'n 5 miljoen jaar) gebeurde de opheffing en even sterke erosie die het Autochtoon Complex terug aan de oppervlakte bracht, als de oudste kern van de Apuanische Alpen. In de huidige staat wordt het marmerbekken langs alle kanten ontgonnen. Vooral in het bekken van Carrara zelf, niet meer dan 10 km² groot, worden de bergen geheel afgegraven. De marmers worden er in vijf groepen onderverdeeld: wit (bianchi), grijsgeband (grigi e venati), breccies (brecciati), gefolieerd (cipollini), niet witte marmers (storici) – (Carmignani et al., 2007). De cipollini zijn jonger dan de witte marmers en zijn als kalkschiefer ontstaan tijdens het Krijt tijdperk (ca 125 miljoen jaar geleden). Ze lijken in het geheel niet op wit marmer. Cipollino (ajuinschilmarmer), met lichtgroene parallelle maar gebogen bandjes is aangewend als bevloering voor het nieuw altaar.

Er bestaan meer dan 200 historische of commerciële namen om de witte marmers van het Carrarabekken te karakteriseren. Om hierin enige structuur te brengen volgen we de aanbevelingen, geformuleerd bij de definitie van deze marmers als erfgoedsteen (Primavori, 2015). Zeven commerciële types wit marmer worden onderscheiden, maar benaming blijft moeilijk wegens de geleidelijke overgangen die er tussen deze types bestaan:

- Bianco Carrara, het gewone wit marmer, weliswaar met korte lichtgrijze streepjes of spikkels (fiorito genoemd wanneer de spikkels meer opvallen door een zwartere kleur), met variëteiten C, C/D en D, van bleek naar donker. Dit is het meest voorkomende marmer (ordinario). De Bianco P is een zeer zuivere meer fijnkorrelige variëteit met kleine grijze vlekjes.
- Venato (geaderd) is wit marmer met wat meer uitgesproken lichtgrijze streepjes dan de Bianco; het onderscheid is echter subtiel en beide variëteiten worden meestal samengenomen.
- Statuario (beeldenmarmer) is de meest grofkorrelige variëteit met de felste schittering, die tevoorschijn komt wanneer de beeldhouwer op de grove calcietskristallen inhakt en de kristalsplijtingsvlakken blootlegt.
- Arabescato, met grillige lichtgrijze strepen, dankt zijn naam aan de fractale versiering van raam- en deurbogen in de islamitische architectuur. Dit is een gebroken gesteente (metabreccie), zonder dat op schaal van de natuursteen de breccie structuur goed zichtbaar is. De herkomstbenaming Corchia wordt meestal gekenmerkt door een meer donkere kleur van de strepen, Vagli door een soms bruinige tint.
- Calacatta, met minder maar meer doorlopende strepen die een patroon van hoekige blokken wit marmer vormen, gescheiden door strepen die grijs, groenig tot bruinig kunnen zijn, en die op schaal van de natuursteen al meer indicaties voor een breccie vertoont.

- Bardiglio, blauwgrijs, geband met scherp afgelijnde witte en donkere aderen. Dit is een voorbeeld van 'grigio' grijs marmer, waarvan de kleur te danken is aan de grote hoeveelheid pyriet. Een meer egaal blauwgrijze variëteit wordt Imperial genoemd.

- Nuvolato (wolkig) is eveneens hoofdzakelijk grijs marmer met slechts vage kleurverschillen, en vormt een overgang tussen Arbescato en Bardiglio.

Bovendien komen er in het bekken van Carrara enkele zeldzame maar hoog gewaardeerde meer gekleurde marmervariëteiten voor met duidelijker breccietextuur, die echter in Averbode niet voorkomen:

- Paonazzo (Pavonazzo of pauwenoomarmer), sterk gebroken textuur met kleurige w.o. paarse aderen.

- Paonazetto, met haarscherpe paarse aderen.

- Breccia di Seravezza, met hoekige meestal witte maar ook licht- tot donkerviolette fragmenten van wisselende grootte, een polymicte breccie als voorbeeld van 'historische' marmer.

Referentie:

Primavori, P., 2015. Carrara Marble: a nomination for 'Global Heritage Stone Resource' from Italy. In: Pereira, D., Marker, B. R., Kramar, S., Cooper, B. J. & Schouenborg, B. E. (eds). Global Heritage Stone: Towards International Recognition of Building and Ornamental Stones. Geological Society, London, Special Publications, 407: 137–154.

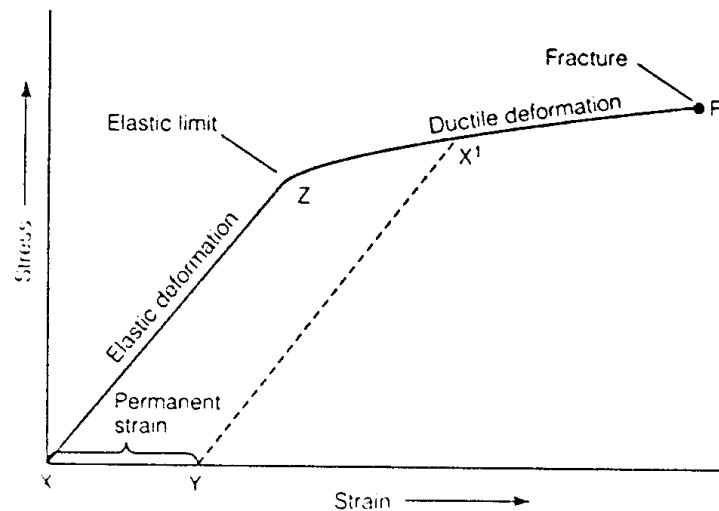
Tekst overgenomen uit: De Ceukelaire et al., 2017. De abdij van Averbode, een verhaal van steen en marmer. Norbertijnenabdij Averbode.

Vervorming van gesteenten

Geplooid gesteentebanken die men zo vaak kan observeren in ontsluitingen roepen de vraag op naar de vormingscondities van dergelijke plooien omdat gesteenten die in normale condities onder spanning gezet worden veel vlugger zullen breken dan dat men er in slaagt ze te plooien. Laboratoriumexperimenten hebben de condities bevestigd die men intuïtief kon vermoeden, namelijk dat brosse breuken in het gesteente optreden bij lage omgevingsdrukken, lage temperaturen en snelle belasting. Wanneer men gesteenten deformeert door de aanleg van differentiële spanningen bij hoge algemene omgevingsdrukken of bij omgevingstemperaturen van enkele honderden graden dan zal het gesteente eerder ductiel vervormen. Er kan in experimenten ook vastgesteld worden dat gesteenten ductiel vervormen zelfs bij lage omgevingsdrukken en temperaturen wanneer de deformatiesnelheid maar traag is. Dat effect kan trouwens vastgesteld worden op doorbuigende gesteenteplaten in eeuwenoude gebouwen, monumenten of begraafplaatsen.

Het deformatiegedrag hangt af van de kristalroosteropbouw van de verschillende mineralen omdat de deformatie-effecten die men uitwendig observeert hun oorsprong vinden in mechanismen die zich op submicroscopische schaal in het atoomrooster voordoen, waar de atomenverdeling gereorganiseerd moet worden. Overgangen van elastische naar ductiele vervorming tot breken doen zich naargelang de samenstelling en eigenschappen van het materiaal en de aanleg van het drukveld op geheel verschillende wijze voor. Aanvankelijk zal een materiaal onder druk elastisch vervormen, maar bij overschrijden van een kritische drempel worden lokaal op atomaire schaal moleculaire bindingen doorbroken. Op het uiteinde van een barst convergeren immers de krachten en neemt de druk op niet-lineaire wijze toe. Dit proces kan zelfversterkend zijn en leidt dan tot voortstuwing van de barst die zelfs kan aangroeien volgens de voortplantingssnelheid van geluidsgolven in het desbetreffende materiaal. Dit is het best waar te nemen in brosse materialen zoals glas. Of een barst onder spanning verder aangroeit of juist

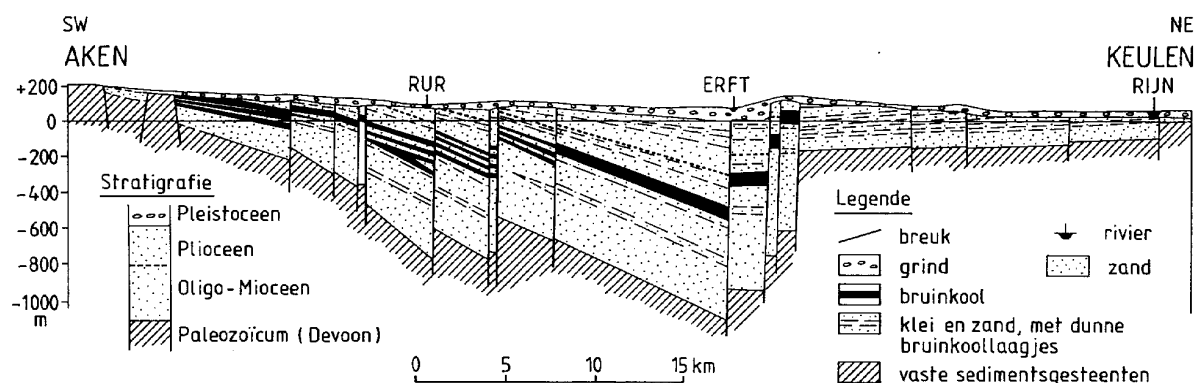
afstompt is uiteindelijk een zeer complex samenspel van druktenoren t.o.v. de zwakste bindingskrachten in het gesteente.



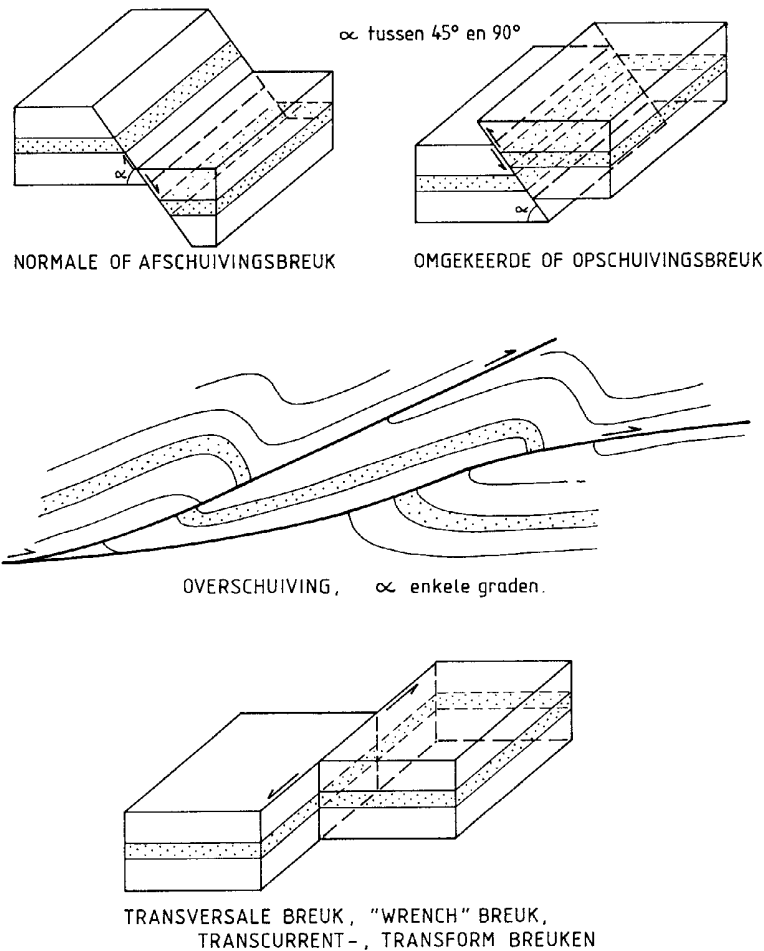
Breuken

Gesteenten die tot boven een kritische drempel onder druk gezet worden in een compressie-regime, kunnen door te breken verkorten en zullen daarbij opschuivingsbreuken geven. Meestal zullen lagen die weinig cohesie bieden als schuifvlak fungeren. Dit mechanisme kan meerdere malen herhaald worden en zorgt ervoor dat eenzelfde stratigrafisch interval verticaal meerdere malen herhaald wordt, gescheiden door zwakhellende breuken. Deze overschuivingen als resultaat van een compressie die de lagen samendrukt doen zich ook op grote schaal voor en de dekbladen zijn een belangrijk structureel patroon in de opbouw van gebergten.

Breuken die ontstaan wanneer lagen uitgerokken worden zijn 'normaal'-breuken waarmee bedoeld wordt dat lagen naar een diepere positie afzakken in het blok in de richting van de helling van het breukvlak. Deze helling benadert gewoonlijk 67° . Bemerkt dat bij normaal-breuken in een rek-regime gesteenteseries als het ware langer kunnen gemaakt worden als reactie op de rekcondities die heersen, maar dat een bepaalde laag niet meer zal voorkomen over een bepaald lengte interval, in tegenstelling tot de opschuivings- en overschuivingsbreuken waardoor bepaalde lagen één of meermaals boven elkaar kunnen herhaald worden in een bepaald interval. Terwijl gebergten producten zijn van compressieve regimes zijn *slenken* (graben) of riften het product van tensie in de korst.



Schematische doorsnede van de Rijnslenk tussen Aken en Keulen.



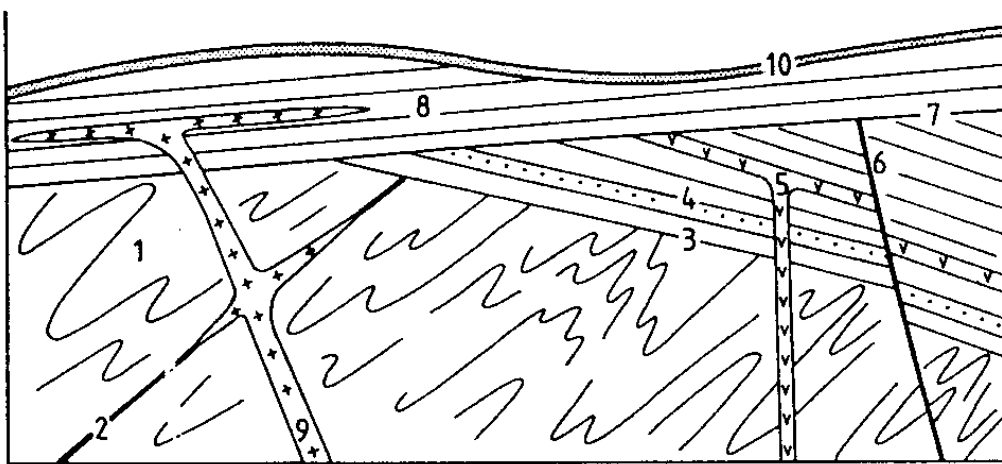
Basistypes van breukbewegingen (uit Vandenberghe & Laga)

Plooien

Breuken zijn niet de enige effecten van de deformatie van gesteenten. Gesteenteseries kunnen ook geplooid worden onder invloed van de druk. Plooien kunnen beschreven worden aan de hand van de helling en strekking van de twee vleugels. Wanneer de strekking van beide vleugels dezelfde is dan zal de plooias, de lijn met de grootste kromming horizontaal zijn, indien de strekking van de beide vleugels niet dezelfde is dan zal de plooias een duiking vertonen. Wanneer de hellingen en de lengtes van beide vleugels dezelfde zijn dan is de plooï symmetrisch, indien de hellingen verschillen maar toch in tegengestelde richting wijzen zijn de plooïen asymmetrisch maar wanneer de hellingen van beide vleugels in eenzelfde richting wijzen dan is de plooï overhellend. Wanneer de hellingen en de lengtes van beide vleugels gelijk zijn en in dezelfde richting verlopen dan zijn de plooïen isoclinaal.

Bij vervormingen op grote diepte waar de druk en de temperatuur voor een grote ductiliteit van het gesteente zorgen zullen de plooivormen ook vervloeien en daardoor een onregelmatiger voorkomen hebben. Deze plooivormen zijn esthetisch wel attractief en geplooid metamorfe gesteenten worden dikwijls in siersteenplaten verwerkt.

Plooïen die open zijn naar het oppervlak toe zijn synclines, plooïen die gesloten zijn naar het oppervlak toe zijn anticlines. Dit is enkel zo indien de plooïen niet volledig omgekeerd liggen omdat een synclinale naar het centrum stratigrafisch jongere lagen moet hebben en een anticlinale structuur naar het centrum oudere lagen moet hebben. Indien er twijfel over het al dan niet omgekeerd zijn van de plooïstructuur bestaat, spreekt men van antiformen en synformen, die dan puur beschrijvende termen zijn.



Relatieve opeenvolging van een geologische doorsnede :

- afzetten en plooien van laagpakket (1) en breukvorming (2)
- erosie en afvlakking (3) en afzetting laagpakket (4)
- injectie van dyke en sill (5)
- breukvorming (6) en scheefstelling van laagpakket 4
- erosie en afvlakking (7), - afzetting laagpakket (8)
- injectie van dyle en sill (9) ook in breukvlak 2
- erosie met reliëfvorming
- afzetting leemmantel (10)

Splijting: diaklazen

Naast breuken en plooien zijn er nog diaklazen of splijtvlakken als uitingen van de vervorming van gesteenten. Diaklazen zijn effen splijtvlakken die vaak over grote oppervlakte regelmatig ontwikkeld zijn doch waarlangs de gesteenten niet verplaatst zijn, zoals bij breuken wel het geval is. Veelal zijn in de gesteenten meerdere diaklaasvlakken aanwezig in een regelmatig patroon dat ook kan gekarteerd worden op een site. Vaak zijn twee diaklaasrichtingen aanwezig die loodrecht op elkaar staan en beide ongeveer loodrecht op het gelaagdheidsvlak waardoor de lagen in blokken opgedeeld worden. De diaklaasrichtingen staan in verband met de deformatiegeschiedenis van het gesteente. Net zoals breuken, laagvlakken, koelscheuren, en druksplijtingen zijn diaklazen discontinuïteitsvlakken die open komen door drukontlasting wanneer een diepbegraven gesteente door opheffing en erosie tot minder dan enkele tientallen meters onder de oppervlakte wordt gebracht. Diaklazen gaan daardoor een belangrijke rol spelen bij de stabiliteit van gesteenten aan het oppervlak of in uitgravingen en bij de circulatie van grondwater in deze gesteenten.

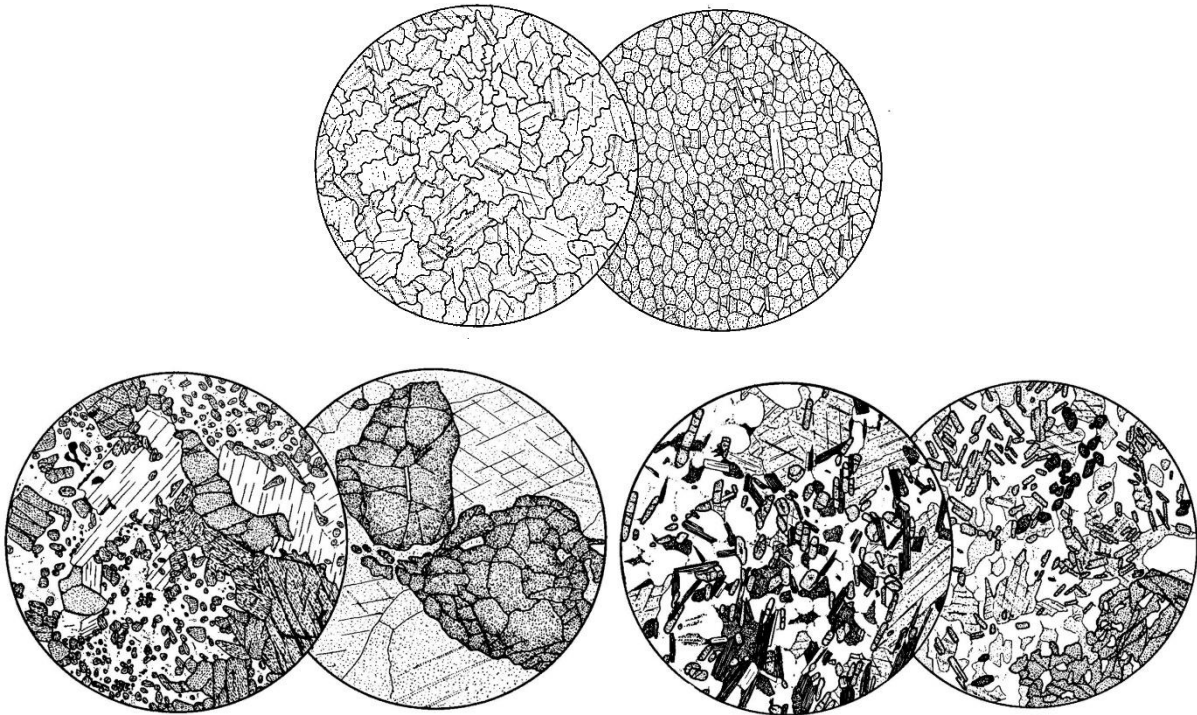
Case study: Het doorbuigen van dunne gevelbekledingen uit marmer

Metamorfe marmer wordt al eeuwenlang beschouwd als materiaal bij uitstek voor de uitvoering van prestigieuze bouwwerken. De afgelopen twintig jaar werden er bij dit materiaal echter belangrijke verweringsverschijnselen (hechtingsverliezen) vastgesteld, en dan vooral bij de toepassing ervan als dunne gevelbekleding. Deze schade is te wijten aan het fenomeen van de 'granulaire ontbinding'. Deze onthechting kan problematisch worden wanneer de platen beginnen te buigen, te scheuren en riskeren te vallen.

Factoren die de amplitude van de buiging beïnvloeden

Men heeft vastgesteld dat de buiging doorgaans meer uitgesproken is bij gevels die blootgesteld zijn aan regen en bezonning (met zuidelijke en zuidwestelijke oriëntatie). Indien de amplitude van de buiging aanzienlijk is, kan dit leiden tot scheurvorming ter hoogte van de verankeringen. Uit

microscopisch onderzoek is gebleken dat de marmers die het gevoeligst zijn voor buiging vrijwel zuiver uit calciet (calciumcarbonaat) bestaan. De vaakst getroffen types vertonen een microstructuur die *granoblastisch* (d.w.z. waarbij alle kristallen ongeveer even groot zijn en in elkaar passen zoals puzzelstukken) dan *xenoblastisch* is (d.w.z. waarbij de kristallen een willekeurige vorm hebben).



Drie types van kristalassociaties in metamorfe gesteenten: granoblastische textuur naar voorbeeld van Carraramarmer (boven), xenoblastische textuur (links onder) en poecilblastische textuur (rechts onder), gezien als een microscopische doorsnede door een gesteente waarbij de korreltextuur in detail zichtbaar wordt (uit: Harker's petrology for students. Cambridge University Press, 1968).

Onder fluorescerend licht stelt men bij de gebogen stenen intergranulaire openingen vast, wat de ontbinding bevestigt : het contact tussen de calcietkorrels is minder sterk door de opeenvolging van verschillende opwarmings- en afkoelingscycli. Dit resulteert dus in toename van de porositeit en van de grootte van de poriën die sterker zullen toenemen aan de buitenkant dan de binnenkant van de plaat. De oppervlaktetemperatuur van een bezonde gevel kan oplopen tot 60 °C. De verklaring ligt dus bij de perfecte splijting die calciet vertoont en die in geval van metamorfe marmer ook de buitenkristalvlakken zal kenmerken. Het is langs deze splijtingsvlakken dat de marmerplaat de fysische vervorming zal opvangen en ook doorgeven van een korrel naar de volgende korrel. Hoe minder korrels er over de dikte van de plaat voorkomen hoe sneller en sterker de plaat zal kunnen vervormen door het cumulatief en onomkeerbaar aspect van de uitzetting.

Dominique Nicaise, WTCB N04_2008-11

Siegesmund, S.; Koch, A. & Ruedrich, J., 2007. Fassadenplatten aus Marmor: Verwitterungsdynamik und Verbiegungspotentiale. Zeitschrift der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 158/3: 631-647.



Doorbuigen van dunne platen in wit Carrara-marmer met suikerige (granoblastische textuur): epitaaf St.-Catharinakerk Kortrijk-Dutsel (links) en gevelbekleding Finlandia House, arch. Alvar Aalto (rechts).

Grondstof voor onze samenleving

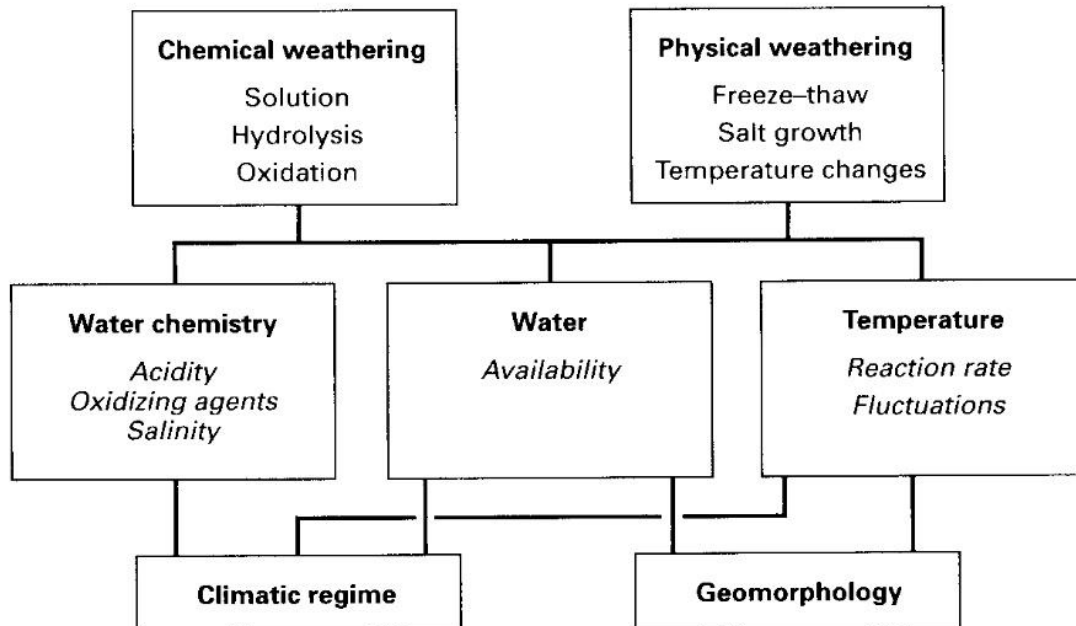
Bijna 500 groeves komen heden ten dage nog voor in België, een fractie van wat het eens was, met slechts 7000 rechtstreekse arbeidsplaatsen, maar nog altijd goed voor 60 miljoen ton/jaar extractiemateriaal. Grondstoffen zijn alomtegenwoordig in het dagelijks leven, en niet alleen in de bouw. Een ton papier bijvoorbeeld, bevat niet alleen vezels uit hout of vodden, maar zo'n 250 tot 300 kg minerale grondstof. 20 kg kalksteen zijn nodig voor de productie van 100 kg suikerklontjes. De productie van een ton staal vergt niet alleen ijzererts of steenkool maar ook 150 kg kalksteen en 50 kg kalk. Een ton glas vergt 700 kg zand, 300 kg dolomiet of kalksteen, 130 kg soda. Per kilometer autosnelweg zijn 30.000 ton granulaten nodig, per kilometer hoge-snelheidstrein 6000 ton. Een ton beton bevat gemiddeld 1310 kg granulaten, 600 kg zand en 325 kg cement.

VERWERING VAN GESTEENTEN EN BODEMVORMING

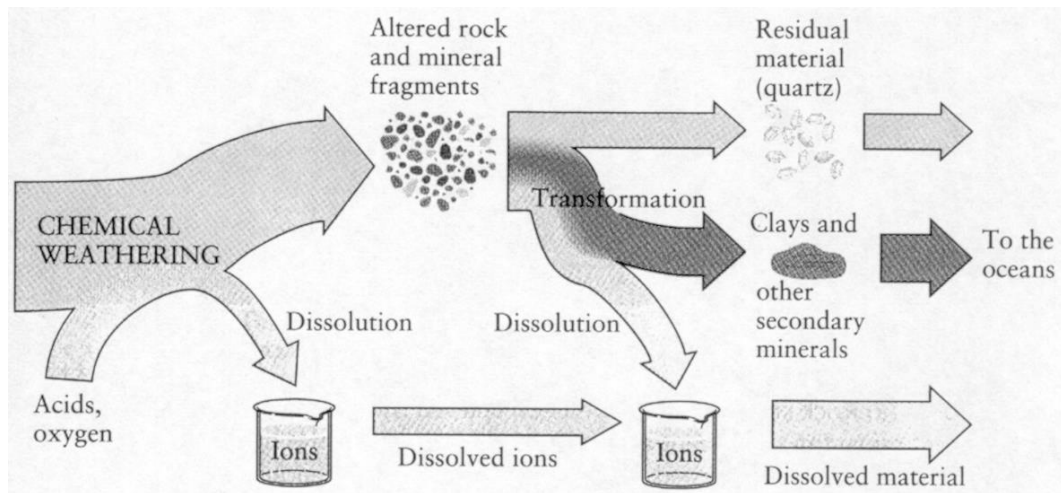
“Achter die bordjes (met Verboden Toegang en dus bijzonder aantrekkelijk) graaft de mens zich, met behulp van monsterlijke graafmachines, pneumatische boren en dynamiet, een weg in de aarde. Hier wordt duidelijk wat onze planeet in werkelijkheid is: een grote steen, inwendig rein, hard en helder, van buiten vuil, slijmerig en versleten. Uit dat vuil, dat slijtagemateriaal, dat slijpsel, achtergelaten door de werking van ijs, sneeuw, regen en wind, is alles voortgekomen: de microben, de planten, de dieren, en de mens.” Willem Frederik Hermans, Het sadistisch universum.

Verwerking

Verwerking van gesteenten zal de bestaande mineralen ten dele omzetten naar andere mineralen en het gesteente tot kleinere fragmenten herleiden. Dit proces verloopt geleidelijk en terwijl zeer verweerde gesteenten gemakkelijk herkenbaar zijn is het niet zo vanzelfsprekend dat een beginnende verwerking gemakkelijk kan vastgesteld worden bij een visuele inspectie van het gesteente op het terrein. Een onderzoek onder de microscoop zal echter de aantasting van de mineralen zeer duidelijk laten zien. Kleine verweringsmineralen zullen aanwezig zijn op de grotere oorspronkelijke korrels, vaak geconcentreerd langs de splijtingen van het mineraal of langs kleine haarfijne spleetjes omdat daarlangs water, de grote motor van de verwerking, het mineraal kan binnendringen. Een voorbeeld is de omzetting van veldspaat naar kleimineralen. De verweringsmineralen worden gevormd met de chemische elementen die uit de verwerende mineralen vrijkomen. De verweringsmineralen beantwoorden aan een nieuw thermodynamisch evenwicht in vergelijking met de verwerende mineralen.



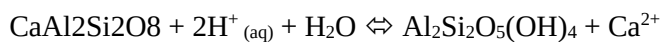
Verweringsprocessen en controlerende factoren (Nicholls, Sedimentology and Stratigraphy, Blackwells 1999)



Verwerkingsschema (Merritt)

Chemische verwerking

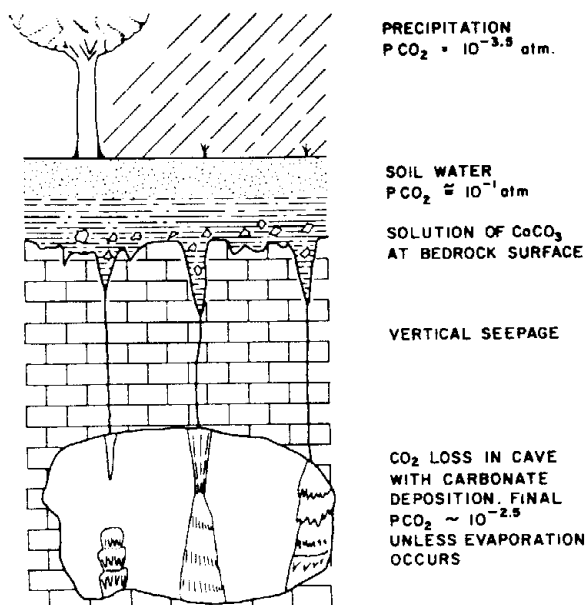
Zeer belangrijk bij de verwerking is *water*. Alleen al door zijn polaire moleculaire structuur zal water met mineraaloppervlakken reageren. Deze hydratatiereactie wordt geactiveerd door de oplossing van koolzuurgas in het water en de aanwezigheid van protonen die trouwens deels afkomstig zijn uit de partiële dissociatie van H_2CO_3 , het reactieproduct van CO_2 en H_2O , maar ook van andere bronnen, onder andere van biologische oorsprong zoals bijvoorbeeld van humuszuren. Zowel silicaten als carbonaten worden door verzuurd water aangetast, bijvoorbeeld de aantasting van anorthiet plagioklaas door verzuurd water met kaolinit als eindproduct:



bijvoorbeeld de aantasting van calciet die resulteert in een volledige oplossing:

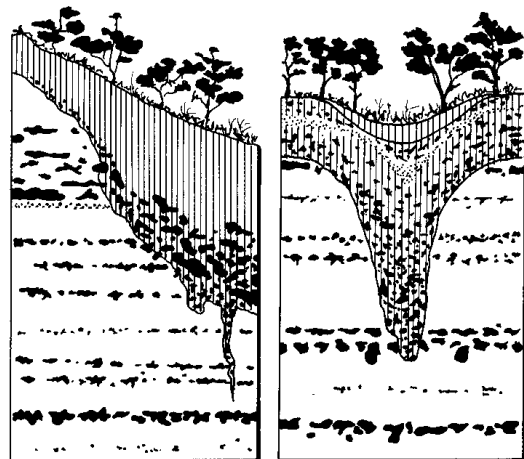


De oplossing van kalkgesteenten gebeurt beneden een pH van ongeveer 8, eigen aan de meeste natuurlijke waters.



Karstwerking door oplossing en neerslag van kalk (CaCO_3) met grot- en druipsteenvorming

Oplossingsverschijnselen in de ondiepe kalkrijke ondergrond van Zuid-Limburg met de vorming van z.g. geologische orgelpijpen, opgevuld met residuele klei, vuursteen (eluvium) of ingespoelde leem en zand (colluvium). Boven een inzakkingspijp ontwikkelt er zich dikwijls een circulaire verzakking of doline (uit cursus Sedimenten en sedimentaire gesteenten, LIKONA Werkgroep geologie, 2002).



Kleimineralen zijn typische verweringsproducten. Welk kleimineraal tijdens de verwerking zal gevormd worden is deels afhankelijk van de samenstelling van het water. Zo zal bij een relatief belangrijke grondwaterstroming in een tropische bodem, zoals bij veel regenval op hellingen het geval zal zijn, de opgeloste stof steeds afgevoerd worden, uitloging, en het gevormde kleimineraal zal arm zijn aan kationen : kaoliniet. Wanneer de verwerking nog verder doorgaat kan ook nog silicium uitgelooft worden zodat enkel nog bauxiet, Al-oxiden en hydroxiden (bron van aluminiumerts) als verweringsresidu zullen achterblijven, eventueel met ijzeroxiden. Ijzeroxiden zijn niet oplosbaar in gewone natuurlijke waters en kunnen in bodems als residueel mineraal aanrijken zoals in de rode tropische laterietbodems.

Niet enkel de verzuring van het water heeft een groot verweringspotentiaal maar ook de opgeloste zuurstof zal mineralen aantasten door *oxidatie*. Uiteraard zullen sulfiden zoals pyriet geoxideerd worden maar ook silicaten en andere mineralen met gereduceerd ijzer in het rooster, zoals glauconiet zijn gevoelig voor oxidatie. Oxidatie is gemakkelijk herkenbaar in gesteenten door de roestkleur van het gevormde limoniet. Ook het opgeloste gereduceerde ijzer dat in grondwater of poriënwater aanwezig is, kan geoxideerd worden en eventueel moerasijzererts of limonietkorsten vormen. Wanneer door onvolledige oxidatie in de kernen van bakstenen oplosbaar ijzer kan uitlogen naar de oppervlakte zal het daar oxideren en roestvlekken veroorzaken.

Kleilagen die aan de lucht blootgesteld worden verwerken tot limonietbruine klei, door de oxidatie van pyriet, organisch materiaal en het Fe^{2+} uit het poriënwater.

De chemische verwerkingssnelheid is niet enkel afhankelijk van de externe factoren zoals de waterhoeveelheid, de waterbeweging, de watersamenstelling, de temperatuur maar ook van de aard van het mineraal zelf. Zo zullen silicaten met een hoog smeltpunt eerder verwerken dan silicaten met een lager smeltpunt. Dat maakt dat Fe-Mg silicaten en Ca-rijke veldspaten gemakkelijker zullen verwerken dan Na- of K-rijke veldspaten, muscoviet en vooral kwarts. De grote weerstand tegen verwerking van kwarts verklaart de dominantie van kwarts in zanden omdat de andere mineralen die met kwarts in het brongebied aanwezig zijn eerder verwerken.

Mechanische verwerking of fragmentatie

De chemische verwerking zal des te effectiever kunnen optreden in de gesteenten naarmate de toegangswegen tot het gesteente veelvuldiger zijn, met andere woorden naarmate het gesteente meer gespleten en gefragmenteerd is. Zo vertonen gesteenten soms verweringsverkleuringen in polygonaal georganiseerde strepen, gelegen langs spleetjes weliswaar soms haarfijn maar voldoende om waterbeweging in toe te laten. De fragmentatiegraad van een gesteente hangt uiteraard samen met de *tektonische* deformatiegeschiedenis, zoals diaklazen, druksplijting en breuken. De *drukontlasting* nabij

de oppervlakte, die ontstaat doordat de erosie steeds de bovenste gesteentelagen verwijdt en daardoor geleidelijk de druk op de onderliggende gesteenten vermindert, zorgt voor het openkomen van bestaande richtingen in het gesteente zoals de laagvlakken, de diaklazen, de koelscheuren bij magmatische gesteenten, de druksplijtingen, de breukvlakken, of van nieuwe vlakken, evenwijdig aan het oppervlak, precies door de drukontlasting gegenereerd, zoals de plaatvorming bij granieten. De invloed van de drukontlasting laat zich op die wijze gelden tot maximaal enkele tientallen meter diepte. Ze zal aan gesteenten die oorspronkelijk in onverweerde toestand geen porositeit hebben toch een spleetporositeit en doorlatendheid geven.

Fragmentatie wordt ook in de hand gewerkt door het *uitkristalliseren* van zouten in de poriën van het gesteente, bijvoorbeeld door het uitdampen van opstijgend grondwater in de woestijnen en in ariede gebieden waar zo een zoutkorst of een caliche kan gevormd worden. Uitbloeiingen op bakstenen ontstaan analoog doordat uitdampend poriënwater zouten van binnenin de baksteen naar de oppervlakte brengt waar ze bij de verdamping van het water achterblijven. Ook in bouwstenen zal vaak een zoutlaagje zich vormen in de poriën net onder het oppervlak van de steen waar de verdamping van het water gebeurt en geleidelijk zal daardoor het oppervlak afschilferen. Zoals de groei van zoutkristallen in de poriën fragmentatie kan veroorzaken zal ook het *bevriezen* van water in de poriën door de volumetoename van 9% reeds spanningen in het gesteente veroorzaken terwijl de druk op het resterende vloeibare water dat in de fijne poriën gevangen zit tussen de ijskristallen en de uiteinden van de poriën nog aanvullende spanningen zal veroorzaken. Ook de *hydratatie* van anhydriet naar gips zal grote spanningen veroorzaken in een gesteente. Zo ook zullen kalkfragmenten die mee in bakstenen werden verwerkt en daarbij tot CaO werden omgezet tijdens het bakken, terug rehydrateren en door de volume-uitzettingen die daarmee gepaard gaat stukken baksteen doen afschilferen.

Door de verschillende thermische uitzetting van de mineralen die in een gesteente voorkomen zullen *temperatuurvariaties* ook helpen om spanningen in een gesteente te veroorzaken die uiteindelijk leiden naar de desintegratie van het gesteente.

Biologische activiteit aan het aardoppervlak helpt de fragmentatie door bijvoorbeeld wortels van struiken en bomen die in spleten ingroeien, maar de biologische activiteit helpt ook de chemische verwerking door de productie van zuren aan de wortels en tijdens de ontbinding van de organische stof.

Regoliet

De regoliet is de overgangszone tussen het vast gesteente dat op variabele diepte voorkomt en de eigenlijke bodem waarin zich de biologische activiteit concentreert. De regoliet omvat enerzijds een verweringsprofiel van het fris moedergesteente naar zijn verkrumelde en chemisch omgezette top laag (het autochtoon of alteriet) en anderzijds oppervlakkige afzettingen nagelaten door ijs, staand of stromend water, wind en hellingsprocessen, accumulaties van organisch materiaal zoals veen (het allochtoon). Tijdwerking is verschillend tussen regoliet (duizenden tot miljoenen jaren) en bodem (tientallen tot honderden jaren). Regoliet en bodem te samen liggen aan de grond van de voornaamste (bouw)grondstoffen, drinkwatervoorziening en voedselvoorziening. In tegenstelling met de processen die zich afspelen in de bodem en de diepere gesteenten is hun interface, de regoliet dus, minder goed gekend. Dit geldt ook voor België alhoewel ons land door toedoen van de ijstijden een relatief jong landschap bezit en de regoliet meestal beperkt in dikte blijft. De regoliet kan desondanks diktes bereiken van meer dan 20 m op het Haspengouws Plateau en zelfs 150 m op de Hoge Ardennen, gevolg van opeenvolgende verweringsfasen die 150 miljoen jaar geleden zijn ingezet. Hoe langer de tijdsduur (wat impliceert dat verschillende klimatologische omstandigheden een rol kunnen hebben gespeeld), hoe intenser het omvormingsproces en hoe groter de dikte kan zijn.

De verweringsprocessen die tot vorming van bodem en regoliet aanleiding geven kunnen resultaatgevoel in twee groepen worden onderverdeeld: onttrekkend, gekenmerkt door nettoverlies

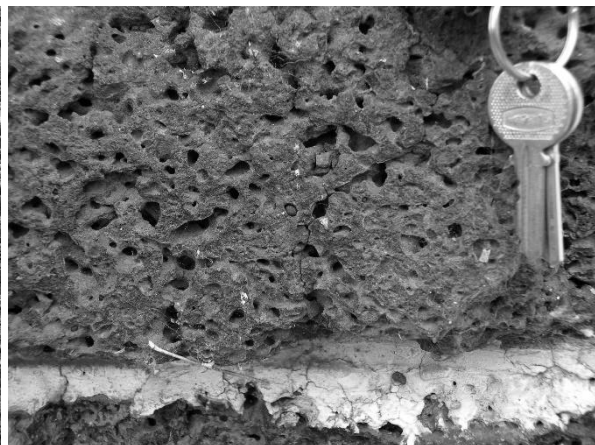
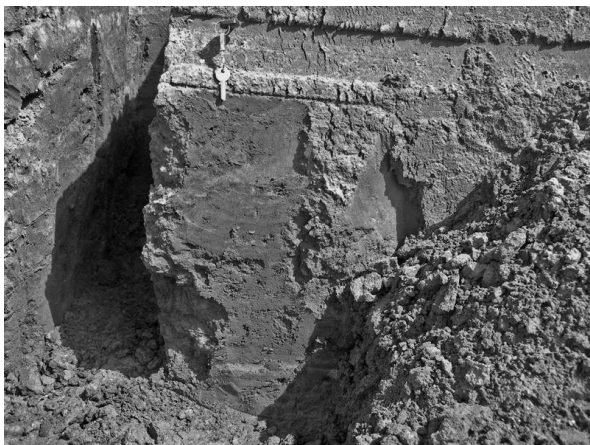
van materie ten gevolge van oplossing, en toevoegend, gekenmerkt door nettowinst van materie ten gevolge van precipitatie.

De onttrekkende verwerking ontstaat door hydrolyse, het verbreken van ionische verbindingen in mineralen onder invloed van H^+ en OH^- ionen die voorkomen uit de dissociatie van watermoleculen. De meest oplosbare elementen gaan in oplossing zoals het water niet verzadigd is en worden afgevoerd door de grondwaterbeweging. De overblijvende elementen combineren tot nieuwe verbindingen. De onttrekkende verwerking leidt tot vorming van kleimineralen en verhoogde porositeit. Uiteindelijk leidt dit proces tot concentratie van mineralen die geheel verarmd zijn aan elementen, kwarts en kaoliniet. Uitloging is dus het voornaamste kenmerk. Dit is het gebruikelijke type van verwerking. De ijzerzandsteen op de Hagelandse heuvels is een voorbeeld van een complexe verweringsprofiel: de opgeloste ijzerrijke zouten die in de zone tussen hoge en lage grondwaterstand neerslaan als limoniet (waterhoudende ijzeroxiden en hydroxiden) zullen door deshydratatie tijdens het droge seizoen (gedeeltelijk) omvormen tot goethiet (ijzerhydroxide) en hematiet (ijzeroxide). Deze precipitatie vormt een moeilijk erodeerbare korst die het onderliggende tegen erosie beschermt.



Ijzerzandsteenvorming in de meest poreuze zandlagen (volgens gekruiste gelaagdheid). Holle weg naar Kluisberg tussen Halen en Kortenaken (foto Joris Barbier).

De toevoegende verwerking leidt tot neerslag in de grondwaterspiegel van nieuwgevormde mineralen uit de opgeloste deeltjes. Dit proces vraagt hoge grondwaterspiegels en evapotranspiratieverliezen, dus een (periodiek) warm en droog klimaat. De geprecipiteerde mineralen zijn van verschillende aard: silcretes, calcretes, ferricretes, in woestijnklimaat ook zouten. Een Kempisch voorbeeld is de vorming van ijzeroer in de beekvalleien.

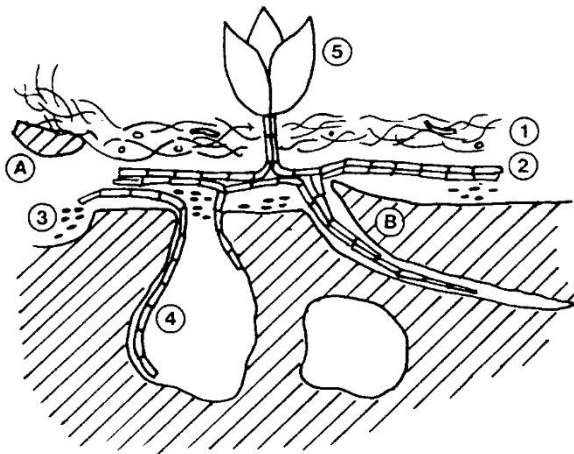


Vorming van 20 cm dikke ijzeroerlaag (foto bouwput, onder de sleutel) boven grijze en groene zanden in de Netevallei te Westmeerbeek; rechts detailfoto van ijzeroer als bouwsteen in de Pallieterhoeve te Booischot (foto's Joris Barbier, Averbode).

Bioreceptiviteit

Bioreceptiviteit van een materiaal is de eigenschap om door levende organismen gekoloniseerd te worden. Veel bouwmaterialen komen hiervoor in aanmerking. Kolonisatie leidt tot kleurverandering en/of tot nieuwe scheikundige en fysische kenmerken. Tot voor kort werden deze veranderingen aangeduid onder de negatief-geladen term **biodegradatie**. Ingeval van eenvoudige, omkeerbare kleurverandering wordt de kwaliteit van het materiaal niet wezenlijk aangetast; integendeel kan een biologische beschermingslaag het materiaal resistent maken tegen verdere aantasting of een esthetisch gewaardeerde patina verlenen.

Levende organismen moeten in duurzame ecologische relatie met het bouw materiaal staan. Kolonisatie kan maar in geval van beschikbaarheid van een ecologische niche die vestiging, ontwikkeling en voortplanting toelaat. Zaden bijvoorbeeld die op een steen terechtkomen maar niet tot ontwikkeling komen, tellen niet mee voor bioreceptiviteit. De organismen die op of soms diep doordringend in een bouwsteen leven vertonen een complexe opbouw en onderlinge samenhang, gaande van bacteriën, schimmels, eencellige wieren, mossen, korstmossen tot bloeiende planten. Bioreceptiviteit van bouwstenen wordt bepaald door eigenschappen van de oppervlakte die blootgesteld is aan klimaatsinvloeden (water, temperatuur, licht, tijd) zoals ruwheid, porositeit, vochtgehalte, capillaire druk, zuurtegraad en scheikundige samenstelling. Bioreceptiviteit begint altijd oppervlakkig maar kan steeds diepgaander de steen aantasten (van *primaire* naar *secundaire* enz.). Stofdeeltjes, roet e.d. die zich op de steen neerzetten beïnvloeden uiteraard de graad en aard van bioreceptiviteit (*extrinsieke bioreceptiviteit*).



Kolonisatie van een poreuze bouwsteen door organismen:

1. biofilm van eencellige blauwgroenwieren en groenwieren
2. mossen
3. eencellige kiezelwiertjes
4. moswortels
5. mosbloei

A. afscheuren steenfragmenten

B. splijten door indringende wortels en schimmels.

Guillite, O. & Dreesen, R., 1995 - Laboratory chamber studies and petrographical analysis as bioreceptivity assessment tools of building materials. *The Science of the total Environment* (Elsevier) 167: 365-374.

Karstwerking en druipsteenvorming

Kalksteen is zeer gevoelig voor oplossing door natuurlijke waters omdat deze in de regel licht verzuurd zijn en kalkstenen in deze pH condities onstabiel zijn. Daarom heeft een landschap dat op kalkstenen is ontwikkeld een speciale morfologie waaraan *karst*, een verzamelnaam voor oplossingsverschijnselen, onvermijdelijk verbonden is. Het extreme voorbeeld is uiteraard de vorming van grotten. De oplossingsverschijnselen kunnen in principe ontwikkeld worden in de volledige zone tussen het landschapsoppervlak en de diepte van de watertafel en verder onder de grondwatertafel voor zover het grondwater niet aan kalk verzadigd is geraakt, bijvoorbeeld door een belangrijke en onderhouden grondwaterbeweging. Enerzijds levert deze eigenschap reservoirgesteenten op, zoals bijvoorbeeld in de provincie Henegouwen en het zuiden van West-Vlaanderen waar in de top van de Carboonkalkstenen de grootste drinkwaterreserves van het land liggen. Een ander voorbeeld is de top van de Carboonkalksteen in de Noorderkempen, een fossiel karstlandschap op grote diepte gelegen, waarin water voorkomt met temperaturen van 70°C tot 100°C, dat in aanmerking komt voor de winning van lage enthalpie geothermische energie (bijv. in Mol en in aanleg te Beerse). Datzelfde reservoir wordt

nu reeds gebruikt voor de seizoensopslag van ingevoerd aardgas te Loenhout, waar ruim 1 miljard m³ aardgas ondergronds is opgeslagen. Gas of vloeistof kunnen ondergronds opgeslagen worden indien die onder een druk ingepompt worden die net iets groter is dan de heersende natuurlijke druk in het reservoir.

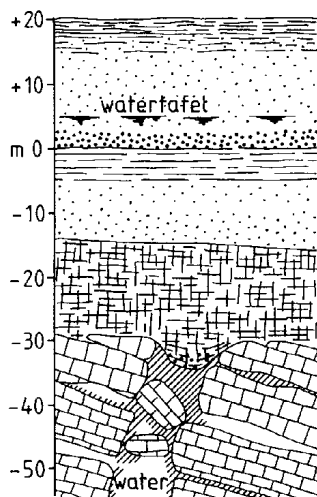
Anderzijds stelt de aanwezigheid van oplossingsholtes in de kalkstenen uiteraard heel wat funderingsproblemen bij de verwezenlijking van bouwprojecten. Ook bij de aanleg van stuwwallen, en waterbekkens in het algemeen, zal een verkarste ondergrond ongeschikt zijn, omdat anders het water gewoon zou weglopen in de karstholtes. De oplossing van kalksteen is een proces dat relatief snel doorgaat. Zo kon berekend worden aan de hand van het opgeloste kalk in het grondwater dat er in Henegouwen, jaarlijks 20.000 ton kalksteen onttrokken wordt, alleen nog maar in het opgepompte water. Deze hoeveelheid stelt zo een 7000 m³ kalksteenvolume voor. Het wegnemen van kalksteen door oplossing in de ondergrond kan ook resulteren in het aanzuigen van bovenliggende gesteenten die, nadat ze gedurende een geruime tijd weerstand boden tegen de inzakking, plots kunnen begeven en op een catastrofale manier instorten. Zo is het gebied rond Doornik reeds sinds jaren geteisterd door het periodisch plots verschijnen van inzakkingscilinders die twintig meter diameter kunnen bereiken en zeker even diep zijn. Een dergelijke natuurlijke put heeft trouwens enkele jaren terug ook eens de Scheldebbedding getroffen nabij Doornik waardoor vervuild Scheldewater in de onderliggende grondwaterreserve stroomde totdat de instortingsholte kon gedempt worden.



Instortingsholtes te Gaurain-Ramecroix (Doornik), 1995, gevolg van diepe bemaling in de nabijgelegen kalksteengroeve en ontwatering van instabiele sedimenten die fossiele grotten hadden opgevuld.



Karst-instortingsholten in de Scheldebbedding te Kain bij Doornik, 1970.

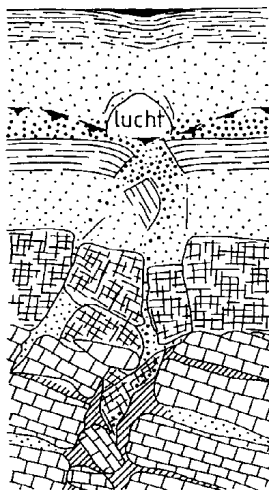


1. diepere karst

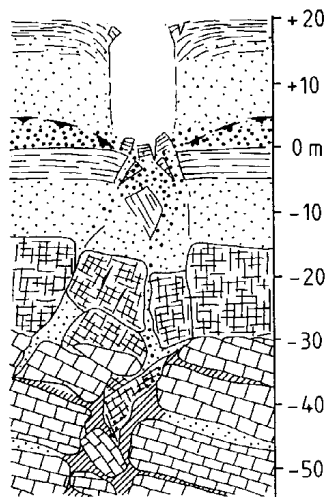


2. ontwikkeling van de instorting

De ontwikkeling van cilindrische instortingsputten door kalkoplossing in de ondergrond, naar het voorbeeld van de Scheldevallei tussen Doornik en Kortrijk. Tientallen van deze putten zijn met zwermen ontstaan door overmatige afpompeling van grondwater sinds de jaren 1960 (naar de Roubaix & Legrand).



3. instorting bereikt de waterfaset



4. doorbraak

Bodemvorming

Het resultaat van de verwerking aan het aardoppervlak is het ontstaan van een bodemlaag, bestaande uit een toplaag van enkele decimeter tot vele meters van gefragmenteerd en verpulverd gesteente dat vermengd is met organische bestanddelen afkomstig van de planten en de organismen die in die bodemlaag leven. Het dode organische materiaal is een voedingsbodem voor een rijke bacteriënactiviteit waardoor het zal afgebroken worden. Een bodem is dus niet beperkt tot de bovenste 20 cm, zoals vaak gedacht wordt omdat de meeste planten in deze zone wortelen.

Door de uitloging die bij de bodemvorming gebeurt zal in de toplaag meestal een zonering of bodemprofiel ontstaan, afhankelijk van een reeks factoren die elkaar ook onderling beïnvloeden:

- de eigenschappen van het moedermateriaal (zand, kalk...)

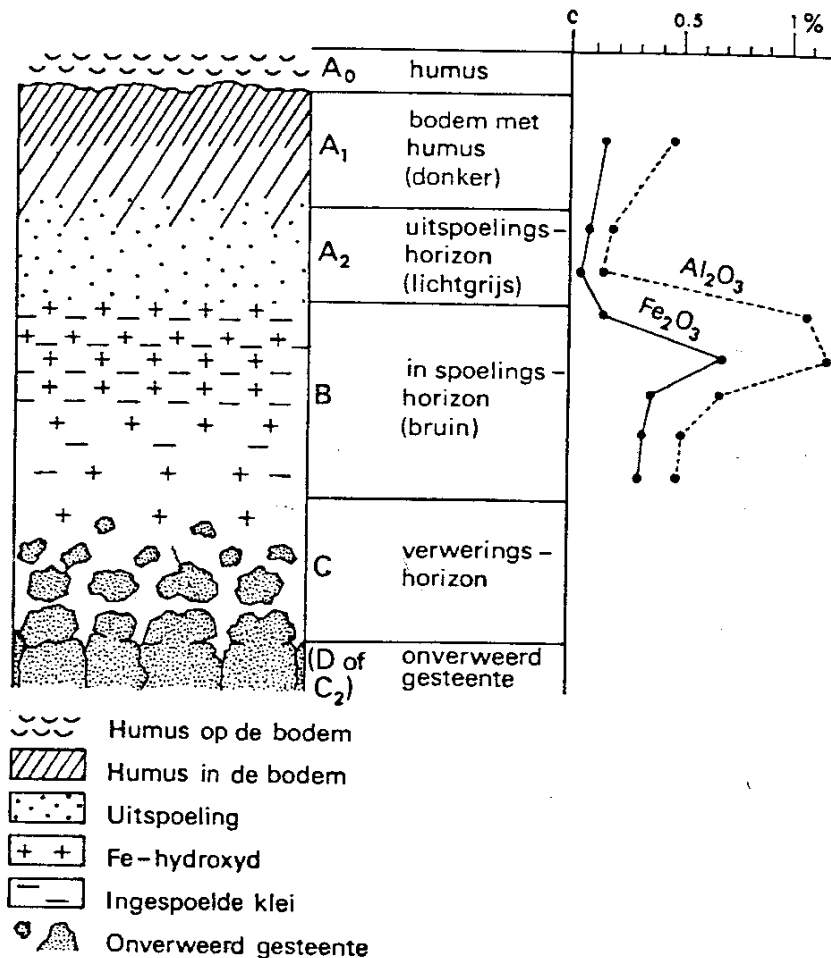
- de tijd (hoe ouder een bodem, hoe meer ontwikkeld en gedifferentieerd en dikker)
- de vegetatie (bos, heide, akker...)
- het klimaat (temperatuur en neerslag)
- het reliëf (afspoeling of afzetting)
- de menselijke invloed (verstoring, bodemverbetering...).

Bodemprofiel

In een type-bodemprofiel worden onder de humuslaag aan de top eerst een A-horizont of uitlogingshorizont aangetroffen en daaronder een B-horizont of aanrijkhingshorizont waarin de uitgeloopte elementen deels neergeslagen zijn als klei en ijzeroxiden en daaronder tenslotte de C-horizont of het verbrokkelde weinig verwerde moedermateriaal.

In een volledig ontwikkeld bodemprofiel kunnen de volgende bodemhorizonten worden aangetroffen (van boven naar beneden):

- de strooisellaag (symbool A0)
- een humushoudende horizont (symbool A1)
- een uitgeloopte horizont, door het insijpelend water verarmd aan oplosbare stoffen zoals humus, klei, zouten, ijzer en de meeste andere elementen (symbool A2)
- een aangerijkte horizont waar de uitgeloopte stoffen van de vorige horizont worden afgezet (symbool B)
- het moedermateriaal, eigenlijk de onveranderde ondergrond (symbool C).



Het zal duidelijk zijn dat de profielopbouw niet steeds dezelfde is: zo kunnen bovenliggende horizonten door afspoeling verdwijnen, overgangshorizonten kunnen voorkomen, enz. Bijzonder in jonge bodems heeft zich nog geen profiel kunnen ontwikkelen. In het beste geval is al een humusaanrijking merkbaar, rustend op het moedermateriaal; zij worden azonaal genoemd. Voorbeelden van azonale bodems zijn landduinen en overstromingsgronden.

Aangezien klimaat, plantendektype en organische activiteit in de verweringslaag, het type van het moedergesteente, de topografie en de tijd allemaal een rol spelen bij de verwerking die de bodem vormt zal er een grote variëteit aan bodemtypes bestaan. Op wereldschaal nochtans is het klimaat de voornaamste factor: bodemtypes en klimaatsgordels vertonen eenzelfde verloop. In België waar geen grote verschillen in klimaat voorkomen, wordt het bodemtype vooral bepaald door het moedermateriaal in de ondergrond. Zo onderscheidt men zandbodems, zandleemgronden en leemgronden.

De tijd die nodig is om een bodemprofiel te vormen zal sterk afhankelijk zijn van het klimaatstype waaronder de bodemvorming gebeurt. Een voorbeeld onder relatief gunstige omstandigheden, namelijk een gematigde temperatuur en hoge neerslag, dat kon nagegaan worden bij de terugtrekking van een gletsjer toont dat de volle ontwikkeling van een profiel een 150 jaar in beslag neemt. In drogere omstandigheden kan het gemakkelijk nog veel langer duren eer een B-horizont zich vormt.

Eenmaal gevormd zal de bodem de interacties tussen lithosfeer, hydrosfeer en atmosfeer stabiliseren en zal er een stabiele vegetatielaag op groeien (climax ecosysteem). Onder menselijke beïnvloeding kan het bodemvormingsproces versnellen; hoe sneller echter een bodem tot stand komt hoe gemakkelijker hij weer kan verarmen en hoe minder ecosysteemdiensten geleverd kunnen worden.

De Kempische bodem : podzolbodems

De arme zeer doorlatende Kempische zandgronden bezitten een goed herkenbaar typisch bodemprofiel dat **podzol** wordt genoemd. Een podzolbodem ontwikkelt zich wanneer de insijpeling van regenwater in de bodem de verdamping van grondwater overtreft, zodat de verticale waterbeweging in de richting van de ondergrond verloopt. Deze waterbeweging gaat gepaard met de uitloging (= verplaatsing naar de diepte) van mineralen, humusstoffen en fijn bodemmateriaal uit de bovenste lagen naar de ondergrond. Hierdoor verarmt de bovengrond bestendig.

De verplaatste materialen worden in de bodem afgezet in een aanrijkingshorizont op veranderlijke diepte, afhankelijk van de stand en de schommelingen in het grondwaterpeil, waar zij aaneenkitten en ondoordringbare lagen kunnen vormen (zoals het ijzeroer) die de wortelruimte beperken en de plantengroei negatief kunnen beïnvloeden wanneer de aanrijkingshorizont dicht bij de oppervlakte voorkomt.

Podzolvorming is vooral gebonden aan een koud-gematigd klimaat en komt best tot ontwikkeling in een goed doorlatende en drainerende grondlaag zoals zand. Het proces kan worden versneld door bodemverzuring en door elke vorm van uitputting en verwaarlozing van bodem en bouwlaag. De mens speelt hierbij een determinerende rol.

Gezien de beperkte landbouwkundige waarde van de zandgronden trachtte de Kempische boer deze door de eeuwen heen te verbeteren. Dit kon hij slechts door het inbrengen van organisch materiaal. Het tekort aan stro om de dieren op stal te kunnen houden werd aangevuld door heide- en grasplaggen die in de omgeving werden gestoken. Vermengd met het mest werden deze plaggen uit de potstal jaarlijks op het land gebracht en ingewerkt. Naast het organisch materiaal werd op die manier ook veel zand op het land gebracht. Dit verklaart de vaak 50 tot 60 cm dikke zware humeuze bovengrond die men nu aantreft in oude cultuurgronden. Plaggenbodems zijn dus een duidelijk voorbeeld van een profielontwikkeling die door de mens bepaald is. Meestal worden ze aangetroffen in de omgeving van de oude woonkernen in de Kempense zandstreek.



Podzol gekenmerkt door uitgeloogd lichtgrijs zand, donkergekleurd door aanrijking aan humus, rustend op een verharde ijzerpan (midden beeld). Overdekt door 70 cm bleek beige-bruin verstoven zand. Onderaan tussen het gevlekte zand (in grondwaterspiegel) en grijze zand (onder de grondwaterspiegel) nog een gebleekte zone, mogelijk overeenkomend met een fossiele Allerød-bodem van het einde van de ijstijd. Sleuf uitgegraven op terrein SCK, Mol.

Duurzaam bodembeheer

Het woord *bodem* krijgt naargelang de context verschillende betekenissen:

- in de gewone omgangstaal: wat zich onder onze voeten bevindt, ongeacht of het natuurlijk of artificieel is;
- geotechnisch: de losse gesteenten aan de aardoppervlakte, als tegengesteld aan de verharde / vaste gesteenten of rotsen die meer in de diepte voorkomen;
- in de landbouw: de losse grond die bewerkt wordt en waarin planten wortelen ('aarde');
- bodemkundig: de min of meer losse toplaag van de lithosfeer, opgebouwd uit mineralen, lucht, water, organisch materiaal en levende organismen;

De National Council of Science (USA) heeft het concept uitgebreid tot de 'kritische zone' waarin onze samenleving functioneert en zijn voornaamste hulpbronnen aan ontleent: de epidermis van de Planeet Aarde waarin zich de interactie tussen lithosfeer, hydrosfeer, biosfeer en atmosfeer zich afspeelt (bodem als ecosysteemdienst).

Bodems, landschappen en ecosystemen zijn functie van dezelfde variabelen (lithologie, tektoniek, water, klimaat).

Belang van de bodem:

- 1 biomassa (voedselproductie)
- 2 wateropslag
- 3 onderhoud biodiversiteit
- 4 funderingslaag voor menselijke activiteiten
- 5 grondstof
- 6 koolstofopslag en recyclage van nutriënten
- 7 historisch archief

Blum, W.E.H. (1993) Soil Protection concept of the Council of Europe and Integrated Soil Research. In: Eijsackers, H.J.P. and Hamers, T., Soil and Environment Vol I. Integrated soil and sediment research: a basis for proper protection. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher, 37-47.

Frossard, E.; Blum, W.E.H. & Warkentin, B.P., 2004. Function of soils for human societies and the environment. Geological Society Special Publication 266.

De bodem is de laag die het aardoppervlak overdekt en bestaat uit mineralen, lucht, water, organisch materiaal en organismen, inclusief alle uitwisseling die tussen deze elementen bestaat, voornamelijk recyclage van nutriënten tussen levende en niet-levende natuur en seizoensgebonden opslag van water dat zo permanent ter beschikking van de biosfeer blijft. De bodem ondersteunt het leven op aarde; vandaar ook dat dit materiaal als 'aarde' geïdentificeerd werd en onlosmakelijk verbonden leek met de planeet die de mensheid draagt. Tegenwoordig is dat diepe inzicht van mensen die volgens het ritme van de natuur leefden en zichzelf konden voeden grotendeels verloren gegaan.

Waar vroeger de bodem als een utilitaire hulpbron gold voor de opbouw van de menselijke samenleving en geoptimaliseerd werd voor de voedselvoorziening, wordt de bodem tegenwoordig ook als erfgoed aanzien. Er zijn in Vlaanderen nog bitter weinig plekken met een natuurlijk bodemprofiel. Die plekken verdienen bescherming. Daarenboven vormt de bodem een archief waarin archeologische sporen van vroegere menselijke bewoning zijn opgeslagen, en ook aanwijzingen voor vroegere klimaten en ecosystemen.

De bodem verzorgt niet alleen de voeding van mens en dier (schepping van biomassa), het vormt ook de basis waarop andere economische activiteiten worden uitgevoerd (woningbouw, wegeaanleg, recreatie, afvalberging); het is een bron van grondstoffen (voor waterwinning, bouwmaterialen); het stabiliseert het aardoppervlak in al zijn verscheidenheid en vormt de diverse landschappen; het omsluit getuigenissen van het verleden en is dus een relevant onderdeel van het culturele erfgoed.

Alhoewel bodems van nature gevormd worden op ieder mogelijk substraat is de tijdsschaal waarop dit gebeurt van een andere grootte-orde (honderden jaren) dan de meeste economische activiteiten (dagen of een seizoen). In de dagelijkse praktijk moet een bodem dus als een niet-hernieuwbare grondstof beschouwd worden.

Ieder jaar gaat wereldwijd 20 miljoen hectare landbouwgrond verloren aan urbanisatie of bodemverlies. Indien de huidige evolutie zou worden doorgetrokken is ook geheel België binnen 250 jaar verdwenen onder het beton. De fysische en chemische bodemkwaliteit gaat achteruit door erosie (ernstig in de leemstreek of Midden België met soms 10 ton/ha/jaar bodemafspoeling), uitputting (verlies van nutriënten, soms door overbemesting) en vervuiling (atmosferisch, bijv. zure regen, diffuus door bemesting of rechtstreeks door storten van afval). In vergelijking met andere landen wordt België vooral geconfronteerd met afsluiting (vermindering water-infiltratiecapaciteit) en nitraatbemesting.

Het bodemleven en hierdoor ook de zuiverende en filterende werking van de bodem worden op talrijke plaatsen zozeer beschadigd dat herstel op korte termijn onmogelijk wordt. Bodems ondersteunen verschillende ecosystemen en bodemdegradatie vormt een bedreiging voor stabiliteit of herstel van die ecosystemen (cf. verdwijnen tropisch regenwoud, de kaalslag van het Middellandse zeebekken). De bodemvruchtbaarheid wordt mede bepaald door de hoeveelheid organisch materiaal, en dus ook koolstof die erin opgeslagen is. In verzuurde bodems, bijv. door overbemesting, gaat het organisch materiaal sneller oxideren en uit de bodem verdwijnen. Terzelfdertijd vormt het intensieve gebruik van het organisch materiaal een rem op de langdurige opslag van koolstof in de bodem, veroorzaakt zodoende een versnelde koolstofkringloop en toename van de hoeveelheid broeikasgassen in de lucht, met risico op opwarming van de aarde. De hoeveelheid koolstof in de bodem opgeslagen is immers vele malen groter dan de hoeveelheid aanwezig in de broeikasgassen. Bijgevolg kunnen zelfs kleine wijzigingen in koolstofgehalte opgeslagen in de bodem grote effecten hebben op de hoeveelheid broeikasgassen in de lucht.

Natuurlijke bodems bezitten ook een grote opslagcapaciteit voor water en kunnen zo het risico op overstromingen sterk verminderen. De meeste recente overstromingen in België hebben te maken met urbanisatieproblemen (bodemverdichting, versnelde waterafvoer en dichtbouwen van natuurlijke afwateringsgebieden). Deze overstromingen brengen daarenboven pollutanten in omloop en laten ze over gans het overstroomde gebied achter, waardoor een bijkomende vervuilingsfactor is geschapen.

Het regeneratievermogen van bodems is in onze geïndustrialiseerde maatschappij een bijkomende bedreiging. Bodems kunnen soms aanzienlijke hoeveelheden pollutanten bufferen en opslaan vooraleer effectieve schade aan water of biosfeer zich zal manifesteren, maar sanering is dan des te moeilijker en kostelijker. Vervuiling wordt dus gemakkelijk aan de volgende generaties doorgegeven. Opname van pollutanten uit de bodem via voedsel of door rechtsreeks contact met de grond (bijv. peuters) vormt een der grootste toxische risico's voor de mens.

Net als water is aarde een grondstof waarmee we dringend duurzaam moeten leren omgaan door bodembescherming. Net als voor de schaarse ruimte spelen immers ook voor de bodems tal van belangenconflicten tussen de grondgebruikers, huidige en toekomstige (bijv. strijd tussen landbouw, verkaveling en ontgronding, landschaps- of kustbescherming). Een der middelen om verder bodemverlies te beperken is hergebruik van artificiële gronden voor zover sanering niet te kostelijk is (verlaten industrieterreinen voor woningbouw bijv. = 'brownfield redevelopment'). Het besef dat deze grondstoffen niet zomaar toegeëigend kunnen worden is misschien wel de grootste stap tot duurzame ontwikkeling. Bodemattesten en de vertaling van vervuilings- en overstromingsrisico's in de grondprijzen brengen de economische impact van mismeestering van de bodem in de aandacht en zullen zo nillens willens bijdragen tot een beter beheer, zo mag althans gehoopt worden. Voor architecten zou het verlies aan natuur en landschapswaarde ook al voldoende argumenten moeten zijn om niet losjes met aarde om te springen.

www.lne.be/themas/bodem

EROSIE

De verwijdering van de partikels die door de verwerking gevormd worden gebeurt tijdens het erosieproces. Deze erosie zal gebeuren via massabewegingen, grotendeels onder invloed van de *zwaartekracht*, en via de impact van de regen en de wind die de korrels over grotere afstanden zullen transporteren.

Snelle erosieprocessen

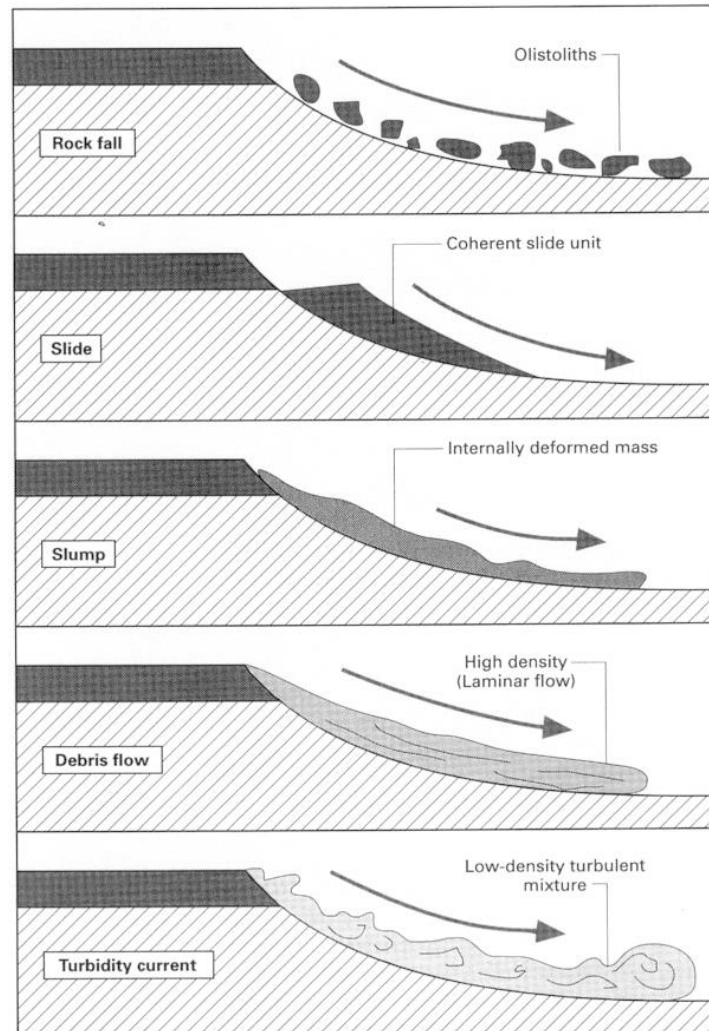
Snelle processen die grote hoeveelheden gesteente of sediment verplaatsen en zo hellingen afbreken en doen terugschijden, zijn afstortingen, verglijdingen, vervloeiingen, uitspreidingen en de bergstortingen of avalanches.

Onder *afstortingen* moeten we het neervallen van sedimenten en gesteenten verstaan wanneer een helling te steil wordt, bijvoorbeeld door de erosie aan de basis van de helling. De schaal van dit proces varieert van grote berghellingen die zo afgebroken worden tot de instorting van door rivierwerking ondergraven oevers. Onder *verglidingen* worden massaverplaatsingen verstaan die zonder veel interne vervorming verschuiven langs een welbepaald vlak. Dat vlak kan gebogen zijn waardoor de verplaatste massa als het ware uit de helling wegdraait. Dergelijke verglijdingen worden daarom rotatief genoemd en ook als slumps aangeduid. Verglijdingen kunnen ook door translatie langs een plat vlak gebeuren. Dit kan bijvoorbeeld het contactvlak zijn tussen de onverstoorde harde ondergrond en de bovenliggende bodempuinmantel, of een breukvlak zijn, maar in een normale opeenvolging van sedimentaire lagen kunnen ook zeer dunne laagjes als schiefer, klei, mergel of zout als glijvlak fungeren waarop alle bovenliggende lagen, intern quasi onverstoord, naar beneden zullen verschuiven. Uiteraard zullen potentiële glijvlakken des te gevaarlijker zijn naarmate ze een afhelling hebben in de richting van het lager gedeelte van het landschap. Zo is de catastrofe bekend in de Italiaanse Alpen waar in de herfst van 1963 een grote massa uit een valleiwand in een afgedamd riviergedeelte terecht kwam. De dam, de Vaiont dam die 267m hoog is, bleef intact maar het water erachter werd door de aardverschuiving die de vallei over een tweetal kilometer vulde in een enorme vloedgolf over de dam gejaagd en doodde bijna 3000 mensen. Deze translatie-verglijding werd in de hand gewerkt door de helling van de lagen naar de vallei toe en het voorkomen van laagvlakken met weinig cohesie, nog in de hand gewerkt door de drukontlasting.

De *vervloeiing* van lagen zal een volledige verstoring van de interne structuur van de vervloeiende massa met zich meebrengen. Vervloeiingen hebben altijd een zeer hoog watergehalte en kunnen zeer grote gesteentebrokken transporteren. Voorbeelden hiervan zijn de modderstromen, en ook de vervloeiing van terrils of van een vliegastort, zoals ook in ons land te Jupille gebeurde in 1961. Bij uitspreidingen gebeurt de vervloeiing onder een cohesieve bovenlaag die daardoor in stukken getrokken en verspreid wordt. Bijvoorbeeld waterverzadigde kleien kunnen door een aardbeving vervloeien, 'liquefactie', en daarbij de meer cohesieve lagen die er bovenop afgezet zijn door rek in blokken opsplitsen en uitspreiden.

Gesteente en puin *avalanches* zijn complexe maar zeer catastrofale vormen van snelle massabewegingen onder invloed van de zwaartekracht. Typisch voor deze avalanches is dat na het afstorten van gesteente en puinmassa's deze niet aan de voet van de helling blijven liggen maar in tegendeel getransporteerd worden over afstanden van meerdere kilometers. Deze manier van massatransport is zeker niet ongewoon in bergstreken en meerdere catastrofes die er verband mee houden zijn bekend. In de Peruviaanse Andes, in het gebied van de Nevados Huascaran waarvan de toppen met sneeuw bedekt zijn, werden in 1962 3500 inwoners van Ranrahirca gedood wanneer hun dorp begraven werd onder een avalanche die op 5 minuten tijd een afstand van 14 km aflegde, en in 1970 ontstond in hetzelfde gebied

een nog grotere avalanche die een nog verder gelegen stadje bedolf en nog eens 18000 mensen doodde. Ook de zuidflank van het Mont Blanc Massief in de Alpen aan de Frans-Italiaanse grens is een bekend gebied van avalanche bergstortingen die afstanden van enkele kilometer afleggen. Verschillende dorpen zoals Courmayeur zijn er trouwens op een zeer grote prehistorische bergstorting gebouwd. Het is mogelijk de potentiële gevarengebieden af te lijnen gebaseerd op de bekende bergstortingen in het gebied en op de mogelijk volgbare trajecten door de avalanches.



Snelle hellingserosieprocessen onder invloed van de zwaartekracht: afstorting (rock fall), verglijding (slide), vervloeiing (slump), avalanche (debris flow) of turbidity current

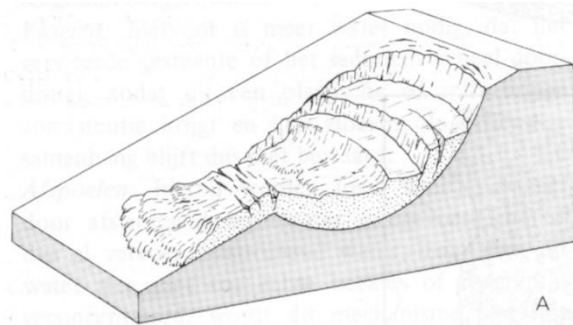
Verglijdingen in de Vlaamse heuvels

In Vlaanderen zijn de smectiet (= zwellende) kleien van Asse en Ieper bijzonder gevoelig voor verglijdingen, zoals slumps en vervloeiingen langs weginsnijdingen getuigen. Speciaal gevoelig voor verglijdingen zijn de steile hellingen in het gebied van de Vlaamse Ardennen in het zuiden van Oost Vlaanderen en aangrenzend Henegouwen. De typische lagenopbouw van die heuvels is een onderste kleisubstraat, de Ieper Klei, aan de voet van de heuvels, met daarbovenop fijne glauconiet- en kleihoudende zanden, een 20-tal meter dik met daarbovenop een nieuwe zware kleilaag van enkele meters dik en daarbovenop nog kleihoudende zanden, de Panisel Zanden. Het zijn de fijne kleihoudende zanden die bij waterverzadiging zeer weinig cohesief zijn en uitvloeien en wegglijden. Deze zanden worden waterverzadigd vooral na lange periodes van neerslag, ook door het van de helling afstromende water. Vaak hebben vroegere verglijdingen en hellingspuin in het algemeen deze waterrijke fijne zanden aan de oppervlakte afgedekt waardoor deze niet meer op een natuurlijke manier door bronnen ontwaterd

worden, wat uiteraard de poriënwaterspanning nog doet toenemen. deze resulteert uiteindelijk in een nieuwe verglijding. Deze hellingen zouden dus in enige mate kunnen gestabiliseerd worden door de bronnen vrij te houden, door de afwatering van de hellingen te controleren en eventueel door water uit de zanden nabij de heuvelrand op te pompen.

De verglijdingen zijn dus een bekend natuurlijk fenomeen in de Vlaamse Ardennen. De gevarenzones waar in historische tijden verglijdingen zijn opgetreden zijn eveneens bekend. Toch werden in deze zones recent nog bouwvergunningen afgeleverd, o.a. voor vakantiehuisjes, vooral aan de zuidkant van de taalgrens. Tijdens verschillende winters zijn also een aantal woningen aan de voet van een verglijding zwaar beschadigd. Ook opgehoogde grond met dezelfde samenstelling is sterk gevoelig voor verglijdingen. Getuige hiervan de quasi permanente problemen van de NMBS op de spoorweglijn Brussel – Gent.

Vandenbergh & Laga, 1991. De aarde als fundament. Een inleiding tot de geologie voor ingenieurs.



Aardverschuiving met twee treden en uitgevloide tong. De verschoven massa roteert enigszins zodat de bovenvlakken kantelen, waarbij bomen en huizen scheef komen te staan. Het zwaartepunt wordt schuin naar onder in de richting van de beweging verplaatst (Pannekoek, p. 206).

Kruip en solifluctie



Voorbeeld van hellingsevolutie door kruip, met scheefgroei en terug oprichten van bomen

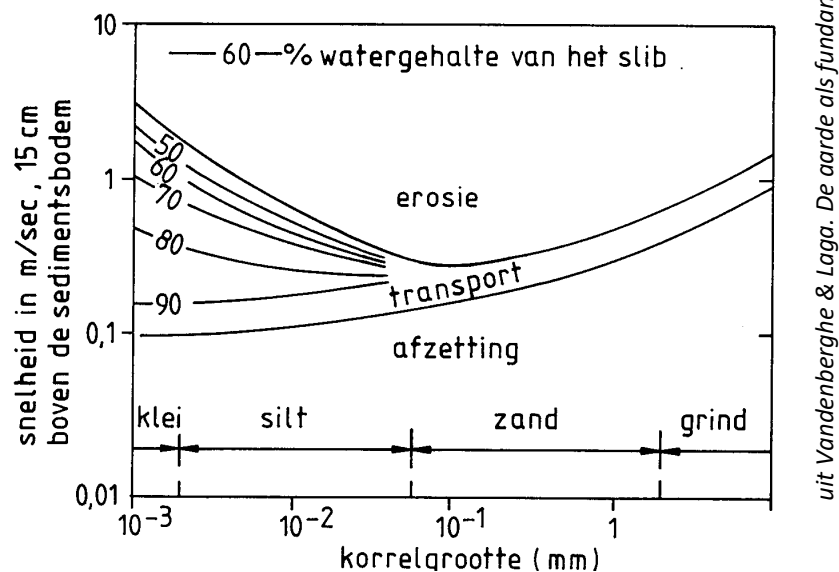
Naast deze snelle massabewegingen beweegt de bodem eigenlijk ook nog traag en continu. De realiteit van *bodemkruip* die hooguit enkele millimeter per jaar bedraagt kan gemakkelijk vastgesteld worden in ontsluitingen van de top van gesteenten op hellingen omdat die lagen in de top zeer dikwijls een ombuiging laten zien in de richting van de terreinhelling. Hellende terreinafsluitingen en de gekromde voet van boomstammen zijn andere klassieke symptomen van de bodemkruip. Kruip kan zelfs massieve,

compacte gesteenten aantasten. Getuige hiervan het doorbuigen van metalen balken en natuursteen-lintelen in historische gebouwen of ‘frame shortening’ in betonconstructies.

Solifluctie is een iets snellere bodembeweging vooral in gebieden met een sterke vorstactie, zoals in permafrost gebieden waar het toplaagje van de bodem in de zomer wel kan ontdooien maar niet de onderliggende ondergrond die permanent bevroren blijft. Het ontdooien van de top van een permafrost wordt soms al veroorzaakt door het verwijderen van het plantendek dat als een isolator functioneert. Het verwijderen van het plantendek, zoals dat normaal gebeurt bij de aanleg van wegen of spoorwegen zal het ontdooien van de toplaag veroorzaken, die evenwel niet kan gedraineerd worden omwille van de permafrost eronder, en die door de waterverzadiging zo zwak wordt dat de aangelegde wegen en spoorwegen danig gaan vervormen dat ze onbruikbaar worden.

De trage processen worden beïnvloed door het uitzetten en krimpen van de bodem door dooicycli, vochtcycli, temperatuurcycli die de bodem doen expanderen loodrecht op het terreinhellingsvlak maar nadien doen inkrimpen volgens een meer verticale neerwaartse beweging gedicteerd door de zwaartekracht. Ook de biologische activiteit in de bodem, de oplossing van mineralen in de bodem en het meesleureffect van een bovenliggende afglijdende sneeuwmantel spelen een rol.

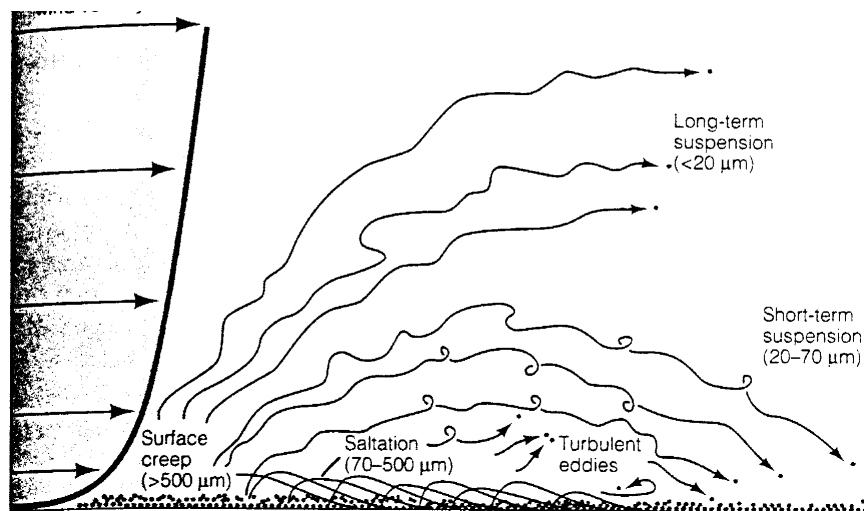
Erosie en transport



Het transporteren, eroderen en sedimenteren van sedimentpartikels wordt beschreven in de *Hjulström*-type curven die aangeven dat om fijnere korrels te eroderen van de bodem steeds minder snel stromend water vereist is tot korrels van zeer fijn zand en silt of klei moeten opgepikt worden van de bodem. Hiervoor is opnieuw meer energie vereist, onder de vorm van sneller stromend water, omdat nu niet enkel individuele korrels van de bodem moeten opgetild worden maar daarnaast ook de cohesie tussen de partikels op de bodem moet verbroken worden.

De curve die voor iedere korrelgrootte aangeeft beneden welke stroomsnelheid die korrels uit het water sedimenteren valt niet samen met de erosiecurve. Het snelheidsbereik tussen beide curven is het domein waarin korrels van een bepaalde grootte nog getransporteerd kunnen worden wanneer ze zich al in het stromend water bevonden maar niet meer geërodeerd kunnen worden van de bodem. Zeer fijne korrels kunnen blijkbaar bij zeer kleine stromingssnelheden nog getransporteerd worden. Dit is het zwevende **suspensiemateriaal**. Grovere zandkorrels worden in **saltatie** langs de bodem bewogen. Relaties tussen

windsnelheden en erosie, transport en afzetting zijn analoog aan die voor watertransport maar voor zelfde korreldiameters zijn hogere windsnelheden vereist.



Het verband tussen breedte en diepte van de rivier is wel afhankelijk van de korrelgrootte en de samenstelling van het materiaal waarin de bedding ligt. In los grofzandig materiaal past de breedte zich veel sneller aan dan de diepte, die min of meer gelijk blijft. In fijn kleihoudend zand wisselt de diepte meer. In klei wordt de diepte groot en blijft de breedte relatief klein. *Dit kan waargenomen worden in de natuurlijk meanderende Dijle: de leemoevers zijn hoog en steil. De Demer daarentegen is een echte zandrivier. Door bedijking hoogde de rivier zijn eigen bedding op eerder dan de omgevende vallei zodat overstromingen moeilijker te bedwingen zijn.*

Bodemerosie

Wat er nu, in vergelijking met toen, van overgebleven is – ook bij kleine eilanden is dat het geval – is dan ook niet veel meer dan het geraamte van een door ziekte uitgeput lichaam : al het vette en malse van de grond is van alle zijden afgevloeid, terwijl alleen het uitgemergelde lichaam van het land overbleef. Maar toendertijd, toen ze nog gaaf was, bezat onze streek hoge heuvels, die haar bergen waren; wat men nu de ‘Steenvlakte’ noemt, was toen een vlakte vol vette grond. Op de bergen was het hout rijkelijk voorhanden. Daarvan bestaan zelfs nu nog duidelijke sporen. Er zijn immers bergen die nu alleen maar wat voedsel voor de bijen opleveren, maar waarop men, nog niet heel lang geleden, bomen velde, bestemd om de balken te leveren voor de grootste bouwwerken – daken die nu nog gaaf gebleven zijn. Verder bracht de grond geweldig veel voedsel op voor het vee. Verder gedijde hij trouwens ook nog door het water dat jaarlijks uit de hemel viel, en dat niet verloren ging zoals nu, door van de onbegroeide aarde in zee te stromen. Nee, in grote hoeveelheid nam de grond water in zich op en behield het, door het in voorraad te houden in de beschuttende kleilaag. Zo kon hij het opgezogen water, dat van de hoogten afstroomde, in diepe hopen laten wegstromen, waardoor hij op alle plaatsen een mild-vloeiende voorraad water bezorgde aan bronnen en rivieren. Nu nog leveren de heilighdommen, die bewaard bleven op de plaats waar eertijds bronnen waren, het bewijs dat de verhalen van nu over het oude Attica waar zijn.

Plato (428-347 v.Chr.): *Critias*. Vertaling X. de Win (1999) in Schouten. De natuur als beeld. KNNV uitgaven, 2001: p. 84.

De regen die invalt op de bodem zal partikels losmaken door de impact van de vallende druppels en het afstromende water zal een gedeelte van de fijnste partikels meevoeren en eventueel onderweg nieuwe partikels oppikken waardoor weer andere partikels ondergraven en verplaatst worden. Dit water zal zich bij het afstromen organiseren in kleine richels en stroompjes en uiteindelijk kleine beekjes vormen die de prille vertakkingen zijn van een rivierstelsel. Het tempo waartegen deze erosie gebeurt kan gemeten worden in het veld, maar een globaal beeld van een gebied krijgt men door de sedimentafvoer te meten in de rivieren die het gebied draineren. Uiteraard moet bij het meten van het erosiebalans ook rekening gehouden worden met de winderosie. Zowel winderosie als watererosie zullen het meest effectief gebeuren wanneer geen plantendek het landschap afdekt. Daarom vormen duinen zich zo gemakkelijk langs de kust door het opwaaien van de onbegroeide strandzanden. Daarom ook worden duinen gevormd, landinwaarts langs brede droogliggende beddingen van verwilderde rivieren en uiteraard ook in woestijngebieden. Uitwaaiende woestijnvlaktes worden zo tot steenwoestijnen omgevormd. Plantbedekking is essentieel voor bodemstabiliteit en daarom heeft ontbossing als neveneffect een versnelde erosie. Doorgedreven erosie op een landschap kan uiteindelijk leiden naar een diep versneden badland landschap dat enkel nog bestaat uit naast elkaar gerangschikte V-vormige insnijdingen. De toename van het badland areaal wereldwijd wordt geraamd op 100.000 hectare per jaar. Ook de bodemdegradatie door de erosie neemt sterk toe door de manier waarop de moderne landbouw gebeurt. Per jaar gaat zo een 24 miljard ton bodem verloren wat leidt naar een productieverlies dat overeenkomt met 9 miljoen ton graan. Bodemdegradatie is precies zo een ernstig fenomeen omdat de degradatie momenteel veel sneller gaat dan de natuurlijke aangroeimogelijkheid van bodems. Het verspoelde bodemsediment zal trouwens stroomafwaarts bijdragen tot een versnelde sedimentatie en aanslibbing in de rivierbedding.

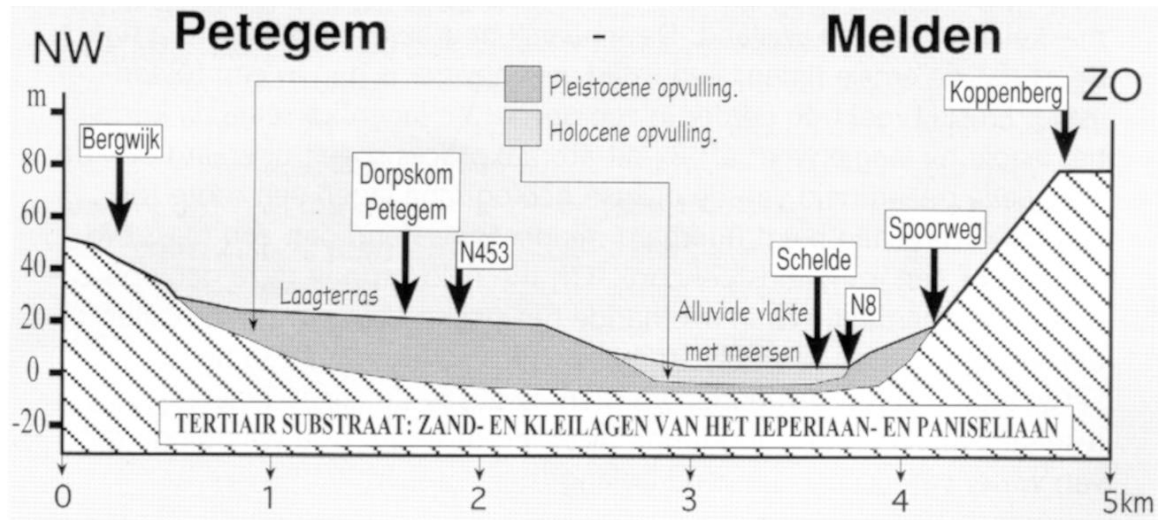


Asymmetrische dalen in Midden België

De vorm van de vallei is meestal asymmetrisch. Een aanvankelijke convexe glooiing verandert in een steile met een concave tot platte basis. Er is ook een verschil tussen de noordwestelijke en de zuidoostelijke helling. Deze laatste is veel steiler. Het leemdek is er volledig weggespoeld en het zandig substraat treedt aan de dag. Op sommige plaatsen lijkt de dalwand artificieel en getuigt van vroegere zandwinning.

De asymmetrie der dalhellingen is een algemeen verschijnsel: gemiddeld genomen zijn de noordelijke of oostelijke hellingen steiler dan de westelijke of zuidelijke hellingen. Er bestaan veel convergente theorieën over het ontstaan van deze asymmetrie. De eenvoudigste is dat er een grotere hoeveelheid loess, tijdens de ijstijden vanuit het noorden aangevoerd, accumuleert in de lichte van de westelijke of zuidelijke dalhelling. Samen met de loess werd ook sneeuw op de westelijke en zuidelijke helling geaccumuleerd, terwijl de oostelijke of noordelijke helling door de strakke westenwinden en de intensere zonbestraling ontbloot werd. Zo kregen wind en regen hier vrij spel. Onder het dikke loess en sneeuw pakket daarentegen bleef de grond verzadigd met water zodat deze progressief naar beneden kon verglijden (= solifluctie). De afglijdende grondmassa stuwt bovendien het beekje naar de noord- of oosthelling, waardoor deze ondermijnd werd en steeds steiler werd. Alhoewel dit verschijnsel vooral

optrad in koude vochtige periodes op het einde van de laatste ijstijd, kan het onder de huidige klimaatsomstandigheden gemakkelijk behouden blijven.



Dwarsprofiel in de Scheldevallei (Diriken: Geogids Vlaamse Ardennen deel 1. Het landschap, p. 18).

Er is ook een alternatieve verklaring, die zich eveneens tijdens de ijstijd heeft afgespeeld maar geheel anders heeft ingewerkt op het geologisch substraat, het proces van de **congelifluctie**.

Door de relatief lange en zeer koude winter gaat de ondergrond tot op een grote diepte bevroren, zodat het water, veelal het gevolg van sneeuwmelt, niet in de ondergrond kan doordringen. Tijdens de vrij korte zomerperiode ontdooit de bovenlaag en ontstaat er een sterk met water verzadigde laag, mollisol (paplaag) genoemd. Deze kan zeer gemakkelijk wegglijden naar een lager punt; zelfs op zwakke hellingen. Dit proces van hellingserosie noemt men congelifluctie.

Dit principe van congelifluctie is echter niet gelijk op alle hellingen en zo ontstaat de asymmetrie. Hoe groter de congelifluctie (hoe meer hellingserosie) hoe zwakker de helling.

De SW helling (naar het NE gericht) krijgt minder zon dan de NE helling (naar het SW gericht). Hoe minder zon, hoe minder de helling opwarmt, hoe langer de koude periode duurt. Het is zelfs mogelijk dat de ondergrond permanent bevroren blijft en dan noemt men dit een permafrost. Deze met ijs gevulde laag gaat dan functioneren als een ideaal glijvlak voor de mollisol waardoor de congelifluctie zeer belangrijk wordt. Daarom is deze (koude) helling zwak.

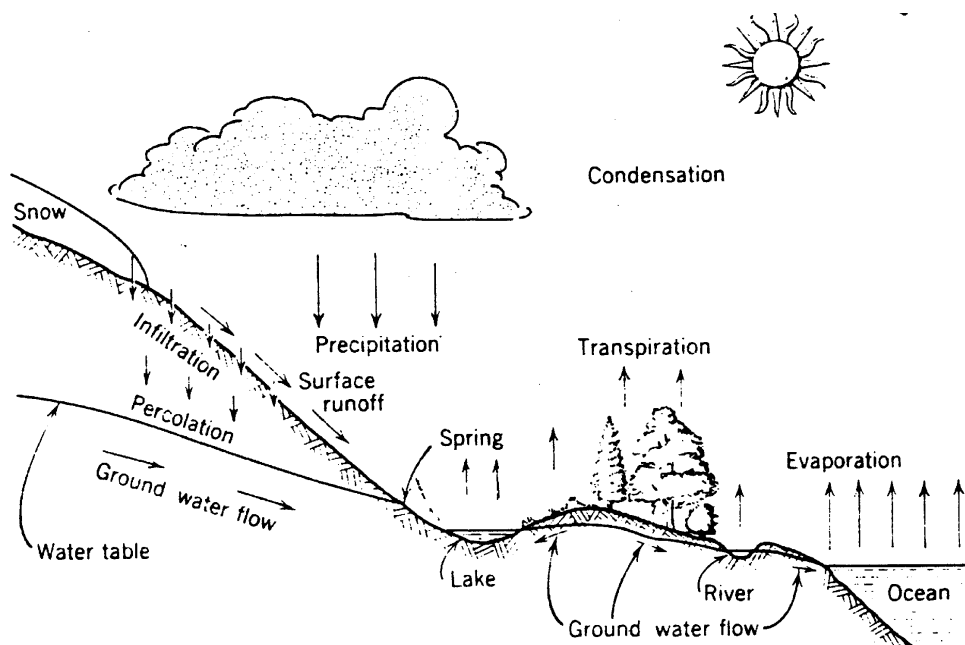
De NE helling, door de zon beschenen, krijgt dus hogere temperaturen waardoor de ondergrond sneller ontdooit, het dooi- en/of smeltwater vlugger in de ondergrond kan dringen, en het systeem van congelifluctie stopt. Omdat de congelifluctie hier zeer beperkt blijft zal de helling (relatief) steil blijven *(met dank aan Jos Janssen)*.

WATER IN DE ONDERGROND

De watercyclus

Water is een van de meer algemene mineralen van de aardoppervlakte. Twee unieke fysische eigenschappen maken dit mineraal belangwekkend: het voorkomen onder de vorm van verschillende fasen (vast-vloeibaar-gasvormig) bij temperaturen die normaal zijn voor de aardoppervlakte, en de hogere densiteit van de vloeibare boven de vaste fase zodat ijs drijft op water hetgeen voorkomt dat alle oceanen zouden veranderen in massieve ijsklompen onder een dunne waterlaag. De watercyclus wordt gestuurd door zonne-energie, goed voor de fase-overgang van vloeibaar naar gasvormig, en door zwaartekracht, waardoor alle water terug in zee belandt. De biosfeer is voor zijn voortbestaan van dit water afhankelijk, maar reageert interactief op de watercyclus: bijkomende lokale watercycli ontstaan, de uiteindelijke afvloeï naar zee en de overgang van zoet naar zout wordt vertraagd, maar de verdamping in zee wordt dan weer bevorderd en zo de nieuwe bevoorrading van het land verzekerd.

Ruim 97% van alle water in de hydrologische cyclus komt voor in de zeeën en oceanen. Het water dat uit zeeën en oceanen verdampt valt voor het grootste gedeelte terug uit als neerslag in de zeeën en oceanen. Slechts een klein deel van dat verdampte water schuift als wolken over het land en valt daar als regen of sneeuw uit, de bron van alle zoetwater op aarde. De neerslag in België is zo voornamelijk afkomstig uit de Atlantische Oceaan. Opnieuw keert een groot gedeelte daarvan terug door rechtstreekse verdamping, de evaporatie, of door de waterafgifte door planten, de transpiratie. Evapotranspiratie recycleert zo 'n 70% van de totale neerslag, waarbij de evaporatie in ons klimaat hooguit 10% voor zijn rekening neemt, en het resterende deel eerst in de bodem geborgen wordt en vervolgens door de biosfeer passeert. Transpiratie door planten vormt dan ook de belangrijkste bron voor de zomerse luchtvochtigheid: 1 ha maïs verdampt ca. 40 m³ water per dag, een volwassen eik verdampt 150 m³ water per jaar, via de wortels onttrokken uit het bodemvocht.



Het andere gedeelte van de neerslag stroomt af van het land naar de rivieren, rechtstreeks, als afvloeiing of 'runoff' water of onrechtstreeks via een traject in de ondergrond. Het water dat in de bodem infiltreert zal inderdaad voor een gedeelte terug gebruikt worden als voeding van de rivieren en een beperkt gedeelte zal de grondwaterreserve aanvullen. Buiten het groeiseizoen valt de transpiratie vrijwel stil. De winter is dan ook de periode dat het infiltrerend water de grondwaterreserves op peil

kan brengen. De infiltratiecapaciteit van de bodem moet daarom onderhouden worden. Al te zeer treedt verstoring in negatieve zin op door menselijke ingrepen. De natuur zorgt zelf voor een optimale infiltratie: dicht begroeide humusrijke bodems bezitten een infiltratiecapaciteit die vele malen hoger ligt dan onbegroeide bodem. Daarenboven beschermt de vegetatie de grond tegen erosie, door afvoer van bodempartikels te samen met de runoff. De runoff is in feite het overtollige water dat het land of de lokale biosfeer niet kan gebruiken en dat zodoende ter beschikking van andere gebruikers of andere gebieden komt. Kleine verschillen in neerslag kunnen grote verschillen in runoff geven, eenmaal dat de maximale infiltratiecapaciteit van de bodem en opname door de planten bereikt is. Vandaar dat het debiet van de waterlopen veel meer extreme standen kent dan de neerslagverdeling, die vrijwel gelijkmatig over het gehele jaar verdeeld is.

Porositeit en doorlatendheid

Het water wordt in de ondergrond opgeslagen ofwel in de poriënruimte, dat is de *primaire of de intergranulaire porositeit*, ofwel in de openstaande discontinuïteitsvlakken zoals druksplijtingen, diaklazen en laagvlakken, dat is de *secundaire of spleetporositeit*. Deze vlakken openen zich ten gevolge van de drukontlasting door de erosie van bovenliggende lagen bij de landschapsvorming. Daaruit volgt dat deze porositeit en de daarmee gepaard gaande doorlatendheid met de diepte zal verdwijnen. Bij de proeven die werden uitgevoerd voor de bouw van stuwdammen op een grotendeels uit schievers en psammieten bestaande ondergrond in de Fagne in ons land kan afgeleid worden dat de injectiecapaciteit van deze gesteenten, met een spleetporositeit, snel afneemt met de diepte en na een twintigtal meter praktisch reeds verdwenen is. In een gesteentemassa zal de spleetporositeit doorgaans een kleinere waarde hebben dan een intergranulaire porositeit in een zand of een zandsteen bijvoorbeeld.

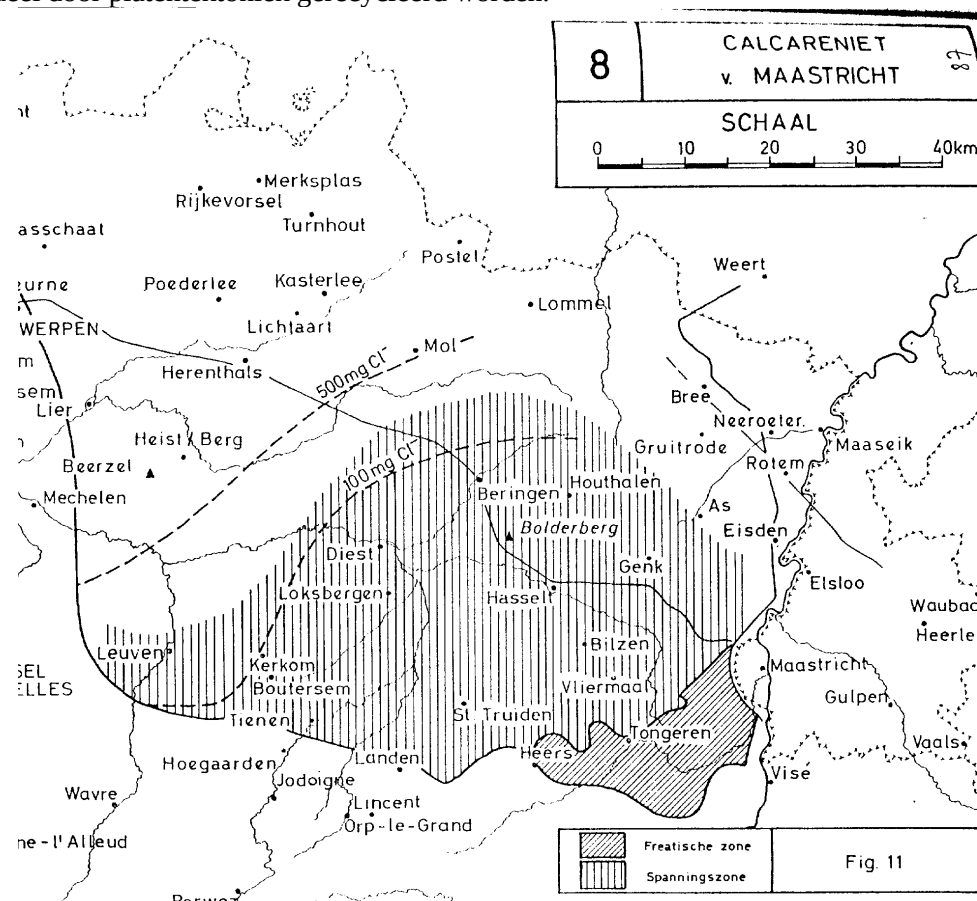
De *doorlatendheid* echter, die aangeeft hoe gemakkelijk het water, gebruik makend van de effectieve porositeit, door het gesteente kan stromen zal via een spleetporositeit wel merkkelijk groter zijn dan bij een primaire of intergranulaire porositeit. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de effectieve en totale poriënruimte omdat er poriën zijn die niet met elkaar in verbinding staan en daardoor geen bijdrage leveren tot de doorlatendheid. Bijvoorbeeld de poriën intern in microfossielen, zoals in krijt, zijn grotendeels niet effectief. In kalkgesteenten zullen de oplossingsruimten voornamelijk ontstaan langs discontinuïteitsvlakken waarlangs het grondwater het gesteentemassief binnendringt en daarom zullen de oplossingsruimten grotendeels behoren tot de effectieve porositeit maar wanneer de oplossingsholten zich erg onregelmatig verder uitwerken in het gesteente dan kan een gedeelte ervan cul-de-sac porositeit leveren die van geen betekenis meer is voor de doorlatendheid van het kalksteenmassief. Spleetporositeit zal voornamelijk ontwikkeld zijn in competente gesteenten zoals zandstenen, kalkstenen, metamorfe gesteenten en ook bij stollingsgesteenten zijn spleten de voornaamste bron van porositeit en doorlatendheid. Ook bij het fijnkorrelige zachte krijt in Haspengouw en Henegouwen is er een effectieve porositeit en doorlatendheid van het gesteente, te danken aan de aanwezigheid van spleten. Het zijn er goede aquifers, tot op een vijftig meter diepte. Het is ook mogelijk zoals bij zandstenen bijvoorbeeld dat er zowel een primaire als een spleetporositeit in het gesteente aanwezig is.

In de ondergrond zijn dus watervoerende lagen aanwezig maar ook lagen die niet of nauwelijks doorlatend zijn voor water. Typisch voorbeeld van een niet tot weinig doorlatende sedimentlaag is een kleilaag. Alhoewel kleien waterhoudend zijn heeft het een uiterst kleine doorlatendheid omdat een aanzienlijke hoeveelheid water gebonden is aan het mineraalrooster en daardoor niet meevloeit en anderzijds omdat de poriën in een kleiafzetting zo klein zijn dat capillaire krachten het water in die poriën houden en het verhinderen van door het sediment te bewegen. Anderzijds moet benadrukt

worden dat doorlatendheid slaat op een volume water dat door een bepaald volume gesteente getransporteerd wordt in een bepaalde tijd. Tijd speelt dus een rol en kleien die als ondoorlatend kunnen beschouwd worden op korte termijn zullen over lange tijd bekeken wel doorlatend zijn.

De grondwaterkwaliteit

Watervoerende lagen zullen met toenemende diepte steeds meer opgeloste zouten in het poriënwater hebben omdat de gesteenten met het water reageren, wat door de toenemende temperatuur in de hand gewerkt wordt evenals door de steeds langere reactietijd die beschikbaar was. Natuurlijk oppervlaktewater en regen bezitten bijvoorbeeld een pH van 5.2-5.4 (pH<5 bij zure regen). Grondwater zal door buffering met bodemmateriaal naar een pH van 7.5 neigen. Tezelfdertijd neemt het water minerale zouten op. Grondwater (bronwater of putwater) gaat een 'pittiger' smaak krijgen dan het fletse regenwater. Wanneer het totaal gehalte aan opgeloste bestanddelen echter 0.5 gram per liter overschrijdt wordt het reeds als ondrinkbaar geklasseerd en komt niet meer in aanmerking voor drinkwaterproductie. Door oplossing van de gesteenten waardoorheen het grondwater percoleert of door uitloging van de bodem wordt ca. 35 m³ materiaal per km² en per jaar uit bodem en ondergrond onder de vorm van opgeloste zouten verwijderd (dit is evenveel als de hoeveelheid slib, zand en gruis dat door rivieren afgevoerd wordt). Deze zouten komen uiteindelijk in zee terecht, waar zij tot het zoutgehalte bijdragen en eventueel door platentektoniek gerecycleerd worden.



Het watertype zal verschillen naar gelang het gesteentetype waarmee het reageerde. Zand en klei gesteenten zullen NaCl type waters opleveren, kalkgesteenten zullen daarentegen dikwijls Ca en bicarbonaat waters opleveren. Met toenemende diepte, en langere verblijftijd van het water ondergronds, verhoogt het gehalte opgeloste stoffen en neemt met name het zoutgehalte fors toe. Het water dat te Turnhout ruim 2000 m diep voorkomt bevat 135 g NaCl per liter grondwater. Het water afkomstig uit

de Krijtlagen op 800 m diepte en dat lange tijd voor het zwembad te Turnhout werd gebruikt bevat al meer dan 10 g NaCl. Uit dezelfde watervoerende Krijtlagen wordt meer naar het zuidoosten, waar die lagen dichter tegen de oppervlakte komen, water van drinkwaterkwaliteit gewonnen wat betekent dat het zoutgehalte er geringer is dan een halve gram per liter. Het zoutgehalte van grondwater ligt aan de basis van de mislukking van veel irrigatieprojecten doordat het zout bij de verdamping van het water achterblijft en een korst vormt op de landbouwgrond die precies via de irrigatie kon ontwikkeld worden.

Hoeveel water?

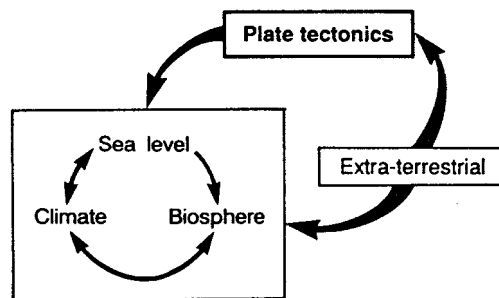
Water wordt van oudsher ervaren als een van de oerelementen naast aarde, lucht en vuur. Het recht op goed water is een van de fundamentele rechten van de mens. Maar de werkelijk beschikbare hoeveelheid water, die een duurzame ontwikkeling toelaat, is moeilijk te becijferen. De waterkringloop is immers een complex, in tijd en ruimte gespreid proces. Denk maar aan de grote verschillen in debiet van de rivieren of de vele honderden jaren die kunnen verlopen tussen infiltratie in de bodem en uitstroming in een waterput, soms tientallen kilometers verderop. Het effect in tijd en ruimte van een specifieke ingreep is daarom ook moeilijk te berekenen. Voor veel mensen is water juist water. Zij beseffen niet wat voor impact menselijk gebruik heeft op de kwaliteit van de resterende reserves, en op de biosfeer die ook van dat water afhankelijk is. De zoetwaterreserves zouden daarom niet alleen op technische wijze verdeeld moeten worden in oppervlaktewater of grondwater. Het gaat erom wat voor water ter onzer beschikking staat: water gratis voor niets, water voor een prikje, of water als het witte goud. Het klaterheldere water, zo maar uit bronnen en beken te scheppen, bestaat helaas niet meer: dat is allemaal opgebruikt of verknoeid. Het pure, goedkope grondwater is er nog steeds, maar in voortdurend afnemende hoeveelheden: overbemaling en vervuiling eisen hun tol. Anderzijds is er nog een quasi onbeperkte hoeveelheid water, maar gebruik ervan heeft zijn prijs: zuivering van afvalwater, stopzetting van overmatige bemesting, herstel van natuurlijke rivierwerking, enz.

Water wordt in onze cultuur nog te veel als iets vanzelfsprekends beschouwd, wat met bakken uit de lucht komt vallen en vrij beschikbaar is. Watergebruik of misbruik is in onze cultuur niet gebonden aan ethische belemmeringen: wat wij nodig hebben nemen wij maar. Het water ondergaat echter een complexe kringloop die in duidelijke interactie staat met de biosfeer. Het is landschapsvormend en levenbrengend, essentieel voor het voortbestaan van de natuur en voor de esthetische verscheidenheid van het landschap. Wat meer respect voor moeder natuur zou zeker bijdragen tot een kwantitatieve en kwalitatieve verbetering van onze belangrijkste grondstof.

ORDENEN VAN GESTEENTELAGEN IN RUIMTE EN TIJD: DE STRATIGRAFIE

Het belang van de stratigrafische ordening

Stratigrafie is de interpretatie van de gesteenteopenvolging als opeenvolgende gebeurtenissen in de geschiedenis van de aarde. Iedere onderscheiden gesteentelaag of stratigrafische eenheid bevat een reeks sleutels tot het ontrafelen van het milieu waarin het gesteente ontstaan is en de gebeurtenissen die het nadien ondergaan heeft. Door al deze sleutels in elkaar te puzzelen kan de evolutie van de aarde door de tijd gevolgd worden.



Het uitzicht van de aarde wordt bepaald door vier variabelen: plaattektoniek, klimaat, zeespiegel en biosfeer. Plaattektoniek lijkt de voornaamste factor voor het bewaren van gesteenten door de controle van bezinkingsbekkens waarin sedimenten kunnen accumuleren. Plaattektoniek controleert ook de vorming en verdeling van stollingsgesteenten en metamorfe gesteenten in de diepte en de vervorming van alle gesteenten. Klimaat, zeespiegel en biosfeer controleren in onderlinge beïnvloeding het afzettingsmilieu van de sedimentgesteenten. Extra-terrestrische invloeden, zoals meteoriet inslagen, kunnen als een plots optredende crisis of catastrofe een nieuwe wending geven aan de interacties tussen de variabelen (uit: Doyle, Bennett & Baxter - The key to earth history. An introduction to stratigraphy.).

De eerste betrachting van de geologie is een ordening of regelmaat te vinden in het voorkomen van verschillende gesteenten die in een gebied ontsluiten of in boringen en uitgravingen worden aangetroffen. De geometrische ordening van de gesteenten is een noodzaak om met succes extrapolaties te kunnen maken naar die plaatsen waar er geen directe observatie van de onderliggende gesteenten mogelijk is. Hoe beter deze geometrische ordening beheerst wordt hoe minder directe observaties er bijvoorbeeld op een bouwsite moeten bijgemaakt worden onder de vorm van boringen of sleuven, wat dan een implicatie heeft op de kosten van het project. Een goed inzicht in de lokale gesteenteopenvolging is ook vereist om ontginning van grondstoffen op doelmatige wijze uit te voeren, en om uitbreidingszones voor toekomstige productie te beperken tot plaatsen waar de delfstof onder optimale omstandigheden kan gewonnen worden (volgens criteria van kwaliteit, dikte, diepte, samenstelling en uitbreiding van de afzetting).

Gelijkvormigheid en actualisme

Gelijkvormigheid of **actualisme** is een van de geologische basisprincipes. Het begrip kan samengeballd worden in de zegswijze 'Het heden is de sleutel tot het verleden'- 'The present is the key to the past'. Met betrekking tot de stratigrafie betekent dit dat actuele geologische processen ook in het verleden voorgekomen zijn; observatie van recente fenomenen helpt aldus de geschiedenis van de aarde te begrijpen en te verklaren. James Hutton beschreef in 1785 als eerste dit principe en realiseerde daarmee

onmiddellijk dat de toen algemeen aanvaarde 'bijbelse' ouderdom van de aarde (4004 v.C.) een schromelijke onderschatting was van de werkelijke ouderdom. Het gelijkvormigheidsprincipe werd in 1830 door Lyell uitgebreid met het **gradualisme** of de geleidelijkheid als wezenlijk kenmerk van de aardse evolutie.

Georges Cuvier (1796) daarentegen zag in de aardgeschiedenis eerder een opeenvolging van **catastrofen** die aanleiding gaven tot gans verschillende fossielen in opeenvolgende tijdperken. De bijbelse zondvloed werd nogal eens aanzien als de jongste van die catastrofes, doch de meeste geologen voelden niet veel voor een bovennatuurlijk ingrijpen.

Uiteindelijk groeide het inzicht dat de opbouw van gesteenten niet alleen te wijten is aan langzame, geleidelijke processen, maar dat catastrofale gebeurtenissen mee het uitzicht van de aarde bepalen. Grote catastrofes, zoals zware aardbevingen of meteorietinslagen, kunnen op ingrijpende wijze het uitzicht van de aarde beïnvloeden en laten met grote waarschijnlijkheid sporen na in de opbouw van de gesteenten. Anderzijds is de grootte van de catastrofes en hun impact op de aarde of biosfeer omgekeerd evenredig met de frequentie waarmee deze plaatsgrijpen. In een geologische tijdsschaal die rekent in miljoenen jaren moet men hiermee dus meer rekening houden dan in de menselijk tijdsschaal waar de levensduur van de mens als voornaamste maatstaf geldt.

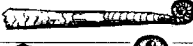
Geologische tijdschalen

Een geologische tijdsschaal geeft een overzicht van de geschiedenis van de aarde, vanaf haar ontstaan zeker 4,5 miljard jaar geleden. Gesteenten van de aardkorst en fossielen getuigen van een deel van deze geschiedenis. De mens heeft om het verloop van de tijd van elke dag voor te stellen toestellen uitgedacht: zonnewijzers, zandlopers, uurwerken. Het verloop van de veel langere geologische tijd kan ook op verschillende wijzen uitgedrukt worden. De twee meest gebruikte tijdschalen zijn de relatieve en de absolute.

De absolute tijdsschaal: hoeveel jaren?

De ouderdom is aangegeven in jaren, meestal in miljoen jaren, waarbij het heden het jaar 0 is. De ouderdom van sommige gesteenten wordt bepaald uitgaande van de **desintegratie** van hun **radioactieve** elementen. Deze elementen, isotopen in onstabiele toestand, veranderen in een gekende tijd in andere elementen die stabiel zijn en gekend zijn als hun dochterelementen. De bestaande verhouding tussen de hoeveelheid dochterelementen en die van de overblijvende oorspronkelijke radioactieve elementen laat toe de ouderdom van het gesteente te berekenen. Zo is bijvoorbeeld de desintegratie van de elementen uranium (U) en lood (Pb) traag. Ze laat toe afzettingen te dateren die ouder zijn dan 20 miljoen jaar; daarentegen is de desintegratie van koolstof 14 (^{14}C) snel en ze laat toe archeologische afzettingen van minder dan 70.000 jaar te dateren. De graad van precisie van dit radioactief uurwerk schommelt tussen 1 en 10%; als gevolg hiervan zijn verschillen van enkele miljoenen jaren aanvaardbaar voor dateringen van de oudste gesteenten.

De absolute tijdsschaal op basis van ouderdomsdateringen wordt **chronostratigrafie** genoemd. De meer gebruikte bio- en lithostratigrafische schalen worden door die dateringen geijkt. Grenzen van chronostratigrafische eenheden zijn isochroon. De chronostratigrafische schaal is de wereldwijde standaard waarmee lokale sequenties vergeleken worden.

EON	ERA	PERIODE	TIJDVAK	Enheden van Belgische oorsprong	BELANGRIJKE STAPPEN IN DE EVOLUTIE			Miljoen jaar
FANEROZOÏCUM	KENOZOÏCUM	KWARTAIR	HOLOCEN					0,01
			PLEISTOCEN				1,6	
		NEOGEEN	PLIOCEEN					5
			MIOCEEN					23
		PALEOGEEN	OLIGOCEEN	Rupeliaan				37
			EOCEEN	Ieperiaan				53
			PALEOCEEN					65
	MESOZOÏCUM "Secundair"	KRIJGT						135
		JURA						205
		TRIAS						250
	PALEOZOÏCUM "Primaair"	PERM						290
		CARBOON		Namuriaan Viséaan Tournaisiaan Famenniaan Frasniaan				355
		DEVOON						410
		SILUUR						438
		ORDOVICIUM						510
		CAMBRIUM						570
	PROTEROZOÏCUM	"PRECAMBRIUM"						2500
	ARCHEÏCUM							4000
OORSPRONG VAN DE AARDE								4500

naar: Godfroid & Dhondt (KBIN) - Korte geschiedenis van de aarde en het leven (m.j. = miljoen jaar)

De relatieve tijdschaal: ouder of jonger?

Deze tijdschaal steunt op de natuurlijke opeenvolging van gesteenten en fossielen. Als gevolg hiervan ligt de oudste afzetting onderaan en de jongste het dichtst bij de oppervlakte (**principe van de superpositie**). De **fossielen**, overblijfselen van dieren en planten die in vervlogen tijden geleefd hebben, maken het mogelijk de gesteenten die ze bevatten te karakteriseren en geologische lagen in soms ver van elkaar verwijderde gebieden te correleren.

In de **stratigrafische schaal** stelt iedere indeling een tijdsinterval voor tijdens hetwelk een hoeveelheid sediment werd afgezet (een **sediment** ontstaat door de ontbinding van vooraf bestaande gesteenten en/of door de accumulatie van overblijfselen of brokstukken van organismen; door verharding ontstaat een afzettingsgesteente zoals bijvoorbeeld een zandsteen, een schiefer, een kalksteen). Sommige namen duiden de ontwikkeling van het leven in een bepaald interval aan (Paleozoïcum = oudste fossiele organismen). Andere namen zijn afgeleid van een gesteentesoort dat typisch is voor die periode (bijvoorbeeld Krijt). Het merendeel der namen die op -iaan eindigen zijn afgeleid van namen van streken of localiteiten waarvan de opeenvolging van gesteenten en fossielen in een specifiek tijdsinterval goed gekend is, en die als model gebruikt worden overal ter wereld. Sommige van deze internationaal gebruikte namen hebben een Belgische oorsprong: Frasniaan, Famenniaan, Tournaisiaan, Viséaan, Namuriaan, Ieperiaan, Rupeliaan.

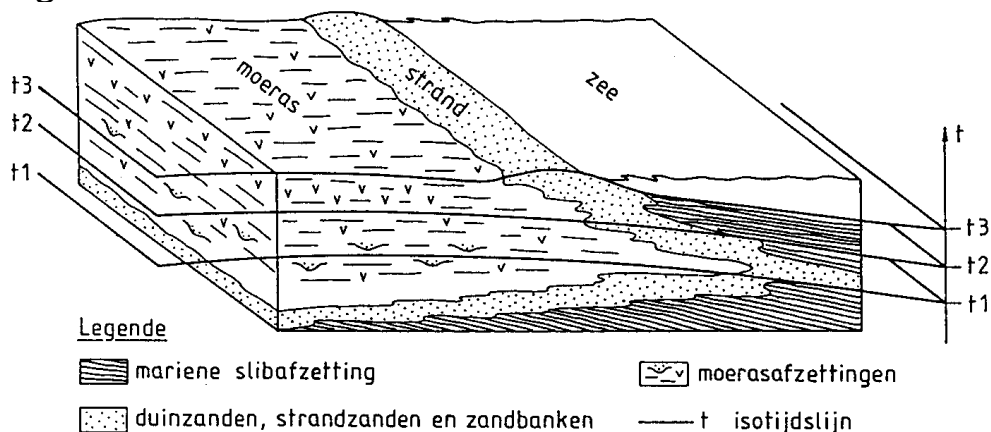
Lithostratigrafie

Omdat bij bouwsites slechts een relatief beperkt volume van gesteenten van belang is zal de stratigrafische ordening van de lagen zich bijna altijd kunnen beperken tot een rangschikking op basis van de op het terrein waarneembare gesteentekennmerken zoals de samenstelling (zand, klei, kalksteen...), ook wel lithologie genoemd, de dikte van de banken, hun kleur, aanwezigheid van fossielen, en dergelijke. Dit geheel van kenmerken noemen wij lithostratigrafische kenmerken, en de stratigrafische schaal die ermee wordt opgebouwd wordt daarom lithostratigrafie genoemd. Het tijdstip van ontstaan wordt niet als argument voor de lithostratigrafische rangschikking gebruikt. Een lithostratigrafische eenheid wordt steeds aangeduid aan de hand van een geografische type locatie die als referentie dient voor die bepaalde eenheid, eventueel gepreciseerd door de kenmerkende lithologie (bijv. Klei van Ieper, Zandsteen van Gobertange). Al naargelang het belang en de dikte van de eenheid onderscheidt men een groep, formatie, lid of laag (van honderden meters tot meterschaal).

Biostratigrafie

Om een idee te krijgen van de ouderdom van de gesteenten is het noodzakelijk hun fossielinhoud te bestuderen. Levende wezens, waarvan de resten als fossielen (micro- of macrofossielen) in de gesteenten terug te vinden zijn, evolueren in de tijd op een onomkeerbare wijze, waardoor iedere fossielvorm als een indicatie voor de ouderdom van de gesteenten kan gebruikt worden. Associaties van fossielen die opeenvolgend in de tijd ontstaan karakteriseren **biozones**. Bij het interpreteren van de fossielinhoud van een gesteente moet men evenwel veranderingen die te wijten zijn aan een veranderende ecologie in het verleden, zoals bijvoorbeeld een uitdrogend meer, kunnen onderscheiden van fossielvariaties die te wijten zijn aan een biologische evolutie in de tijd. De biostratigrafische zonering geeft op zichzelf geen absolute ouderdom, maar is eigenlijk een relatieve stratigrafische schaal die omwille van fossielen die overal ter wereld teruggevonden kunnen worden, een wereldwijde relatieve tijdsschaal voorstelt, in tegenstelling tot lithostratigrafische eenheden die gebonden zijn aan meer lokale afzettingssomstandigheden.

Paleogeografie

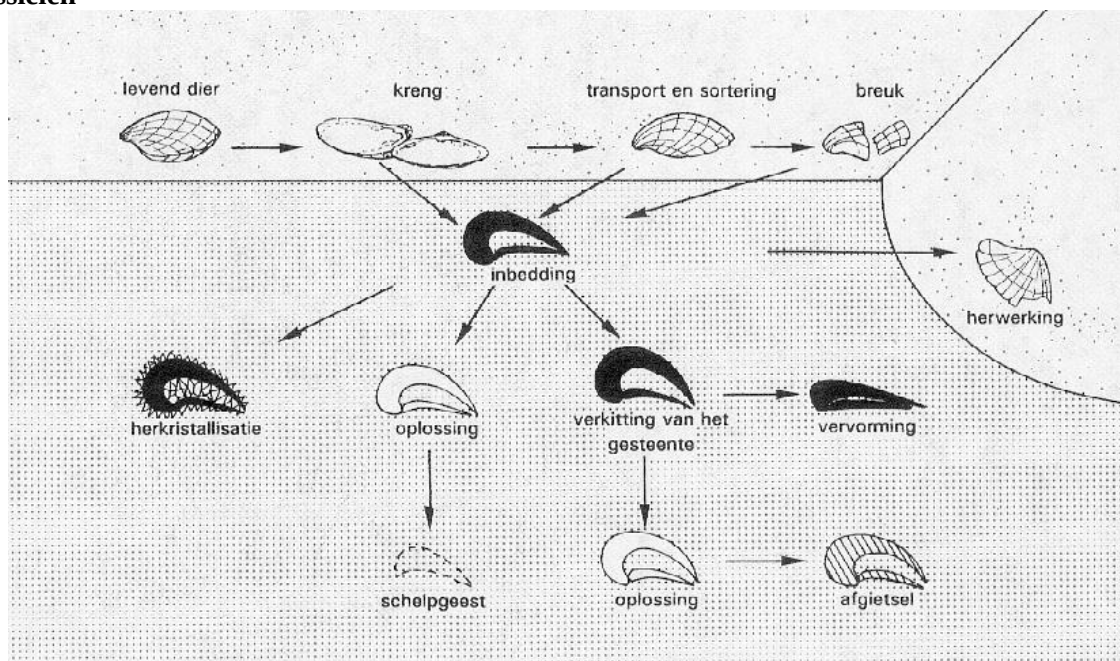


Het lateraal verschuiven van lithologische eenheden doorheen de tijd (van t1 naar t3). Als voorbeeld geldt een strandzand dat over een beperkte strook voorkomt, die geleidelijk mee opschuift wanneer de zee steeds verder het land overspoelt omdat de zeespiegel stijgt of het land langzaam daalt. Dit verschijnsel wordt **diachronisme** genoemd. Het zand dat op een strand wordt afgezet zal als één lithostratigrafische eenheid opgenomen worden in de stratigrafische schaal omdat het overal dezelfde lithologische eigenschappen vertoont maar de ouderdom ervan zal geleidelijk jonger worden in de transgressierichting van de zee.

Veel delfstoffen (steenkool, marmer, goud, grint...) zijn gebonden aan specifieke afzettingssomstandigheden. Net zoals dat aan het huidige aardoppervlak het geval is waren er in vroegere tijden landschappen en zeeën waar verschillende afzettingstypes samen naast elkaar bestonden, bijvoorbeeld duinzanden naast strandzanden, moerassen, diepere zeeleien, rivierafzettingen en zo verder. Bij de exploratie van delfstoffen wil men aan de hand van doorgaans beperkte informatie over de ondergrond gunstige afzettingstypes lokaliseren. Om een betrouwbare geografische reconstructie in een welbepaalde tijdseenheid te kunnen maken is nauwkeurige tijdsinformatie uiteraard van wezenlijk belang. De meeste afzettingen zijn op grotere schaal min of meer diachroon (op de schaal van een bouwput speelt dit natuurlijk geen rol). uit: *Vandenberghe & Laga - De aarde als fundament*.

Tijd en Evolutie

Fossielen



Fossielen zijn overblijfselen van planten en dieren die vroeger geleefd hebben. Soms worden ze als *versteningen* aangeduid, maar het ontstaan van fossielen kan volgens verschillende processen verlopen. De meeste fossielen zijn resten van dieren of planten die vroeger in de zee leefden en die beschikten over harde schalen en skeletten of weerstandbiedende weefsels. Zeldzaam zijn fossielen van wezens die op het land in een droge omgeving leefden of die enkel uit zachte lichaamsdelen bestonden. Toch zijn er fossielen van de meest diverse wezens bekend; uitzonderlijk zijn ook de zachtste lichaamsdelen op een delicate wijze bewaard (bijv. afdrucken van kwallen).

Het fossilisatieproces doorloopt drie stadia:

- * de plant of het dier gaat dood
- * het afgestorven organisme moet afgesloten worden. Indien de begraving niet snel plaatsgrijpt zal het vlees ontbonden worden door aaseters en door biochemische processen, terwijl fysische processen onder invloed van wind, water, vorst... het skelet afbreken, verspoelen en vergruizen
- * eens begraven kan het organisme onderworpen worden aan verschillende processen die het materiaal van organische oorsprong omzetten in nieuwgevormde mineralen. Desondanks kunnen sommige oorspronkelijke structuren gedurende zeer lange tijd in onveranderde vorm bewaard blijven. Meestal

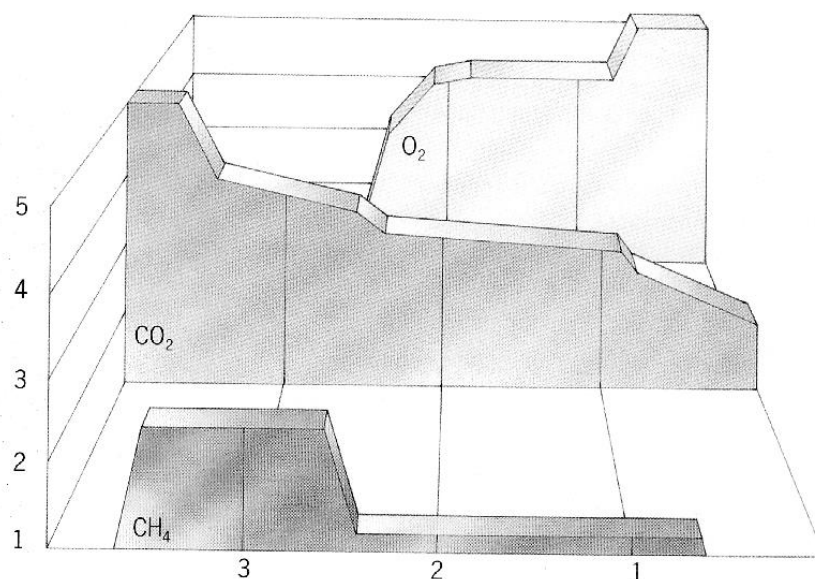
zullen schelpen of skeletdelen geïmpregneerd of vervangen worden door nieuwe mineralen die uitkristalliseren in het poriënwater van het sediment, ofwel volledig opgelost worden en eventueel vervangen door een ander mineraal bestanddeel dat de ontstane holte opvult. In het omringende gesteente is het fossiel terug te vinden als een afdruk van buiten- en binnenzijde. Het harde gesteente dat een afdruk van de binnenzijde van een vroegere schelp vormt, wordt een *steenkern* genoemd. Dit spel van oplossen en neerslaan kan zich tijdens de fossilisatie meermaals voordoen, in overeenkomst met de diagenetische evolutie van het gesteente als een geheel. Het zal uiteindelijk bepalend zijn voor uitzicht en structuur van het fossiel dat we nu kunnen terugvinden.

De hoeveelheid of verscheidenheid van fossielen, aanwezig in de gesteenten kan sterk variëren. Ook de grootte van de fossielen is erg ongelijk. Algemeen geldt het principe: hoe kleiner, hoe talrijker. De meeste fossielen zijn dus enkel microscopisch waarneembaar. Sommige gesteenten zoals kalksteen of krijt bestaan uitsluitend uit (microscopische) fossielresten; in andere gesteenten zoals zandsteen zijn zij zeldzaam. Gesteenten die niet in de biosfeer ontstaan (bijv. graniet), bevatten geen fossielen.

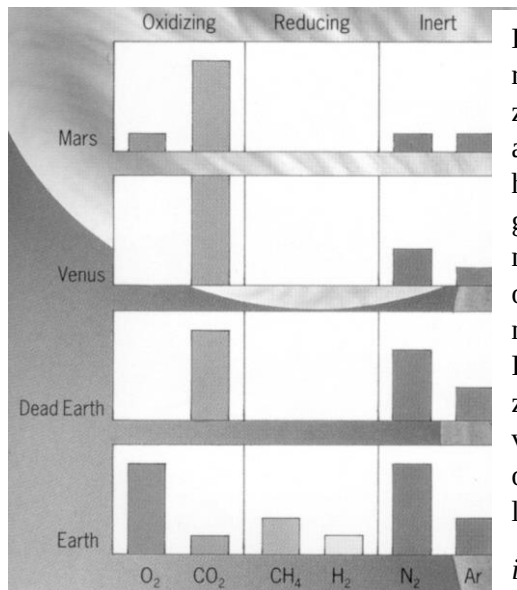
Geologisch belang van de biosfeer

De biosfeer heeft op twee domeinen een essentiële bijdrage geleverd tot de ontwikkeling van de aarde: vooreerst door de aanpassing van atmosfeer en klimaat, en vervolgens door de productie van sedimenten.

Vooraleer een vegetatiedek ontstond op het land tijdens het Onder Paleozoicum, was er niets wat de bodem samenhiield, en de erosie moet zeer groot geweest zijn. Naarmate de landplanten verder evolueerden en een groot deel van de aardoppervlakte konden koloniseren en daarbij de losse bodem vastlegden moet de erosiesnelheid en de veranderlijkheid van het landschap aanzienlijk gedaald zijn. Ook de aanvoer van sediment naar sedimentatiebekkens moet verminderd zijn.



Evolutie van de aardse atmosfeer onder invloed van het leven (vnl. bacteriën): CO₂ anorganisch → CH₄ opkomst fermenteerders → O₂ opkomst fotosynthese (horizontale schaal in miljarden jaren, verticale schaal in ppm logaritmisch). uit: Lovelock: Gaia. The practical science of planetary medicine. p. 113.



De ontwikkeling van de huidige atmosfeer is het resultaat van het fotosynthese proces. De zuurstofvoorraad van de atmosfeer kan tegenwoordig aangevuld worden op enkele duizenden jaren. Tijdens het Precambrium nam de transformatie van een CO₂ gedomineerde naar een O₂ rijke atmosfeer meer dan een miljard jaren in beslag. De zuurstofrijke atmosfeer onderhoudt het leven, maar beïnvloedt eveneens de mineralen en sedimenten aan de aardoppervlakte. Roodgekleurde sedimentgesteenten die een aanwijzing zijn voor de oxidatie van ijzermineralen, komen pas vanaf het Latere Precambrium algemeen voor. Levende organismen bepalen de erosiesnelheid van het landoppervlak en de landschapsevolutie.

ill. uit Lovelock, *Gaia*.

Levende wezens hadden ook een rechtstreekse invloed op de sedimentopbouw. Organismen die in contact komen met de bodem, te land of ter zee, verstoren en vermengen het sediment dat zich opstapelt (verandering van de textuur van het sediment). Zij kunnen het sediment ook opvangen en doen neerslaan (bijv. slibafzetting tussen zeewieren). Organismen die een vaste minerale structuur opbouwen (skelet, tanden, schelp, kalkplaatjes...) worden bij afsterven zelf een bron van sediment. Kalksteen heeft meestal een organogene oorsprong en ontstaat uit een accumulatie van schelpachtige fossielen (macro- of microfossielen) of uit schelpengruis. Krijt is een typevoorbeeld van een zuiver kalkgesteente dat vrijwel volledig bestaat uit ontelbare aantallen kalkplaatjes van marien plankton (in het water zwevende eencellige wieren). Krijtlagen zijn soms honderden meters dik en komen over grote delen van Europa en Noord Amerika voor. Zij kenmerken een periode met veel rifting (spreiding van de continenten), en daaraan gekoppelde hoge zeewaterstanden (veel ondiepe zeeën) en hoge temperaturen (broeikaseffect). Kalkwierproductie wordt in dergelijke omstandigheden opgedreven omdat hierdoor overtollige hoeveelheden van het broeikasgas CO₂ uit de atmosfeer worden verwijderd en geneutraliseerd onder carbonaatvorm waardoor een negatieve terugkoppeling van de temperatuur, en dus beperking van het broeikaseffect mogelijk is. Koraalrifkalksteen en andere carbonaat accumulaties vormen eveneens een substantieel deel van het globale sedimentpakket: een vijfde van alle sedimenten die sinds het Cambrium afgezet zijn bestaan uit carbonaten.

naar: Doyle, Bennett & Baxter - *The key to earth history. An introduction to stratigraphy*. Wiley, 1994.
Bultynck, P. ; Vandenberghe, N. ; Waelkens, S., 2005. *Leven in Steen. Sporen van 4 miljard jaar evolutie*. Davidsfonds / Leuven, 156 p.

Het grote uitsterven: de ondergang van de dinosauriërs, ramp of zegen?

Geologische processen spelen zich af in een enorme tijdsspanne. Twee grote stromingen hebben sinds het ontstaan van de geologie als wetenschap, aan het begin van de 19^e eeuw, de geologische studie van de ondergrond gedomineerd: het actualisme en het catastrofisme. Het catastrofisme ontstond, onder bijbelse invloed, als een leer dat de geschiedenis van de aarde mede bepaald is door zeldzame ingrijpende gebeurtenissen, die het uitsterven van vele organismen veroorzaakten, en werd sterk geïnspireerd door de zondvloed gedachte. Het actualisme daarentegen stelde dat alle geologische processen verklaard kunnen worden in termen van huidige processen: 'het heden is de sleutel tot het verleden'. Vermits er aan de oppervlakte weinig spectaculaire processen optreden, moeten de meeste geologische veranderingen het resultaat zijn van een langzame evolutie.

Naarmate de geologie als wetenschap zich steeds verder ontwikkelde, en nieuwe verklaringen voor allerlei geologische processen het daglicht zagen, zegevierde geleidelijk het actualisme, en geraakte het catastrofisme in het diskrediet.

Het actualisme kon trouwens vooral beroep doen op de evolutieleer, ontworpen door Darwin (1859). Twee grote natuurwetenschappelijke wetten werden door Darwin verkondigd: de gemeenschappelijke afstamming van alle organismen, in een geleidelijke evolutie van minder naar meer ontwikkelde soorten, met aan de 'top' van de piramide de mens; en het overblijven van de geschiktste in de strijd om het bestaan ('survival of the fittest'). De natuurlijke selectie is dan het mechanisme dat instaat voor de vorming van nieuwe soorten. Darwinisme is vaak en onterecht aanzien als een kanstheorie. Iedere stap in de evolutieleer start inderdaad met een kansspel, de mutatie. Een mutatie is het plotse ontstaan van een wijziging in het DNA patroon. Het DNA draagt het erfelijk materiaal van alle levende wezens en sleept de erfenis van alle voorgaande generaties vanaf het begin der tijden als een ogenschijnlijke ballast met zich mee. Defecten of veranderingen in de DNA-dragers, de chromosomen zijn dan ook niet uitzonderlijk. De mutatie is niet voorgeprogrammeerd om goed of slecht te zijn; de wijze waarop hij zich voordoet berust op toeval. Eenmaal de mutatie gevormd, begint het proces van natuurlijke selectie dat doelgericht welbepaalde genetische configuraties bevoordeelt, maar de meeste mutaties uitwiedt. Natuurlijke selectie blijft het mechanisme dat leidt tot de enorme biodiversiteit en de onvoorstelbare complexiteit van de biologische interacties. (Richard Dawkins. *Climbing Mount Improbable*. Penguin Books, 1997)

Nieuwe inzichten in de geologie, en de studie van fossielen in hun biotoop, samen met het tijdstip van hun eerste optreden of verdwijnen, hebben de impact van de tweede wet van Darwin gerelativeerd. Er zijn tegenwoordig afdoende bewijzen gevonden om een globale, geleidelijke evolutie en het uitsterven van oude soorten ten gevolge van de competitie met nieuwe, beter aangepaste soorten niet als een verworvenheid te beschouwen. De evolutie is met horten en stoten verlopen; nieuwe soorten zijn toevallig in de plaats van oudere soorten gekomen door plotse veranderingen in het milieu. De biologische evolutie wordt weliswaar verduidelijkt door de moleculaire biologie maar is enkel verklaarbaar vanuit de aardgeschiedenis. Het catastrofisme heeft weer de bovenhand gehaald, ten minste om de grote stappen in de aardgeschiedenis te verklaren.

Dit wordt best geïllustreerd door de fascinerende geschiedenis van het plotse uitsterven van de dinosauriërs op het einde van het Krijt, zo'n 65 miljoen jaar geleden. De meest actuele verklaring is een enorme verstoring van leefmilieu en klimaat door een asteroïde inslag in de omgeving van Yucatan (Mexico). De impact schok en verpulvering van een 10 km grote asteroïde gaat gepaard met een enorme hitte-ontwikkeling en branden over halve continenten. Sporen van roet, zandkorrels met schoktexturen, en extraterrestrische scheikundige stoffen werden wereldwijd teruggevonden in diverse gesteenten met exact dezelfde ouderdom. Stof en roet in de atmosfeer verduisterden gedurende enkele weken tot maanden de aardoppervlakte met zware afkoeling tot gevolg. De grote hoeveelheden water, verdampt door inslag van de asteroïde in de oceaan (er zijn geen sporen voor een continentale inslag gevonden) sloegen neer onder de vorm van sneeuw, te samen met de fijne stofdeeltjes, waardoor het zonlicht weer toegang kreeg.

Het leven werd grotendeels geëlimineerd van de aardoppervlakte. De koolstofcyclus werd onderbroken en de verhoogde koolzuurgas concentratie leidde vervolgens tot een sterke tijdelijke opwarming van de aarde. Het duurde duizenden jaren vooraleer de aarde weer leefbaar werd.

Het massale afsterven op het einde van de Krijtperiode leidde tot het uitsterven van de dinosauriërs die nochtans bijzonder goed aangepast waren aan de meest diverse milieus en dan ook het leven op aarde overheersten. De kleine zoogdieren leefden letterlijk en figuurlijk in de schaduw van de dinosauriërs. Het waren nachtdieren die in de beschutting van hun holen meer kans hadden om aan de toenmalige holocaust te ontsnappen. De weinige exemplaren die al die rampen overleefden verspreidden zich zeer snel over de aarde en gingen tegelijkertijd sterk diversifiëren. Talrijke nieuwe soorten zagen het licht.

Dit was dus niet zozeer te wijten aan competitie - de rivalen waren al verdwenen - maar eerder aan toeval. Door een toevallige maar erg drastische ingreep in het leefmilieu stierven een groot aantal dieren en plantensoorten uit; degene die toevallig overleefde lag dan aan de grondslag van een nieuwe opbloei en herstel van de soortenrijkdom. "Alter any event, ever so slightly and without apparent importance at the time, and evolution cascades into a radically different channel" (Stephen Jay Gould, *Wonderful Life*, 1989). Anderzijds is onafhankelijk gegroeide convergentie in levensvormen zo opvallend (bijv. de ogen van gewervelde dieren en inktvissen) dat een algemeen, mogelijk goddelijk geïnspireerd bouwplan als zeer plausibel werd ervaren "the evolutionary routes are many, but the destinations are limited" (Simon Conway Morris, *Life's Solution: Inevitable humans in a Lonely Universe*, 2003)[R. Lenski in *Nature*, vol. 425, 23.10.2003: 767-768]. Intussen worden steeds meer tussenstappen (ook voor de ontwikkeling der ogen) gevonden zodat de 'evolutiehypothese' inmiddels een 'evolutieleer' is geworden.

De plotse verandering in de fossielsamenstelling inspireerde de grondleggers van de geologie om deze breuklijn (waarvan de ware aard tot voor een twintigtal jaar volslagen onbekend bleef) uit te kiezen als scheiding of grens tussen twee geologische tijdperken, nu bekend als het Krijt en het Tertiair. Door de verschillen in de fossielen zijn gesteenten van Krijt of Tertiair ouderdom vrij gemakkelijk te onderscheiden. Gelijkaardige fenomenen werden ook vastgesteld bij de meeste overige grenzen van de geologische tijdsschaal (bijv. Paleoceen: radiatie van zoogdieren over de aarde, echter alle grote groepen bij de Paleoceen-Eoceen crisis een zeer abrupte wereldwijde temperatuursstijging - uitgestorven; Eoceen: nieuwe radiatie en ontstaan van zoogdiergroepen die tegenwoordig nog leven; Pleistoceen: ontstaan van de moderne zoogdiersoorten). De tijdsschaal vormt dus in zekere zin een aaneenrijging van grote natuurlijke catastrofes en bijbehorende biotische crisissen (vrij naar Hsü - Het grote uitsterven).

We kunnen ons dus gemakkelijk een andere wereld voorstellen. Een wereld die even plausibel is als de onze en waarin de blijvende overheersing van de grote reptielen een rem gevormd zou hebben op de ontwikkeling van de zoogdieren en op de vermenigvuldiging van de soorten. Een wereld ook waarin de primaten en mensachtigen al helemaal geen kans gekregen zouden hebben om zich te ontwikkelen. de opkomst van nieuwe structuren en dimensies van het leven verband houdt met een opeenvolging van unieke en niet-herhaalbare gebeurtenissen.

Het jongste geologische tijdperk

Throughout Earth's history many animals and plants have become geological forces. Think of the Great Barrier Reef, or worldwide deposits of coal. Humans are now perhaps the most geologically significant species ever.

For example, we now move more material around the Earth's surface than all natural agents of erosion. Meanwhile our species is depleting water and fuel resources, causing floods and droughts, producing wastes and 'greenhouse' gases - disturbing the planet's dynamic equilibrium. Yet, offering our growing population a secure and prosperous future requires ever more intensive searches for nutrients, energy, water, ores and building materials.

These resources continue to be found as Earth sciences develop their understanding. All predictions of the exhaustion of such resources have so far proved wildly wrong. There is, as yet, no reason to believe that the Earth will not continue to support our needs - as long as we manage those resources sustainably, as we explore and benefit from the planet's resources without disturbing the proper functioning of the Earth System.

Earth Sciences for Society Foundation, 2003. Planet Earth in our hands [www.esfs.org].

Het «Anthropoceen», nieuwste geologische periode is gestart op het einde van de 18de eeuw, met stijgende concentraties van koolzuurgas en methaan in de lucht, zoals blijkt uit analyse van luchtbellen ingesloten in het ijs van de poolkappen. Dit wordt, misschien niet geheel terecht maar wel politiek correct aanzien als het eerste teken van menselijke dominantie op het leefmilieu : het begin van de industriële revolutie met de ontdekking van de stoommachine door James Watt in 1784. Sindsdien is de mensheid bijzonder snel toegenomen in aantal en in exploitatie van de aardse natuurlijke rijkdommen. Idealisten zoals Teilhard de Chardin en Vernadsky spraken bij het begin van de 20ste eeuw nog liever van de ‘noösfeer’ (de wereld van het menselijk denken) als nieuwe (r)evolutionaire fase van de aardgeschiedenis, en het is inderdaad dank zij onze hersenen dat de mens in staat is zijn leefomgeving naar zijn hand te zetten. Bodemonderzoekers die gewoonlijk eerst onze afval tegenkomen spreken daarentegen al geruime tijd gemeenzaam van ‘poubellien’ of ‘smeerlappiaan’ : de naam volgt het meest markante spoor dat onze beschaving achterlaat.

Sinds het begin van het ‘Anthropoceen’ is het aantal mensen vertienvoudigd tot meer dan 8 miljard en zal verder oplopen tot 10 miljard in de loop van de 21ste eeuw. Het herkauwende rundvee, de voornaamste bron van het broeikasgas methaan, bedraagt nu 1,4 miljard stuks. Menselijke ecosystemen grijpen steeds verder om zich heen en nemen ca 30% van de aardoppervlakte in. Tropische regenwouden verzwinden in razendsnel tempo en daarmee ook het grootste deel van de terrestrische biodiversiteit; biomassa wordt omgezet in broeikasgas. De natuurlijke dynamiek van rivieren als vormgevers van het landschap is niet meer toegestaan. In plaats daarvan verlegt de mens zelf de rivieren of trekt ze recht, en verandert hun bovenloop in stuwmeren. Visvangst slaat reuzengaten in de voedselketen van de oceanen, en roomt 25% van de biologische productie af in de opwellingszones van koude zeestromingen en 35% in de kustzeeën van de gematigde streken (niet in het minst in de Noordzee). CFK’s slaan seizoensgebonden gaten in de beschermende ozonlaag (en dan mogen wij nog van geluk spreken dat het toevalligerwijze geen BrFK’s, broom-fluor-koolwaterstoffen, zijn geworden want die hadden het ozongat permanent gemaakt). Het energieverbruik is 16-voudig gestegen tijdens de 20ste eeuw en brengt jaarlijks 160 miljoen ton zwaveldioxide in de lucht, dubbel zoveel als de natuurlijke emissies. Meer stikstofhoudende kunstmest wordt jaarlijks over onze akkers uitgestort dan alle terrestrische ecosystemen samen nodig hebben. Verbranding van fossiele brandstoffen en landbouw veroorzaken beide een stijgende uitstoot van broeikasgassen : de concentratie van koolzuurgas in de lucht is gestegen met 30%, methaan met 100%, en zijn nu hoger dan ooit te voren tijdens de laatste 400.000 jaar. Een stevige opwarming van de aarde, met 1,5°C of zelfs meer staat ons in de 21ste eeuw te wachten. En dan wordt het leeuwendeel van deze bijdrage maar geleverd door de rijkste 25% van de mensheid.

Bescheidenheid zou echter ook de doemdenkers, wier universum rond de mens draait, sieren: een stevige vulkaanuitbarsting gelijk de Pinatubo op de Filippijnen zorgt in zijn eentje voor een even grote uitstoot van broeikasgassen en wereldwijde temperatuursbeïnvloeding als de industriële mensheid op een heel jaar voor elkaar brengt. Toch zal enkel een wereldcatastrofe zoals een reuzenmeteoriet-inslag de mensheid ervan weerhouden een dominerende milieufactor te blijven. Enkel duurzame ontwikkeling kan ons behouden door het Anthropoceen loodsen. Maar of en hoe dit zal gebeuren, blijft een groot vraagteken en maakt de maatschappij tot een avontuur.

*Naar P.J. Crutzen : *Geology of mankind*. Nature, vol. 415, 3 Jan. 2002, p. 23. Williams et al., 2011.*

VIJFHONDERD MILJOEN JAAR GEOLOGISCHE GESCHIEDENIS

De geologische geschiedenis omvat een relaas van evenementen en hun weerslag in de abiotische omgeving (gesteenten, bodems, waterhuishouding, reliëf, nuttige grondstoffen, natuurlijke risico's) die geleid hebben tot de landschappen waarin we vandaag leven en ook hun verdere toekomst bepalen.

Hoe de geologische geschiedenis wordt aangestuurd

De stratigrafische opeenvolging van sedimentgesteenten weerspiegelt de globale evolutie van plaattektoniek, klimaat, zeepeil en de biosfeer. Ook de geologische geschiedenis van België wordt gedomineerd door de stapsgewijze vorming van een supercontinent, Pangea, tijdens het Paleozoïcum, en het terug uit elkaar vallen ervan door de opening van de Atlantische Oceaan tijdens het latere Mesozoïcum en het Cenozoïcum.

De accretie van continenten tot een supercontinent en de erop volgende fragmentatie volgt een cyclisch verloop; een supercontinent cyclus duurt ongeveer 500 miljoen jaar. Dit zou voortvloeien uit een verschil in thermische conductiviteit van continentale en oceanische korst. Continentale korst is een veel slechtere warmtegeleider dan oceanische korst. Wanneer een supercontinent een grote oppervlakte inneemt zal de hitte zich opstapelen in de onderliggende aardmantel. Hierdoor wordt het supercontinent omhoog gedrukt en opgebroken door diepe slenken waaruit oceanisch magma kan opwellen dat de continentale korst verder uit elkaar drijft. De continenten worden dan van elkaar gescheiden door oceanen, zoals overeenkomt met de actuele situatie. Oceanische platen zullen dan langs hun randen subductiezones gaan vertonen waardoor continenten terug gaan samensmelten tot vorming van een nieuw supercontinent. Oceanen sluiten en bergketens worden gevormd door het versmelten van de continenten.

Klimaatsschommelingen gingen van broeikaseffect tot ijstijd, maar werden mede beïnvloed door een noordwaartse continentendrift van een positie in de buurt van de Zuidpool tijdens het Cambrium tot de actuele positie op het noordelijk halfrond; het Proto-Europese continent passeerde de evenaar op het einde van het Paleozoïcum.

Verschillende omstandigheden bevorderen de omslag naar 'global warming': verandering in effectieve zonnestraling omgezet in warmtestraling door veranderingen van de aardbaan om de zon, concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer, hoge zeespiegelstand, grote onderling verbonden oceanen met warmtetransfer tussen polen en evenaar, geen continenten in polaire positie die albedo bevorderen en circulatie van zeewater (= warmtetransport) tegengaan.

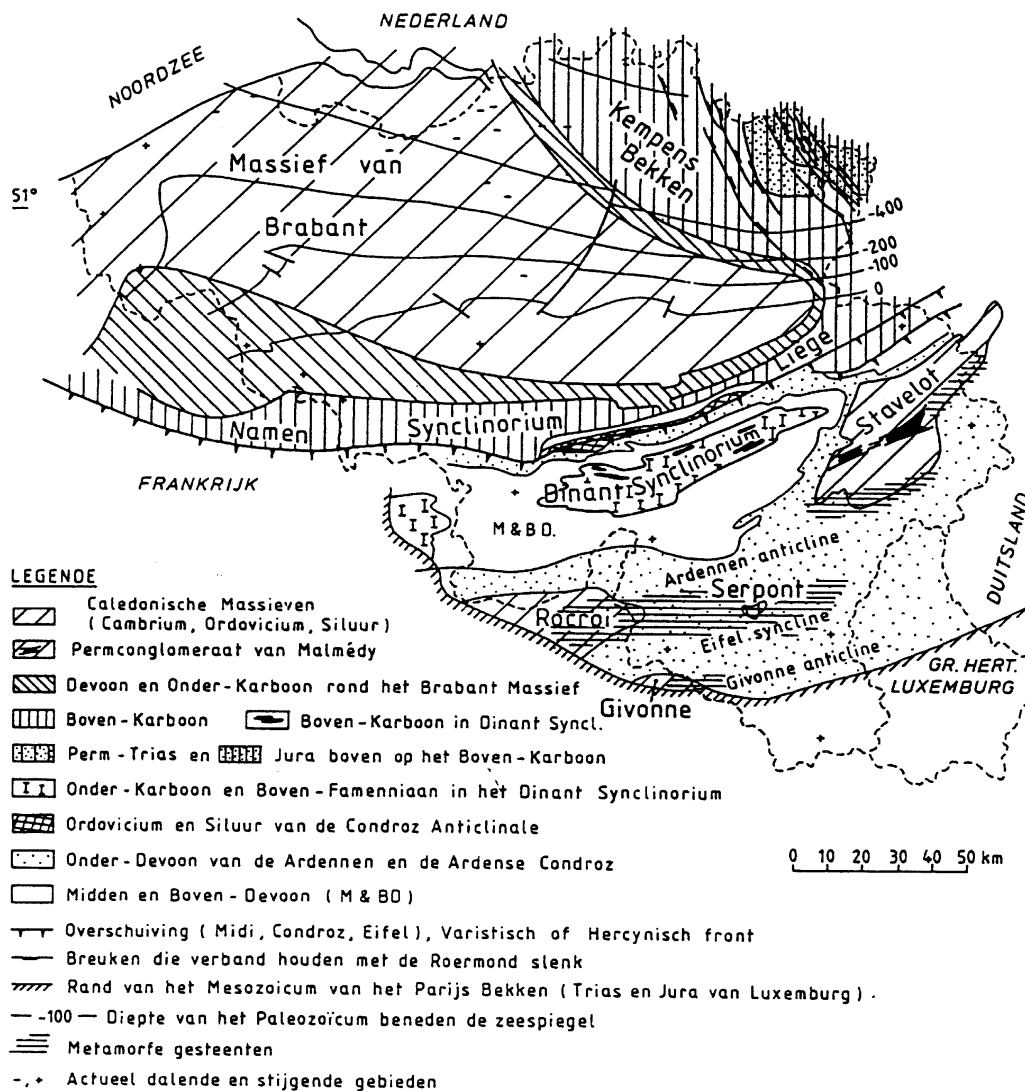
Tijdens de warme perioden, zoals bijvoorbeeld het Krijt, was de aarde volledig ijsvrij, met een gemiddelde temperatuur die tot 6°C hoger lag dan de hedendaagse temperatuur. Poolstreken waren bebost en bewoond door dinosauriërs. Hoge zeespiegelstanden (met een grote uitbreiding van ondiepe randzeeën tot gevolg) leidden tot langdurige warme perioden; wanneer de zeespiegel daalde werd het klimaat meer variabel met duidelijke seizoensschommelingen. Tijdens de koude perioden trad vorming van polaire ijskappen enkel op wanneer een grote continentale landmassa zich op de polen bevond (bijv. Antarctica).

Zeespiegelschommelingen leidden tot een voortdurende afwisseling van transgressies (bij stijgend zeepeil) en regressies (bij dalend zeepeil). Deze waren minder merkbaar in periodes van actieve tektoniek met bergvorming door accretie van continenten (opheffing van het land, gekoppeld aan erosie

zodat weinig getuigenissen van die tijd zijn overgebleven, en terugtrekking van de zee waardoor mariene sedimenten afwezig zijn).

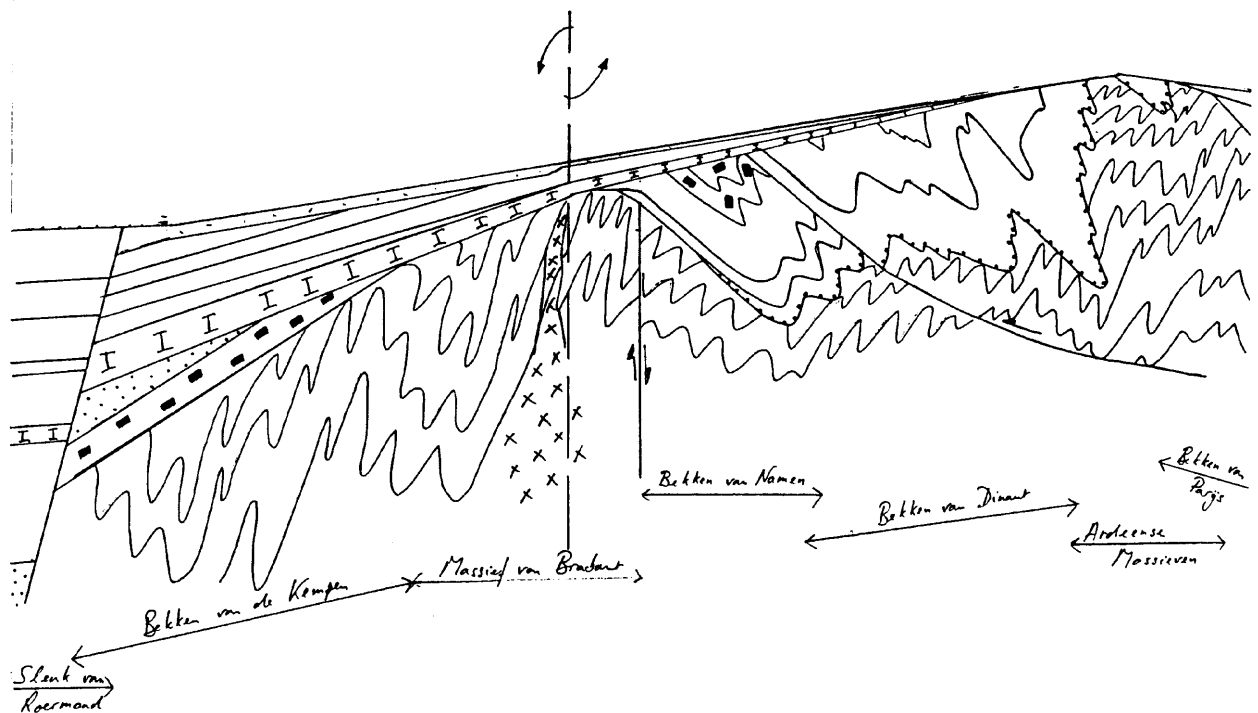
Globale veranderingen in zeespiegelstand worden teweeggebracht door 2 factoren: wijzigende volumes zeewater, en wijzigend volume der oceanische bekkens. De eerste factor kan te wijten zijn aan thermische uitzetting of krimp van het watervolume (1 m zeespiegelstijging bij 1°C temperatuurstijging), aan opslag van water onder de vorm van landijs, of aan het periodisch uitdrogen van afgesloten zeeën (bijv. de Middellandse Zee). De tweede factor kan te wijten zijn aan het ontstaan van Mid-Oceanische spreidingsruggen (met warmere, dus lichtere en rijzende oceaankorst), aan continentale rifting en subductie (oude, zware oceaankorst en compact supercontinent vergroot het volume van de oceanbekkens en verlaagt het waterpeil, en omgekeerd), of mogelijk ook aan de snelheid van erosie en sedimentatie (massatransfer van land naar zee, met opvulling van de zee en stijging van het peil).

De biosfeer is medeverantwoordelijk voor de samenstelling en homeostasie van de atmosfeer en versnelt de recyclage van vaste, vloeibare en gasvormige bestanddelen die aan de aardoppervlakte voorkomen. Evolutie en crisissen in de biosfeer zijn in de sedimenten af te lezen, of hebben mede zijn samenstelling bepaald. Door de interactie tussen al deze variabelen is de bijzonder gevarieerde gesteente-opeenvolging ontstaan een klein gebied als België kenmerkt.



Kaartje van België met ligging en benaming van de voornaamste structurele eenheden (uit Vandenberghe & Laga. De aarde als fundament).

De geologische geschiedenis wordt weerspiegeld in de geologische kaart, die de gesteentelagen weergeeft die aan de oppervlakte treden of vlak onder de bodem voorkomen. Globaal genomen kan men een tweedeling van het land maken, met in het noorden vooral niet of zwak geconsolideerde jongere formaties van het Quartair, het Tertiair en het Krijt, en in het zuiden van het land compacte gesteenteformaties van Carboon to Cambrium ouderdom. Deze oorspronkelijk verticaal boven elkaar gestapelde formaties worden door plooïing naaste elkaar geplaatst en meermaals herhaald; hun grote dichtheid danken zij aan poriënverkleining en cementatie wanneer zij bij de aanvang van iedere vervormingsfase op grote diepte werden gebracht. In het midden van het land treffen wij een tweeledige situatie aan: enerzijds is er de overdekking door dunne lagen zwakhellende, weinig geconsolideerde afzettingen, anderzijds zijn er de rivierinsnijdingen waar bovenliggende lagen geërodeerd zijn en een venster laten op onderliggende, veel oudere compacte Paleozoïsche gesteenten.



Geologische NNW-SSO doorsnede doorheen België, met schets van de diepe geologische opbouw van de ondergrond. Let op de gelaagde en relatief ongestoorde opbouw van de Limburgse ondergrond (links) in tegenstelling tot de complexe geplooid en gebroken structuur van de ondergrond van Wallonië (rechts). Hertekend naar Bless & Fernandez-Narvaiza, 1994).

De oudste geschiedenis van België: het Onder Paleozoïcum (Cambrium - Ordovicium - Siluur) of de Caledonische cyclus

Ten gevolge van het superpositieprincipe zijn de oudste gesteenten op de meest plaatsen overdekt door jongere gesteenten. Vooral in zuid België heeft de erosie vensters vrijgemaakt op de onderliggende geplooid rotsachtige 'gesteentemassieven', die er in een hogergelegen positie verkeren. Verschillende Caledonische massieven zijn in België bekend:

- Massief van Brabant, in centraal en west België, ook op grotere diepte onder de Kempen, doorlopend onder de Noordzee tot in Engeland; enkel ontsloten in de bovenlopen van Dender, Zenne, Dijle, Orneau, Méhaigne en zijriviertjes, elders overdekt door jongere gesteenten
- Massief van de Condroz, een smalle anticlinale zoom tussen de hercynische bekkens van Namen en Dinant, tussen Charleroi en Luik

- Massief van Stavelot, gelegen tussen Eupen, Vielsalm, Stavelot en Spa
- Massief van Rocroi, gelegen aan weerszijden van de Maas aan de Belgisch-Franse grens
- Massief van Serpont, gelegen in het midden van de anticlinale as die de Massieven van Stavelot en Rocroi verbindt, ook wel anticlinale as van de Ardennen genoemd
- Massief van Givonne, gelegen aan de zuidrand van de Ardennen, ten zuiden van Bouillon, gedeeltelijk overdekt door de jongere gesteenten van het Bekken van Parijs.

Al deze massieven werden tweemaal geplooid; eenmaal tijdens de Caledonische bergvorming op de overgang van Siluur naar Devoon, en een tweede maal te samen met de jongere gesteenten op het einde van het Carboon.

De oudste gesteenten die uit diepere boringen in Vlaanderen bekend zijn, dateren van het vroegste Cambrium. Het zijn detrietische sedimenten die behoren tot het 'Massief van Brabant', een kern van oeroude gesteenten. Vermoedelijk maakte die kern deel uit van het zuidelijke *Gondwana continent* (Afrika-Zuid Amerika-Indië-Arabië-Australië-Antarctica).

Vanaf het Cambrium begonnen de continenten te verschuiven, tot uiteindelijke vorming van een supercontinent, Pangea tijdens het Perm. De sluiting van de oeroceaan tussen Proto-Europa in het noorden ('Baltica' bestaande uit Skandinavië-Rusland-Groenland-noord en oost Noord Amerika) en een microplaat, Avalonia genaamd (Engeland-Benelux-noord Duitsland-New England en Newfoundland), die afgescheurd was van het grote Gondwana continent in het zuiden, leidde eerst tot subductie van de oceanische korst en vulkanisme tijdens het Ordovicium, waarvan de resten nu als een vulkanische gesteentegordel door het Massief van Brabant lopen, van Halle tot Oostende. De porfier van Quenast (bij Halle) is bijvoorbeeld een oude vulkaanprop, die het merendeel van de traditionele kasseien geleverd heeft, maar nu vooral als breuksteen ontgonnen wordt. Accretie van continentale platen, na sluiting van de tussenliggende oceaan, ging gepaard met een belangrijke bergvorming, die bekend staat als de *Caledonische* bergvorming (overgang Siluur - Devoon): de perifere Gondwana sedimenten die nu in de Belgische ondergrond voorkomen werden eerst in de Ardennen (Ordovicium-Sluur) en pas later in Brabant (laat Siluur tot midden Devoon) geplooid en opgeschoven tegen de Proto-Europese landmassa die aldus vergroot werd. België lag toen aan de zuidrand van Europa.

Alhoewel het klimaat op wereldschaal warm was, en broeikaseffecten vertoonde, zijn de Onder Paleozoische gesteenten van België afgezet onder koude omstandigheden, in een randzee van het Gondwana continent. Dit continent lag toen nog bij de zuidpool. De sedimenten zijn in totaal meerdere kilometers dik, monotoon zandig of kleiig, en zonder veel fossielen. Continentendrift leidde tot een snelle noordwaartse verschuiving van de Avalonia microplaat in de richting van de Evenaar.

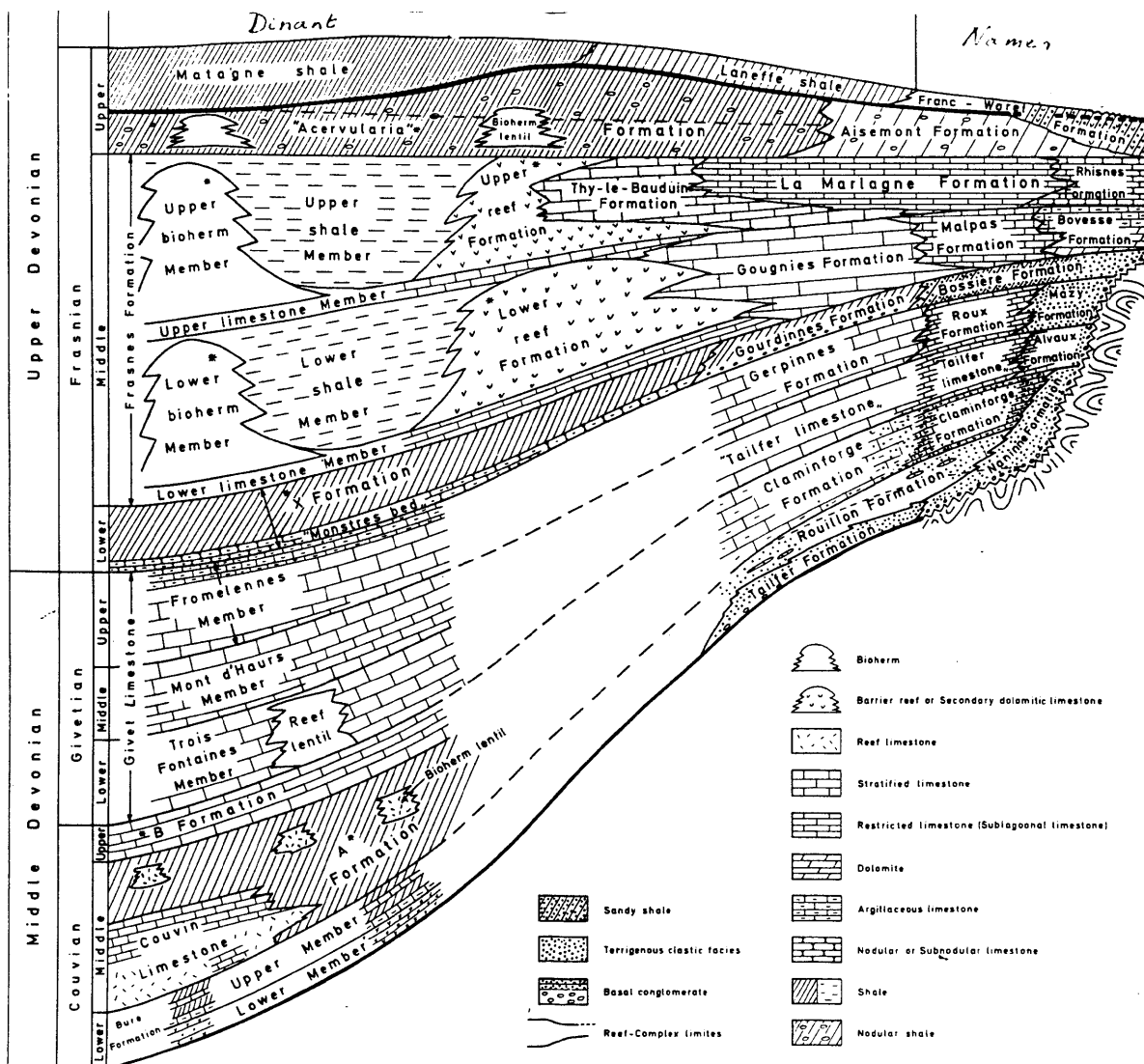
De Cambro-Siluurgesteenten in de Ardeense massieven werden tweemaal geplooid; eenmaal tijdens de Caledonische bergvorming op de overgang van Siluur naar Devoon, en een tweede maal te samen met de jongere gesteenten op het einde van het Carboon. Het Massief van Brabant kende veel deformatie gedurende het Cambrium en de vulkanische intrusies van het Ordovicium. Het werd echter slechts eenmaal geplooid tijdens het vroeg Devoon.

Het Boven Paleozoicum (Devoon - Carboon) of de Hercynische cyclus

Het proces van aanhechting van delen van het Gondwanacontinent aan proto-Europa, dat begonnen was tijdens de Caledonische fase, werd verder gezet totdat een supercontinent, Pangaea, werd gevormd. De accretie van continentale platen ging gepaard met de *Hercynische* bergvorming, die vooral het zuidelijk deel van België beïnvloed heeft. Tijdens het Devoon en het Carboon was het klimaat warm, met

stijgende zeestanden en dus veel mariene carbonaatgesteenten wereldwijd (in België vooral tijdens het Midden Devoon en het Onder Carboon). Tijdens het Boven Carboon - Onder Perm daarentegen trad een verkoeling op met vorming van een ijskap over wat nu Zuid Amerika en zuidelijk Afrika is, maar toen op de Zuidpool lag. In België vinden wij weinig sporen van die ijstijd omdat ons land toen op de Evenaar lag en een tropisch klimaat kende. Door de eraan gekoppelde daling van het zeepeil werden de zeeafzettingen vervangen door fluviatiele of delta afzettingen met koollagen: het Carboon was ook de periode waarin voor het eerst houtige landplanten verschenen die de vochtige tropische laaglanden op grote schaal koloniseerden en aanleiding gaven tot dikke accumulaties van veenlagen die nadien werden samengeperst en ingekoold tot steenkool.

De Devoon - Carboon gesteenten werden afgezet in de randzee die gelegen was ten zuiden van proto-Europa (Zuid België) of de ondiepe delen ervan overspoelde (Noord België). De hercynische zee zou onder invloed van de continentenbotsing geleidelijk sluiten. Dit proces gaat gepaard met een bekkenvorming (= inpersing met langzame maar voortdurende subsidentie van de zeebodem zodat zich een dik sedimentatiebekken kan vormen). De sedimentopvulling kent een karakteristiek verloop, van overwegend grofklastisch naar fijn slib en carbonaat om ten slotte weer grofklastisch te eindigen. Begin- en eindfase bestaan uit continentale afzettingen, maar het leeuwendeel is marien.

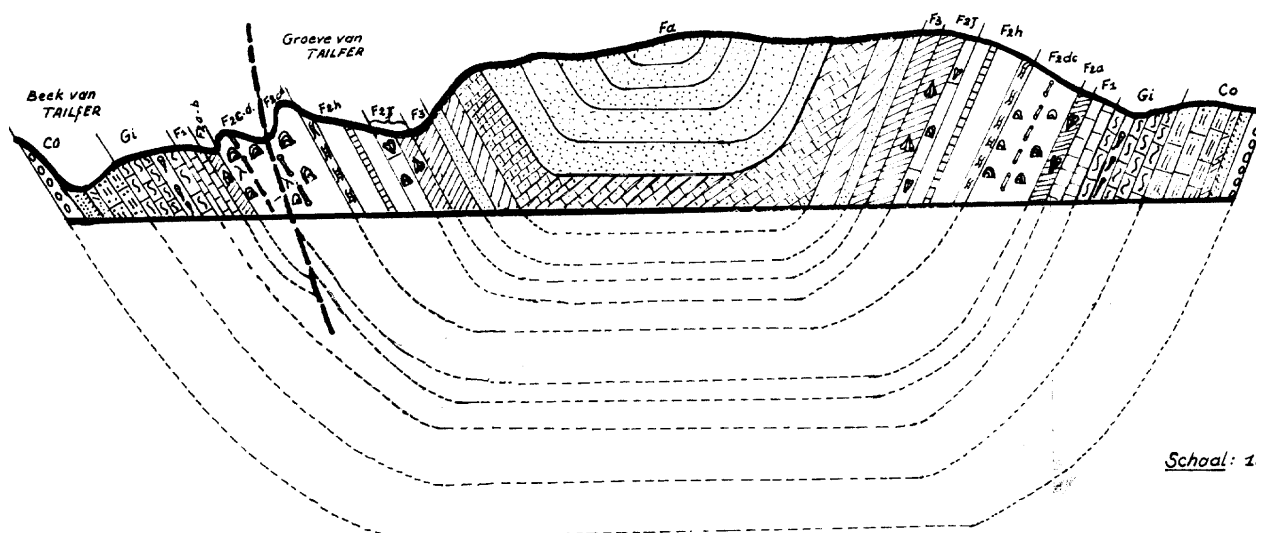


Gereconstrueerde dwarsdoorsnede (met de later plooiën terug gladgestreken) door de Midden- en Boven-Devoon gesteenten in de Bekkens van Dinant en Namen. In het noorden (bekken van Namen)

dunnere zandiger, kustnabije afzettingen; in het zuiden (bekken van Dinant) dikkere kleiiger afzettingen van de matig diepe randzee met kalksteenriffen.

De basisgesteenten van de hercynische cyclus (= Onder Devoon) bestaan vooral uit detrietische afbraakproducten van het continent dat door de Caledonische bergvorming was opgeheven en aan sterke erosie blootstond. De zand-silt-grint afzettingen zijn meerdere kilometers dik in Zuid België, terwijl het Massief van Brabant van deze afzetting werd gevrijwaard. Met het afslijten van het Caledonisch gebergte tot een schiervlakte verdween geleidelijk het brongesteente voor detrietische sedimenten. Vanaf het Midden Devoon domineerde een biogene sedimentatie: kalkstenen, ontstaan uit kalkslib, fossielgruis of zelfs koraalriffen (cf. de tropische ligging). De kalksteenformaties worden afgewisseld met schalie-afzettingen, ontstaan door decantatie van slib dat door zeestromingen werd vervoerd. Vaak ontstaat op die wijze een mengeling van kalk en klei. De totale dikte van dit pakket kan 1500 m bedragen voor de Devoonformaties en 800 m voor de Onder Carboonkalken. In het Boven Devoon zorgt de afzetting van de Condros zandstenen ("psammieten") voor een intermezzo. Door een tijdelijke verandering van zeestroming werd een fijngecalibreerd zand parallel aan de paleokust vanuit het noordoosten over grote afstand vervoerd en in de Condros in een 500 meter dik pakket gesedimenteerd.

In het Boven Carboon liet de geleidelijke sluiting van de zee tussen Proto-Europa en Gondwana zich reeds gevoelen. De eerste compressie en bijbehorende opheffing van het front van het Gondwanacontinent zorgde voor een vernieuwde aanvoer van detrietische erosieproducten en voor een afsluiting van de zee. Tijdens deze eerste compressiefase van de Hercynische bergvorming werd een diepe trog gevormd aan de rand van Proto-Europa waarin een 4 kilometer dik pakket van die erosieproducten werd afgezet, afgewisseld met organische afzettingen, namelijk de steenkoollagen. De aanvoer van sediment kon dus gelijke tred houden met de zakking van de trog. De trog werd geleidelijk gesloten door het oprukkende compressiefront. Sedimentatie werd opgevolgd door algemene opheffing. Langs de zuidrand van Proto-Europa leidde de compressie tot sterke verkorting van de aardkorst: de sedimentlagen werden er geplooid tegen het Massief van Brabant dat als stootblok fungeerde. Overschuivingsbreuken leidden zelfs tot een bijkomende opstapeling van de geplooiden formaties. Bovenop het Massief van Brabant bleef de vervorming van de Devoon-Carboonlagen beperkt tot scheefstelling langs breuklijnen. Op het Massief van Brabant verdwenen de Devoon-Carboonlagen door latere erosie; in de Kempische ondergrond bleven ze gedeeltelijk behouden.



Geologische doorsnede door de syncline van Walgrappe (Maasprofiel tussen Wépion en Yvoir).

Verskillende Hercynische massieven zijn in België bekend die zich bekkenvormig tussen de oudere Caledonische massieven bevinden en er zich toe verhouden als complexe, samengestelde synclinalen

(synclinoria) tot anticlinalen (anticlinoria). Zij bepalen hoofdzakelijk het uitzicht van Wallonië, maar zijn ook verantwoordelijk voor de steenkoolrijkdom in Limburg:

- Bekken van de Kempen met een niet aan de oppervlakte tredende Hercynische gesteentecyclus. Dit bekken valt niet geheel toevallig samen met de geografische Kempen (oude diepliggende structuren worden gereactiveerd bij latere tektonische vervormingen) en loopt door onder Nederland

- Bekken van Namen, volgens de Maas-Samber as, of het oude Waalse industriegebied (aanwezigheid van steenkoolvelden), doorlopend over Noord Frankrijk en Kent tot in Zuid Wales enerzijds en over Aken tot in het Ruhrgebied anderzijds

- Bekken van Dinant, overeenkomend met de Condroz en de Fagne-Famenne streken, gekenmerkt door een opeenvolging van langgerekte plooiruggen waardoor afwisselend kalksteen, zandsteen of schieferbanden dagzomen

- Massief van de Ardennen, omvat de detrietische gesteenten (schalie - zandsteen) van het Onder Devoon die de Ardeense Caledonische massieven omsluiten

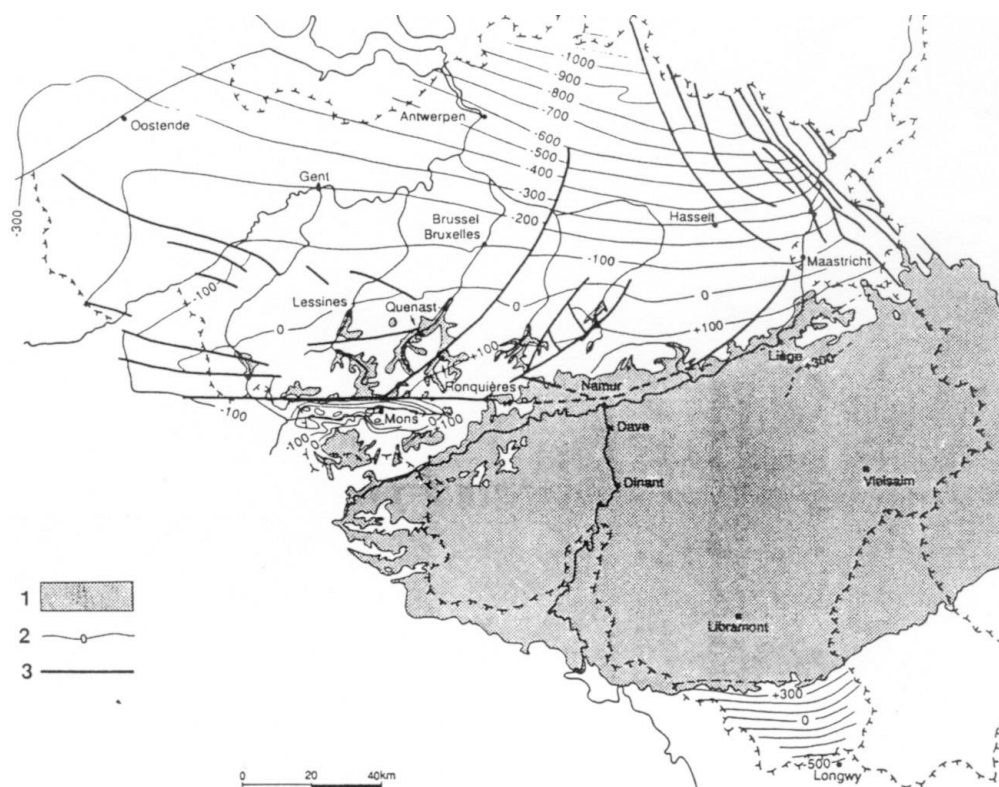
- Bekken van Neufchateau, in de Ardennen enkel met detrietische gesteenten van het Onder Devoon, zet zich voort in de Eifel (Duitsland) waar Midden Devoon kalkstenen voorkomen.

In de zuidelijke Ardennen dagzomen nu gesteentelagen die voor de Hercynische bergvorming diep begraven lagen. In deze lagen manifesteert zich een milde vorm van metamorfisme (herkristallisering van mineralen onder invloed van verhoogde druk en temperatuur). Dit proces is irreversibel; het metamorfisme blijft behouden wanneer de lagen opgeheven worden en door erosie van de bovenliggende formaties uiteindelijk dagzomen.

Van Pangea tot de opening van de Atlantische Oceaan of de Kimmerische cyclus (Perm – Trias - Jura)

Ten gevolge van de Hercynische bergvorming en continentendrift werd een supercontinent Pangea gevormd. In de erop volgende periode viel dit supercontinent weer geleidelijk uit elkaar: het tektonisch regime dat onze streken kenmerkte werd niet langer door compressie gedomineerd maar wel door rek van de aardkorst. De opening van de Atlantische Oceaan en de vorming van de Noordzee langs een secundaire rift die zich niet geheel kon doorzetten, zijn de belangrijkste gebeurtenissen die de nieuwe geologische geschiedenis van België gestalte gegeven hebben. Aanvankelijk kende de aarde een van de warmste perioden uit haar geschiedenis; pas vanaf het Tertiair trad een geleidelijke verkoeling op die uiteindelijk leidde tot de ijstijden. Deze klimaatsevolutie werd versterkt door de noordwaartse verschuiving van Europa tot zijn huidige positie.

Na de Hercynische bergvorming is er een groot tijdshiaat met de volgende afzettingsfase. Tijdens het Perm en het Trias kenden onze streken die nog deel uitmaakten van Pangea, een uitgesproken woestijnklimaat, met roodgekleurde zandige sedimenten (erosieproducten van het Hercynische hoogland in wadi-afzettingen) en dikke zoutlagen (niet bewaard in het Kempisch Bekken, wel meer noordelijk onder Nederland, Noord Duitsland en de Noordzee waar de zakking van het Proto-Noordzeebekken sterker en meer continu was). West Europa lag toen in een geografische positie die overeenkomt met die van de Sahara nu. Ten gevolge van de vorming van Pangea was het zeepeil op een allerlaagste stand beland zodat de sedimenten van continentale aard waren, waardoor ook hun bewaringspotentieel veel geringer is (gemakkelijke overgang van sedimentatie naar erosie op het continent).



Diepte van de paleozoische sokkel onder dekklagen van Tertiair, Krijt of Permo-Trias ouderdom: 1) ontsluitingen van de Paleozoische sokkel; 2) gelijke dieptelijnen van de top paleozoische sokkel onder jongere dekklagen; 3) breuklijnen (uit Maréchal. De geologische structuur. In: Denis, ed. Geografie van België. Gemeentekrediet, 1992).

De post-hercynische afzettingen zijn niet geplooid want zij hebben geen bergvorming meer meegemaakt, maar zij kunnen wel gekanteld en gebroken zijn, vooral dan de oudere formaties (Perm-Trias-Jura). Die zijn maar op beperkte wijze bewaard in België: in de ondergrond van Noord Limburg in het Kempens Bekken en in Lotharingen (Zuid Luxemburg). Oorspronkelijk overdekten deze sedimenten ook het tussenliggende gebied, maar zijn daar intussen door erosie verdwenen.

Het Jura was een periode van verhoogde tektonische activiteit, bekend als de Kimmerische tektonische fase, en gekoppeld aan de opening van de Atlantische Oceaan. De Slenk van Roermond werd gevormd als een tak van een geaborteerd riftsysteem: de Noordzee - Rijn as, die geen oceaan werd, maar toch een belangrijke olie- en gasprovincie werd. In het noordoosten van de provincie Limburg werden de koollagen kilometers diep verzonken. Terwijl de Roermond Slenk verzakte werd het Massief van Brabant ruim 2 kilometer opgeheven. Hierdoor kon een sterke erosie optreden die alle getuigenissen van Hercynische en Kimmerische afzettingen over dit gebied deed verdwijnen. Vervolgens perste de opheffing van de Pyreneeën de vroegere zakkingszones omhoog zodat Limburg lange tijd uit het bereik van de zeetransgressies bleef. Pas op het einde van het Krijt was deze erosiefase afgelopen, met mariene carbonaatrijke afzettingen over het grootste deel van België.

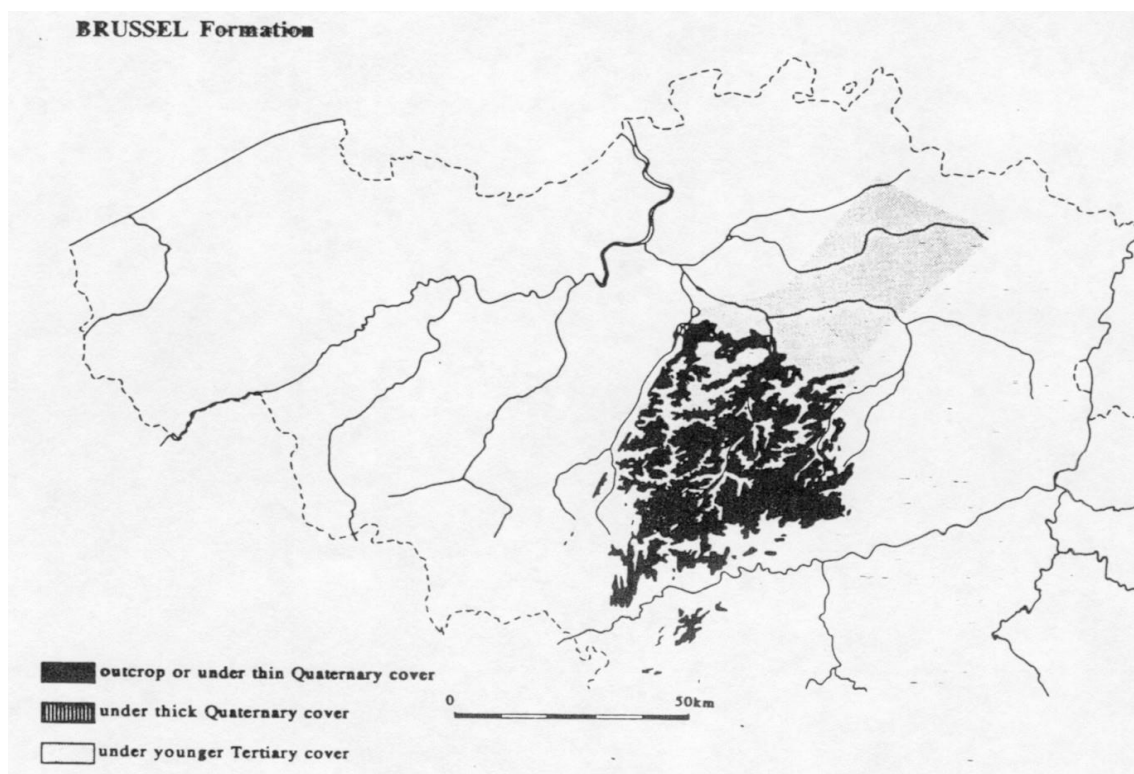
De nieuwe geschiedenis of de Atlantische cyclus: een relatief kalme periode (Krijt - Cenozoïcum)

Het uit elkaar vallen van Pangea ging gepaard met een wereldwijde stijging van het zeepeil dat een hoogste stand bereikte tijdens het Krijt. Carbonaatafzettingen zijn opnieuw toonaangevend tijdens deze fase; de krijtlagen danken hun ontstaan aan massale algenbloei ieder voorjaar. Overal in België werden krijt- en vuursteenlagen afgezet. Zelfs op de Hoge Venen zijn sporen van de Krijttransgressie terug te

vinden. In Noord België zijn de Krijtafzettingen wel bewaard, maar enkel ontsloten in zuid-oost Limburg (Haspengouws plateau) en de Voerstreek.

Terwijl in het westen de Atlantische Oceaan verder openging en het Noordzeebekken verdiepte, werd de noordrand van de Afrikaanse plaat tegen Europa aangeschoven. Hierdoor werd Zuid Europa toegevoegd, met aldaar een nieuwe bergvorming. De relatief jonge en nog niet door erosie opgeruimde bergketens markeren de contactzone tussen het 'oude' en het 'nieuwe' Europa: Pyreneeën, Alpen, Karpaten. Het middeneuropese voorland werd mee opgeheven waardoor de noordelijke en zuidelijke zeebekkens van elkaar gescheiden werden. Tijdens het Cenozoïcum (beter bekend als Tertiair en Quartair) werd het Noordzeebekken gevuld met steeds koeler wordend water en massieve carbonaatafzettingen bleven achterwege. De vorming van een ijskap op de polen heeft dan weer het zeepeil schoksgewijs doen dalen in het Tertiair, waarvan de afzettingen in België te danken zijn aan een reeks van Noordzeetransgressies in zuidelijke richting.

Het Cenozoïsche Noordzeebekken werd gevuld met detrietische sedimenten (zand - klei), voornamelijk geleverd door erosie van de Schotse Hooglanden, en terug te vinden in Noord België. Naar het zuiden toe waren de afzettingen dunner en de erosie sterker. Kleine zeespiegelschommelingen als gevolg van variaties in de snelheid waarmee de Atlantische Oceaan openging hadden grote invloed op de rand van het Noordzeebekken, en uitten zich onder de vorm van opeenvolgende transgressies en regressies. Op het hoogtepunt van de belangrijkste transgressies, waardoor de kustlijn ver naar het zuiden verschoof, werden in Noord België dikke kleipakketten afgezet: de Klei van Ieper en de Klei van Boom. Andere transgressies verschoven de kustlijn in mindere mate, waarbij overwegend zand werd afgezet op toenmalige zandbanken (zeer hoge energie en grof), stranden (hoge energie, minder grof, met schelpen) en baaien (lage energie en fijn). De transgressies drongen mettertijd minder ver door naar het zuiden omdat het zeepeil een algemeen dalende trend vertoonde door de uitbreiding van het landijs, en omdat Zuid België geleidelijk werd opgeheven, waar dit in het vroege Tertiair even vlak was afgesleten als Noord België. Om deze redenen dagzomen de Tertiaire afzettingen op een gegradieerde wijze: van oud naar jong verschuift de dagzoom in noordelijke richting. De Slenk van Roermond beleefde meerdere pulsen van versnelde zakking. Dikke pakketten met riviersedimenten van Maas en Rijn, hoofdzakelijk zand en grind, afgewisseld met bruinkool, werden in het noordoosten van Limburg afgezet.



De recente geschiedenis van België: landschapsvorming onder invloed van de ijstijden (Quartair)

Een verheviging van de koudeperiode tijdens de laatste 2,5 miljoen jaar, overeenkomend met het Quartair, luidde de ijstijden in. Tijdens de allerkoudste fasen van de ijstijd, wanneer ook een ijskap werd gevormd over Noord Europa en Noord Amerika (paradoxaal genoeg bleven Siberië en Alaska ijsvrij) stond het zeepeil ruim 200 meter lager dan op dit ogenblik. Het cyclisch bevroren en ontdooien van deze gebieden leidde tot een opeenvolging van glacialen en interglacialen. Op dit ogenblik bevinden wij ons in een interglaciaal, maar het leidt weinig twijfel dat nieuwe glacialen verwacht kunnen worden.

Het ontstaan van de ijstijden en de klimaatsevolutie in het algemeen is het complexe gevolg van een reeks factoren, astronomische (periodische variaties in de afstand van de aarde tot de zon, in de helling van de aardas t.o.v. de omwentelingsas rond de zon, en de precessie of tolvormige beweging van de aardas) en terrestrische (hoeveelheid broeikasgassen waaronder vooral CO₂, verandering in albedo van het aardoppervlak of terugstraalintensiteit van de zonnewarmte - bijv. door aangroei of inkrimping van de naaldwouden op noordelijke breedtegraad, toename of afname in warmtetransferten tussen pool en evenaar door veranderingen in het circulatiepatroon van het oceaanwater - bijv. activeren of stilleggen van de Golfstroom - en van de wind - bijv. versterking van het Centraalaziatische hogedrukgebied door de versnelde opheffing van het Tibetaans hoogland).

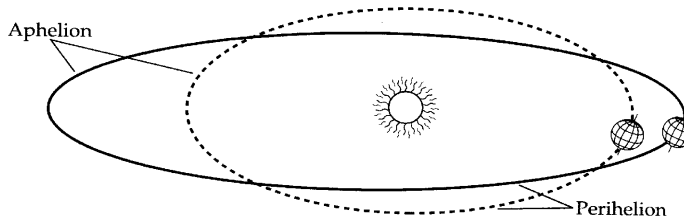
De belangrijkste factor in het ontstaan van extreem koude periodes zou de helling van de aardas t.o.v. de invallende zonnestralen zijn: bij sterk afgekeerde helling zal een halfmond veel minder zonne-energie opvangen en 's zomers onvoldoende opwarmen om de winterse afkoeling te compenseren, waardoor de sneeuw steeds langer blijft liggen. Hierdoor gaat het albedo verder stijgen en ontstaat een positieve terugkoppeling.

Op dit ogenblik houden de astronomische factoren elkaar in evenwicht, zodat temperatuursevoluties veel sterker afhankelijk worden van randfactoren zoals het CO₂ gehalte van de atmosfeer. Een verdere stijging zou tot versnelde afsmelting van het Groenlandijs kunnen leiden, die mogelijk al over enkele honderden jaren zou inzetten en op enkele duizenden jaren voltooid zijn (om de ijskap op te bouwen zijn daarentegen vele honderdduizenden jaren nodig, zodat de temperatuursevolutie asymmetrisch verloopt: een langzame daling tegenover een snelle stijging).

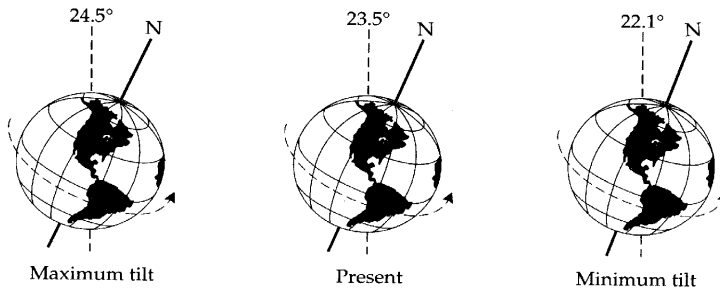
Op langere termijn (op schaal van duizend jaren) evolueren wij opnieuw naar een ijstijd. Menselijke beïnvloeding van het broeikaseffect kan deze evolutie niet tegenhouden, maar wel aanzienlijk vertragen. Intussen (op schaal van 100 jaar) blijft de temperatuur verder stijgen. Deze stijging is trouwens reeds ingezet rond 1850, het einde van de z.g. 'kleine ijstijd', een merkelijk koudere periode van ca. 3 eeuwen, die het einde van de Middeleeuwen heeft ingeluid, en die zeer goed geïllustreerd wordt door de winterlandschappen van Breughel.

Brown & Lomolino, 1998.

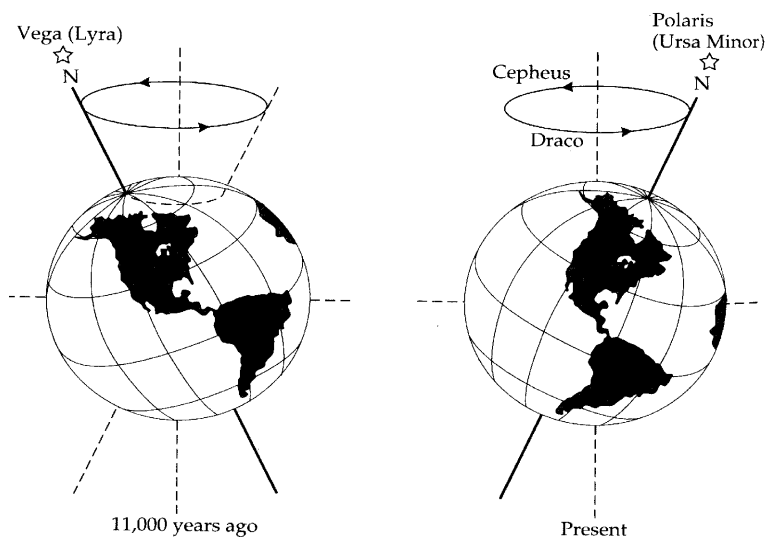
(A) Eccentricity (ellipticity of orbit)
Cyclic period = 100,000



(B) Obliquity (orbit tilt)
Cyclic period = 41,000



(C) Precession (pole wandering)
Cyclic period = 22,000



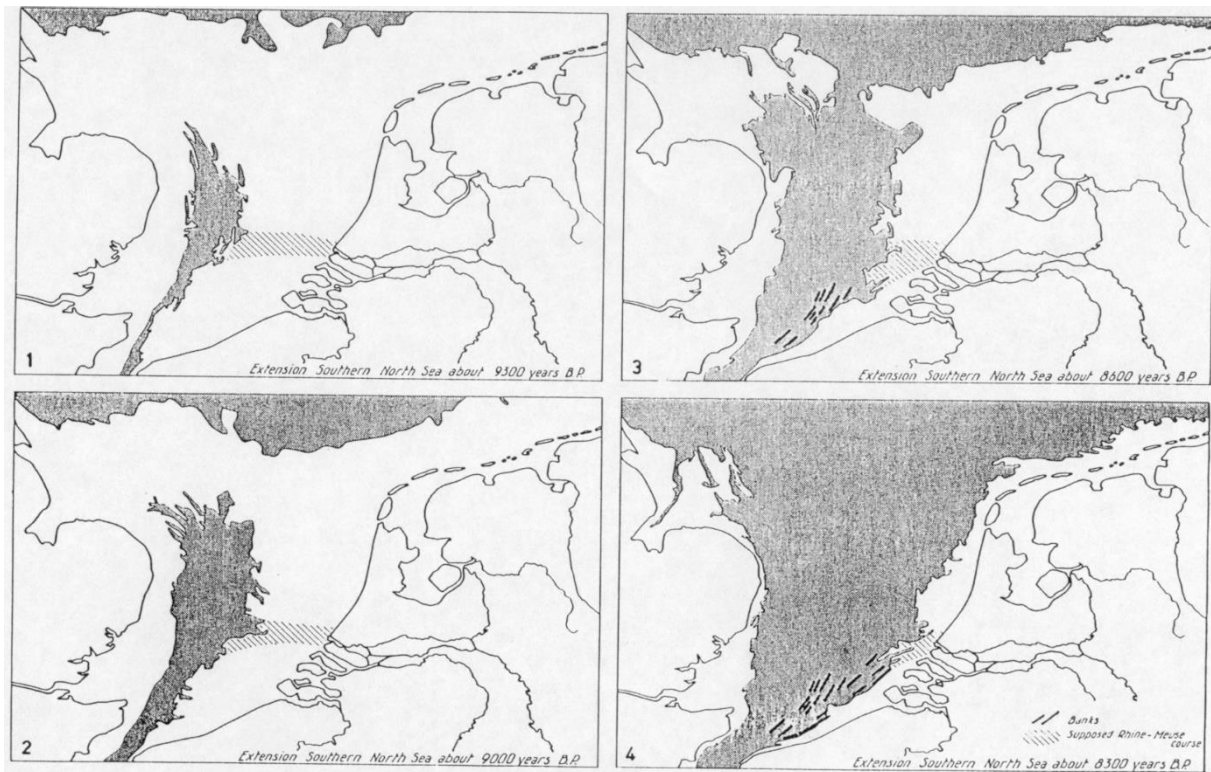
Milankovitch cycli zijn periodische veranderingen in de eccentriciteit, as-scheefstelling of obliquity en tolbeweging of precessie in de aardomwenteling rond de zon. Iedere wijziging verandert de ontvangst van zonne-energie op ieder punt van de aarde, met periodiciteiten die variëren van 110.000, 40.000 en 22.000 jaar.

Deze cycli zijn verantwoordelijk voor de ijstijden, die vooral te wijten zijn aan verlenging van het winterseizoen en verhoogde albedo (meer sneeuwval die steeds langer blijft liggen).

Vermits astronomische veranderlijken goed gemodelleerd kunnen worden is nu reeds duidelijk dat wij op een nieuwe ijstijd afstevenen, met inzet binnen 5000 jaar en koude-minimum over 50.000 jaar.

(uit Brown & Lomolino, 1998.)

Sinds het latere Tertiair ging de Noordzeebekkenvorming in versneld tempo door. Transgressies over het zuidelijk randgebied ten gevolge van zeespiegelstijgingen vonden echter niet meer plaats, aangezien steeds meer water in de vorm van ijs werd opgeslagen zodat er een daling van het algemene zeepeil optrad. De zakking van de Slenk van Roermond loopt nog verder door, getuige hiervan de aardbevingen waarmee dit proces gepaard gaat. Dikke pakketten met riviersedimenten van Maas en Rijn, hoofdzakelijk zand en grind, afgewisseld met bruinkool, werden in de Limburgse Kempen afgezet ten gevolge van de sterke zakking van de Rijnslenk - Slenk van Roermond. De breuksteilranden bij Bree-Opitter, Bergerven, Grote Brogel, Reppel, Bocholt en Hamont zijn te wijten aan aardbevingen die weliswaar duizenden jaren geleden zijn gebeurd, maar geologisch nog voldoende recent zijn opdat hun sporen in het landschap niet gewist zijn.



Onderwaterlopen van de zuidelijke Noordzee en doorbraak van het Nauw van Kales na de laatste ijstijd, model voor de zondvloedverhalen die in de mythes van alle kust nabije volkeren bekend zijn. (Nederlandse Geologische Dienst)

Een epirogenetische scharnierbeweging volgens een as die loopt van Maastricht over Brussel naar Cap Blanc Nez is verantwoordelijk voor een verschillende landschappelijke evolutie tussen Laag, Midden en Hoog België: Laag België zakt mee met het Noordzeebekken, Midden en vooral Hoog België wordt opgeheven. Het vulkanisme van de Eifel zowat 300 à 400.000 jaar geleden ging gepaard met een sterke, thermisch gestuwde opwelling van Ardennen en Eifel, waardoor de Ardeense rivieren zich weer dieper konden insnijden en de steile pittoreske dalen gevormd werden. Een rivierpatroon kon zich ontwikkelen op het Midden Belgische hinterland. Alle rivieren stroomden van zuid naar noord, meer precies van zuid-zuid-west naar noord-noord-oost, van het opgeheven gebied naar de rand van de zee. De bovenloop van verschillende rivieren in Midden België getuigt hier nog van: vanaf IJzer, Leie, Schelde, Dender, Zenne, Dijle tot Gete en Demer. De benedenloop van al deze rivieren werd gedraineerd door de 'Vlaamse Vallei' recht naar de Noordzee toe, in de richting van het Zwin.

Door de opheffing van Midden en Hoog België werd de basis voor het huidige landschap gelegd. Dit was veel meer geaccidenteerd dan het huidige landschap en had door sterke ravinatie het uitzicht van "badlands". De rivieren sneden zich fors in en stroomden over een keibedding. Tegelijkertijd werd een loessdek afgezet op de interfluvia. Op het einde van de laatste ijstijd (ca. 15.000 jaar geleden) onder een voldoende droog klimaat, werd het fossiele draineringspatroon bedolven en op inactief gesteld.

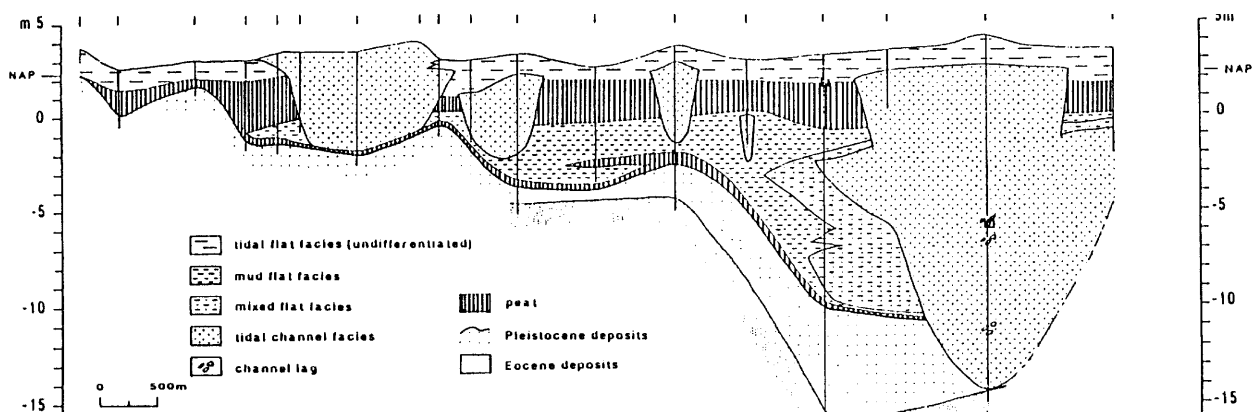
De aanwezigheid van dekzand en leem is te wijten aan de ijstijden. Gedurende de laatste ijstijd (ca. 70.000 tot 15.000 jaar geleden) werden vanuit de drooggevalen Noordzeevlakte grote hoeveelheden zand en stof opgewaaid en als een dekmantel over de zuidelijke gebieden uitgespreid. Het zwaardere zand dat door saltatie werd verwaaid, bleef achter in Laag België. Het vormt er de dekzandlaag, die lokaal tot landduinen opgestapeld kan zijn. Het fijnere stof of "loess" werd door de wind over honderden kilometers zuidwaarts vervoerd en bedekte ook het landschap van Midden België. Het onderscheid tussen Kempen en Haspengouw werd hierdoor nog eens bevestigd.

Door bodemprocessen werd de loess geleidelijk ontkalkt en omgevormd tot leem. In dikkere leemdekken blijft desondanks nog een kalkrijke kern bewaard. Leem kan gemakkelijk herkend worden door het tussen de vingers fijn te wrijven tot een poeder waarvan de individuele korrels niet meer voelbaar zijn: leem bestaat voornamelijk uit silt (fractie 5 - 60 μ) en verspoelt gemakkelijk.

Vanaf het einde van de laatste ijstijd, vlak voor het begin van het Holocene (ca. 12.000 jaar) werd een nieuw vegetatiekleed gevormd. De rivierinsnijding liep ten einde en metersdikke veenlagen werden opgebouwd in de dalen. Regenerosie reactiveerde gedeeltelijk het vroegere draineringspatroon vanaf ca. 7000 jaar geleden. Verspoelde leem verstikte de venen en vulde de rivierdalen op. Dit patroon werd nog versneld door de ontbossingen waarmee de menselijke beïnvloeding van het landschap definitief een aanvang nam, vanaf ca. 6000 jaar geleden (eerste landbouwers). De ontbossing bereikte een eerste piek tijdens de Galloromeinse periode (tweede eeuw n.C.) en een tweede piek tijdens de Middeleeuwen (elfde - dertiende eeuw). Erosie van landbouwgronden en onbeschermde hellingen leidde tot overstromingen met accumulatie van zand en slib in de dalen die meerdere meters werden opgehoogd (vandaar ook dat vroegere stadsresten zo diep liggen, zoals bijvoorbeeld kan afgeleid worden uit de neerwaartse trappen tot de kerkvloer terwijl deze tijdens de bouw nog verheven was boven de omgeving). Helaas hebben moderne praktijken in landbeheer hetzelfde effect, denk maar aan de beslikte straten en verstopte riolering na een hevige regenval.

Ook het regime van de rivieren is door de klimaatsevolutie en het wisselende landgebruik beïnvloed. Voor de ontbossingen waren de rivieren helder en snelstromend, gekenmerkt door een regelmatig debiet (bronvoeding en vertraging van de afvloeit van regenwater door het plantenkleed). Na de ontbossingen werden de rivieren troebel door de lading aan suspensiemateriaal en traagstromend door de ontwikkeling van meanders. Hun debiet werd gekenmerkt door piekdebieten met overstromingen en de opbouw van oeverwallen tot gevolg.

Vermits de meeste historische woonkernen in of aan de rand van de alluviale vlakten zijn geconcentreerd is het van groot belang met de opbouw van die alluviale vlakten rekening te houden. De meeste afzettingen zijn dun en kennen een onregelmatige verbreiding ten gevolge van het grillig verloop van de rivierbeddingen. Zij zijn geologisch gesproken erg recent en weinig geconsolideerd, met stabiliteitsproblemen voor gevolg. Grote bouwwallen waar bemaling wordt toegepast hebben soms een onomkeerbare inklinking van het veen veroorzaakt door dit lokaal droog te zuigen: dit fenomeen is mede verantwoordelijk voor de onstabiele toestand waarin oudere gebouwen in die omgeving zijn terechtgekomen.



Doorsnede door de Holocene opvulling van de Belgische kustvlakte (sinds 8500 jaar) met afwisseling tussen veen- en kleilagen, op verschillende tijdstippen ingesneden door getijdengeulen. Hierdoor ontstaan verschillen in de waterhuishouding (aanvulling met zoet water in de zandge vulde geulen tegenover blijvende verzilting van kleien en veen) en in de bodemstabiliteit (inklinking van de bodem door compactie van veen en slappe kleien) (Baeteman, 1993).

GEODIVERSITEIT OP VERPLAATSING : HISTORISCHE GEBOUWEN ALS GEOLOGISCH ERFGOED

Geodiversiteit in beeld gebracht

Geodiversiteit is een totaalbegrip dat de globale verscheidenheid omvat van geologische (substraat), geomorfologische (landschappen) en bodemkundige kenmerken. Geodiversiteit draagt informatie over de evolutie van de aarde (fossielen, vroegere milieus, continentendrift...) en is het resultaat van huidige of vroegere biologische, hydrologische, atmosferische processen of van de interne dynamiek van de aarde (bodembewegingen, gesteentevervorming, vulkanisme...). Geodiversiteit verschaft de natuurlijke grondstoffen en de afgeleide kunstmatige bouwstoffen waarzonder omzeggens geen enkel gebouw of gebruiksvoorwerp kan worden gemaakt. Geoconservatie behelst bescherming, conservering en behoud van geodiversiteit. Het begrip geodiversiteit is een doorslag van het in woord en gedachten reeds diep verankerde begrip biodiversiteit. Zonder ondersteunende geodiversiteit zou overigens de grote rijkdom aan landschappen en biodiversiteit niet mogelijk zijn. Dit verband werd reeds in vorige nummers aangetoond voor enkele biodiversiteitsanomalieën.

Omgekeerd kan de biosfeer ook zijn weerslag hebben op de geodiversiteit. Zo worden in onze streken twee bouwstenen teruggevonden die als levende steen ontstaan, het ijzeroer dat zich vormt door bacteriële neerslag in de grondwaterspiegel van de immer vochtige Kempische valleibodems, en de kalktuf die neerslaat door toedoen van blauwgroenwieren in kalkrijke kwelwaters. Het zijn de overigens meest bescheiden levensvormen die tot deze gesteentevormende prestaties in staat zijn. Anderzijds zijn er ook stenen vol fossiele levensvormen, zoals de talrijke kalkstenen opgebouwd uit skeletdeeltjes van organismen (bijvoorbeeld de crinoidenstengellidjes die de blauwe hardsteen ‘petit granit’ zijn naam hebben geschonken) of kan men soms fraaie fossielen of zelfs een versteende zeebodem tegenkomen in allerlei sedimentaire gesteenten (bijvoorbeeld de 10 cm grote zeeëgelschalen in Maastrichtersteen of de fraaie koraalkolonies in Devoenkalksteen).

Alhoewel geodiversiteit in ieder gebied aanwezig is blijkt dit niet overal even zichtbaar en zijn de natuurlijke processen erg geschonden door de wijze waarop de mens de omgeving naar zijn hand heeft gezet. Dit geldt inzonderheid voor het reeds eeuwenlang dicht bevolkte Vlaanderen met zijn nijvere bevolking en intensieve landbouw. Het cultuurlandschap komt in de plaats van het natuurlandschap maar betreft er toch zijn primaire grondstoffen uit. Waar de courante bouwgrondstoffen (baksteen, cement, beton, staal, glas...) het resultaat zijn van industriële transformatieprocessen, is er één categorie van bouwproducten die zijn natuurlijke oorsprong volledig heeft behouden, namelijk de natuursteen. Het gebouw is een uitgelezen plaats voor waarneming en studie van deze steensoorten. De plaats van herkomst van natuursteen is doorgaans niet beschermd. Tijdens de exploitatie zijn deze plaatsen moeilijk toegankelijk, daarenboven vuil van modder of stof. Na stopzetting van de steenwinning worden verlaten groeves als stort gebruikt en/of verdwijnen ze onder de vegetatie of onder de stadsuitbreiding. Informatie gaat verloren; zelfs de ligging van de groeves of kennis over de erin ontgonnen producten geraken in vergetelheid. Uiteindelijk blijken natuurstenen in gebouwen vaak de enige overgebleven verwijzing naar de oorspronkelijke geodiversiteit en de enige getuigenis van de vaak ingenieuze wijze waarop de mens van geodiversiteit heeft gebruik gemaakt. Het monument opgebouwd uit natuursteen vervangt aldus de natuurlijke geodiversiteit. Een bezoek aan het monument wordt dan een bezoek aan een virtuele steengroeve, waarin sedimentaire structuren, mineralen en fossielen zelfs beter tot hun recht komen als gevolg van de soms eeuwenlange blootstelling aan weer en wind (door selectieve of differentiële verwerking). Zo blijft de natuurvernietigende stad nog herinneren aan het landschap waarzonder die stad geen vorm had kunnen krijgen.

Natuursteen definitie

Natuursteen is elk steen die geschikt is als bouw materiaal en gevormd is door natuurlijke processen, dit in tegenstelling tot kunstmatige steen of ‘kunststeen’ (zoals baksteen of betonblokken) die gevormd wordt door de mens (bakken van klei of door geïnduceerde hydraulische processen). Natuursteen komt voor als natuurlijke rotsformaties of steenbanken die aan de dag treden of ondergronds ontgonnen worden. Hij wordt al dan niet na mechanische bewerking, in zijn natuurlijke samenstelling toegepast.

Natuursteen is dus een product van de natuur, ontstaan in een dynamisch ecosysteem of uit een oprijzend magma, ‘gegroeid’ tijdens steenvormingsprocessen die duizenden tot zelfs miljoenen jaren in beslag namen, waarbij de materie onderworpen was aan alle wisselvalligheden van de natuur (zoals wijzigende temperatuur of druk, chemische concentraties, geologische bewegingen, atmosferische invloeden), die hun sporen in de steen hebben nagelaten. Onregelmatigheden in het ‘groeiproces’ (of diagenese) hebben ervoor gezorgd dat de eigenschappen en het verouderingsproces van natuursteen sterk kunnen variëren. Sterkte, homogeniteit, porositeit, kleur, verwerking, enz. zijn veel minder voorspelbaar dan bij kunststeen. Die werd immers door de mens zelf gefabriceerd met materialen waarvan de eigenschappen vooraf gekend zijn en volgens controleerbare productieprocessen, die steeds tot hetzelfde resultaat leiden. Natuursteen daarentegen kan voor heel wat ‘verrassingen’ zorgen; ogenschijnlijk dezelfde gesteenten reageren soms erg verschillend.

Natuursteen als stedelijk spoor

Historische steden vormen waardevolle sporen van stadsontwikkeling en cultuur. De integriteit van het historisch gegroeid stadsweefsel staat garant voor de blijvende leefbaarheid van de stadskernen, die niet louter bestaan uit beschermde monumenten of iconische gebouwen maar evengoed uit meer bescheiden vernaculaire architectuur. Alhoewel aan- of afwezigheid van natuursteen in de appreciatie van de historische stad geen hoofdrol speelt kan het toch worden aangewend als ‘proxy’ voor de authenticiteit van het bebouwd patrimonium en voor de wijze waarop met dit erfgoed wordt omgesprongen.

Natuursteen verwijst immers impliciet naar het bouwen en verbouwen en expliciet naar de mogelijkheden en interesses van bouwmeester en/of bouwheer. Wegens hun duurzaamheid vormen ze van de meest conservatieve elementen in de gevelopbouw zodat ze betrouwbaarder getuigen zijn van het bouw- en afbraakproces. Kleur en vormgeving van natuursteen dragen bij tot de visuele waarneming van de stad. Maar “elke steensoort heeft tevens haar eigen hardheid, haar eigen warmte, haar eigen bewerkingswijze” (Mellaerts et al., 2007). Herkenning van natuurstenen is een contact met de natuur, de steengroeve, de bouw, en ook de vergankelijkheid van materialen, kortom een belangrijke bladzijde in het verhaal van gebouw en stad.

Natuursteenherkenning is er niet alleen voor de geoloog maar draagt ook bij tot de opwaardering van de gebouwde omgeving door:

- onder de aandacht brengen van natuursteenpatrimonium als onderdeel van het architecturaal erfgoed en zo bekomen dat de culturele identiteit, aandachtspunt wordt voor conservering
- nagaan in hoeverre de natuursteen in het Leuvens straatbeeld bijdraagt tot de waardering van de gebouwen en zo indirect tot de identiteit
- vaststellen van problemen betreffende conservering en zo van de zwakke punten van het erfgoedbeleid

- nagaan welke effecten stedenbouwkundige ingrepen of zelfs acties tot behoud van het architecturaal erfgoed kunnen hebben op het bestaande natuursteenpatrimonium.

In iedere bouwstijl of bouwperiode heeft er variatie bestaan tussen de door natuursteenelementen opgesmukte burgerwoningen en de eenvoudige ‘vernaculaire’ arbeiderswoningen waarvan het universeel en daardoor tijdloos bouwplan datering bemoeilijkt. Maar er is wel een verminderde impact van natuursteen in het straatbeeld doorheen de tijd, zeker voor zover het individuele woningbouw betreft. Ook bij talrijke renovaties van bestaande gebouwen is natuursteen verdwenen. Dit komt uiteraard door de ruimere beschikbaarheid van diverse andere bouwmaterialen maar ook door de beperkte affiniteit van de hedendaagse architect met natuurproducten. De geest van het inherent natuurvijandig modernisme heeft een diepgaande impact op de vorming van de architecten. Er lijkt echter een kentering te komen. Natuursteen gevelplaten zijn aandachtstrekkers en zijn daarom in trek bij commerciële panden. Gevelplaten in Blauwe Hardsteen geven een meer verstilde indruk en zijn meer gegeerd bij renovatieprojecten gericht op bewoning (Foto xxx). Het is nog zoeken naar een vormgeving die kwaliteit uitstraalt en het straatbeeld verlevendigt

De bouwgeschiedenis, opbouw en evolutie van de natuursteen-geodiversiteit in Vlaanderen

In tegenstelling tot Wallonië is Vlaanderen niet op steen gebouwd. Klei en zand kenmerken de Vlaamse ondergrond (in de betekenis van de aardlagen die onder de eigenlijke bodem liggen, de humusrijke laag waarin de planten wortelen en waarin het grootste deel van de neerslag en de nutriënten worden gerecycleerd). Vandaar ook dat de nochtans actieve natuursteensector in Vlaanderen steunt op wereldwijde import, naast traditionele maar tanende aanlevering uit Wallonië. De meeste natuursteen die nu in het straatbeeld verschijnt komt uit China en India, sierstenen komen ook uit Brazilië en Zuid-Afrika. Het oogt allemaal heel divers maar is tegelijk banaliserend, want dezelfde steensoorten worden nu over de gehele wereld teruggevonden. En er is weinig kans dat deze stenen exoten ooit teruggedrongen zullen worden. Deze situatie is pas rond 1950 ontstaan. Tot dan bestond er een regionaal verband tussen steengebruik en herkomst, dat zeer lange tijd standgehouden heeft: nog tijdens de industriële revolutie bleef de natuursteen komen uit dezelfde regio's waaruit reeds de Romeinen hun stenen betrokken in de eerste eeuwen na Christus.

Toch zijn er verschillende trends vast te stellen. De geologische kaart verduidelijkt reeds waar welke steensoorten te verwachten zijn. De meest opvallende trend is de afname van natuursteendiversiteit van zuid naar noord, van steenrijke naar steenarme streken. Hierbij kan worden vastgesteld dat de grootste variabiliteit en dus ook geodiversiteit voorkomt in de onmiddellijke omgeving van het herkomstgebied van de steensoort. Hoe verder van het herkomstgebied, hoe meer de export beperkt bleef tot uniforme massaproductie van de meest commerciële steensoorten. Zo zal een arme dorpskerk meer lokaal materiaal van lagere kwaliteit of lager prestige maar hogere geodiversiteit vertonen dan een rijke abdijkerk die zich het beste en duurste materiaal kon veroorloven, en daardoor minder streekgebonden was in zijn steengebruik.

Een tweede trend is dat hierbij oost-westverschuivingen optreden. Vergelijkbare veelgebruikte steensoorten hadden hun eigen territorium: zo is er bijvoorbeeld geen overlapping tussen de Limburgse Maastrichtersteen en de Vlaams-Brabantse Ledestein bij de witstenen, of tussen Doornikse kalksteen en Maaskalksteen bij de blauwe hardstenen. Een vaststelling hierbij is dat onze voorgangers hun bodem zeer goed kenden en er zeer inventief mee omsprongen. Het aantal steensoorten weergevonden in Limburgse monumenten kwam uit op 35; voor geheel Vlaanderen is dit verdubbeld tot 70 waarvan een dertigtal effectief in de Vlaamse ondergrond voorkomen. Vergelijking tussen de uit boringen en ontsluitingen bekende versteningen en de aangewende natuursteen toont aan dat alle in de

Vlaamse ondergrond voorkomende steenlagen ook als natuursteen werden gebruikt. Waar dit voor sommige steensoorten zeer anekdotisch was en beperkt bleef tot enkele gebouwen rond de vindplaats (bijvoorbeeld Potamideskwartsiet) hadden ruimer voorhanden en kwalitatief meer geschikte steensoorten meer succes (bijvoorbeeld de Maastrichtersteen die vanuit het Mergelland werd ingezet over bijna geheel Limburg tot aan een lijn Halen – Tessenderlo – Achel, maar daartegenover zuidwaarts de regiogrens overschreed tot in Namen en noordwaarts tot in Utrecht).

Een derde trend is het verschuivend gebruik in de tijd. Zo is er de overgang van het gebruik van zware steensoorten (gedomineerd door zandstenen, maar ook de onzuivere Doornikse kalksteen langs de Schelde omvattend), kenmerkend voor de Romaanse en vroeggotische bouwkunst, naar een explosie van zachte kalksteen of witsteen die toeliet om de ranke gotische monumenten op te richten (bijvoorbeeld de basiliek van Tongeren integraal in Maastrichtersteen opgetrokken). Zelfs gebieden die aan de lokale zandsteen trouw bleven, zoals het Hageland, thuisland voor de Diestiaanse ijzerzandsteen, zien een verschuiving in gebruik van harde maar onregelmatige ijzerschollen naar goed bewerkbare en in grotere formaten beschikbare grauwe schollen, die nu dikwijls minder duurzame blijken te zijn. Vanaf de renaissance duiken de blauwe hardstenen weer op, doorgaans in combinatie met de witsteen, zoals in de Maaslandse renaissance. In de 19de eeuw wordt de traditionele witsteen vervangen door Gobertangesteent en ingevoerde steensoorten zoals de Luxemburgse zandsteen, Euvillesteen en Savonnières. Opvallend is dat deze laatste steen sinds de galloromeinse tijd in onbruik was geraakt en pas massaal terug opdook vanaf het einde van de 19de eeuw. Globaal genomen kan men toch een trend vaststellen van afnemende geodiversiteit, door overgang van de meest diverse lokale materialen naar minder maar kwalitatief betere steensoorten.

De modernisering doorgevoerd tijdens het interbellum uit zich door beton en (gebakken of gegoten) kunststeen. Dezelfde natuur- en kunststeensoorten blijven in gebruik, tot in de 60er jaren van de 20ste eeuw. Voorkeur voor afwerking met natuursteen of kunststeen is onvoorspelbaar, onafhankelijk van bouwstijl of architect. Daarenboven is het voor een niet geoefend oog niet eenvoudig om het onderscheid te maken tussen natuursteen en kunststeen. Behoud en restauratie van deze laatste categorie zal voor grotere problemen zorgen dan al voor de natuursteen het geval is. De omschakeling op plaatvormige bekledingen, typisch van toepassing op flatgebouwen van de 60er en 70er jaren van de 20ste eeuw werd aanzien als een keerpunt in natuursteengebruik. Het is echter opmerkelijk hoeveel van deze vroege gebouwen nog zijn aangekleed met contrasterende soorten natuursteen. Deze gebouwen genieten weinig waardering en ook de natuursteen wordt niet onderhouden. Het echte keerpunt doet zich pas voor in de 80er jaren met het algeheel verdwijnen van natuursteen. Pas in de recente postmoderne constructies doet natuursteen een schuchtere herintrede met een revival van de blauwe hardsteen, symbool voor het streven naar authenticiteit en duurzaamheid.

Een laatste trend, ten slotte, is sociologisch: hoe rijker de opdrachtgever, hoe rijkelijker de toepassing van natuursteen. Dit gaat gepaard met een voorkeur voor meer prestigieuze bouwmaterialen, zowel gebaseerd op bouwtechnische kwaliteit ervan, hun homogeniteit en lange aanvoerroute. Zo wordt in het 19^{de} eeuwse Leuven de Gobertangesteent de steen van de kleine man, terwijl de bourgeoisie op Franse steen overschakelt. Ongetwijfeld was dit zo omdat de lokale bouwsteen goedkoper was dan de ingevoerde Franse steen; het kan verkeren! Een neveneffect is dat de vernaculaire, vooral landelijke bebouwing een grotere diversiteit aan lokale bouwstenen weliswaar van diverse kwaliteit of maatvoering vertoont dan prestigegebouwen die enkel in een beperkte selectie van eersteklas natuurstenen zijn uitgevoerd.

In weerwil van de verschuivingen in het natuursteengebruik, afhankelijk van beschikbaarheid of mode, blijft toch een goed beeld bestaan van het vroegere gebruik. Niet alles gaat verloren bij de ononderbroken reeks renovaties, verwoestingen en heropbouw. Waar in vroeger tijden recyclage uit noodzaak gebeurde - aanvoer van nieuwe steen was immers kostbaar - werden vanaf de 19de eeuw getuigenissen van vroegere bouwfasen uit respect voor authenticiteit intentioneel voor het nageslacht bewaard, zij het vaak onder de vorm van beperkte natuursteenvlakken. Recyclage resulteert

uiteindelijk in lappendeken- of patchwork monumenten. De beste voorbeelden zijn terug te vinden in deelgemeenten van Borgloon en Kortesse in Vochtig Haspengouw. Het sprekendste voorbeeld is de opgraving van een Romeinse stadswal toren naast het Kapittelgebouw met kloosteromgang aan de O.L.Vrouwebasiliek van Tongeren: hier fungeerden de Galloromeinse ruïnes als steengroeven.

Natuursteen-geodiversiteit als geotoeristische trekpleister

De relatie tussen natuursteen in het gebouw en het omgevende landschap als brongebied voor het materiaal of zijn transport blijft het duidelijkst in gebieden met veel landschappelijk schoon. Zo zal Jan Modaal snel het verband leggen tussen Maastrichtersteen, mergelgroeven en het Mergelland. Het Regionaal Landschap Noord-Hageland promoot behoud en (h)erkenning van ijzerzandsteengroeven. Zo wordt ook de band tussen de Maaskeien en de Maasterrassen hersteld door de geologische rotstun van de Kikbeekgroeve, de nieuwe Keienkaart voor het Nationaal Park Hoge Kempen en het Stenenpad van Kattevennen bij Genk. Uiteindelijk kan de combinatie van een dominerende witsteen met ondergeschikte zandstenen of andere meer zeldzame steensoorten het bouwkundig erfgoed typeren en resulteren in typische natuursteenlandschappen.

Natuurstenen geven vorm en kleur aan ons bouwkundig patrimonium en dragen zo bij tot de uitstraling van onze historische steden, bij bezoekers en bewoners. Daarenboven is natuursteen in Vlaanderen de meest herkenbare bron van geodiversiteit. Net als biodiversiteit is die kwetsbaar voor het verdwijnen, zelfs uitsterven van zeldzame steensoorten met beperkt areaal, of verdringing door exoten. Inventarisatie van het bestaande geo-erfgoed is de eerste vereiste voor behoud. De erkenning van zijn natuurhistorische naast cultuurhistorische waarde is een tweede vereiste. De geotoeristische ontsluiting is een logisch gevolg. Geologische monumentenroutes, eventueel gekoppeld aan groeventochten, ondersteunen het belang van authenticiteit in het monumentenbeheer en bieden een kans op geologische ontdekking in een geurbaniseerde omgeving.

Dusar, M. & Dreesen, R., 2009. Geodiversiteit op verplaatsing. Historische gebouwen als geologisch erfgoed. Erica, Contactblad van de werkgroep Limburgse Natuurgidsen 37-2: 21-24.

Dusar, M.; De Ceukelaire, M. & Walstra, J., 2014. Natuursteengebruik als urbanisatie-indicator – stadskern Leuven. Geological Survey of Belgium Professional Paper 2014/1 N. 316: 109-145.

STREEKEIGEN NATUURSTEEN, EEN KENNISMAKING

IJzerzandsteen, erfgoedsteen van het Hageland

Het Hagelandse landschap dankt zijn eigenheid aan die heuvelruggen die zelf gekenmerkt worden door het voorkomen van ijzerzandsteen, een roestbruine steen die in alle oude monumenten van het Hageland is aangewend, zodanig dat het Hageland met ijzerzandsteen wordt geïdentificeerd. Diestiaanse ijzerzandsteen dankt sinds 1839 zijn verwijzing naar de stad Diest aan André Dumont sr, de grondlegger van de Belgische geologische tijdsschaal en kaart. Tot dan werd steevast de benaming grauwensteen gebruikt. Deze erfgoedsteen verbindt letterlijk natuur en cultuur. Het is een steensoort om te koesteren, maar problematisch om te behouden, te wijten aan zijn speciale ontstaansgeschiedenis te midden van een bodem die overigens uit zand is opgebouwd.

Dit zand bestaat uit een mengeling van grove slecht gesorteerde bleke kwarts- en donkergroene glauconietkorrels. Het is van oorsprong zeezand dat 10 miljoen jaar geleden de 'Hagelandse Golf' heeft opgevuld, een baai van een zee die toen de Kempen overspoelde. Door verlaging van het zeepeil en kanteling van het land is het Hageland sinds 7 miljoen jaar in reliëf komen te staan, waarvan de van zuid naar noord afnemende hoogte van de heuvelruggen getuigt, van 105 m bij Pellenberg tot 50 m bij Averbode.

Het opgeheven land was onderhevig aan bodemvorming. De donkergroene glauconietkorrels in het zand vallen dan uit elkaar tot elementaire kleideeltjes en oplosbare ijzer(hydr)oxiden. Die worden door insijpelend bodemwater meegevoerd tot in de grondwatertafel, waar het ijzer(hydr)oxide als limoniet neerslaat tussen de zandkorrels. Deze gemineraliseerde neerslag vormt een roestbruin cement dat de zandkorrels met elkaar verbindt en zand tot zandsteen omvormt. De ijzerzandsteenbanken vertegenwoordigen zo de verdichte inspoelingshorizonten van diepe bodems die tijdens langdurige perioden van eerder warm en vochtig klimaat tot stand kwamen. Deze bodemvormingsfase liep door tot het begin van de ijstijden ca 1-2 miljoen jaar geleden. Nu steken de ijzerzandsteenbanken ver boven de grondwatertafel uit; ze vormen dus relictten van een vroegere landschapsfase. Weliswaar gaat ijzerzandsteenvorming ook onder het huidige klimaat door, maar de jonggevormde ijzerzandstenen ontbeert het aan hardheid om als bouwsteen te worden gebruikt. Hierin zullen dus geen ontginningen gebeuren.

Tijdens de ijstijden, sinds 700.000 jaar maar dan vooral op de overgangen van een tussenijstijd naar een ijstijd, hebben de rivieren zich diep ingesneden en de zandlagen geërodeerd. De dikste ijzerzandsteenbanken boden weerstand, waardoor de Hagelandse heuvels nu van zuid naar noord 70 m tot 30 m in reliëf staan. Het zijn 'getuigenheuvels' waarvan de toppen getuigen van een vroeger bestaand oppervlak.

De combinatie van donkergespikkeld zand met ijzercement geeft aan de Hagelandse ijzerzandsteen zijn warme roestbruine kleur. Verijzering grijpt vanaf het landoppervlak in op een zandpakket dat uit hellende lagen bestaat, ontstaan als stroomribbels op de bodem van de zee, van elkaar gescheiden door onopvallende kleilaagjes. Grote variabiliteit in kleigehalte, intensiteit van het ijzercement en poriënverdeling resulteren in aanzienlijke verschillen in hardheid en duurzaamheid. De verstening kan dus onmogelijk leiden tot uitgestrekte horizontale steenbanken met homogene samenstelling.

Heterogeniteit in samenstelling en kwaliteit is een wezenlijk kenmerk van alle oppervlakkig gevormde steenbanken, dit in tegenstelling met de op grote diepte door bergvorming versteende lagen, zoals in de Ardennen, die meer homogeen en betrouwbaar van kwaliteit zijn, maar ook eentoniger van uitzicht. De sterk wisselende eigenschappen van de ijzerzandsteenbanken verlenen de monumenten opgetrokken in deze steen het patina van een oud materiaal, vergroeid met de omgeving.

Vooraf in holle wegen of oude groeves zijn ijzerzandsteenbanken nog goed waar te nemen. Alhoewel ijzerzandsteen dikwijls over een metersdik pakket voorkomt blijken bruikbare lagen toch beperkter. Onregelmatige en dunne ijzerzandsteenbanken vol ringen of banden van compacte donkerbruine metaalglanzende limoniet, uitgekristalliseerd als goethiet staan bekend als grauwe schollen. Het natuurlijk voorkomen is uitgebreid want het omvat de door vorstwerking kapot gesprongen bovenkant van de steenbanken. Omwille van de onregelmatige vorm van de verstening hadden de grauwe schollen geen commerciële waarde en zijn ze enkel lokaal gebruikt in hoevebouw, omheiningen en tuinarchitectuur; ze geven ze het bouwwerk een rustieke uitstraling.

Het meest gebruikt als bouwsteen is echter de ‘grauwe arduin’ of ‘grauwensteen’, een ijzerzandsteen met gelijkmatig limonietcement, al dan niet met ondergeschikte goethietbandjes, doorgaans niet zo hard en duurzaam, maar wel gemakkelijk verzaagbaar tot regelmatige formaten en daarom interessant voor de bouw van grote monumenten. Waar de schollen vooral op de vlakke heuveltoppen voorkomen zijn dikkere ijzerzandsteenbanken die de grauwe arduin opleveren vooral ontsloten op de steilste heuvelflanken.

De bijzonderste kenmerken van Diestiaanse ijzerzandsteen zijn de warme roestbruine kleur van het limoniet, die ongeëvenaard is, zelfs kan variëren met de lichtinval, en de sterk wisselende, soms bedenkelijke technische eigenschappen die aan datzelfde limoniet te wijten zijn. Historische natuurstenen moeten worden genomen zoals ze zijn; de mooiste ijzerzandsteen is daarom niet steeds de meest duurzame. Dat neemt niet weg dat de toestand van meerdere monumenten in Diestiaan ijzerzandsteen verontrustend is. Zelfversnellende schadeverschijnselen bij waterinfiltratie en vries-dooi werking of gewoon door langzame ‘kruip’, maar ook onachtzame omgang met nog goede stenen (bijvoorbeeld door voegen met waterdichte portlandcement in plaats van de traditionele kalkmortel of tras) maken dat veel erfgoed onherroepelijk verloren gaat, of leiden tot nogal willekeurige vervanging door andere materialen. Vermenging van steensoorten is een sluipende bedreiging voor de authenticiteit van het bestaande erfgoed. Er is nog geen eenduidig antwoord hoe en waar de beste vervangsteen te vinden en ontginnen. Zolang blijven we nog een stap achter op de vorige generaties die ons een aantal emblematische monumenten hebben nagelaten.

Vlaamse witsteen

Een groot aantal kerken en andere historische gebouwen in Vlaanderen zijn opgetrokken in witte natuursteen, in geval van traditionele en streekelijke producten gemeenzaam ‘witsteen’ genoemd, ook al vertonen ze kleurschakeringen van wit tot bruin. Aanwending van witsteen voor prestigieuze gebouwen is veralgemeend sinds de Gotiek. Witsteen is poreus, zacht en gemakkelijk bewerkbaar, nuttige eigenschappen voor kerken en kathedralen die in de hoogte met veel licht en versiering werden opgetrokken, dit in tegenstelling tot de gebouwen uit voorgaande Romaanse periode die donker en compact zijn en voornamelijk werden opgetrokken uit massieve zware kalkstenen en zandstenen.

De Vlaamse witstenen dateren uit het Eoceen tijdperk, 40 tot 50 miljoen jaar geleden. Tijdens deze periode lag Vlaanderen onder zee en werden op de zeebodem afwisselend zand- en kleilagen afgezet. In kalkrijke zandlagen werden steenbanken gevormd, die in de literatuur vaak als ‘witte zandsteen’ worden vermeld. Omwille van het hoge kalkgehalte, van 40 tot 85% zijn het eigenlijk kalkstenen, vandaar de voorkeur voor de benaming ‘witsteen’. Deze steenbanken zijn intensief ontgonnen in zandputten of ondergrondse galerijen en de reserves zijn vrijwel uitgeput. Het ontginningsproduct vormt nu de bouwsteen voor talloze monumenten in Vlaanderen, maar ook tot ver in Nederland.

De historisch belangrijkste witsteen in Vlaanderen is de Ledesteen, ook wel Lediaanse (zand)steen genoemd, Dielegemse steen of Balegemse steen enz. naar de ontginningsplaats of eigenaar van de groeve. Ledesteen is massaal gebruikt in Vlaanderen vanaf de Middeleeuwen. Oudere sporen van

gebruik zijn terug te vinden in de streek van ontginning, bijvoorbeeld een Gallo-Romeinse waterput in het Provinciaal Archeologisch Museum in Velzeke (Zottegem). Eenmaal de Gotiek voorbij is het gebruik verminderd door concurrentie met natuurstenen die van verder komen, maar het blijft een belangrijke bouwsteen tot in de 19de eeuw. Momenteel wordt de steen nog beperkt gewonnen als bijproduct van een zandwinning in Balegem (Oosterzele).

De Ledesteen is opgebouwd uit (hoofdzakelijk) fossielgruis, zandkorrels en fijne donkere glauconietkorreltjes die samen het gesteente een zandtextuur geven. De korrels zijn aan elkaar gekit door calcietcement, waardoor het oorspronkelijke kalkzand is versteend. Kenmerkend voor deze steen bij ontginning in Oost-Vlaanderen is de aanwezigheid van kleine nummulieten (reuzen-eencelligen met een kalkskelet) die op kopseldjes lijken. Ook kleine witte buisjes die getuigen van de kalkkokerworm zijn dikwijls opvallend aanwezig. De steen heeft eerder een lichtbeige kleur. Ledesteen werd ontgonnen in een brede strook van centraal Oost-Vlaanderen tot tegen Leuven. Opmerkelijk is wel dat de typische fossielen zoals die gevonden worden in Oost-Vlaanderen, eenmaal in Brabant, veel minder tot uiting komen. Afskrakken van gewonden schelpen of gastropoden komen daarentegen wel voor, maar die zijn minder opvallend in de Oost-Vlaamse variëteit.

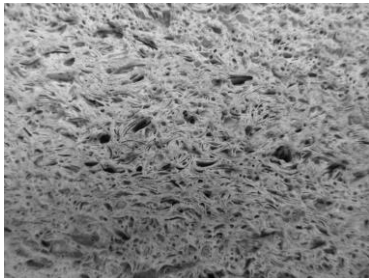
Andere witstenen zijn deze uit het Brusseliaan, een iets oudere geologische tijdsperiode dan het Lediaan waarin de Ledesteen is ontstaan. Beide komen echter overeen met het Lutetiaan, het tijdperk waarin de bouwsteen van Parijs is ontstaan. Het gezegde ‘als het in Parijs regent druppelt het in Brussel’ gaat ook op voor het geologisch substraat van beide steden. Brusseliaanse steen wordt naargelang de winningsplaats onderverdeeld in de eigenlijke Brusseliaanse steen, afkomstig uit het productiegebied tussen Zenne en Dijle, of tussen Waterloo in het zuiden en Zemst in het noorden, en de Gobertangesteent, afkomstig uit het Getebekken, genoemd naar de voornaamste winningsplaats, maar even goed ontgonnen in bijv. Hoegaarden. Deze stenen zijn bleker van kleur, verkrijgen een nagenoeg echt wit patina, en bevatten hoofdzakelijk kalk. Macrofossielen zijn zo goed als afwezig. Millimeterdunne witte kalkbandjes zijn soms zichtbaar. In de eigenlijke Brusseliaanse steen is er naast de dunne kalkbandjes weinig structuur te zien. In de Gobertangesteent is dit patroon van witte kalklaminaties onderbroken door grijs afgetekende kringen, graafgangen nagelaten door kreeftachtigen en opgevuld met glauconiethoudend zand. Dit typische patroon wordt eikenhoutstructuur genoemd.

Gebruik van de Brusseliaanse steen is eveneens opgekomen met de Gotiek in de regio Brussel – Mechelen - Antwerpen. Deze steen heeft in latere eeuwen de Ledesteen overvleugeld, ook in Oost- en West-Vlaanderen. Een aantal monumenten die oorspronkelijk volledig uit Ledesteen waren opgetrokken, zijn zo goed als volledig vervangen door Brusseliaanse steen. Gobertangesteent is in de eigen regio ook al sinds de Middeleeuwen gebruikt maar heeft mettertijd zowel de Ledesteen als de eigenlijke Brusseliaanse steen verdrongen, vooral gedurende de 19de eeuw. Vlaamse witstenen, Ledesteen in het bijzonder, hadden namelijk erg te lijden onder luchtvervuiling en zure regen, en werden vanaf de 19de tot en met de 20ste eeuw door ‘harde restauratie’ ontmanteld en vervangen door andere witstenen. Deze werden in toenemende mate ingevoerd uit Frankrijk, zodanig dat ‘Franse steen’ een inherent deel uitmaakt van het Vlaamse bouwkundige patrimonium.

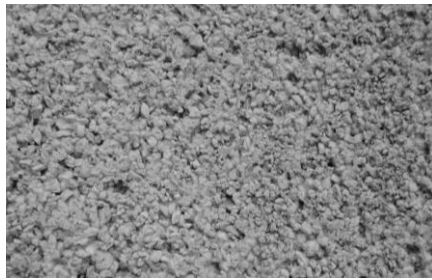
Witsteen niet steeds wat het lijkt. De bouw- en restauratiegeschiedenis is af te leiden uit de aard van de witstenen en het is soms verrassend vast te stellen dat de oorspronkelijke bouwfasen nog sporen hebben nagelaten wegens de veralgemeende recyclage van de natuursteen.

De Ceukelaire et al., 2017. De abdij van Averbode, een verhaal van steen en marmer. Norbertijnenabdij Averbode.

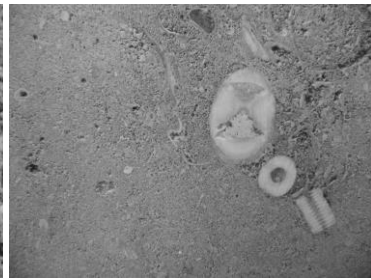
“Witstenen” uit Frankrijk - de Franse steen



Savonnières



Euville



Massangis

Franse steen is in onze streken doorgedrongen vanaf de 19de eeuw. Dit is vooral te wijten aan de opkomst van de spoorwegen, zodat afstand van de groeve tot de werf minder problematisch werd. In die periode werd het pas opgerichte België bovendien sterk beïnvloed door Frankrijk, zeker wat betreft de architectuur: de bouwstijl heeft de invoer van de Franse steen mee bepaald. De neo-stijlen vroegen immers naar grote steenformaten. In tegenstelling tot de Belgische witstenen konden de Franse kalkstenen in alle maten geleverd worden, wat hen tot een ideaal bouw materiaal bestempelde. Bovendien hadden de Vlaamse witstenen sterk geleden onder zure regen, een gevolg van de industrialisatie en steenkoolgebruik, vooral in de stadskernen. Verhoopt werd dat systematische vervanging van inheemse witsteen door Franse steen de monumenten een nieuw en/of lang leven zou bezorgen (wat niet echt bewaarheid werd). Gelukkig is de strijd tegen de zure regen in onze streken gewonnen en is de zwaveluitstoot drastisch gedaald, en daarmee ook de aantasting van de kalkrijke bouwstenen die dus hun duurzaamheid hebben herwonnen. De Franse stenen kennen een sterke opbloei tijdens de Belle Epoque, blijven de dominante witsteen tijdens het Interbellum, maar moeten steeds meer opboksen tegen nieuwe materialen, niet in het minst beton, en weerstaan aan nationalistische reflexen die de inheemse witsteen promoten. Einde 20ste eeuw is bovendien de concurrentie van andere witte natuursteen uit bijvoorbeeld Spanje en Portugal of Turkije zo groot, dat de Franse steen op zijn beurt is weggedrongen. De ingevoerde natuursteen uit Frankrijk kan fungeren als een tijdsindicator in de bouwgeschiedenis, hoewel een complexe want Frankrijk is uitzonderlijk rijk aan bleke kalksteensoorten, vandaar de gemeenschappelijke benaming ‘Franse steen’. Weliswaar zijn er de modetrends en ook economische wetmatigheden die maken dat uit dit ruime aanbod voorspelbare selecties van natuursteensoorten werden gemaakt.

De meeste van de in Vlaanderen en Brussel aangewende Franse stenen komen uit de Maasvallei ten zuiden van Verdun, het grensgebied tussen de Champagne en Lorraine. Savonnières en Euville zijn de meest gekende soorten die in tal van groeves werden ontgonnen waar de steen vergelijkbare eigenschappen bezat. De Savonnières-steen is een roomkleurige oolitische kalksteen van Boven Jura ouderdom. Hij bestaat uit een opeenstapeling van kleine holle kalkbolletjes (ooïden, gelijkend op viskuit) met laagvormige concentraties van fijn schelpengruis (in feite van het cement dat de holtes van opgeloste schelpen aan elkaar verbindt). Het is dus een erg poreuze en zachte maar toch duurzame (in de zin van lang leven) natuursteen. Deze steen overspoelde de Belgische markt omstreeks 1860 en zijn gebruik doofde pas volledig uit rond 1970. De iets wittere Euville-steen bezit een grofkorrelige textuur die is opgebouwd uit een opeenstapeling van fossiele crinoidenstengellidjes die elk in een calciet monokristal zijn omgezet, aaneengekit door een calcietcement. Perfecte kristalsplijtvlakken in de crinoidenkorrels weerkaatsen het zonlicht en laten deze bouwsteen schitteren in de zon. De steen werd iets later op de Belgische markt gebracht, werd nog grootschalig gebruikt in de Wederopbouw na Wereldoorlog I al was zijn populariteit toen al tanende wegens tekortkomingen in de duurzaamheid en verdween voorgoed na Wereldoorlog II (ongeveer 1870-1950).

De Massangissteen of Vaurion, aangevoerd uit de Bourgogne, wordt vanaf 1950 sporadisch gebruikt, maar vanaf 1980 wordt deze steen massaal aangewend als vervangsteen voor de Belgische witstenen, zodanig veel en onnodig zelfs dat van een restauratie-indigestie ‘massangitis’ werd gesproken. Deze steen is wat compacter dan de andere Franse stenen, typisch oranje gekleurd (al krijgt de steen mettertijd een bleek patina) met een complexe samenstelling van volle oöiden en gerolde skeletfragmenten van zeedieren en van kalkwieren. Opvallend zijn de fragmenten van centimetergrote crinoiden (zeelies). Massangis wordt overal aangetroffen waar in het laatste kwart van de 20^{ste} eeuw restauratiewerken zijn uitgevoerd aan gebouwen opgetrokken in witsteen.

Dreesen et al., 2011. In het voetspoor van Camerman: de opmars van de Franse steen in België.

De Ceukelaire et al., 2017. De abdij van Averbode, een verhaal van steen en marmer.

Norbertijnenabdij Averbode.

Rood, zwart en grijs, de kenmerkende kleuren van Belgisch marmer

Naast het bier en de chocolade blijft ook “marmer” een belangrijk Belgisch handelsmerk met belangrijke internationale uitstraling om nooit te vergeten.

Marmergebruik is in onze streken geïntroduceerd door de Romeinen. Tijdens de Middeleeuwen is er minder van deze natuursteen als “marmer” ontgonnen maar gebeurde wel recyclage van Romeinse bouwvallen. Zwart marmer was toch betekenisvol maar dan hoofdzakelijk voor begin en einde van het leven, namelijk als doopvont en grafsteen. Vanaf de 16e eeuw kwam onder Italiaanse invloed opnieuw grotere vraag naar marmer. Aanvankelijk werd Belgisch zwart marmer gecombineerd met wit albast en wit Carrara marmer uit Italië. De barokperiode, 17e - 18e eeuw, was een bloeiperiode waar ook Belgisch rood marmer werd gecombineerd met zwart en wit marmer. In de 18de eeuw werden nieuwe technologieën ontwikkeld, zodat ontginning en verwerking gemakkelijker werd. Dit resulteerde dan weer in de uitbreiding van de exploitatie. Het hoogtepunt in de 19de eeuw is mede te wijten aan gebruik van marmer bij de burgerij en niet enkel in prestigieuze gebouwen. Tijdens de 20ste eeuw is de belangstelling voor Belgisch marmer sterk teruggelopen. Momenteel is, met uitzondering van de groeven Petit Granit die soms ook als marmer worden gebruikt, nog slechts één Belgische groeve rood en grijs marmer (Vodelée) en één Belgische groeve zwart marmer (Golzinnes) productief. Toch blijft Belgisch zwart marmer in Italië en het Midden-Oosten zeer sterk gewaardeerd omwille van zijn uitzonderlijke zuivere zwarte kleur.

Belgisch marmer is een afzettingsgesteente en geen metamorf gesteente zoals het woord marmer eventueel zou kunnen suggereren. De term marmer wordt hier in algemene zin gebruikt als een omschrijving voor gesteenten die door polijsten een glad glanzend oppervlak met lichttinteling verwerven. Geologisch gezien is Belgisch marmer een sedimentaire kalksteen, ontstaan op de zeebodem. De afzettingsperiode dateert van 390 tot 325 miljoen jaar geleden, een periode bekend in de aardgeschiedenis als de Devoon en Carboon tijdperken. In de steen vinden we onder vorm van fossielen heel wat sporen van “leven” terug uit die periode. Opvallend zijn de vele soorten koralen en ecologisch vergelijkbare maar uitgestorven stromatoporen. Onze streek was toen immers bedekt met verschillende tropische koraalriffen, vergelijkbaar met het Great Barrier rif in het noordoosten van Australië. Fossiele schelpen van brachiopoden, gastropoden, cephalopoden (inktvis), sponzen of segmenten van zeelies (crinoiden) kan je soms als bleke vlekken of contouren herkennen in een marmerplaat. Ook fijngelamineerde stromatolieten (blauwgroenwieren) en gevlamde stromatolieten, als fossiele restanten van sponsdieren, zijn veelvuldig terug te vinden als blekere structuren tegen een donkerdere achtergrond.

De definitieve verstening en het uiteindelijk uitzicht is tot stand gekomen door een bergvorming op het einde van het Carboon tijdperk, zo ‘n 300 miljoen jaar geleden.

De meeste Belgische marmers zijn zwart, rood of grijs, of een combinatie van deze kleuren en hun kleurtinten. De kleur wordt bepaald door de afzettingssomstandigheden. Zwart marmer dankt zijn kleur aan koolstof wat wijst op een zuurstofarme zeebodem zodat organisch materiaal niet geheel werd afgebroken. De rode kleur wordt veroorzaakt door de ijzerbacteriën die ijzerdeeltjes uit het slib omzetten in ijzeroxide. Grijs is een kleur die doorgaans ontstaat door combinatie van verschillende componenten.

De basiskleuren worden vaak onderbroken door witte calcieters, een gevolg van tektonische krachten die marmer in wording hebben gebroken zodat er spleten zijn ontstaan die later zijn opgevuld met kristallijne calciet. Het polijsten van de kalksteen zal de kleur versterken. Buitengebruik van niet gepolijst marmer zal kleurintensiteit sterk doen afnemen, totdat zowel zwart als rood marmer een bijna wit patina verkrijgt; ook gepolijst marmer dat door omstandigheden in openlucht terechtkomt verdoft van kleur en het oppervlak verpoedert. Het rood marmer wordt onderverdeeld in Griotte (donkerrood), Rouge Royal (helderrood), Gris-Rosé (flets rood) en Byzantin (rood met zwart afgelijnde grijze patronen). Grijs marmer wordt ingedeeld op basis van de aanwezige fossielen en hun ontginningsplaats.

De meest befaamde zijn de Marbre Saint-Anne, Grand Antique de Meuse, Gris des Ardennes. De Belgische Blauwe Hardsteen of Petit Granit is de meest voorkomende en duurzame natuurlijke bouwsteen en wordt tegenwoordig ook als marmer ingezet. Deze afwerking wordt 'gezoet' genoemd en vertoont een bleekgrijs-wit gevlekte textuur tegen een donkere, bijna zwarte achtergrond als gevolg van de fossilisatie van millimetersgrote crinoiden stengellidjes tot calcietskristallen, die massaal in een donkere (door organische koolstof) fijnkorreliger grondmassa voorkomen.

Bouwmeesters waren de beste materiaaldeskundigen en grondig vertrouwd met wat de groeven te bieden hadden om hun bouw- en/of beeldhouwkunst te realiseren. Vanaf de 19de eeuw verwaterde deze band en gaat de bouwmeester / marmerbewerker shoppen op de markt, op zoek naar beschikbare en/of goed geprijsde combinaties van kleur en textuur. Deze latere aanvullingen vervulden de bouwgeschiedenis, zonder afbreuk te doen aan de waarde of uitstraling van het architectonisch geheel.

De Ceukelaire et al., 2017. De abdij van Averbode, een verhaal van steen en marmer. Norbertijnenabdij Averbode.

Keihard bedreigd erfgoed - de kassei : de geschiedenis van onze steden met de voeten getreden

Voor het te laat is, willen we de aandacht vestigen op een wegwijzend kassei-patrimonium, dat nochtans gekenmerkt wordt door een zeer grote verscheidenheid van inheemse natuursteensoorten. Het verlies aan patrimonium is schrijnend zowel in historische stadscentra en op plattelandswegen als op erven/binnenpleinen van private gebouwen. Bij de herinrichting van autoluwe stadskernen merken we wel een vernieuwde belangstelling op voor het gebruik van kasseien, maar hier worden eerder importstenen gebruikt, actueel voornamelijk van Aziatische oorsprong.

De essentiële kwaliteiten van kasseien zijn de lage impact op het milieu als natuurproduct tijdens de hele levensduur en hun opwaardering van het stedelijk gebouwde patrimonium. Historische Belgische straatstenen zijn erg divers van samenstelling en eigenschappen, en bezitten unieke en onvervangbare geodiversiteitswaarde. Vervanging door gestandaardiseerde importsteen draagt zo bij tot de banalisering van de openbare ruimte. Er is nood aan praktische handleidingen voor de uitvoering van kasseibestratingen in onze historische centra. Vooral ook is er nood aan sensibilisering bij de burger en daardoor ook bij de overheden over het feit dat authenticiteit een prijs heeft en tegengesteld is aan vlakheid en gebruiksgemak.

Overzicht der tradionele kasseisoorten, waarvan iedere soort zijn specifieke toepassing kent (Pieret, 1897):

Famenniaan zandstenen

De Famenniaan zandstenen ook gekend als 'Psammieten van de Condroz', zijn de enige kasseien die vandaag nog in exploitatie zijn, meer bepaald in verschillende artisanale groeves gelegen in de valleien van de Ourthe, de Hoyoux en de Bocq. Dit zijn licht micahoudende, fijnkorrelige, calciumcarbonaathoudende zandstenen uit het boven Famenniaan. De mineralogische samenstelling is gedomineerd door kwarts (62-78%), veldspaat, muscoviet en chloriet en een kalkhoudend cement. Deze zandstenen vertonen een bijzonder breed kleurenpalet gaande van blauwgrijs, grijsgroen en roze tot oker, beige, wijnrood en zelfs roestkleurig voor het materiaal dat dichter aan het oppervlak in de

groeve wordt uitgebaat. Voor straatsteen overwegen de grijze tinten van de hardste en meest kiezelrijke zandsteenbanken uit de Formatie van Montfort.

Famenniaan zandstenen zijn ideaal voor straten die nat worden, een grote helling vertonen en ook voor stoepen.

Andenne-zandsteen

Deze zandsteen, die ook wel Namuriaan zandsteen genoemd wordt, is een decoratieve zandsteen, meestal bleek en duidelijk korrelig, vaak met zwarte kolige lijnen en/of putjes waar grotere korrels of kolige partikels weggesprongen zijn. Ze vertonen een grote kleurvariatie van grijsbruin over asgrijs tot roze. Ook bruingrijze zandstenen komen voor waardoor deze moeilijk te onderscheiden zijn van de meer algemeen voorkomende Famenniaan zandstenen. Roze tinten tegen een asgrijze achtergrond, kenmerkend voor het ontginningsniveau 'Grès du Java' zijn diagnostisch voor deze steen. Deze zandsteen staat qua productievolume sterk ondergeschikt aan de Famenniaan zandsteen. De grootste productie was gelegen aan de rechtermaasoever tussen Andenne en Huy, met name uit de Carrière de Rieudotte. Deze laatste groeve bestaat nog, maar de productie ligt al jarenlang stil.

Porfier van Quenast

Dit is de voornaamste en meest gewaardeerde kassei, die ook buiten de landsgrenzen een goede reputatie bezat. Porfier is zowat de verpersoonlijking van de 'Belgische' kassei. De kleur is variabel, meestal groengrijs tot blauwachtig, soms ook paarsachtig, en gevlekt. Het porfier van Quenast is een homogene kwartsdioriet, zeer fijnkristallijn met ingebedde kristallen of fenokristen (grotere eerstgevormde kristallen) van plagioklaas (het dominerend mineraal), hoornblende, kwarts en ilmeniet. Porfier is ongetwijfeld de kassei met de beste bouwtechnische eigenschappen. Door zijn magmatische oorsprong is hij homogeen van kwaliteit, zeer taai, zeer moeilijk te breken of te versplinteren, absoluut zonder porositeit of permeabiliteit, zo goed als onverweerbaar en niet vorstgevoelig. De grote hardheid en dichtheid van het materiaal maken wel dat het gepolijst wordt door gebruik. De herkomst van dit porfier is Rebecq – Quenast - Bierghes (Waals Brabant tot vlak onder Halle-Lembeek) en Lessines (Henegouwen). Porfierkasseien worden op grote schaal vervangen door import-graniet, oorspronkelijk van Europese landen (onder andere Zweden en Frankrijk), geleidelijk vanuit de gehele wereld (voornamelijk Indië, China en Brazilië).

Kwartsiet van Dongelberg

Deze metamorfe kwartsiet werd uitgebaat in meerdere steengroeves gelegen nabij de grens tussen Vlaams en Waals-Brabant die alle een steen van vergelijkbare ouderdom ontgonnen, behorend tot de oudste gesteenten van België. De Formatie van Blanmont met Dongelberg als de meest bekende winningsplaats, naast Rodenem, Buizingen, Dworp, Opprebais, Piétrebais, Nil-Saint-Vincent, Jodoigne) levert verschillende variëteiten, waarvan de twee belangrijkste zijn: de groep van de Dongelberg kwartsiet, de grootste groep met ook de kwartsieten van Dworp en Opprebais, en de groep van Jodoigne. Deze laatste werd samen met grijze leistenen ontgonnen en is eerder grijszwart van kleur. In de omgeving van Dworp – Buizingen ten zuiden van Brussel werd bovendien oranje tot paarsrode kwartsiet ontgonnen, in kleine formaten. De soms sterke kleurschakeringen zijn het gevolg van 'rubefactie', zijnde roodverkleuring van het gesteente onder invloed van bodemontwikkeling in een meer tropisch klimaat tijdens het Krijt tijdperk.

De Kwartsiet van Blanmont - Dongelberg staat model voor een standaardkwaliteit met homogene samenstelling, zonder sedimentaire structuren. De kasseien vertonen een oneffen breukvlak maar hebben toch een glad oppervlak, wel niet versplinterend maar het gevolg van de grote hardheid en moeilijke bewerking. De kleur is meestal blauwig – groenig grijs (chlorietrijk), tot asgrijs met rood-zwart verkleurde slijtvlakken, die soms een roze schijn als gevolg van een hoog kwartsgehalte vertonen. In sommige gevallen komen doorsneden voor van rechte witte kwartsaders die niet altijd duidelijk zijn afgetekend.

Kwartsiet van Tienen, Zandsteen van Bray, Oosterbantzandsteen

Al deze sedimentaire kwartsieten zijn van dezelfde ouderdom en op gelijkaardige wijze ontstaan tijdens een kortstondige maar intense opwarming van de aarde. De kwartsiet van Tienen, ook wel 'Vossekop' en 'Rosse Napoleonskop' genoemd, was de voornaamste 19de tot vroeg 20ste eeuwse

kassei in oostelijk Brabant. Daarnaast kenden de Zandsteen van Bray in Henegouwen, Zandsteen van Picardië of Ostrevent (Oosterbant) of Atrechtse steen (Grès d'Arras) in het noorden van Frankrijk en van daaruit gebruikt in West-Vlaanderen, een ruime toepassing als kassei tot de Wederopbouw na Wereldoorlog I. De natuurlijke kleur is asgrijs tot lichtgrijs, maar de steen verwerft een opvallend bleek rozig grijze over roodgespikkelde en bruinrode tot grijsbruine patina. Het ruwe onbewerkte materiaal vertoont vaak nog karakteristieke lobben en bevat ook regelmatig versteende houtwortels, die lokaal in de kasseien worden aangetroffen. Kwartsiet van Tienen werd uitgebaat in Bost - Oorbeek (Tienen), Hoegaarden, Zétrud-Lumay en Huppaye. De Zandsteen van Bray werd uitgebaat in de streek van Binche (Henegouwen), de Zandsteen van de Oosterbant in de Ostrevent tot Arras tussen Schelde en Scarpe op de grens tussen de graafschappen Vlaanderen en Artois in Noord-Frankrijk. Terwijl de steen in vroegere eeuwen, en dan vooral in romaanse periode als bouwsteen werd gebruikt, zijn tijdens de 19de en vroeg 20ste eeuw veel groeves exclusief voor de winning van kasseistenen geopend. De kwartsietbanken leenden zich goed hiertoe want de betreffende bouwsteenblokken zijn gemakkelijk te klieven en produceerden zeer weinig afval (slechts 20%). De steen is homogeen van kwaliteit en breekt niet.

Onder-Devoon zandstenen

Deze zandstenen onderscheiden zich van de meer algemeen voorkomende Famenniaan zandstenen die eenzelfde kleurspectrum bezitten door een grovere en duidelijk herkenbare korrel, door het voorkomen van keitjes of conglomeraten, herkenbaar aan de veelkleurige rolkeitjes in de steen, en door het donkerder grijsbruin patina.

Deze Onder-Devoon zandstenen werden op meerdere plaatsen ten zuiden van Samber-en-Maas en tot in de Hoge Ardennen gedeeltelijk als straatsteen ontgonnen. Historische ontginningen situeren zich voornamelijk in het noorden van de Condroz, in de Sambervallei ten zuiden van Charleroi (omgeving van Thuin) en op de zuidflank van de Henevallei (Wihéries – Roisin). De belangrijkste ontginningen als kasseisteen bevonden zich in Dave en Wépion langs de Maas. Zij werden voornamelijk in Henegouwen en Namen aangewend, vooral als straatsteen voor hellende straten wegens hun ruwzandig anti-slip oppervlak, en dit vaak in combinatie met de zachtere variant van de Famenniaan zandsteen en de zandstenen van Attre, deze laatste voor de stoepen.

Belgische Blauwe Hardsteen of Petit Granit

Kasseien van Blauwe Hardsteen vallen op door hun blauwe patina, die sterk verschillend is van de lichtgrijze kleur die parementsteen aanneemt, met daarin millimetergrote ronde witte vlekken van de calciëtkristallen die de crinoiden (zeelie) -stengellidjes fossiliseren. Soms worden centimetersgrote witte vlekken waargenomen die overeenkomen met honingraatachtige Michelinia-koralen. Kalksteen is minder hard of slijtvast dan zandsteen, kwartsiet of porfier. Door slijtage krijgen ze een nog meer uitgesproken 'kinderkopje' profiel. Petit Granit kasseien komen nog veelvuldig voor en zijn globaal, na de Famenniaanzandstenen en de porfier, de meest verbreide straatsteensoort.

Hoewel Belgische Blauwe Hardsteen nog ruim voorhanden is, wordt de Chinese dolomiethoudende hardsteen 'Tan Shan Limestone' (een oölitische kalksteen) steeds meer als alternatief gebruikt. Bij gebruik van deze steen is het wel aangewezen om gecertificeerde steen te vragen. Beige tot bruine verkleuringen zijn mogelijk.

Zandsteen (Grès) van Attre

Deze zandsteen ook wel 'Grès à pavés de Mévergnies – Attre' of 'Pavés platines gris' genoemd is een licht poreuze dolomiethoudende zandsteen. De kleur is lichter grijs dan de gewone Famenniaan zandsteen, en groenig tot blauwig grijs of kakigrijs, met fijne lijnen (sporen van sedimentaire gelaagdheid) en vooral aan de randen bruinverkleurend.

De herkomst van deze stenen is de vallei van de Oostelijke Dender te Attre en Mévergnies, fusiegemeente Brugellette bij Ath (provincie Henegouwen). De ontginning vanaf de 16de eeuw werd gestopt in 1940. De hardste zone van de steenbanken werd als kassei gebruikt, terwijl de zachtere randzone als ruw behouwen parementsteen gebruikt werd. De steen is wat zachter dan de gewone Famenniaan zandsteen en vertoont dikwijls afschilfering in het bovenvlak, en werd meer als stoepsteen gebruikt.

Gobertange, Diegemse (Brusseliaanse), Ledesteen en Ieperiaanse nummulietenkalksteen

Zowel de Gobertangesteent als de Diegemse steen (ook 'Brusseliaanse kasseisteen' en 'Vilvoordse steen' genoemd, maar meestal afkomstig uit de streek van Waterloo), de Ledesteen en zelfs Ieperiaanse nummulietenkalksteen werden niet alleen als bouwsteen maar ook sporadisch als kassei gebruikt, in de vorm van onregelmatige kinderkopjes, dikwijls enigszins langgerekt met brokkelige randen. Zij zijn zeker niet geschikt voor wegen met druk en zwaar auto- en vrachtverkeer. Het gebruik van deze zandige kalkstenen als kasseien blijft vooral beperkt tot de vernaculaire architectuur (vooral inritten en binnenkoeren van hoeves) en vormt zo een bijzonder kwetsbaar erfgoed, maar zij komen ook voor rond kerken. De uitgesproken bolvorm laat immers een goede drainage of afvoer van gier toe op boerenerven.

Pieret, M., 1897. Les matériaux employés dans la construction des chaussées des routes provinciales et communales dans le Brabant. Annales des Travaux Publics de Belgique 2ième série t. 2:155-173.
Elsen et al., 2014.

REFERENTIES: GEOLOGIE M.B.T. NATUURSTEEN IN VLAANDEREN, SINDS 2000 + ENKELE STANDAARDWERKEN

Bams, V. & de Barquin, F., 2006. Geelbruine verkleuring van witte marmers. WTCB-Dossiers – Katern nr. 5 – 4e trimester 2005 (verschenen Februari 2006), 13 p.

Borremans, M. (coordinator en editor), 2015. Geologie van Vlaanderen. Academia Press, Gent, XII + 492 p. (ISBN 9789038224336).

Boulvain, F. & Pingot, J-L., 2015. Genèse du sous-sol de la Wallonie. 2^e édition, revue et augmentée. Académie royale de Belgique, Mémoire de la Classe des Sciences coll. In-8°, IV^e série, tome V, 208 p.

Boulvain, F. & Tourneur, F., 2015. Pierres et marbres en Wallonie. Reconnaissance et genèse. Académie royale de Belgique, collection l'Académie en poche, Vol. 69: 102 p.

Boulvain, A. & Vandenberghe, N., 2017. An Introduction to the Geology of Belgium and Luxembourg. In: A. Demoulin (ed.) Landscapes and Landforms of Belgium and Luxembourg. World Geomorphological Landscapes series (ISBN 10.1007/978-3-319-58239-9): 9-33.

Camerman, C. (†), 1961. Les pierres naturelles de construction. Annales des Travaux Publics de Belgique, 1960-61, 4: 325-372.

Camerman, C.; Bienvenu, C.; Bourguignon, P. ; Calembert, L. ; Dumon, P. ; Guillaume, C.; Gulinck, M. ; Legrand, R. ; Macar, P. ; Marlière, R. ; Tavernier, R. ; Van Leckwijck, W., 1947. Les roches calcaires de la Belgique. Centenaire de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège (A.I.Lg.), Congrès 1947. Section Géologie: 317-381.

Cnudde, V.; De Kock, T.; Boone, M.A.; De Boever, W.; Bultreys, T. & Van Stappen, J., 2015. Conservation studies of cultural heritage: X-ray imaging of dynamic processes in building materials. European Journal of Mineralogy, DOI: 10.1127/ejm/2015/0027-2444.

Cnudde, V., Dewanckele, J., Boone, M., de Kock, T., Boone, M., Brabant, L., Duser, M., De Ceukelaire, M., De Clercq, H., Hayen, R. & Jacobs, P., 2011. High-resolution X-ray CT for 3D petrography of ferruginous sandstone for an investigation of building stone decay. Microscopy Research and Technique, 74, 11: 1006-1017.

Cnudde, V.; Dewanckele, J.; De Kock, T.; Boone, M.; De Clercq, H. & Van Hoorebeke, L., 2014. Inzoomen in de Diestiaan ijzerzandsteenstructuur met X-stralento-mografie. In: H. De Clercq, E. Janssens, S. Smets & G. Verhaert. Omgaan met Diestiaan ijzerzandsteengebruik. Diest, Begijnhof, vrijdag 19 september 2014. KIK-RLNH-ALBON Samenvattingenbundel: 53-55.

Cnudde, V.; Dewanckele, J.; De Ceukelaire, V.; Everaert, G.; Jacobs, P.; Laleman, M.-C. (red.), 2009. Gent... Steengoed! Academia Press, Gent, 412 p. (ISBN 9789038214023).

Cnudde, V.; Dewanckele, J.; De Ceukelaire, M.; Everaert, G.; Jacobs, P.; Laleman, M.-C., 2009. Gent... Steenroute. Academia Press, Gent, 32 p. (ISBN 9789038214337).

Coquelet, C.; Creemers, G.; Dreesen, R. & Goemare, É., 2018. Roman ornamental stones in North Western Europe. Archéologie (Etudes et Documents, Division du Patrimoine), 38: 378 p.

Creemers, G. & Dreesen, R., 2017. De mysterieuze stenenconcentraties van Diepenbeek: een Limburgs “Stonehenge” of natuurfenomeen? Provinciaal Natuurcentrum Limburg, Natuuronderzoek Limburg 2017: 2-25 (digitale uitgave).

- Debonne, V. & Dreesen, R., 2015. Stenen immigranten in de Zwinstreek. Natuursteen in de Onze-Lieve-Vrouwhemelvaartkerk in Damme. *Relicta Monografieën*, 12: 149-180.
- De Ceukelaire, M.; Doperé, F.; Dreesen, R.; Duser, M.; Groessens, E.; collab. Boulvain, F.; Coen-Aubert, M.; Tourneur, F.; Peltier, F., 2014. *Belgisch marmer*. Academia Press, 292 p. (ISBN 9789098223117).
- De Ceukelaire, M.; Doperé, F.; Dreesen, R.; Duser, M.; Janssens, H.; Tourneur, F. mmv F. Peltier, J. Barbier, E. Van de gehuchte, 2017. *De abdij van Averbode, een verhaal van steen en marmer*. Uitgeverij Averbode / Erasme, 187 p. (ISBN 9789090304427).
- De Ceukelaire, M. & Duser, M., 2015. *Belgisch marmer*. Grondboor & Hamer, 2015/ 5-6: 14-22 [= *Gea*, vol 48 nr 4].
- De Clercq, H.; Fontaine, L.; Godts, S.; Hayen, R.; Duser, M. & De Ceukelaire, M., 2012. Investigation of the degradation phenomena of the Luxembourg sandstone in the Royal Museum for Central Africa (Belgium). 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. Columbia University, New York, 22-26 Oct 2012: 9 p.
- De Clercq, H.; Hayen, R.; Cnudde, V.; Boone, M. & Duser, M., 2010. The “Maagdentoren” of Zichem (Belgium): damage assessment of ferruginous sandstone by X-Ray Tomography. Proceedings of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments of the Mediterranean Basin, Patras, 31 May-2 June 2010, Volume II, pp 206-219, ISBN: 978-960-8369-66-5.
- De Clercq, H.; Hayen, R.; Cnudde, V.; Boone, M. & Duser, M., 2012. Damage assessment of ferruginous sandstone X-ray tomography - the “Virgin tower” of Zichem (Belgium). 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone. Columbia University, New York, 22-26 Oct 2012: 10 p.
- De Clercq, H.; Hayen, R. & Duser, M. (red.), 2009. *Zichem, Maagdentoren*. Materiaal-technisch onderzoek van de buitenschil. Koninklijk Belgisch Instituut voor het Kunstpatrimonium, KIKIRPA, D 2005.08759: 140 p.
- De Clercq, H.; Hayen, R. & Duser, M., 2010. The “Maagdentoren” of Zichem (Belgium): damage assessment of ferruginous sandstone and strengthening effect of consolidation with ethylsilicate (TEOS). Proceedings of the 8th International Symposium on the Conservation of Monuments of the Mediterranean Basin, Patras, 31 May-2 June 2010, Volume II, pp 220-235, ISBN: 978-960-8369-66-5.
- De Clercq, H.; Janssens, E.; Smets, S. & G. Verhaert, G., 2014. *Omgaan met Diestiaan ijzerzandsteengebruik*. Diest, Begijnhof, vrijdag 19 september 2014. Koninklijk Instituut voor het Kunstpatrimonium – Regionaal Landschap Noord Hageland -ALBON. Samenvattingenbundel.
- De Clercq, W.; Dreesen, R.; Dumolyn, J.; Leloup, W. & Trachet, J., 2017. Ballasting the Hanse: Baltoscandian Erratic Cobbles in the Later Medieval Port Landscape of Bruges. *European Journal of Archaeology*, doi:10.1017/eea.2017.2 (27 p.)
- De Jonghe, S.; Géhot, H.; Genicot, L.; Weber, Ph. ; Tourneur, F., 1996. *Pierres à bâtir traditionnelles de la Wallonie*. Manuel de terrain. Ministère de la Région wallonne, Dir.-Gén. Ressources naturelles et Environnement (D/1996/5322), 261 p.
- De Kock, T.; Boone, M.; Dewanckele, J.; De Ceukelaire, M. & Cnudde, V., 2015. Lede Stone: A potential “Global Heritage Stone Resource” from Belgium. *Episodes: International Geoscience Newsmagazine*, 38 (2): 91-96.

- De Kock T.; De Boever W., Dewanckele J., , Boone M.A., Jacobs P., Cnudde, V., 2015. Characterization, performance and replacement stone compatibility of building stone in the 12th century tower of Dudzele (Belgium). *Engineering Geology*, 184: 43–51.
- De Kock, T.; De Ceukelaire, M.; Elsen, J.; Cnudde, V., 2015. De Eocene witte stenen van Noord-België [ook: Gea vol. 48 nr. 4]. *Grondboor en Hamer*, 2015/5-6: 84-91.
- De Kock, T., Dewanckele, J., Boone, M., De Schutter, G., Jacobs, P. & Cnudde, V., 2014. Replacement stones for Lede stone in Belgian historical monuments. In Cassar, J., Winter, M.G., Marker, B.R., Walton, N.R.G., Entwisle, D.C., Bromhead, E.N. & Smith, J.W.N. (eds), *Stone in Historic Buildings: Characterization and Performance*. Geological Society of London Special Publications, 391: 31-46.
- De Kock, T.; Roelens, I. & Cnudde, V., 2016. Historical decision-making for the choice of natural stone in St Bavo's Cathedral tower in Ghent, Belgium. *Geology Today*, The Geologists' Association & The Geological Society of London, Vol. 32, No. 4: 148-153.
- De Kock, T.; Turmel, A.; Fronteau, G. & Cnudde, V., 2017. Rock fabric heterogeneity and its influence on the petrophysical properties of a building limestone: Lede stone (Belgium) as an example. *Engineering Geology*, dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.007.
- De Kock, T.; Van Stappen, J.; Fronteau, G.; Boone, M.A.; De Boever, W.; Dagrain, F.; Silversmit, G.; Vincze, L.; Cnudde, V., 2017. Laminar gypsum crust on Lede stone: Microspatial characterization and laboratory acid weathering. *Talanta*, 162: 193-202.
- Demoulin, A. (ed.), 2017. *Landscapes and Landforms of Belgium and Luxembourg*. World Geomorphological Landscapes series (ISBN 9783319582375): XI + 424 p.
- Dewanckele, J.; De Kock, T.; Fronteau, G.; Derluyn, H.; Vontobel, P.; Dierick, M.; Van Hoorebeke, L.; Jacobs, P.; Cnudde, V., 2014. Neutron radiography and X-ray computed tomography for quantifying weathering and water uptake processes inside porous limestone used as building material. *Materials Characterization*, 88: 86-99.
- Doperé, F., 2018. *Dater les édifices du Moyen Âge par la pierre taillée*. Editions Safran Publishers, Collection Précisions, 4: 537 p.
- Dreesen, R., 2008. Gebruik en herkomst van natuursteen op het begijnhof. In: Coomans, T. & Bergmans, A., red. In *zuiverheid leven*. Het Sint-Agnesbegijnhof van Sint-Truiden, het hof, de kerk, de muurschilderingen. *Relicta Monografieën*, 2: 139-153.
- Dreesen, R. (ed.), 2012. Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten. Contactforum – Forum de Contact Geoheritage, Geoconservation & Geotourism, Brussels, November 15, 2012. Royal Belgian Institute of Natural Sciences - Geological Survey of Belgium, D/2012/0880/005, 84 p.
- Dreesen, R.; Cnudde, V.; Duser, M.; De Ceukelaire, M.; Bossiroy, D.; Groessens, E.; Elsen, J.; De Kock, T. & Dewanckele, J., 2012. In het voetspoor van Camerman: de opmars van de Franse steen in België. In: R.P.J. van Hees, H. De Clercq & W.J. Quist (red.) *Stenen van binnen, stenen van buiten*. Natuursteen in de Jonge Bouwkunst. Syllabus 4de Vlaams-Nederlandse Natuursteendag - 15 februari 2012. Delftdigitalpress (9789052694054): 33-63.
- Dreesen, R.; Coquelet, C.; Creemers, G.; De Clercq, W.; Fronteau, G.; Gluhak, T.; Hartoch, E.; Henrich, P.; Lafitte, J.-D.; Picavet, P.; Reniere, S.; Ruppiene, V.; Thiébaux, A.; Vanderhoeven, A.; Vynckier, G. & Goemaere, E., 2014. Unraveling geological and geographical provenances of lithic materials during Roman times in Belgium: a fruitful collaboration between geologists and archaeologists. *European Geologist*, 38: 14-20.

Dreesen, R.; De Ceukelaire, M. & Ruppinié, V., 2018. On the roman use of 'Belgian marbles' in the Civitas tungrorum and beyond. In: Coquelet C.; Creemers G.; Dreesen R. & Goemare É. (ed.) Roman Ornamental Stones in North-Western Europe. Natural Resources, Manufacturing, Supply, Life & After-Life. Archéologie (Etudes et Documents, Division du Patrimoine), 38: 25-50.

Dreesen, R. & Duser, M., 2002. Occurrence, geographical spreading and provenance of historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium). Proceedings of the first Geologica Belgica International Meeting, Leuven, 11-15 September 2002. Aardkundige Mededelingen, 12: 273-276.

Dreesen, R. & Duser, M., 2003 - An illustrated atlas of the historical building stones in the Province of Limburg (NE-Belgium): role of petrography. In: Broekmans, M.A.M.M.; Jensen, V. & Brattli, B., Euroseminar on Microscopical techniques Applied to Building Materials. Proceedings of the 9th EMABM, 9-12 September 2003, Trondheim, Norway. ISBN 82-7385-107-9. 20 p.

Dreesen, R. & Duser, M., 2004. Historical building stones in the province of Limburg (NE Belgium): role of petrography in provenance and durability assessment. Materials Characterization, 53: 273-287.

Dreesen, R. & Duser, M., 2012. Duivelsstenen in Limburg: zwerfstenen, megalieten of getuigenstenen? LIKONA Jaarboek 2011 Nr. 21: 14-29.

Dreesen, R. & Duser, M., 2017. Volcanic tuff, an exotic historical building stone in Flanders. In: Nijland, T.G., ed., Use and conservation of Rhenish tuff in the Netherlands, Germany, Flanders and Denmark. Proceedings of the symposium in Amersfoort, March 20, 2017. TNO. ISBN 9789059864825. pp. 33-45.

Dreesen, R.; Duser, M. & Doperé, F., 2001. Atlas Natuursteen in Limburgse monumenten. Provincie Limburg, Provinciaal Natuurcentrum, 294 p.

Dreesen, R.; Duser, M. & Doperé, F., 2019. Atlas Natuursteen in Limburgse gebouwen. Provincie Limburg, Provinciaal Natuurcentrum, 360 p. (ISBN 9789046523674).

Dreesen, R.; Duser, M. & Lagrou, D., 2009. Natuursteen uit het oosten, een bedreiging voor inheemse natuursteen? Dimension, vaktijdschrift voor de architect Jg 3 N12: 54-55.

Dreesen, R.; Gullentops, F. ; Hooyberghs, H. ; Moorkens, T. ; Dupae, E. ; De Leersnijder, D., 1999. De Mergels van Gelinden in Overbroek: geologische site van wereldbelang. LIKONA Jaarboek 1998: 11-27.

Dreesen, R.; Marion, J-M. & Mottequin, B., 2013. The Red Marble of Baelen, a particular historical building stone with global geological importance and local use. Geologica Belgica, 16/3: 179-190.

Dreesen, R.; Marion, J-M. & Mottequin, B., 2015. Het Rode marmer van Baelen, een geologisch buitenbeentje [ook: Gea vol. 48 nr. 4]. Grondboor en Hamer, 2015/5-6: 1-13.

Dreesen, R. & Vanderhoeven, A., 2017. Romeins gebruik van natuursteen in de provincies Limburg. In: Wido Quist & Hendrik-Jan Tolboom, red. Natuursteen in Limburg / Natuursteen uit Limburg. Delftdigitalpress: 61-93. (ISBN 978-90-5269-424-5).

Dubarry de Lassale, J., 2000. Identification des marbres. Ed. H. Vial, 303 p.

Dubelaar, C.W.; Duser, M.; Dreesen, R.; Felder, W.M. & Nijland, T.G., 2006. Maastricht limestone: a regionally significant building stone in Belgium and The Netherlands. Extremely weak, yet time-resistant. Heritage, Weathering and Conservation, ed. Fort, Alvarez de Buergo, Gomez-Heras & Vazques-Calvo. Taylor & Francis Group, London, pp. 9-14.

Dumont, P. & Vander Bruggen, B.; collab. Baeck, M.; De Clercq, L.; Dekeyser, L.; Snaet, J.; Tourneur, F.; Verdonck, A., 2010. Steen & co. Brussels Hoofdstedelijk Gewest, Directie Monumenten en Landschappen, 168 p.

Dusar, M., 2012. Geoheritage in Belgium: unknown, unloved? In: R. Dreesen, ed. Koninklijke Vlaamse Academie van België voor Wetenschappen en Kunsten. Contactforum Geoheritage, Geoconservation & Geotourism, Brussels, November 15, 2012. Royal Belgian Institute of Natural Sciences - Geological Survey of Belgium (ISBN 9789080906105): 70-83.

Dusar, M., 2015. Geowaarden van de Wijngaardberg. In: H. Abts, v.u., De Wijngaardberg in Wezemaal, een erfgoed- en natuurmonument van Europees belang. Regionale Vereniging Natuurpunt Oost-Brabant, Dossier: 4-7.

Dusar, M., 2018. Het marmeren pronkstuk van de Sint-Pieterskerk. In: T. Depoortere, J. Van Osta, M. Dusar, red. Het hoogaltaar van de Sint-Pieterskerk te Langdorp. De Kroon op het Werk, juni 2018: 98-117.

Dusar, M.; m.m.v. De Clercq, L. & Deckers, K., 2018. Natuursteendiversiteit in het gevelbeeldhouwwerk van het Leuvense stadhuis. KBIN-Belgische Geologische Dienst, Juli 2018, 28 p.

Dusar, M.; Breuls, T.; Walschot, L. & Lagrou, D., 2017. Zoektocht naar de oorsprong van de mergelsteen in het Sint-Lutgardisheiligdom van Tongeren. In: Wido Quist & Hendrik-Jan Tolboom, red. Natuursteen in Limburg / Natuursteen uit Limburg. Delftdigitalpress (ISBN 978-90-5269-424-5): 123-146.

Dusar, M. & De Ceukelaire, M., 2014. Voorkomen en ontginning van Diestiaan ijzerzandsteen. In: H. De Clercq, E. Janssens, S. Smets & G. Verhaert. Omgaan met Diestiaan ijzerzandsteengebruik. Diest, Begijnhof, vrijdag 19 september 2014. KIK-RLNH-ALBON. Samenvattingenbundel: 19-26.

Dusar, M. & De Ceukelaire, M., 2016. Natuursteen in het Leuvense stadhuis. Belgische Geologische Dienst, Juli 2016, 40 p.

Dusar, M.; De Ceukelaire, M. & Walstra, J., 2014. Natuursteengebruik als urbanisatie-indicator – stadskern Leuven. Geological Survey of Belgium Professional Paper 2014/1 N. 316: 109-145.

Dusar, M. & Dreesen, R., 2007. Stenen uit het Mergelland. In Nijland, T.G., red. Authentiek duurzaam / Duurzaam authentiek. Proceedings 2° Vlaams-Nederlandse Natuursteendag, Utrecht. TNO, Delft/Utrecht : 47-87.

Dusar, M. & Dreesen, R., 2009. Geodiversiteit weerspiegeld in historische monumenten: Vlaamse natuursteenlandschappen als geotoeristische trekpleister. In: Jacobs, P.; Cnudde, V.; Dewanckele, J.; Pieters, K.; Dreesen, R.; Dubelaar, C.W.; De Ceukelaire, M. & Elsen, J. (eds.), 2009. 3de Vlaams-Nederlandse Natuursteendag, 14-15 mei 2009, Gent. Vergane glorie of glorieus verdergaan? Geological Survey of Belgium Professional Paper 2009/1 N. 305: 79-100.

Dusar, M. & Dreesen, R., 2009. Geodiversiteit op verplaatsing. Historische gebouwen als geologisch erfgoed. Erica, Contactblad van de werkgroep Limburgse Natuurgidsen 37-2: 21-24.

Dusar, M. & Dreesen, R., 2010. Verschil tussen Belgische en Aziatische straatstenen? Polycaro 29: 38-44.

Dusar, M. & Dreesen, R., 2012. Challenges to geoheritage conservation and sustainable development in Belgium. In: H. Van den Ancker, coord. Geoheritage – learning from the past to inform the future. European Geologist, Journal of the European Federation of Geologists N° 34: 8-11.

Dusar, M.; Dreesen, R. & De Naeyer, A., 2009. Renovatie & restauratie. Natuursteen in Vlaanderen, versteend verleden. Kluwer. 562 p.

Dusar, M.; Dreesen, R. & De Naeyer, A., 2009. Natural Stones in Flanders - an illustrated catalogue of historical building and ornamental stones in N-Belgium, including microscopic characteristics. The Belgian black marbles as a case study. In: Middendorf, B., Just, A., Klein, D., Glaubitt, A. & Simon, J. (eds): 12th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Stones, 15th-19th September 20009, Dortmund, Germany. Extended abstracts and CD-ROM with full paper, pp. 213-226 (ISBN 978-3-00-028697-1).

Dusar, M.; Dreesen, R. & De Ceukelaire, M., 2015. Oolitic limestones from Lorraine (France) as a major building stone in Belgium. In: G. Lehrberger & E. von Plehwe-Leisen, eds., Barrois-Oolite. Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, 22: 416-427. (ISBN 9783899371970).

Dusar, M.; Dreesen, R.; Indeherberge, L.; Defour, E. & Meuris, R., 2011. The origin of 'tauw', an enigmatic building stone of the Mergelland: a case study of the Hesbaye region, southwest of Maastricht (Belgium). In: Jagt, J.W.M., Jagt-Yazykova, E.A. & Schins, W.J.H. (eds): A tribute to the late Felder brothers - pioneers of Limburg geology and prehistoric archaeology. Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw 90 - 2/3: 239-258.

Dusar, M. & Lagrou, D., 2000. Een grot in Vlaanderen. Instortingsholte te Hoegaarden-Hoksem. Spelerpes, nr 90: 37-38.

Dusar, M. & Lagrou, D., 2008. The underground quarries of Hinnisdael at Vechmaal (Municipality Heers, Belgian Limburg): geology, mining, risks, geoheritage. In: Silvertant, J. & Ni Mhairtin, J., 3rd International Symposium on Archaeological mining history. Institute Europa Subterranea, Maastricht: 53-58.

Dusar, M.; Lagrou, D. & Dreesen, R., 2007. De mergelgrotten van Hinnisdael te Vechmaal, geologisch erfgoed in de schaduw. LIKONA, Limburgse Koepel voor Natuurstudie, Jaarboek 2006 N° 16: 6-13.

Dusar, M.; Lagrou, D.; Willems, L.; Felder, P.J. & Matthijs, J., 2005. De mergelgrotten van Hinnisdael te Vechmaal (gemeente Heers, Limburgs Haspengouw), een geologische bijdrage tot de studie van het Krijt. Geological Survey of Belgium Professional Paper 2005/1 N. 301, 89 p.

Dusar, M. & Nijland, T., 2012. Spoorwegen als 'enabling technology' voor de architectuur: veranderend natuursteengebruik in 1860-1960. In: R.P.J. van Hees, H. De Clercq & W.J. Quist (red.) Stenen van binnen, stenen van buiten. Natuursteen in de Jonge Bouwkunst. Syllabus 4de Vlaams-Nederlandse Natuursteendag - 15 februari 2012. Delftdigitalpress (9789052694054): 7-31.

Elsen, J.; De Ceukelaire, M.; Dreesen, R.; Dusar, M.; Goemaere, E.; Tolboom, H.-J. & Tourneur, F., 2014. Keihard bedreigd erfgoed - de kassei: de geschiedenis van onze steden met de voeten getreden. Geological Survey of Belgium Professional Paper 2014/1 N. 316: 15-29.

Engels, R.; De Clercq, H.; Dusar, M. & De Ceukelaire, M., 2012. Het Koninklijk Museum voor Midden-Afrika in Tervuren - de glorie van de Luxemburgse zandsteen, niet zonder problemen. In: R.P.J. van Hees, H. De Clercq & W.J. Quist (red.) Stenen van binnen, stenen van buiten. Natuursteen in de Jonge Bouwkunst. Syllabus 4de Vlaams-Nederlandse Natuursteendag - 15 februari 2012. Delftdigitalpress (9789052694054): 125-135.

Gulinck, M., 1944. Geologische uitstappen naar Oosterzele - Balegem - Bambrugge op zondag 15 augustus en zaterdag 25 september. Biologisch Jaarboek Dodonaea, 11: 45-60.

Gulinck, M., 1949. Oude natuurlijke bouwmaterialen in Laag- en Midden-België. Technisch-Wetenschappelijk Tijdschrift, 18-2: 25-32.

Gulinck, M. & Tavernier, R., 1947. Les grès tertiaires exploités en Basse et Moyenne Belgique. Centenaire de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège (A.I.Lg.), Congrès 1947. Section Géologie: 179-185.

Lagrou, D. & Dreesen, R. (red.), 2005. Eerste Vlaams-Nederlandse Natuursteendag, Belgische natuursteen in historische monumenten en hun vervangproducten bij restauratie in België en Nederland, 3 februari 2005, Leuven. VITO 2005/MAT/P/004.

Nijland, T.G.; Dubelaar, W. & Duser, M., 2017. Natuurlijke bouwstenen van Zuid-Limburg en omgeving. In: Wido Quist & Hendrik-Jan Tolboom, red. Natuursteen in Limburg / Natuursteen uit Limburg. Delftdigitalpress (ISBN 978-90-5269-424-5): 11-54.

Pauthier, I.; Tourneur, F.; Vital, A.; Van Loo, A.; Deferm, H.; Demeure, J.-P.; Guilan y Suarez, F.; Roggeman, D.; Scherrier, N.; Vanderhulst, G.; Wouters, P.; Detiffe, M., 2015. Pavés de Bruxelles. Archives d'Architecture Moderne, 521 p.

Pereira, D.; Tourneur, F.; Bernáldez, L. & Blázquez, 2015. Petit Granit: a Belgian limestone used in heritage, construction and sculpture. Episodes: International Geoscience Newsmagazine, 38: 85-90.

Picavet, P.; Reniere, S.; Cnudde, V.; De Clercq, W.; Dreesen, R.; Fronteau, G.; Goemaere, E. & Hartoch, E., 2018. The Macquenoise sandstone (Devonian – Lochkovian), a suitable raw material for ancient querns and millstones: quarries, properties, manufacture and distribution in France and Belgium. *Geologica Belgica*, 21/1-2: 27-40.

Price, M., 2007. Decorative stone. The complete sourcebook. Thames & Hudson, 288 p.

Quist, W.J.; De Kock, T.; Nijland, T.N.; van Hees, R.P.J. & Cnudde, V., 2014. Conservering van witte steen: verbetering of verspilde moeite? De beleving van interventies in Vlaanderen en Nederland. Geological Survey of Belgium Professional Paper, 2014/1 N. 316: 5-14.

Sintubin, M., 2009. De wetenschap van de aarde. Over een levende planeet. Acco, Leuven, 324 p.

Tolboom, H.; Duser, M.; Dubelaar, W.; Dreesen, R.; Elsen, J.; Groessens, E. & van der Star, C., 2009. Avendersteen. In: Jacobs, P.; Cnudde, V.; Dewanckele, J.; Pieters, K.; Dreesen, R.; Dubelaar, C.W.; De Ceukelaire, M. & Elsen, J. (eds.), 2009. 3de Vlaams-Nederlandse Natuursteendag, 14-15 mei 2009, Gent. Vergane glorie of glorieus verdergaan? Geological Survey of Belgium Professional Paper 2009/1 N. 305: 45-77.

Toussaint, J. (dir.), 2012. Marbres jaspés de Saint-Remy et de la région de Rochefort. Monographies du Musée provincial des Arts anciens du Namurois, 56: 240 p. (ISBN 9782875020376).

Toussaint, J. (dir.), 2013. Actes du Colloque “Autour des Marbres jaspés”. Monographies du Musée provincial des Arts anciens du Namurois, 59.

Van Den Eeckhaut, M.; Poesen, J.; Duser, M.; Martens, V. & Duchateau, Ph., 2007. Sinkhole formation above underground limestone quarries: A case study in South Limburg (Belgium). *Geomorphology* 91: 19–37.

Veldeman, I.; Baele, J.-M.; Goemaere, E.; Deceukelaire, M.; Duser, M. & De Doncker, HWJA, 2012. Characterizing the hypersiliceous rocks of Belgium used in (pre-)history: a case study on sourcing sedimentary quartzites. *Journal of Geophysics and Engineering* 9: 118-128.