



AARDWETENSCHAPPEN

Prof. dr. David Van Rooij

1^{ste} Bachelor of Science in de bio-ingenieurswetenschappen
Academiejaar 2023–2024





Aardwetenschappen

Prof. dr. David Van Rooij

1^{ste} bachelor Bio-ingenieurswetenschappen
AJ 2023-2024

VOORWOORD

De cursus Aardwetenschappen vormt een belangrijke ondersteunende rol in de opleiding bio-ingenieurswetenschappen. Gelijkaardig aan burgerlijk ingenieurs worden in deze opleidingen alle wetenschappen met elkaar in verband gebracht, en wordt ook de brug geslagen naar de toepasbaarheid ervan. Het unieke aan deze opleiding is de centrale rol van het leven, om zo op het kruispunt te staan tussen technologie, biologie, natuur en milieu. Hierin verschillen de bio-ingenieurs eigenlijk niet veel van geologen, met het verschil dat er respectievelijk wordt gekeken naar “levende” versus “dode” materie, evenals het belangrijke tijdsaspect. Een bio-ingenieur krijgt in de eerste bachelor eigenlijk dezelfde multidisciplinaire basisopleiding, maar met de finaliteit om in het heden (en voor de toekomst) oplossingen aan te bieden, waar geologen eerder in het verleden kijken om de Aarde en haar werking beter te begrijpen.

Daarom ook dat het leven (de biosfeer) de belangrijke rode draad vormt in deze cursus. Het is de bedoeling om meer inzicht te geven in de werking van deze dynamische Aarde waarop we leven, en welke mechanismen bepalend zijn in het tot stand komen van het (geologisch) huidige klimaat. Het is daarom belangrijk om inzichten te geven omtrent het ontstaan en de evolutie van het leven... en zijn bedreigingen in het verleden, het heden en ook in de toekomst.

De cursus Aardwetenschappen bestaat uit twee onderdelen; de hoorcolleges en de praktische oefeningen. De hoorcolleges vinden aansluiting bij de 10 hoofdstukken van deze cursusnota's, waar de praktische oefeningen in de eerste plaats de doelstelling hebben om de theorie aan te scherpen, en het letterlijke contact met de Aarde te bevorderen.

- Het *eerste hoofdstuk* bestaat uit 2 delen, waarin eerst Aardwetenschappen (en hoofdzakelijk geologie) in het algemeen worden gekaderd, met aanduiding van het maatschappelijke belang ervan. Daarop volgt een korte **inleiding** tot het “Systeem Aarde”, om zodoende enkele belangrijke aspecten, cijfers, terminologieën mee te geven die doorheen de cursus verder worden gebruikt.
- Het *tweede hoofdstuk* behandelt het **ontstaan van de Aarde** als een eerste deel van een drieluik dat de Aarde op een chemische manier benadert. We focussen op planeetvorming in het algemeen, en meer specifiek op de vorming van de Aarde en de Maan. Er wordt ook stilgestaan op welke manier al deze informatie tot ons is gekomen (letterlijk en figuurlijk) met de studie van meteorieten en kometen.
- In het *derde hoofdstuk* verlaten we de vaste Aarde even om de werking van de **atmosfeer** en de **hydrosfeer** nader te bekijken. Daarnaast zullen de atmosferische en oceanische circulatie aan bod komen, om beter te begrijpen hoe deze een essentiële rol spelen in de energiebalans van de Aarde en de werking van het globale klimaat.
- Het laatste deel van het drieluik over de “chemische Aarde” omvat de **gesteentecyclus** in het *vierde hoofdstuk*. Vooraleer over te gaan naar de fysische werking van de Aarde, dienen we te weten uit welke bouwstenen deze is opgebouwd, en welke informatie we daaruit kunnen halen. Eerder dan een puur “classificatiehoofdstuk”, trachten we hier eerst een beknopt overzicht te geven van de

belangrijkste gesteentevormende mineralen. Vervolgens komen de 3 grote types gesteenten voor, gekozen voor hun belang voor de belangrijkste Aardse processen, en ook omwille van hun belang voor de geologie van België. Processen zoals vertering en bodemvorming worden ook kort toegelicht, evenals de rol van koolstof en de koolstofcyclus.

- Het *vijfde hoofdstuk* behandelt het aspect **tijd** in de geologie. We gaan hiervoor eerst even terug naar de eerste observaties die bewezen dat de Aarde toch iets ouder was dan 7 dagen. In een kwantitatieve context komen eerst de principes van stratigrafie (*gelaagdheid*) aan bod, vooraleer er wordt gekeken naar effectieve absolute en relatieve dateringstechnieken in een kwantitatieve context. Tot slot wordt besproken hoe de geologische tijdschaal tot stand is gekomen.
- Het eerste deel over de “fysische Aarde”, **geodynamica**, komt aan bod in het *zesde hoofdstuk* en bekijkt de fysische werking van de Aarde, gebonden aan respectievelijk de kern, mantel en korst. Meer specifiek wordt de werking van het aardmagnetisch veld uitgelegd, evenals het zwaarteveld van de Aarde. Ter voorbereiding van het tweede deel over de fysische Aarde, wordt dit hoofdstuk afgesloten met de genese en evolutie van de oceanische lithosfeer.
- Het *zevende hoofdstuk* behandelt de principes van de **platentektoniek**, en de daaraan gekoppelde processen. Dit omvat ook een bespreking van de belangrijkste natuurlijke risico's zoals vulkanisme en aardbevingen.
- Het aspect “leven op Aarde” wordt voluit behandeld in het *achtste hoofdstuk* onder de **evolutie van de biosfeer**. Het brengt verschillende aspecten van vorige hoofdstukken tezamen, en overloopt in feite hoe de Aardse geschiedenis een bepalende rol heeft gespeeld in het ontstaan en de evolutie van het leven. Vanzelfsprekend komen ook bedreigingen en extincties aan bod.
- Het *negende hoofdstuk* kan eveneens worden bekeken als een “integratiehoofdstuk” dat vooral de nadruk legt op de evolutie van het klimaat tijdens de laatste 200 miljoen jaar. Dit wordt gedaan aan de hand van een **case study over de evolutie van de Atlantische Oceaan**, en is een illustratie van de supercontinent cyclus.
- Het laatste en *tiende hoofdstuk* behandelt niet alleen de **geologie van België**, maar kan eveneens worden bekeken als een herhalingshoofdstuk waar alle aspecten van de vorige hoofdstukken terug aan bod komen. Dit hoofdstuk vormt uiteraard ook de basis voor de ééndaagse excursie.

Elk hoofdstuk bevat één of meerdere kaderteksten. Deze zetten de behandelde materie eens in een ander daglicht, of bieden wat verdieping, of geven de historische context weer. Deze kaderteksten zijn geen leerstof, maar bieden aanvulling voor de geïnteresseerde lezer.

De praktische oefeningen bestaan uit 3 verschillende delen, die ook grotendeels aan elkaar gekoppeld zijn;

- De praktische oefeningen rond gesteentevormende mineralen en gesteenten kaderen hoofdzakelijk in een context “Geologie van België”, maar hebben als doelstelling om de herkenning(stechnieken) van de meest voorkomende en belangrijkste gesteenten aan te brengen, evenals het kunnen plaatsen van deze gesteenten in hun genetische context.
- De kaartoefeningen zijn bedoeld om het ruimtelijke inzicht aan te scherpen, als voorbereiding op de geologische excursie naar Zuid-België. Deze vaardigheden vormen ook een basis voor eventuele

vervolgvakken (o.m. Omgevingswetenschappen) die verder zullen ingaan naar landschapsgenese en bodemvorming.

- De excursie naar Zuid-België zal zich hoofdzakelijk toeleggen op Devoon afzettingen in de omgeving van Namen-Dinant-Couvin, omdat net hier de evolutie van het leven op een zeer mooie manier gedocumenteerd is. Deze ééndaagse excursie is beschikbaar op 2 manieren; er is een online “virtuele” excursie op UFORA (beschikbaar voor iedereen), en je kan – op vrijwillige basis – deelnemen aan de “echte” excursie (deze informatie wordt later dit jaar bekendgemaakt). De online component behandelt op zich alle aspecten van de excursie, en is voldoende voorbereiding op het examen. De deelnemers aan de ééndaagse excursie zullen bij bepaalde locaties meer ingaan op de manier waarop informatie is verzameld, en gaan zelf ook aan de slag met observaties op terrein.

Het samenstellen van deze cursusnota's is gebaseerd op het raadplegen van enkele basiswerken over algemene geologie. Deze worden achteraan in de cursus weergegeven in de referentielijst, tezamen met verwijzingen naar enkele specifieke publicaties, die potentieel interessant kunnen zijn indien verdere verdieping in bepaalde onderwerpen gewenst is.

Hiermee beantwoorden de doelstellingen van dit opleidingsonderdeel aan 4 opleidingscompetenties van de opleiding bio-ingenieurswetenschappen;

- Inzicht hebben in het *Systeem Aarde* en in de genetische, moleculaire, fysiologische en fenotypische aspecten van planten, dieren en micro-organismen, en hun *interacties*
- Begrijpen van de *fysische wetmatigheden* onderliggend aan biologische, *natuurlijke* en industriële *processen*
- Begrijpen en kwantificeren van de (bio)*chemische karakteristieken* van biologische, *natuurlijke* en industriële *processen*
- Evalueren van biologische, *natuurlijke* en industriële *processen* gerelateerd aan de levende materie, aan de *omgeving* en hun *interacties* door een integratie van wiskundige, fysische, (bio)chemische, biologische en ecologische inzichten

De cursus Aardwetenschappen geeft aansluiting op het opleidingsonderdeel Ecologie (1^{ste} Bachelor), en vormt een essentiële voorbereiding voor het opleidingsonderdeel Omgevingswetenschappen (2^{de} Bachelor). Verdere aspecten kunnen aan bod komen in opleidingsonderdelen van de Major Bos- en Natuurbeheer, de Major Landbouwkunde en de Major Land, Water en Klimaat.

1. INLEIDING

1.1. Inleiding

Het is geen toeval dat “onze” Aarde leven bevat. Alle elementen die hiervoor nodig zijn, zijn op een unieke wijze vertegenwoordigd op deze planeet. Eén van de elementen die van de Aarde een “succesverhaal” maakt, is haar dynamiek. Is het een toeval dat de enigste planeet met (bewezen) leven in ons zonnestelsel een zelf-recyclerende korst heeft dank zij de platen tektoniek? Om dit beter te kunnen begrijpen, moeten we in de eerste plaats de positie van de Aarde in het zonnestelsel begrijpen, maar ook haar huidige en vroegere werking doorgronden. Veel informatie hierover is effectief op Aarde te vinden, hoewel een groot deel onbereikbaar is en blijft voor rechtstreekse observaties. De kern en mantel van de Aarde kennen we enkel maar door middel van (onrechtstreekse) geofysische afstandswaarnemingen. Vandaar dat andere bronnen van informatie moeten worden aangesproken die op eenzelfde moment, of op een vergelijkbaar wijze zijn ontstaan. Daarom kijken we hiervoor niet alleen naar het binnenste deel van de Aarde, maar ook naar de Maan en zijn naaste burens Mars, Venus en Mercurius. Zelfs asteroïden, meteorieten, kometen en de manen van de verre buitenste planeten kunnen waardevolle informatie aanbieden.

Al deze aspecten komen aan bod in de “aardwetenschappen”; een studie met de gehele Aarde als onderwerp, inclusief de atmosfeer, oceanen en de plaats ervan in het zonnestelsel. Het gedeelte dat de “vaste Aarde” behandelt, komt integraal aan bod in het studiedomein geologie, dat wordt gezien als één van de takken in de “aardwetenschappen”. Geologie bestudeert de evolutie van de Aarde en het leven, maar dat kan op zich ook niet zonder een gedegen kennis van de atmosfeer en de oceanen, die beide een vitale rol spelen in de sturing van het klimaat. De grote kracht van de geologie is de kennis en de relativisering van de processen in de geologische tijd, en het leren denken vier dimensies. Deze cursus behandelt dus aardwetenschappen vanuit een geologisch oogpunt.

De Aarde kan echter op meerdere manieren worden bestudeerd. In het middelbaar onderwijs behandelt het vak Aardrijkskunde geologie en geografie door elkaar, ondanks de grote verschillen. Geografie legt zich toe op de studie van de hedendaagse interacties tussen de mens en het milieu op Aarde. Hier staat dus de mens centraal, wat zich zal uiten in meerdere aspecten, zoals bijvoorbeeld de studie van sociale en economische ontwikkelingen op het aardoppervlak. Uiteraard omvat geografie ook een fysisch aspect (fysische geografie), gezien het zich toelegt op het (letterlijk en figuurlijk) beschrijven van het oppervlak van de Aarde. Het zijn de disciplines geomorfologie en landschapsgenese die dan ook het raakpunt vormen met geologie.

1.1.1. Geologie als wetenschap

Het is bijna een doodoener om te beweren dat geologie zo oud is als de Aarde. Echter, het heeft lang geduurd vooraleer de geologie als apart wetenschapsdomein werd beschouwd. Het woord “geologie” duikt maar voor het eerst op als handgeschreven woord aan de kantlijn van een Latijnse tekst in 1344, en werd slechts

gepubliceerd in 1473. Het is pas in 1603 dat Ulisse Aldrovandi (de grondlegger van de natuurwetenschappen) “*la geologia*” in zijn huidige betekenis zal formuleren. Toch heeft het, naast fysica, biologie en geografie een lange tijd onder de grotere wetenschapsdiscipline “natuurwetenschappen” gestaan. De mooiste collecties van mineralen en fossielen staan meestal uitgesteld in de “natural history” musea. Hoewel de basis van de moderne geologie al in 1788 werd gepubliceerd door “oergeoloog” James Hutton in zijn “*Theory of the Earth*”, is het Charles Lyell die met zijn “*Principles of Geology*” (12 uitgaven tussen 1830 en 1875) deze tak van de natuurwetenschappen het nodige belang gaf. Met zijn uniformitarisme (gebaseerd op het actualiteitsprincipe van Hutton) vestigde hij één van de belangrijkste principes van de geologie: “*the present is the key to the past*”. Dit is echter de verkorte versie, waar de originele verwoording veel interessanter is;

“The past history of our globe must be explained by what can be seen to be happening now... No powers are to be employed that are not natural to the globe, no action to be admitted except those of which we know the principle”

Een belangrijk natuurwetenschapper, die een bevriend studiegenoot van Lyell was in Cambridge, nam zijn eerste uitgaven mee op reis, om deze te toetsen op andere werelddelen. Dit was niemand minder dan Charles Darwin, die met deze boeken tijdens zijn expeditie van de Beagle zijn geologische basis versterkte voor zijn latere ideeën over evolutie. Het principe van Lyell beschreven in zijn “*Principles of Geology*” is zo universeel dat het kan worden uitgebreid naar het Zonnestelsel en het heelal... waar de wetten van de fysica uiteraard overal geldig zijn, maar waar door andere aanwezigheid van scheikundige elementen, andere temperaturen, druk, er totaal andere processen zijn die totaal niet (meer) op Aarde voorkomen. Voorbeelden hiervan zijn te vinden bij de manen van Jupiter (de Galileïsche manen); ijsplaten tektoniek (Europa), zwavelvulkanisme (Io), oceanen van waterijs in de mantel (Ganymedes). Het is dank zij deze planetaire geologie dat we ook beter zicht hebben gekregen op de oorsprong van onze planeet, en die van het ontstaan van het leven... want van deze begindagen zijn maar bitter weinig bewijzen of “recente analogen” te vinden op Aarde.

Doorheen de eeuwen heen is deze tak gespecialiseerder geworden en uitgegroeid tot een volwaardige wetenschap. De grote doorbraak kwam er in het begin van de 20^{ste} eeuw, toen er grote technologische stappen werden gezet (jammer genoeg voor oorlogsdoeleinden), die aanleiding gaven tot de ontdekking van de platen tektoniek (Vine & Matthew, 1963; Le Pichon, 1968). Sindsdien is er eveneens een enorme diversificatie van geologische subdisciplines opgetreden. Elk van deze disciplines steunt op geologische toepassingen en is gekoppeld aan andere wetenschappen zoals fysica, scheikunde, biologie, maar ook microbiologie, informatica, toegepaste wetenschappen en technologie. De meest essentiële disciplines van de geologen buigen zich over de bouwstenen en opbouw van de Aarde: mineralogie, petrologie, sedimentologie en stratigrafie (studie van de gelaagdheid). Andere disciplines zijn eerder scheikundig van aard en lopen door naar meer gespecialiseerde domeinen zoals geochemie, isotopengeologie, geochronologie (toepassing van isotopengeologie voor dateringen), biogeochemie en hydrogeologie. De meer fysische kant van de geologie wordt vertegenwoordigd door geofysica, (paleo)seismologie (studie van aardbevingen), mariene geologie en teledetectie (hoewel grotendeels gedeeld met de geografie). Het aandeel van de “levenswetenschappen” wordt uiteraard ingenomen door paleontologie, paleobiologie, paleoklimatologie en paleoceanografie.

Kader 1.1: En wat met de “bodem”?

Men kan zich afvragen welke wetenschapsdiscipline de bodem bestudeert. Aan de ene kant omvat dit de studie van de ondergrond, en was het traditioneel een domein binnen de geologie. Echter, aan de andere kant, kan er worden bepleit dat dit gekoppeld is aan recente processen, zoals landschapsvorming en toebehoort aan de geografie. Daarnaast is het leven een essentiële component voor bodems, dus zouden biologen zich hier ook mee moeten bezig houden. Echter, de tak van de wetenschap die het meeste aandacht schenkt aan een geïntegreerde studie van bodems, valt onder het domein “bodembeheer” als onderdeel van de vroegere “landbouwingenieur”, en dus nu de bio-ingenieurswetenschappen. Bodems zijn essentieel voor landbouw, maar ook bos- en natuurbeheer, waar een duidelijke interactie is met de mens, maar ook vele toepassingen zijn naar bodemverrijking, remediëring, etc. Met andere woorden, de studie van de bodem ligt ècht op het kruispunt tussen geologie, geografie, biologie en bio-ingenieurswetenschappen. Tegenwoordig (vooral in België) zijn het vooral bio-ingenieurs die zich met het onderzoek van bodems bezighouden.

Aanvullend is het interessant om stil te staan bij het onderscheid tussen de (strikte) definitie van bodem (soil) enerzijds, en de (diepe) ondergrond (subsurface), anderzijds. Dit ligt namelijk anders bij burgerlijk ingenieurs die meestal de ondergrond als “bodem” (sensu lato) beschouwen. Een technisch “bodemonderzoek” beperkt zich doorgaans niet tot enkel de bodem (sensu stricto). Vandaar (en gelukkig) dat in een commerciële omgeving (bv, milieustudiebureaus) meestal multidisciplinair wordt gewerkt, met aanwezigheid van al deze bovengenoemde disciplines. Het gaat niet om competitie, maar samenwerking tussen al deze competenties.

1.1.2. De maatschappelijke relevantie van geologie

Het zou ondenkbaar zijn dat geologie geen maatschappelijke relevantie heeft, gezien geologie op zich ontstaan is uit een nood naar natuurlijke rijkdommen, maar ook uit de zoektocht naar de oorzaken (en mogelijkheid van voorspellen) van natuurlijke gevaren. Het zou eveneens oneerlijk zijn om te ontkennen dat geologie met de ontginning van fossiele brandstoffen geen slechte naam heeft gekregen, gezien ongecontroleerde exploitatie in de tweede helft van de 20^{ste} eeuw voor veel schade aan het milieu en klimaat heeft gezorgd. Vandaar dat de moderne geoloog zich richt op een duurzaam beheer van grondstoffen (Fig. 1.1), in het kader van de duurzame ontwikkelingsdoelstellingen of SDG's (*sustainable development goals*).

Hoewel bij de studie van natuurlijke grondstoffen bijna onmiddellijk de koppeling wordt gelegd naar koolwaterstoffen (zeker vorige eeuw), omvat dit uiteraard veel meer dan enkel de zoektocht naar petroleum en gas. De meest essentiële en (door de “1^{ste} wereld”) onderschatte grondstof is en blijft grondwater. Grotendeels gaat dit om het gebruik ervan als drinkwater, maar het is ook essentieel in vele industriële processen en kan tevens een grote rol spelen als “groene” (of blauwe?) energie: hydro-elektrische energie, maar ook geothermie (waar diep natuurlijk opgewarmd grondwater kan worden opgepompt voor verwarming of energie). De industrie blijft ook de grote vragende partij achter ertsen (metalen, uranium erts...), bouwstenen (siersteen, baksteen), zanden en aggregaten. Vandaar dat ook in België het beroep als geoloog relevant blijft met betrekking tot natuurlijke grondstoffen, behalve voor koolwaterstoffen, want dat hebben we nooit gehad.



Fig. 1.1 – De verschillende facetten van geologie in het kader van de duurzame ontwikkelingsdoelstellingen, ontwikkeld door The Geological Society en vertaald naar het Nederlands in samenwerking met Geologica Belgica, de Geologische Dienst van België en de Koninklijke Academie voor Overzeese Wetenschappen.

Ook bij de exploratie en ontginning van de natuurlijke grondstoffen speelt de huidige milieuproblematiek een vitale rol. Maatschappelijk groeit de vraag naar het duurzame beheer van grondstoffen, en dus ook daar zal de geoloog zijn maatschappelijke verantwoordelijkheid moeten opnemen. Het is logisch dat vele natuurlijke rijkdommen totaal niet hernieuwbaar zijn. Ontginning betekent dat je onherroepelijk bepaalde elementen of stoffen uit de Aarde onttrekt. Dit kan enkel worden verholpen als er een “circulaire economie” ontstaat op basis van recyclage. Dit zal echter nooit 100% de nood naar nieuwe ontginning uitsluiten, wat betekent dat er een verantwoorde manier van ontginning moet kunnen gebeuren. Zelfs bij het in gebruik nemen van alternatieve energiesoorten (windmolens, batterijen voor elektrische wagens, zonnepanelen), zal altijd een specifieke grondstof nodig zijn, zoals koper of lithium... Enkel geologie kan een bepalende rol spelen in de overschakeling naar het gebruik van hernieuwbare natuurlijke rijkdommen zoals aardwarmte of waterbeheer. De geoloog kan dus worden aanzien als de beheerder van hernieuwbare en niet-hernieuwbare grondstoffen en energie. In deze milieubewuste wereld moet de geologie de huidige voorraden onder controle houden en (indien echt nodig) voorstellen kunnen doen voor een efficiënte en duurzame exploitatie, naast het zoeken naar waardevolle alternatieven. Als het effectief op ontginning aankomt, moet de geologie de vele mogelijke exploitatierisico's zoveel mogen kunnen beperken. Vele activiteiten van (Belgische) geologen leggen zich effectief toe op direct maatschappelijk relevante domeinen, met een belangrijke rol voor samenwerking met toegepaste wetenschappers (bio-ingenieurs, burgerlijk ingenieurs), zoals:

- Opsporen van vervuiling in bodem- en grondwater, maar ook in het voorspellen van de verspreiding ervan om zo een saneringsplan voor te stellen
- Verantwoord landgebruik voor een groeiende bevolking (niet enkel ontginning, maar bijvoorbeeld het beter definiëren van zones waar beter geen bebouwing komt... zoals overstromingsvlaktes)
- Veilige opslag van afval, waaronder ook dat van radioactief en toxisch materiaal
- Het uitvoeren van voorstudies voor onshore en offshore constructies zoals kanalen, havens, windmolenparken, dammen, snelwegen, tunnels,...
- Kwaliteitscontrole van bouwmaterialen (waaronder ook edelstenen, cfr. opsporen conflictdiamanten)
- Herstelling van aangetaste gesteenten van kerens, monumenten, standbeelden,...

Maar daar stopt de relevantie van de geologie nog niet. Als je enkele maanden de media volgt, besef je snel dat natuurlijke gevaren (jammer genoeg) veelvuldig en regelmatig aan bod komen. We leven op een dynamische Aarde, en die houdt niet altijd rekening met de bewoners ervan. Een meer correcte formulering hiervan is dat de mens niet altijd rekening kan (of wil?) houden met de grilligheid van de Aarde. Dit heeft gedeeltelijk te maken met onwetendheid of de totale onberekenbaarheid van de Aardse processen, maar ook soms door het (moedwillig?) negeren van wetenschappelijke informatie. Het is de taak van de geoloog om deze natuurlijke risico's zo goed mogelijk in te schatten. Jammer genoeg is het voorspellen ervan in sommige gevallen niet echt mogelijk, en is het informeren naar overheden en bevolking toe de enige mogelijkheid om zo tot mitigaties te komen (evacuatie, beschermde constructies, versterkingen gebouwen, etc.). Onder de meeste grillige en verwoestende kunnen natuurrampen zoals aardbevingen, tsunami's en vulkaanuitbarstingen worden gerekend. Op een kleinere schaal, maar daarom niet minder ingrijpend, zijn landverschuivingen, karst (oplossingsholten), overstromingen en de erosie van stranden en duinen. Sommige hiervan zijn ook rechtstreeks gekoppeld aan de niet te ontkennen klimaatsveranderingen. Hoewel de recente problematiek van "*global change*" op een geologische zeer korte tijd speelt, kan de geoloog op langere termijn beter een onderscheid maken tussen "normale" en "antropogene" processen. De Aarde kent bijvoorbeeld sinds zijn ontstaan verschillende periodes van opwarming en afkoeling. De processen en oorzaken hiervan zijn duidelijk gekend en wijken volledig af van de extreem snelle opwarming van de laatste decennia. Het aandeel van de geologie in de aanpak van deze problematiek beperkt zich niet enkel tot het verleden, maar bestudeert ook hoe het Aardse systeem op middellange en lange termijn hierop zal reageren.

1.2. Curriculum vitae van de Aarde

Binnen ons Zonnestelsel is de Aarde uniek om drie zeer specifieke redenen. In de eerste plaats is er een enorme diversiteit van leven aanwezig. Dit betekent ook dat er een stabiele en (vooral) gunstige atmosfeer is die dat leven kan onderhouden. Dit wil uiteraard niet zeggen dat dit altijd zo is geweest... de evolutie van het leven, en de omgevingsfactoren die dit hebben toegelaten, is gedocumenteerd in geologische afzettingen; het "geologische archief" (*the geological record*). Dit gaat niet alleen over individuele fossielen, maar ook over grotere constructies, zoals riffen, die heel duidelijke omgevingscondities nodig hebben (cfr. de Devoon biostromen en biohermen in het Synclinorium van Dinant, zie hoofdstuk 10). Er hoeven zelfs geen fossielen in het geologische archief te zitten om veranderingen in omgevingscondities te kunnen waarnemen. Deze veranderingen zorgen hoe dan ook voor een ingrijpende invloed op het leven. Zo kunnen bijvoorbeeld klimaatsveranderingen (ijstijden, of de huidige *global change*) de diversiteit van het leven op Aarde (drastisch) beïnvloeden. In de tweede plaats bezit de Aarde over de unieke combinatie om alle drie fasen (vast, vloeibaar, gas) van water aanwezig te hebben. Dit dynamische evenwicht is te danken aan de afstand van de Aarde met de Zon. Dit is bijna de enige plaats binnen dit Zonnestelsel die dit delicate evenwicht toelaat. Op de derde plaats, zijn er continenten met een duidelijk onderscheid tussen een oceanische en continentale lithosfeer. Dit zou er niet zijn als er geen platentektoniek aanwezig zou zijn die zorgt voor een (geologisch) regelmatige beweging en recyclage van de lithosfeer. Daarom dat we in dit deel de basiskenmerken van de Aarde overlopen, in de vorm van een *curriculum vitae*, om in de volgende hoofdstukken hier dieper op in te gaan.

1.2.1. "Third Rock from the Sun"

Hoe zou de Aarde zich voorstellen in een *curriculum vitae*? De meest essentiële informatie is zijn ouderdom, waar die gelegen is, en wat zijn meest belangrijke kenmerken zijn. Hieronder is gekozen om eerst wat geometrische informatie weer te geven, evenals wat cijfermateriaal omtrent de bewegingen van de Aarde. De Aarde wordt doorgaans als een "bol" voorgesteld, maar is eerder een afgeplatte ellipsoïde; een bol die iets breder is aan de randen, en iets platter is aan de poolgebieden, dichtbij zijn eigen rotatieas.

Geboortedatum: 4,54 miljard jaar geleden

Adres: Zonnestelsel, 1 AU (astronomische eenheid). De AU is de gemiddelde afstand tussen de Aarde en de Zon en bedraagt 150 miljoen km.

Kenmerken:

Massa: $5,974 \cdot 10^{24}$ kg

Gemiddelde dichtheid: $5,5 \text{ g/cm}^3$

Gemiddelde aardstraal: 6371 km (6378,136 km aan de evenaar en 6356,751 km aan de polen)

Omtrek (evenaar): 381555 km

Tilt van de aardas: $23,5^\circ$ (variatie tussen $21,9^\circ$ en $24,3^\circ$)

Rotatiesnelheid: 0,9973 dagen

Omwentelingsperiode: 365,242 dagen (cfr schrikkeljaar)

Excentriciteit van de omwenteling: 0,01671 (variatie tussen 0,001 en 0,060)

Gemiddelde omwentelingsnelheid: 29,79 km/s (108000 km/u)

De Aarde is gelegen in de bewoonbare zone van het zonnestelsel (Fig. 1.2), gekend als de “*Goldilocks Zone*”, waar de afstand tot de Zon temperaturen toelaat voor vloeibaar water. Planeten die te dicht bij een zon zijn, verliezen hun water door verdamping, en bij planeten (of manen daarvan) die te ver van de zon staan, zal het water enkel in vaste toestand voorkomen. In ons zonnestelsel strekt deze zone zich uit tussen 0,8 en 2,5 AU. Dit is vanzelfsprekend afhankelijk van de warmteproductie van een zon en kan dus in verschillen van het ene tot het andere zonnestelsel. Daarnaast spelen individuele planetaire kenmerken (atmosferische druk, temperatuur, samenstelling) uiteraard ook een rol of er leven kan voorkomen. In hoofdstuk 8 zullen we daarom ook kort bespreken waarom er leven op Mars zou kunnen geweest zijn geweest (en waarom nu niet meer).

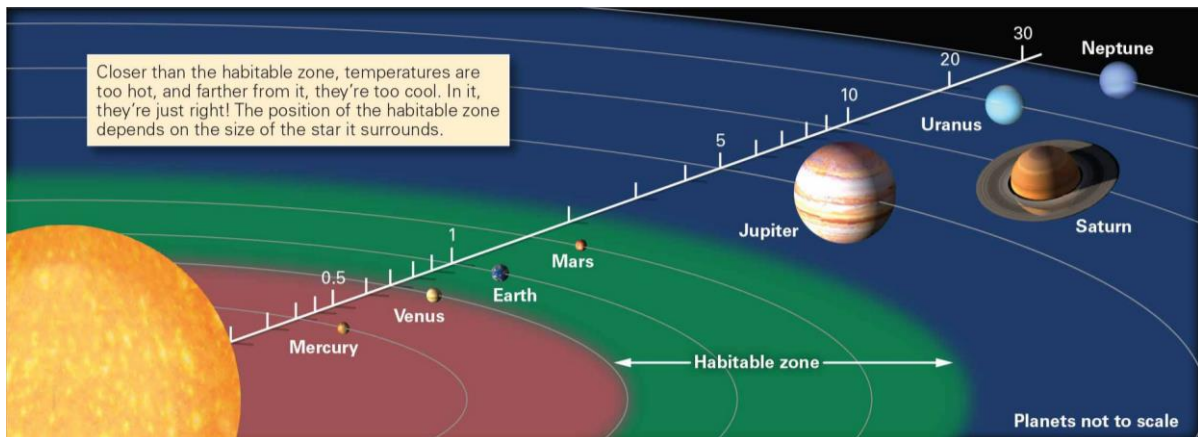


Fig. 1.2 – Locatie van de Aarde in het zonnestelsel, met afstanden in astronomische eenheden (AU). Enkel de Aarde ligt in de relatief smalle bewoonbare zone (Marshak, 2022).

Het aardoppervlak bestaat voor 30% uit land (continenten en eilanden) en 70% uit water (Fig. 1.3). Er is ook een duidelijke **topografie** aanwezig die verschillen aangeeft in de hoogteligging op het landoppervlak. Men kan bijvoorbeeld onderscheid maken tussen vlaktes (*plains*), gebergtekets (*mountain range*) en valleien. Het hoogste punt op land is de top van Mount Everest op 8,9 km boven het zeeniveau, terwijl het diepst gelegen punt op land 0,4 km onder het zeeniveau ligt; de Dode Zee. Ook op de zeebodem is er variatie in de diepte; de **bathymetrie**. Het grootste gedeelte van de zeebodem bestaat uit wijdverspreide abyssale vlaktes (*abyssal plains*), met een relatieve vlakke zeebodem op 4 tot 5 km onder het zeeniveau. Er lopen echter ook langgerekte gebergtekets doorheen de meeste wereldoceanen, die tot 2,5 km boven de abyssale vlaktes opstijgen; de spreidingsassen (*mid-ocean ridges*). Die gebergtekets worden regelmatig doorsneden door grote breuken, gekend als *Fracture Zones*. Daarnaast, meestal gelegen nabij de continenten, kan de zeebodem tot grote dieptes afzakken in de diepzeetroggen (*trench*). Het meest langgerekte systeem van aaneensluitende troggen loopt van het oostelijke tot het westelijke gedeelte van de Stille Oceaan, van Zuid-Amerika tot Alaska, over Kamchatka tot de Filippijnen, Papoua-Nieuw Guinea en Nieuw Zeeland. Het diepste punt ligt op 10,9 km onder het zeeniveau, en staat gekend als de Challenger Diepte in de Marianentrog, op 300 km van het eiland Guam. Toch moeten we deze extremiteiten wat relativeren; de afstand van het hoogstgelegen punt (Mt. Everest) tot het diepst gelegen punt (Challenger Diepte) bedraagt 19,8 km. Dit bedraagt maar 0,3% van de aardstraal (6371 km)... met andere woorden, als de Aarde de grootte van een biljardbal zou hebben, zou die zelfs nog gladder zijn dan die van een echte biljardbal (maar wel eentje die lichtjes is afgeplat).

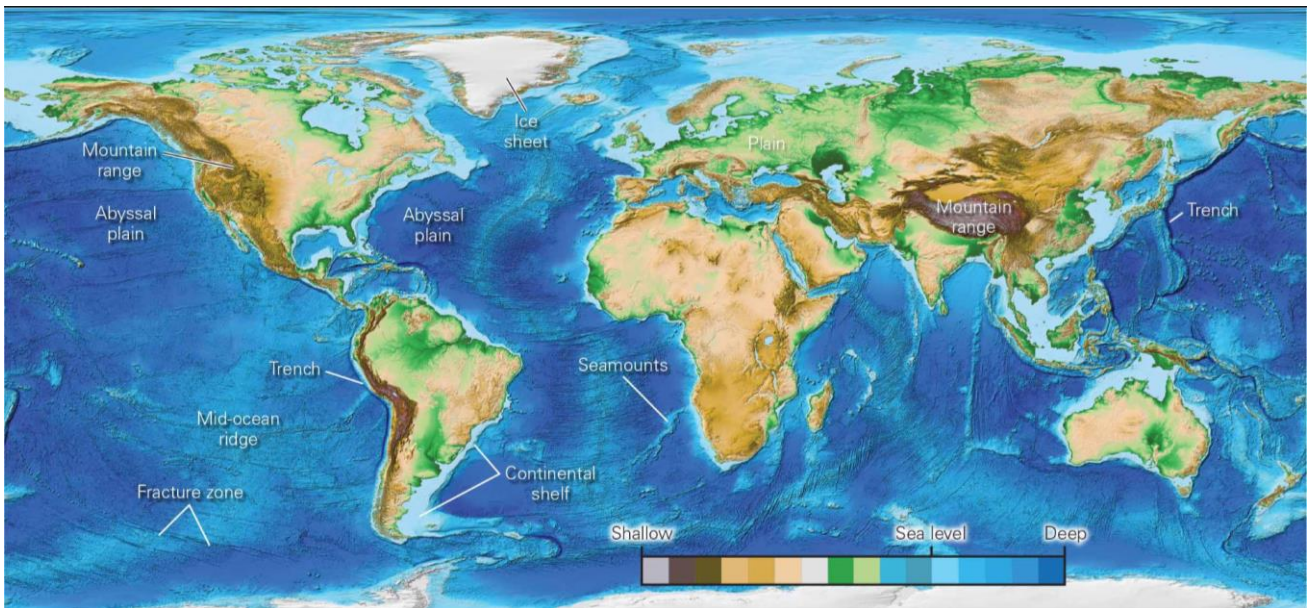


Fig. 1.3 – Deze kaart van de Aarde toont de variaties in hoogte of diepte voor respectievelijk het landoppervlak en de zeebodem (Marshak, 2022).

De verdeling van hoogteligging (zowel positief als negatief) ten opzichte van het percentage bedekking wordt weergegeven op een **hypsometrische curve** (Fig. 1.4). Deze toont dat een relatief klein gedeelte van het aardoppervlak overeenkomt met grote hoogtes (gebergteketen) of grote dieptes (troggen). Het grootste deel van de zeebodem ligt tussen 4 en 5 km diepte. Het grootste deel van het landoppervlak ligt net binnen een km verschil van het zeeniveau. Het gedeelte landoppervlak dat overspoeld is door oceanen, tot ongeveer 300 m diepte, is de continentale shelf (of continentaal plat). Op Fig. 1.4 is dit lichtblauw gekleurd en omvat, bijvoorbeeld, een omvangrijk deel rond de Britse Eilanden en vooral onze Noordzee. Dit impliceert ook dat maar een kleine verhoging van het zeeniveau onmiddellijk een vrij groot gedeelte van het landoppervlak kan innemen. In een context van dreigende zeespiegelstijging door het afsmelten van de ijskappen, dient dit zeer ernstig genomen te worden.

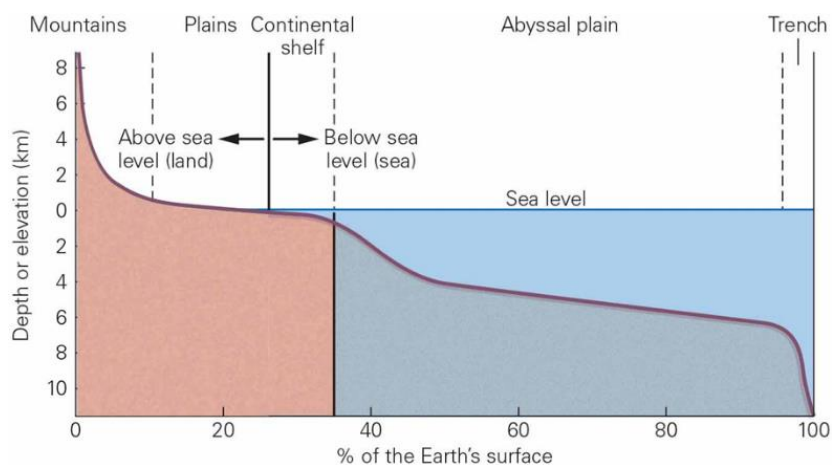


Fig. 1.4 – De hypsometrische curve geeft aan welk percentage van het oppervlak van de vaste Aarde voorkomt onder een andere hoogte of diepteligging. Twee belangrijke zones, de continenten en de aanliggende continentale shelf gebieden enerzijds, en de oceanen anderzijds, nemen het grootste aandeel in beslag. Gebergtes en troggen bedekken maar een relatief klein deel gedeelte van het totale aardoppervlak (Marshak, 2022).

Als we al het water van de Aarde zouden weghalen, kunnen we duidelijk zien dat het ganse oppervlak in verschillende grote “platen” is opgedeeld (Fig. 1.5), grenzend aan spreidingsassen, diepzeetroggen of *Fracture Zones*. Deze platen worden lithosfeerplaten genoemd, en kunnen een verschillende dikte hebben. Doorgaans – maar niet altijd – is het oceanisch gedeelte dunner (100 km) en het continentale gedeelte is dikker (150-200 km). De definitie van een continent, dus ook het aantal continenten, is heel erg afhankelijk vanuit welke invalshoek dit wordt bekeken. De geologische definitie van een continent omvat dat dit een groot en bathymetrisch geïsoleerd gebied moet zijn. Volgens deze definitie zijn er 7 continenten: Afrika, Eurazië, Noord-Amerika, Zuid-Amerika, Australië, Antarctica en Zeelandia (Mortimer *et al.*, 2017). Geografisch kan men, bijvoorbeeld, een onderscheid maken tussen Europa en Azië gebaseerd op socio-culturele verschillen. Zeelandia is er pas sinds 2017 bijgekomen na decennia onderzoek (Fig. 1.5). Het is niet alleen de kleinste continentale massa, maar het ligt ook voor meer dan 90% onder water. Dit botst tegen de lopende veronderstellingen dat continenten boven water “moeten” liggen, maar dit is volledig correct gezien boringen hebben bewezen dat dit allemaal continentale afzettingen zijn die in het verleden zijn verzonken. Zeelandia is ook uniek omdat het doorloopt over twee lithosfeerplaten heen, wat ook niet echt “gebruikelijk” is en ons doet nadenken over de relatie tussen continenten en lithosfeerplaten. Inderdaad, niet alle lithosfeerplaten bevatten continenten, zoals bijvoorbeeld de Nazca plaat direct ten westen van Zuid-Amerika!

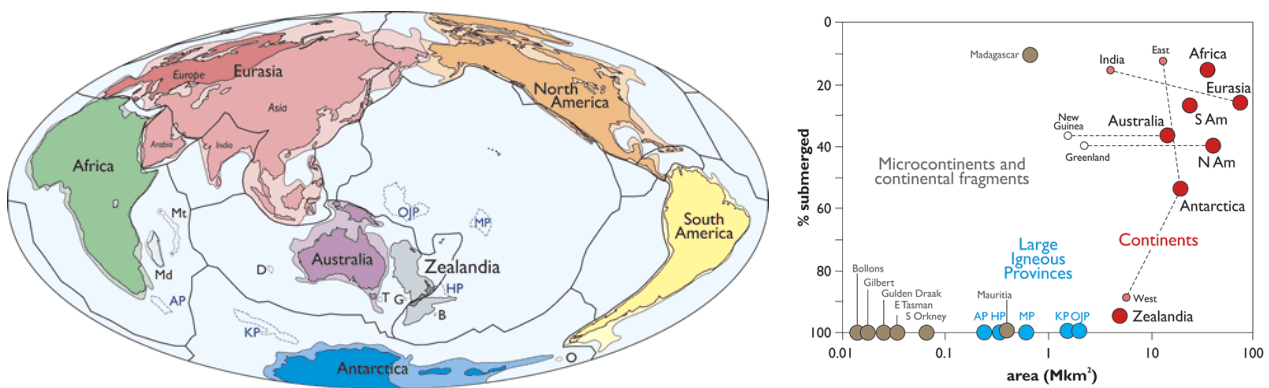


Fig. 1.5 – Links: overzicht van de huidige geologische continenten. Rechts: grootte van de continenten (evenals microcontinenten en Large Igneous Provinces) en percentage dat ze onder water liggen (Mortimer *et al.*, 2017).

1.2.2. Levensloop

1.2.2.1. De geologische tijdschaal

De Aarde gaat al een lange tijd mee en heeft vele (turbulente) periodes ondergaan met verschillende configuraties van continenten, veranderende klimaatscondities en de evolutie van het leven. Om te kunnen verwijzen naar deze verschillende zones in geologische tijd, hebben geologen de geologische tijdschaal ontworpen. Deze wordt vereenvoudigd weergegeven in Fig. 1.6, waar deze schaal uitzonderlijk volledig lineair wordt afgebeeld. Voor het weergeven van geologische tijdstippen of periodes worden vastgelegde afkortingen gebruikt met het voorvoegsel “k” (kilo) voor duizend jaar, “M” (Mega) voor miljoen jaar en “G” (Giga) voor miljard jaar. Als het gaat over een bepaald tijdstip op de geologische tijdschaal, wordt “*annum*” (ka, Ma, Ga) gebruikt. Bijvoorbeeld; de impact van de meteoriet die zorgde voor het uitsterven van de dinosauriërs gebeurde

op 65 Ma. In geval van een tijdsduur wordt gebruik gemaakt van “year” (ky, My, Gy). Bijvoorbeeld; de laatste ijstijd duurde 100 ky.

Het grootste deel van het recente geologische onderzoek focust op de laatste 541 miljoen jaar (Ma); het **Eon** dat gekend staat als het Fanerozoïcum. Dit wordt op zich onderverdeeld in 3 grote **Eras**; het Paleozoïcum (541-252 Ma), Mesozoïcum (252-66 Ma) en het Cenozoïcum (66 Ma – nu). Het (informele) Precambrium omvat de oudere geologische tijd (het Cambrium is de oudste tijdszone van het Paleozoïcum) en bestaat uit 3 **Eons**; het Proterozoïcum (2,5 Ga – 541 Ma), het Archeaan (4,0 Ga – 2,5 Ga) en het Hadeaan (4,54 Ga – 4,0 Ga). Tezamen vertegenwoordigen ze iets meer dan 87% van de aardgeschiedenis. Omdat er doorgaans niet zoveel onderzoek wordt gedaan over het Precambrium, focussen tijdschalen meestal enkel op het Fanerozoïcum, en wordt het Precambrium op een veel kleinere schaal weergegeven (zie hoofdstuk 5). Het zou ook moeten opvallen dat de meest Eons en Eras het Griekse woord “zoön” bevatten, wat “levend wezen” betekent. Dit verwijst effectief naar een welbepaalde fase in de ontwikkeling van het leven, en toont ook mooi aan dat effectief de evolutie van het leven een centrale rol speelt in de opdeling van de grote geologische tijdsvakken. De term Fanerozoïcum verwijst dan ook letterlijk naar “duidelijk (zichtbaar) leven”. Het Paleozoïcum verwijst naar “oud levend wezen”, terwijl Mesozoïcum en Cenozoïcum respectievelijk verwijzen naar “middelste” en “recente” levende wezens. De Fanerozoïsche Eras kunnen ook nog worden opgedeeld in kleinere tijdsindelingen, namelijk de Periodes en de Epochs (zie hoofdstuk 5).

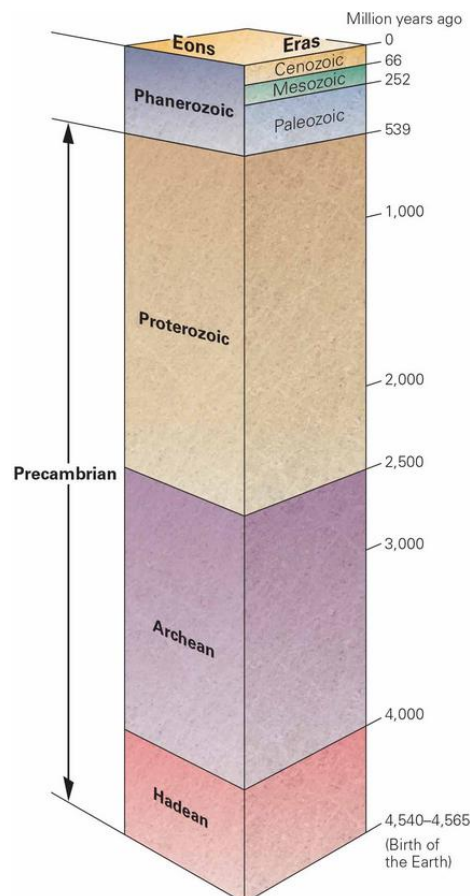


Fig. 1.6 – Vereenvoudigde geologische tijdschaal met aanduiding van de Eons en de Fanerozoïsche Eras. Deze schaal is volledig lineair over de ganse aardgeschiedenis (Marshak, 2022).

Kader 1.2: De relativiteit van geologische tijd

Meer dan andere wetenschappers, hebben geologen een zeer unieke kijk op het aspect tijd. Voor een geoloog is tijd relatief. Iets wat 1000 jaar duurt, lijkt voor de mens meer dan een eeuwigheid, maar voor een geoloog is dit ontzettend snel. De Aarde bestaat 4,6 miljard jaar. Dat is voor een geoloog wel degelijk “lang geleden”. Om het concept geologische tijd wat begrijpelijker te maken, zou je de geschiedenis van de Aarde in één kalenderjaar kunnen gieten. Als je dat doet, komt 1 dag overeen met 12,5 miljoen jaar. Als de Aarde dan ontstaat op 1 januari, dan ontstaat Homo sapiens, de moderne mens pas op 31 december, een uurtje voor middernacht. Alle gekende menselijke geschiedenis vindt plaats tijdens de laatste 30 seconden...

Hoewel geologen bedreven tijdsreizigers zouden willen zijn, bestaat er ook een onzekerheid over deze tijd, en dat heeft alles te maken met het “geheugen” van het geologische archief. Dat werkt net hetzelfde als je eigen geheugen. Gebeurtenissen van gisteren komen nog vlot voor de dag, daar waar gebeurtenissen van 1(0) jaar geleden toch wel wat vager zijn. Daarom dat geologen die – bijvoorbeeld – in het Quartair werken (de voorbije 2.6 My, gekenmerkt door de ijstijden), véél nauwkeuriger in de tijd kunnen werken (met een nauwkeurigheid van “maar” een 100-tal jaar). Dit is in tegenstelling tot de “deep-time” geologen die met “nauwkeurigheden” van 100 ky tot 1 My moeten werken in het Paleozoïcum. Eén van de redenen waarom dit moeilijker gaat, is omdat deze oudere “archieven” moeilijker of niet meer beschikbaar zijn; ofwel zitten ze al diep in de korst begraven, ofwel zijn ze door erosie of platentektoniek al totaal van het oppervlak van de Aarde geveegd. Het is zo goed als onmogelijk om bijvoorbeeld gesteenten op Aarde te vinden die ouder zijn dan 3.6 Ga. Een andere reden is dat de meeste dateringstechnieken (zie hoofdstuk 5) werken op radioactief verval, en dus ook niet echt heel ver in de tijd terug kunnen gaan. Hoe recenter de afzetting, hoe meer mogelijkheden er zijn om de ouderdom te achterhalen.

1.2.2.2. Periodiciteit van geologische processen

De Aarde is eerder al eens vergeleken met een thermodynamische machine, en het mag geen verrassing zijn dat machines enige regelmaat vertonen in hun werking. Iedereen is zeker vertrouwd met sommige Aardse regelmatige processen, zoals de gevolgen van de aardrotatie (dag/nacht), de omwenteling van de Aarde rond de Zon (seizoenen), maar ook getijden en zonnevlekken. Dit zijn allemaal **quasi-periodische processen**; hier staat (min of meer) een regelmaat op, maar dan wel op menselijke maat. Binnen een mensenleven, zien we deze cycli regelmatig opduiken. Processen zoals El Niño (een belangrijke klimatologische verstoring die om en bij de 10 jaar gebeurt aan de westkust van Zuid-Amerika) en meteorietenregens (bijvoorbeeld de Perseïden rond mid-Augustus) zijn respectievelijk **niet-periodische processen** en **gebeurtenissen** die een statistische, maar onregelmatige herhalingsperiode hebben. Figuur 1.7 toont dan ook duidelijk aan dat hier (in tegenstelling tot bij de bovenste lijn waar de aardrotatie toe behoort) enige foutenmarge aanwezig is. De meeste geologische processen vallen net buiten die menselijke maat, maar het kan toevallig wel eens kort op elkaar gebeuren, kijk maar naar tsunami's. Tot voor 2004 had niemand echt een grote tsunami meegemaakt; en dan volgden er enkele vrij grote tsunami's relatief kort op elkaar in Indonesië (2004), Chili (2010) en Japan (2011).

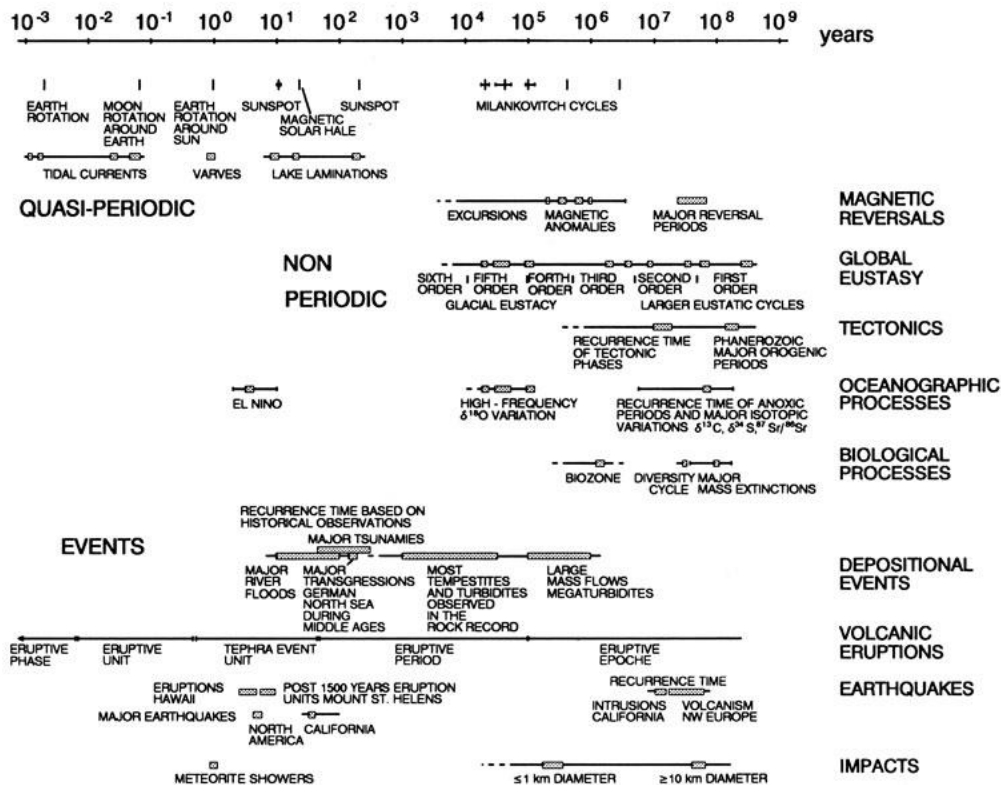


Fig. 1.7 – Herhalingsstijd van quasi-periodische en niet periodische processen en gebeurtenissen (Einsle et al., 1991).

Quasi-periodische processen zijn hoofdzakelijk te wijten aan de regelmatige fysieke rotatie van de Aarde, de omwenteling van de Aarde om de Zon en effecten van de Maan op de Aarde. De Milankovitch cycli zullen kort worden besproken in hoofdstuk 3, maar zijn gekoppeld aan variaties in de manier van rotatie en omwenteling. **Niet-periodische processen** gebeuren zo goed als allemaal met een regelmaat van 10 ky tot 100 My. Hier zit niet echt een fysieke regelmaat achter, hoewel grote cycli kunnen worden herkend die terugvallen tot de fundamentele werking van de Aarde. Hieronder vallen de magnetische ompoling (zie hoofdstuk 6), zeespiegelschommelingen van verschillende grootteordes (zie hoofdstuk 9), tektonische cycli zoals gebergtevorming, openen en sluiten van oceanen (zie hoofdstuk 9) en zelfs biologische processen zoals veranderingen in diversiteit (evolutie) en extincties (zie hoofdstuk 8). De **gebeurtenissen** omvatten herhalingsstijden gebaseerd op historische waarnemingen, en eerder een statistische indeling is (en misschien te lezen moet zijn als een kansrekening...). Als je de aard van deze gebeurtenissen bekijkt, gaat het veelal over natuurlijke risico's en het voorkomen van kleinere tot echt catastrofale gebeurtenissen. Dit is duidelijk als je kijkt naar de onderverdeling van vulkanische erupties, aardbevingen en zeker impacten van meteorieten. De “*depositional events*” slagen op afzettingen in een aquatische omgeving, en omvatten overstromingen, tsunami's, stormafzettingen (*tempestieten*) en grote afglijdingen (die op zich potentieel gekoppeld kunnen worden aan nog grotere tsunami's). Dit overzicht heeft dus eerder de bedoeling om een beeld te scheppen over welke tijdschalen bepaalde geologische processen zich kunnen voordoen, en merendeels buiten het bereik van een mensenleven. De individuele processen zullen in latere hoofdstukken worden toegelicht. Trouwens, een mooi verhaal over hoe de menselijke maat “in conflict” komt met de geologische processen valt te lezen in het gelijknamige boek van Kroonenberg (2007).

1.2.3. Anatomie en metabolisme

De werking van de Aarde kan worden vergeleken met de werking van een menselijk lichaam. Naast zijn structuur (anatomie), zijn er verschillende belangrijke onderdelen die de werking ervan onderhouden. Deze verschillende onderdelen kunnen apart bekeken worden, maar toch staan ze met elkaar in verband en loopt de ene soms in de andere over (denk maar aan spijsvertering, ademhaling, bloedsomloop,...). Dat onderhoud kan enkel plaatsvinden als er voldoende energie wordt geleverd. Bij de Aarde kunnen we rekenen op zowel interne als externe energiebronnen. De “anatomie” van de Aarde wordt doorgaans voorgesteld als een reeks concentrische sferen, van het centrum van de Aarde tot zijn buitenste lagen. Ondanks het feit dat ze hier apart worden behandeld, zal het in de volgende hoofdstukken duidelijk worden hoe de (complexe) interacties tussen al deze sferen verliepen of verlopen.

1.2.3.1. De Aardse sferen

De **geosfeer** is de vaste Aarde, die ook kan worden ingedeeld in enkele regelmatig gestructureerde sferen. Dat onderscheid wordt hoofdzakelijk gemaakt op basis van de scheikundige samenstelling en ook de fase waarin dat materiaal zich bevindt (zie hoofdstuk 6). Hoewel de gemiddelde dichtheid van de Aarde $5,5 \text{ g/cm}^3$ bedraagt, verhoogt de dichtheid van deze gesteenten naar het centrum van de Aarde toe (Fig. 1.8). Korstgesteenten hebben doorgaans maar een gemiddelde dichtheid van $3,0 \text{ g/cm}^3$, waar de dichtheid van gesteenten in de kern kan oplopen tot $7,9 \text{ g/cm}^3$.



Fig. 1.8 – Voorbeelden van typische gesteenten die voorkomen in de verschillende lagen in de Aarde. Continentale korst heeft een samenstelling die doorgaans overeenkomt met die van graniet, waar oceanische korst eerder overeenkomt met die van basalt en gabbro. De mantel bestaat hoofdzakelijk uit peridotieten en de kern uit een legering van ijzer en nikkel. Dit laatste is een veronderstelling op basis van de kennis uit meteorieten (Marshak, 2022).

De meest centrale zone van de Aarde is de vaste binnenkern (6371 km – 5155 km) die hoofdzakelijk bestaat uit een legering van hoofdzakelijk ijzer en nikkel (Fig. 1.9). Daarrond zit een vloeibare buitenbinnenkern (5155 km – 2890 km) die bestaat uit een metallische smelt. Ondanks het feit dat de gehele kern in volume vrij klein is (16%), is zijn aandeel in de massa van de Aarde significanter (32%) door de hogere dichtheid van de aanwezige massa. De mantel (2890 km – 35 km) is de dikste zone van de Aarde (82% van het volume en 68% van de Aardse massa) en bestaat uit donkere vaste silicaatgesteenten; peridotieten. De mantel kan op zich worden onderverdeeld in een onder- en bovenmantel met een grens op 660 km. Het gedeelte tussen 660 en 410 km staat gekend als een overgangszone, gekenmerkt door een verschil in dichtheidsverdeling (zie hoofdstuk 6). De buitenste laag van de vaste Aarde is de korst met een gemiddelde dikte van 35 km (maar

kan variëren tussen 7 en 70 km); de oceanische korst is doorgaans dunner (7-10 km) dan de continentale korst (25-70 km). De dikste (maar stevig vervormde) continentale korst is gelegen onder gebergtekets. Het is ook in die dikke continentale korst dat we de oudste gesteenten van de Aarde kunnen vinden. In vergelijking met de gemiddelde Aardstraal, neemt de korst hier maar een aandeel van 0.1 tot 1% in. De samenstelling van de continentale korst is vrij heterogeen, maar komt doorgaans overeen met graniet. Daarentegen bestaat de oceanische korst hoofdzakelijk uit basalten en gabbro's (Fig. 1.8). Deze korst is geologisch vrij jong en is maximaal 200 My oud. De continentale korst ($2,7 \text{ g/cm}^3$) heeft dan ook een kleinere dichtheid in vergelijking met de oceanische korst ($3,0 \text{ g/cm}^3$). De grens deze korst en mantel is de **discontinuïteit van Mohorovičić (MOHO)**, gekenmerkt door een overgang van respectievelijke heterogene korstgesteenten naar de homogene silicaatgesteenten van de mantel.

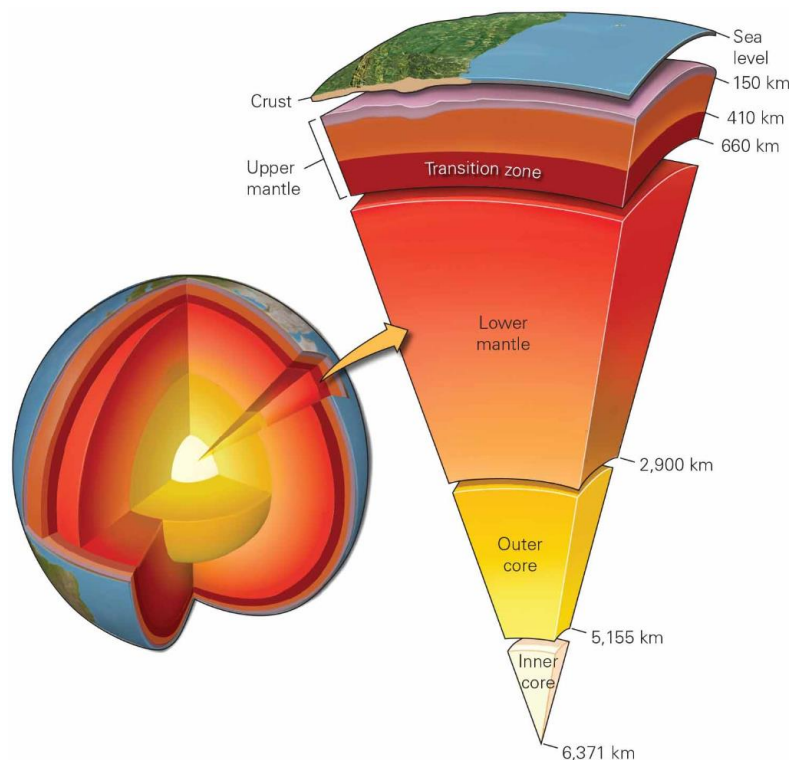


Fig. 1.9 – Een hedendaags overzicht van de opbouw van de geosfeer. Merk dat de continentale korst steeds dikker is dan de oceanische korst. De continentale korst kent ook variabiliteit in dikte en gesteentetype (Marshak, 2022).

De buitenste lagen van de Aarde kunnen ook op een andere manier worden ingedeeld, bepaald door hun rheologisch gedrag. Rheologie is de studie van de vloeijing en vervorming van materiaal onder druk. Meer specifiek heeft dit weerslag op de dynamische bewegingen van de buitenschaal van de Aarde; de platentektoniek. Die beweeglijkheid is volledig gekoppeld aan warmte, en staat los van de aard van het gesteente. De **lithosfeer** is de “koude” buitenste vaste en plastische (breekbare) cel van de Aarde en bestaat uit de korst en een deel van de bovenmantel (Fig. 1.10). De ondergrens voor de lithosfeer bedraagt 1600 K (en ligt dus in de mantel). De **asthenosfeer** is het “warme” bovenste deel van de bovenmantel (tot 660 km diepte) en gedraagt zich elastisch, dus vervormbaar. Het wordt aanzien als de smeerlaag waarop de lithosfeer horizontaal als verticaal kan bewegen. Dit is dus nog altijd vast gesteente, maar dat wel extreem traag beweegt, aan een snelheid van 15 cm per jaar (ongeveer even “snel” als de gemiddelde menselijke haargroei).

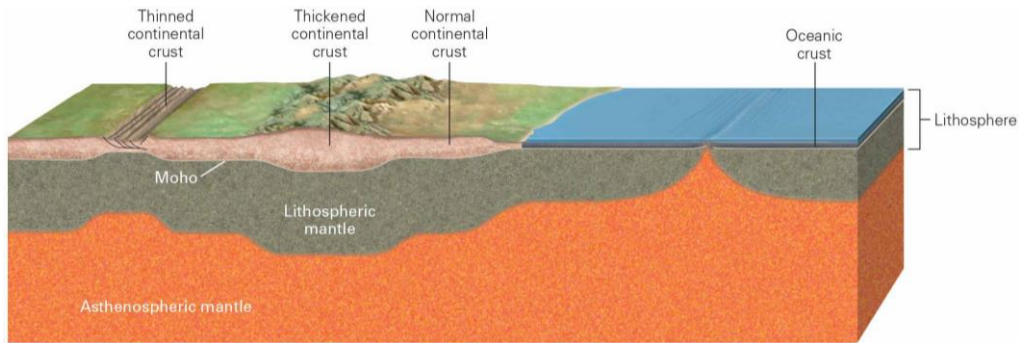


Fig. 1.10 – Blokdiagram van de lithosfeer. Let op de het verschil in dikte (en evolutie) van de oceanische lithosfeer ten opzichte van de continentale lithosfeer en zijn verschil in dikte (Marshak, 2022).

De buitenste sferen van de Aarde grenzen allen aan de lithosfeer. In de eerste plaats is er de vloeibare **hydrosfeer**, de vaste **cryosfeer** en gasvormige **atmosfeer**. Dwars door al deze sferen loopt ook de **biosfeer** en de menselijk gegenereerde **technosfeer**.

De **hydrosfeer** is de verzameling van alle vloeibare water en omvat de oceanen (98%), meren, rivieren, maar ook bodem- en grondwater (hoe diep ook). Het belang van water op Aarde is op vele vlakken niet te onderschatten; het aardoppervlak bestaat dan ook voor 71% uit water. Het is van onmiskenbaar belang voor alle levende organismen op Aarde. Ook voor de lithosfeer is de hydrosfeer van belang gezien het tezamen valt met de watercyclus (zie hoofdstuk 3), die verantwoordelijk is voor de continue erosie van gebergtekets en de afvoer van sediment via rivieren naar de sedimentatiebekkens in meren, zeeën en oceanen.

De **cryosfeer** is de verzameling van alle opgeslagen water als ijs, zoals zeeijs, rivierijs, sneeuw, gletsjers, ijskappen, permafrost... met vanzelfsprekend een grote dynamische overlap met de hydrosfeer. Deze twee sferen werken ook als communicerende vaten waar bij klimaatsveranderingen zoals ijstijden en tussenijstijden beide – over een bepaalde geologische tijdsperiode – in elkaar overlopen. Dit werkt uiteraard ook op een kortere tijdschaal (zomer vs. winter), maar dan met een kleinere impact.

De **atmosfeer** kan worden gedefinieerd als aan de Aarde gebonden lucht door de zwaartekracht. Meer algemeen – op planetair niveau – is een atmosfeer een verzameling van gassen rond een lichaam met voldoende massa, in plaats gehouden voor de zwaartekracht van dat lichaam (zie hoofdstuk 3). De dichtheid van een atmosfeer is dus afhankelijk van de samenstelling van de aanwezige gassen en het lokale zwaarteveld (en is dus niet overal in het zonnestelsel hetzelfde). Hoewel deze laag gevuld met gas maar een insignificant klein gedeelte inneemt ten opzichte van de planetaire massa (minder dan 0,01%), is het een zeer belangrijke laag wegens zijn vlotte beweeglijkheid en zijn constante interactie met de oceanen en het land. Het is grotendeels verantwoordelijk voor het vormgeven van het landschap, en is uiteraard essentieel voor het leven. Met toenemende hoogte wordt de atmosfeer dunner. Er wordt aangenomen dat de Aardse atmosfeer reeds kan worden waargenomen op 120 km hoogte, en de Karman lijn (op 100 km) wordt als aangenomen grens aanvaard. Buiten de atmosfeer, in de **exosfeer**, stijgt de temperatuur tot 1727°C. Dit wordt echter niet zo ervaren gezien de exosfeer zo goed als een vacuüm is, waarbij de moleculen geen contact met elkaar hebben, en deze extreem hete temperaturen in werkelijkheid bij het vriespunt liggen.

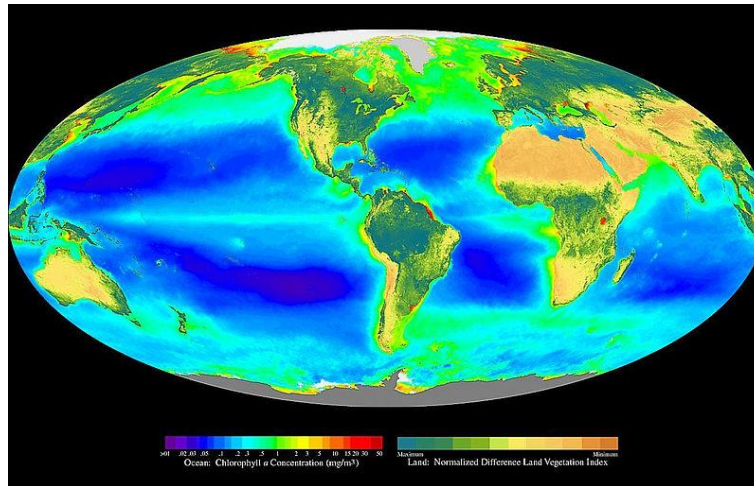


Fig. 1.11 – Grootte en verdeling van globale primaire productie, als kenmerk van de biosfeer. De oceanische productie is weergegeven aan de hand van de dichtheid van chlorofyl a (mg/m^3) en de terrestrische productie is weergegeven aan de hand van de landvegetatie index (SeaWiFS project, NASA Goddard Space Flight Center & ORBIMAGE).

De **biosfeer** (Fig. 1.11) is de globale som van alle ecosystemen en vertoont de grootste interacties met lithosfeer, hydrosfeer, atmosfeer en cryosfeer. Zelfs in de diepe Aarde werd bacteriële activiteit teruggevonden. De evolutie van de biosfeer gaat terug tot 3.5 Ga (zie hoofdstuk 8). Tot nu toe zijn er 1.6 miljoen verschillende soorten beschreven, maar schattingen duiden aan dat er nog een 3 miljoen ongekend zijn. Het grootste deel van deze ecosystemen bevindt zich op land, en een kleiner deel in de oceanen, vooral in de zone die zonlicht bevat (de fotische zone, tot maximaal 200 m waterdiepte). Het is echter in de donkere, diepe en dus “onzichtbare” zones van de oceanen dat er waarschijnlijk nog veel meer leven is dan nu gekend.

De laatste sfeer is relatief nieuw, maar daarom niet onbelangrijk, aangezien het een zeer snelle en ingrijpende verandering aan onze planeet omvat. De **technosfeer** (Zalasiewicz *et al.*, 2016) wordt gedefinieerd als de som van alle materiële producten van menselijk ondernemen. Het omvat alle actieve stedelijke, agrarische en mariene componenten die gebruikt worden om de aanvoer van energie en materiaal voor de dagdagelijkse menselijke werking te onderhouden. Dit zijn dus onze wegen, huizen, fabrieken, landbouwgronden, computers, smartphones, satellieten... Dit gaat zelfs over genetisch gemodificeerde gewassen, waarmee de mens met zijn technologie ingrijpt in de biosfeer (en het toekomstige paleontologische archief aantast). Zonder enige twijfel is de technosfeer dan ook (op een quasi parasitische manier?) vervlochten alle andere sferen aan de oppervlakte van de Aarde. Dit vormt een groeiende laag waarvan enkel een klein gedeelte wordt gerecycleerd. Voorlopige schattingen stellen een massa voor van ongeveer 30 triljoen ton (Tt), wat neerkomt op gemiddeld meer dan 50 kg per vierkante meter aardoppervlak. Deze technosfeer ondersteunt dus volledig het menselijk leven (en omgekeerd...), waarvan de biomassa ongeveer 5 grootteordes kleiner is. Hoewel deze technosfeer geologisch extreem jong is, evolueert deze met een (geologisch) ontzettende snelheid, en laat al zeer diepe sporen na in onze planeet. Dit concept ligt ook mee aan de basis van de definitie van een nieuwe geologische tijdseenheid; het **Anthropoceen** (Lewis & Maslin, 2015). Dit is de “nieuwste” geologische “*Epoch*” (doch nog niet officieel erkend) waar onmiskenbaar de invloed van de mens over de ganse Aarde merkbaar is. Er is nog steeds discussie over de “startdatum” van deze periode, maar de consensus lijkt te groeien naar 1945, gekenmerkt door de eerste nucleaire atoombomtesten en de snelle naoorlogse groei van zowel industriële productie en de wereldbevolking. Dit zal deels nog verder aan bod komen in hoofdstuk 8.

1.2.3.2. De energiebronnen van de Aarde

De werking van de Aarde kan niet zonder een permanente aanvoer van energie, in de vorm van warmte. De grote geologische processen op Aarde worden aangedreven door zowel **interne** als **externe** energiebronnen. Dit wil echter niet zeggen dat warmte exclusief verantwoordelijk is voor alle geologische processen. Een andere belangrijke speler achter zowel interne en externe processen is de **zwaartekracht** (zie hoofdstuk 6).

In de eerste plaats is de **externe** energie (tevens ook afhankelijk van de positie van de Aarde ten opzichte van de Zon) belangrijk voor het bepalen van ons klimaat door processen van reflectie en absorptie binnen de atmosfeer. De grootte van de cryosfeer speelt daarom een belangrijke rol voor de reflectiviteit van de externe warmte. Hoe groter het cryosferische oppervlak, hoe groter de reflectie van de zonnewarmte (albedo). Deze processen gaan de atmosferische circulatie aandrijven, die – over het algemeen – verantwoordelijk is voor de herverdeling van de warmte van de evenaar naar de polen (zie hoofdstuk 3). In de tweede plaats gaat de atmosferische circulatie een belangrijke rol spelen in het aandrijven van de oceanische circulatie (vooral de oppervlaktecirculatie over de bovenste 500 m). Zelfs de diep-water circulatie wordt aangedreven door thermohaliene processen aan de poolregio's. Veranderingen in het klimaat hebben vanzelfsprekend dus effect op atmosferische (snel) en oceanische circulatie (trager).

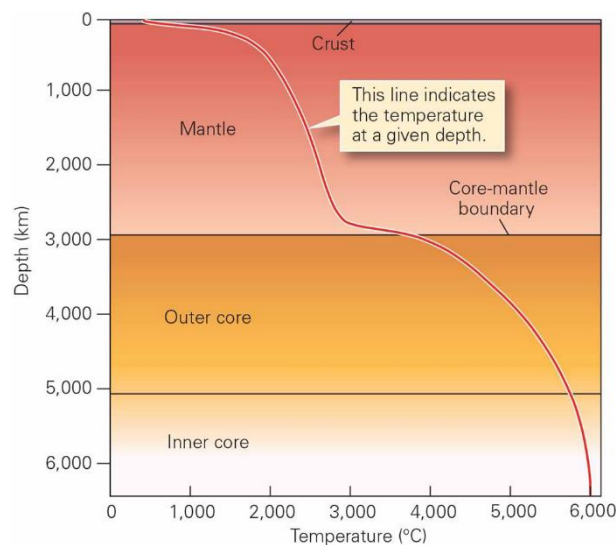


Fig. 1.12 – Voorstelling van de geothermische gradiënt (Marshak, 2022).

Het grootste deel van de energie is echter afkomstig van de Aarde zelf als een goed werkende thermodynamische machine. Deze **interne** warmte zorgt ervoor dat de temperatuur toeneemt met de diepte, volgens de **geothermische gradiënt** (Fig. 1.12). Iedereen die diepe mijngangen (steenkoolmijnen, zoutmijnen) heeft bezocht, heeft dit waarschijnlijk al eens gevoeld. Deze verschilt tussen gemiddelde waarden van 15 tot 30°C/km in het bovenste gedeelte van de korst, naar een 10°C/km op grotere dieptes. Uiteraard is dit nooit rechtstreeks gemeten, en kennen we deze informatie enkel door middel van geofysische waarnemingen en schattingen. De diepste wetenschappelijke boring, uitgevoerd tussen 1970 en 1989 in Kola schiereiland (Rusland) bereikte een diepte van 12,262 km, wat maar overeenkomt met de bovenste 0,2% van de Aarde. Onder de continentale korst kunnen de temperaturen al oplopen tot 400 à 700°C, daar waar de

temperatuur tussen de kern en de mantel 3500°C bedraagt. De geschatte temperatuur in de kern bedraagt waarschijnlijk meer dan 4700°C, wat vrij dicht de oppervlaktetemperatuur van de Zon bedraagt (5500°C of 5800 K).

De intern geproduceerde energie komt voor 20% van **accretiewarmte**. Deze initiële warmte is een overblijfsel van de vorming van de Aarde (*zie hoofdstuk 2*), waaronder de warmte die afkomstig is van impacten van meteorieten of kometen. Hoewel er moeilijk een positief aspect aan zulke impact kan worden gebonden, hebben ze in het geologische verleden wel degelijk een belangrijke rol gespeeld in het vormen van de Aarde. Zo zou de bron van water en leven op Aarde toegedragen kunnen worden aan de impact van kometen, hoewel hiervoor nog geen sluitend bewijs voorhanden is. Het grootste deel (80%) van de interne warmte van de Aarde is **radiogene warmte**. Dit het gevolg van radioactief verval van K^{40} , U^{238} , U^{235} en Th^{232} . Wetende dat dit radiogeen verval al 4,6 Gy bezig is, impliceert dit ook dat het aantal radiogene elementen in het geologische verleden drastisch hoger lag, met een hogere warmteproductie tot gevolg (naast een hogere accretiewarmte, uiteraard). De werking van de Aarde - de geodynamica – was toen dan ook heviger, met meer mantelpluimen en een intensere platentektoniek. Het gemiddelde huidige warmteverlies aan het aardoppervlak bedraagt 87 mW/m². Ter vergelijking produceert de kern van de Zon zo'n 276,5 W/m³. De aard van de warmteproductie is uiteraard verschillend; in de kern van de Zon wordt de warmte geproduceerd door een fusie van protonen (H) tot Helium tot een temperatuur van $15,7 \cdot 10^6$ K. Het is enkel in dit relatief kleine deel van de Zon (24%) dat 99% van de warmteproductie plaatsvindt. Aan het oppervlak van de Zon is die temperatuur “afgekoeld” tot 5800 K. Een laatste – bijkomende - bron van energieproductie op Aarde is de **latente warmte**. Dit is de warmte (energie) die nodig is om een stof een faseovergang te doen ondergaan onder constante druk en temperatuur. Echter, deze is van minder belang in het algemene energiebudget (maar niet voor de werking) van de Aarde.

De meest geodynamische processen, zoals de platentektoniek, worden hoofdzakelijk gestuurd door warmte vanuit de kern van de Aarde. Daarom dienen we niet alleen te weten hoe de huidige werking verloopt (*zie hoofdstuk 6*), maar dienen we ook te begrijpen hoe de Aarde gevormd is, en hoe de huidige situatie tot stand is gekomen. Vandaar dat het volgende hoofdstuk zich gaat toeleveren op het ontstaan van de Aarde, hoofdzakelijk vanuit een chemisch oogpunt.