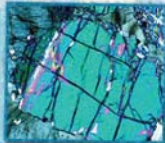
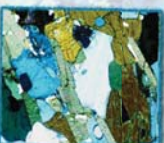
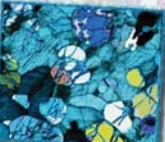
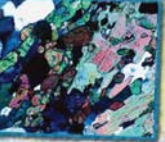
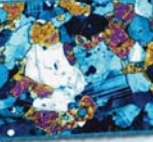


Natuurlijke samenstelling van delfstoffen

 32 18 2 Hg 80. 200.6	 13 1 Cr 24. 52	 18 1 Cu 29. 65.4	 18 5 As 33. 74.9	
 32 18 4 Pb 82. 207.2	 18 2 Zn 30. 65.4	 16 2 Ni 28. 58.7	 18 2 Cd 48. 112.6	

Dr. L. Broothaers

ministerie van de Vlaamse Gemeenschap
afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie



Redactie: Ludo Broothaers, afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie
Lay-out en tekeningen; Vera Laforce, afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie
Taaladvies: Katleen Maesen en Natalie Hulsen, afdeling Coördinatie en Ontvangst

Verantwoordelijke uitgever: André Van Haver, waarnemend directeur-generaal, administratie Economie

Wettelijk depotnummer: D/2003/3241/257

VOORWOORD

In tegenstelling tot wat het algemeen publiek er vaak van denkt, bevat de Vlaamse ondergrond een substantiële hoeveelheid delfstoffen. Weliswaar geen koper- of ijzerertsen, maar toch essentiële grondstoffen voor een aantal belangrijke economische sectoren. Klei, leem, grind en diverse zandsoorten liggen aan de basis van woningbouw, infrastructuurwerken, baksteen- en betonnijverheid en de glasindustrie. Zonder die delfstoffen is onze moderne samenleving niet mogelijk.

De afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie van de administratie Economie moet erover waken dat de valorisatie van deze delfstoffen op een zo duurzaam mogelijke manier plaatsvindt. Daarvoor moet een evenwicht gezocht worden tussen economische behoeften, zuinig verbruik, maatschappelijke aanvaardbaarheid en milieuvriendelijkheid.

In het licht van de zorg voor een schoner en gezonder milieu moet de afdeling daarom ook bijdragen tot de kennis van de milieuhygiënische kwaliteiten van de delfstoffen.

Het opsporen van verontreinigde en voor de gezondheid risicohoudende partijen ondergrond vergt degelijk onderzoek naar de chemische samenstelling ervan. Dat houdt echter wel in dat men weet hoe de oorspronkelijke samenstelling van die ondergrond eruit zag. Niemand is dan beter geplaatst dan deze afdeling om hierop een antwoord te geven, want zij houden toezicht op alle ontginningen van delfstoffen in Vlaanderen.

De redactie van dit boek beantwoordt aan een dubbele motivatie. Ten eerste, bij verontreinigingen vallen vaak onrustwekkende woorden zoals lood en arseen. De auteur wil daarom met dit boek aantonen dat dergelijke elementen op natuurlijke wijze overal in onze omgeving aanwezig zijn, in zeer kleine hoeveelheden, en dat hun aanwezigheid niet noodzakelijk tot ongerustheid hoeft te leiden. Vandaar ook de titel van het boek: natuurlijke samenstelling van delfstoffen. De tweede reden om dit volume samen te stellen is de noodzaak om de geïnteresseerde Vlaamse burger in te lichten over de onderzoeksactiviteiten van de administratie. Het geeft een overzicht en synthese van de onderzoeken die de recentste vijf jaren rond dit onderwerp door de administratie ontplooid werden, inclusief alle resultaten.

Mede in het zog van de recente goedkeuring van het Oppervlaktedelfstoffendecreet door het Vlaams Parlement, hopen de minister en de administratie met dit boek een bijdrage te leveren tot een betere kennis en een rationeel beheer van de Vlaamse ondergrond.



André Van Haver
wnd. directeur-generaal
Departement Economie, Werkgelegenheid,
Binnenlandse Aangelegenheden en Landbouw

INHOUD

HOOFDSTUK 1: INLEIDING	9
1.1 ONTSTAAN VAN EEN PROBLEEM	11
1.2 PROBLEEMSTELLING	11
1.3 DEFINITIES	12
1.4 BEMONSTERINGSPROBLEMEN	13
1.5 CHEMISCHE ANALYSEN	14
HOOFDSTUK 2: DICHTERBIJ DAN JE DENKT	17
2.1 SPORENELEMENTEN IN MENS EN DIER	19
2.2 SPORENELEMENTEN IN PLANTEN	21
2.3 SPORENELEMENTEN IN DE AARDKORST	23
2.4 SPORENELEMENTEN IN OPPERVLAKTEWATER	25
2.5 ENKELE NABESCHOUWINGEN	27
HOOFDSTUK 3: VERSTOPPERTJE SPELEN	31
3.1 WAT ZIJN MINERALEN ?	33
3.2 DE KRISTALLIJNE TOESTAND	33
3.3 IONENSTRAAL	37
3.4 ELEMENTEN VANGEN	37
3.5 ADSORPTIE	40
HOOFDSTUK 4: GEOCHEMISCHE PROCESSEN	43
4.1 STOLLINGSGESTEENTEN	46
4.1.1 Stollingsverhaal	46
4.1.2 Gefractioneerde kristallisatie	48
4.1.3 Gedifferentieerde samenstellingen	49
4.1.4 Belangrijkste mineralen	50
4.1.5 Verdeling over mineralen	52
4.1.6 Verdeling over gesteenten	54
4.2 VERWERING	55
4.2.1 Van veldspaat naar kaolien	56
4.2.2 Kleimineralen	57
4.2.3 Van pyroxeen naar ijzeroxide	57
4.2.4 Mobiliteit	60
4.2.5 Bodemvorming	60
4.3 SEDIMENTATIE	62
4.3.1 Grind	62
4.3.2 Zand	63
4.3.3 Accessorische mineralen	63
4.3.4 Silt	64
4.3.5 Klei	64
4.3.6 Opgeloste stoffen	64
4.3.7 Sporenelementen	64
4.4 DIAGENESE	65

HOOFDSTUK 5: SPORENELEMENTEN IN DE VLAAMSE GEOLOGIE.....	69
5.1 SCHEMATISCHE STRUCTUUR.....	71
5.2 LEEM.....	73
5.3 LITHOSTRATIGRAFIE.....	73
5.4 ALLUVIALE VLAKTES.....	75
5.5 ONDERZOEKSPROGRAMMA.....	75
5.5.1 Sporenelementen in boorkernen.....	75
5.5.2 Sporenelementen in ontginningsgebieden.....	76
5.5.3 Hoofdelementen versus sporenelementen.....	76
HOOFDSTUK 6: ANALYSERESULTATEN.....	87
6.1 ANALYSEMETHODEN.....	89
6.2 GEANALYSEERDE ELEMENTEN.....	89
6.3 accuraatHEID EN PRECISIE.....	89
6.4 VERGELIJKING TUSSEN LABORATORIA.....	90
6.5 RESULTATEN.....	108
6.5.1 Gehalten rond detectielimieten.....	108
6.5.2 Geochemische kaarten.....	108
6.5.3 Correlaties.....	108
6.6 POPULATIES EN VERDELINGEN.....	115
6.7 GEHALTEN IN DELFSTOFTYPES.....	117
6.8 VERGELIJKING ONTSLUITINGSMETHODEN.....	118
6.9 GLAUCONIET.....	120
HOOFDSTUK 7: SPORENELEMENTEN EN REGELGEVING.....	123
7.1 BEVOEGDHEIDSDOMEINEN.....	125
7.2 ACHTERGRONDGEHALTE.....	126
7.3 ACHTERGRONDDREMPEL.....	127
7.4 TOETSINGSWAARDEN.....	128
7.4.1 Regressielijnen.....	130
7.4.2 Toetsingsfuncties.....	130
7.4.3 Bepaling van de achtergrondrempels.....	131
7.5 DE PROEF OP DE SOM.....	133
7.6 BETEKENIS VAN OVERSCHRIJDINGEN.....	133
7.7 NABESCHOUWINGEN.....	134
BIJLAGE.....	137
LITHOSTRATIGRAFISCHE CODES TERTIAIRKAART.....	139
GERAADPLEEGDE WERKEN.....	141
AFBEELDINGEN.....	142
TABELLEN.....	144

Alle samengestelde lichamen – die komen allemaal voor in de omgeving die deel van het centrale hemellichaam uitmaakt – bevatten alle enkelvoudige lichamen (= elementen). Zij bevatten immers allemaal Aarde omdat elk enkelvoudig lichaam hoofdzakelijk en meest overvloedig in zijn eigenste omgeving voorkomt. Zij bevatten ook allemaal Water omdat het samengesteld lichaam een welbepaalde vorm vertoont, en Water is het enige van de enkelvoudige lichamen dat makkelijk elke vorm kan aannemen. Bovendien kan Aarde zonder vocht geen cohesiekrachten bezitten. Integendeel het is juist het vocht dat Aarde samenhoudt. Verwijder alle vocht eruit en het zou in stukken uiteenvallen.

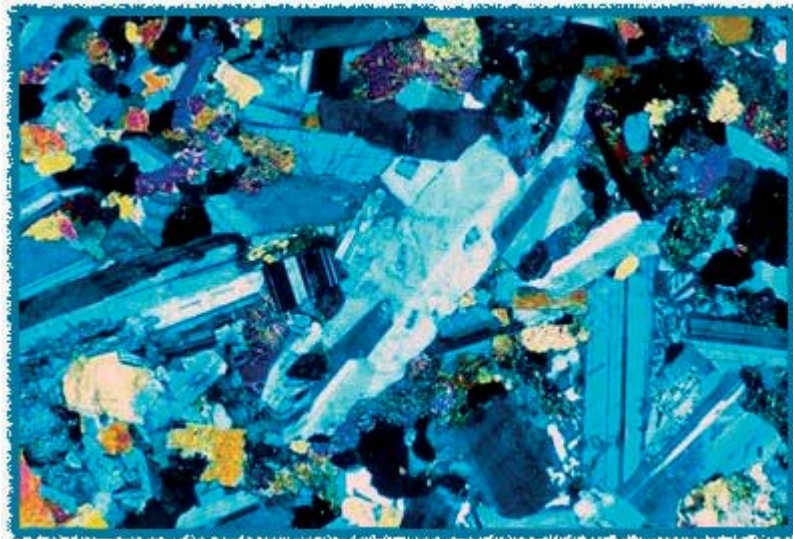
Alle samengestelde lichamen bevatten Aarde en Water, om redenen die we hier net hebben aangegeven. En zij bevatten ook Lucht en Vuur, omdat dit de tegengestelden zijn van Aarde en Water (Aarde als tegengestelde van Lucht, en Water als tegengestelde van Vuur). Nu is het zo dat alle samengestelde lichamen tijdens hun ontstaansfase de aanwezigheid van aan elkaar tegengestelde componenten bevatten: en alle samengestelde lichamen bevatten minstens één koppel tegengestelden. Daaruit volgt dat zij eveneens het andere koppel tegengestelden moeten bevatten, zodat elk samengesteld lichaam alle enkelvoudige lichamen moet bevatten.

We hebben dus aangetoond dat alle samengestelde lichamen alle elementen bevatten.

ARISTOTELES, *De Generatione et Corruptione*, Boek II, Hoofdstuk 8
Eigen Nederlandse vertaling uit het Engels van H.H.Joachim, in The works of
Aristotle, Encyclopaedia Britannica, Inc.

HOOFDSTUK 1:

Inleiding



1.1 ONTSTAAN VAN EEN PROBLEEM

Een sterke bevolkingstoename, steeds maar groeiende en om zich heen ingrijpende industriële activiteiten en een blijkbaar onverzadigbare honger naar energieproductie en -consumptie, hebben de leef- en denkwereld van de moderne mens tijdens de late tweede helft van de twintigste eeuw grondig gewijzigd.

Het begon allemaal zoals het ook bij alle andere diersoorten begonnen is. Elke soort probeert de haar omringende natuur in de mate van de mogelijkheden te beheersen. Kwestie van zichzelf van een steeds weer aangevulde voorraad levensmiddelen te verzekeren en het voortbestaan van de soort te beveiligen. Steeds ten koste van de concurrerende soorten, van de plantaardige natuur en in gestaag toenemende mate ook van het landschap. Een van de meest succesvolle geslachten bleek al gauw het genus *Homo*, de mens, te zijn. Er zijn nog diersoorten die gebruik weten te maken van toevallige werktuigen, zoals takjes en keien, maar wat de mens aan creativiteit en behendigheid tentoonspreidde in het vervaardigen van stenen werktuigen, zoiets had de aardbol nog nooit aanschouwd.

Ongeveer 5000 jaar voor onze tijdrekening zette de soort *Homo sapiens* een reusachtige stap voorwaarts: waarschijnlijk de meest ingrijpende verandering ooit in de natuurhistorie. Hij liet zijn leventje van jagen en verzamelen voor wat het was, vestigde zich permanent op een geschikte plaats en ontwikkelde gaandeweg een activiteit die wij nu landbouw noemen. Zo ontstonden dorpen en steden, bewoond door mensen die zich op diverse taken gingen specialiseren: akkerbouwers, vee-telers, pottenbakkers, steenhouwers, lederbewerkers en nog vele andere. Nieuw aan deze evolutie was het georganiseerd en systematisch gebruik van plaatselijke grondstoffen. Er werd een beroep gedaan op drie soorten grondstoffen: dierlijke, plantaardige en minerale. Dat is ook nu nog zo. Er zijn er geen andere. Neem deze drie soorten grondstoffen weg en de mensheid is ten dode opgeschreven.

Dat deze nieuwe organisatievorm succesvol was bleek snel uit de plaatselijke bevolkingsexplosies. Daar waar één stel primitieve jager-verzamelaars toch gauw enkele vierkante kilometers ruimte nodig hadden om te kunnen overleven, kon een woongemeenschap nu duizenden mensen in leven houden. De ingreep van mens op natuur was daaraan evenredig: bossen werden gerooid en landbouwpercelen aangelegd, laagbegroeide oppervlaktes werden afgegraasd, steengroeven werden geopend en kleilagen afgegraven. Een noodzakelijke en onontkoombare keuze.

Vanaf zowat 500 jaar voor onze tijdrekening begonnen enkele bijdehante geesten in diverse regio's zoals Egypte, Mesopotamië, Klein-Azië, Griekenland en China, hun

kennis met behulp van een of ander schriftsysteem op schriftdragers vast te leggen: kleitabletten, perkament, papier. Daarom weten we ook dat ze er waren. Fundamenteel in deze ontwikkeling was evenwel dat vanaf toen kennis doorgegeven kon worden. Met de latere koppeling van wiskunde aan techniek kon kennis zelfs gecumuleerd worden, zonder dat men telkens weer van nul moest beginnen. Het gevolg was een steeds sneller toenemend begrip van natuurwetten en -verschijnselen. Dat mondde tijdens de Renaissance uit in een stroomversnelling: de ontwikkeling van het moderne wetenschappelijke denken.

Het volgende hoogtepunt was de eerste industriële revolutie aan het einde van de achttiende eeuw. Het kind van deze revolutie was de machine. Man, paard en wind waren niet langer de belangrijkste aandrijvingskrachten. Stoom en waterkracht konden nu veel meer werk aan. Grondstoffen werden voortaan veel gretiger aangesproken. Mijnbouw moest de nodige metalen leveren voor de vervaardiging van de machines. Grondverzet werd in een hoge versnelling gezet voor de aanleg van spoorwegen, kanalen, havens en fabrieken. Dat deze periode niet op alle vlakken een succes was, bleek uit de vaak schrijnende proletarische werkomstandigheden en menselijke miserie. Zelfs het jonge maar bijna populaire vertrouwen in de rede van de Verlichting liep op een ontgoocheling uit. De Franse Revolutie was immers in moordpartijen en bloedbaden ontaard. Dus toch geen hemelbelovende vooruitgang.

In de tweede helft van de negentiende eeuw kwam er nog een tweede industriële revolutie aan. De nieuwe revelaties heetten nu chemie en elektriciteit. Grootschalige toepassingen hiervan hebben aan talrijke naties werkgelegenheid, welvarendheid en rijkdom gebracht. De impact op de natuur was eveneens massaal. Voor de eerste maal in de geschiedenis van de aardbol dreigde de natuur het tegen de mens te moeten afleggen. Achteloos gemors van afval- en nevenproducten, afvoer van gebruikt water en rookgassen, loste onzichtbaar op in de bodem, rivieren, zeeën en lucht. Tot het begin van de jaren 60 van de twintigste eeuw. Pas dan is de wereld, met het Rapport van Rome, gaan beseffen dat de natuur limieten kent, dat voorraden van grondstoffen en brandstoffen niet onuitputtelijk zijn. Nog later is het dan geleidelijk doorgedrongen dat ook het herstellvermogen van de natuur niet onbegrensd is.

1.2 PROBLEEMSTELLING

In regio's zoals Vlaanderen, met een zeer hoge bevolkingsdichtheid en een kluwen van menselijke activiteiten, worden de beperkingen van de natuur sneller ervaren. Diverse sectoren dingen in scherpe concurrentie met elkaar naar nieuwe ruimte: industrie, landbouw, woongebied, natuurgebied, infrastructuur. In die mate zelfs dat oude en verlaten industrieterreinen worden ont-



manteld om eventueel nieuwe bestemmingen te krijgen. Niet zelden ontdekt men dan pas in welke mate de grond waarop we lopen verontreinigd werd. Zoals men bij het verwijderen van oud behang verrotte muren terugvindt.

Ook de medische wereld werd ongerust. Vergelijkingen met vroegere tijden wezen op merkelijke toenames van allergieën, ademhalingsproblemen en andere “beschavingskwalen”. Hoewel men sommige problemen gewoon kon ruiken of zien, wees nader onderzoek de schuldige aan: vervuild water, verontreinigde bodems en onzuivere lucht.

Daaraan moest dus wat verholpen worden. Voor een aantal problemen, zoals luchtvervuiling en vervuild oppervlaktewater, kon men een eenvoudige remedie voorschrijven: de bron van de vervuiling wegnemen of althans verminderen. Kraan dicht, probleem weg. Voor andere pijnpunten, zoals verontreinigde bodem, ondergrond en grondwater, ligt de zaak moeilijker. Ook al is de vervuiliingsbron daar verdwenen, de vervuiling zelf blijft nog bestaan, vaak voor zeer lange tijd, voor tientallen jaren of zelfs permanent. De oplossing vergt een doortastender aanpak: herstellen in de oorspronkelijke toestand. Daarvoor bestaan nu gespecialiseerde technieken.

Herstellen houdt echter in dat men weet hoe die oorspronkelijke toestand eruitzag.

In de prospectie naar ertsen, gesteenten waaruit diverse nuttige metalen gewonnen kunnen worden, past men al sinds de jaren '50 van de twintigste eeuw een techniek toe waarbij men zeer lage gehalten aan deze en andere metallische elementen in allerlei gesteenten chemisch opspoort. Op die manier wil men de aanwezigheid van rijkere ertsen aan het licht brengen. De nieuwe probleemstelling heeft er nu voor gezorgd dat men aan het einde van de twintigste eeuw ook interesse voor de natuurlijke samenstelling van sedimentgesteenten, zoals klei, zand, leem enzovoort is gaan vertonen. Want ook die sedimenten, in feite zijn het losse gesteenten, bevatten van nature uit meerdere metallische elementen, zij het in extreem lage concentraties. Dat heeft dus helemaal niets te maken met enige vorm van door mensenhanden veroorzaakte verontreinigingen.

Om een idee te krijgen van hoe de natuurlijke toestand van de aardkorst eruitziet moet men eerst en vooral een aantal monsters van diverse gesteenten nemen. Daarbij let men er vooral op dat uitsluitend gesteenten bemonsterd worden waarvan men nagenoeg zeker is dat ze niet verontreinigd geweest zijn. Zo kan men ook een beroep doen op monsters die uit de diepte van de ondergrond afkomstig zijn, uit boringen bijvoorbeeld. Daar is het risico op verontreiniging uiteraard vrijwel onbestaande. Die monsters laat men dan chemisch analyseren voor een aantal elementen waarover in de praktijk vaak wel eens betwistingen kunnen ontstaan. De verzameling gegevens

waarover men dan beschikt, levert de achtergrondgehalten voor die elementen. Bij onderzoek van een gesteente waarvan men de kwaliteit ten aanzien van het milieu wil nagaan, moet men vervolgens dezelfde elementen laten analyseren en vergelijken of de verkregen waarden overeenkomen met de achtergrondgehalten, dan niet hoger zijn. In dat laatste geval kan besloten worden om al dan niet tot een correctieve actie over te gaan.

1.3 DEFINITIES

Van elementen die men in diverse stoffen, zij het vloeistoffen, vaste stoffen of gassen, slechts in uiterst lage concentraties aantreft, zegt men dat ze slechts als sporen aanwezig zijn. Daarom worden ze sporenelementen genoemd. In een momenteel wat in onbruik geraakt taalgebruik werden ze ook wel oligo-elementen genoemd, van het Griekse woord *oligos* dat “enkele” betekent.

Het begrip sporenelement verwijst uitsluitend naar concentraties en niet naar bepaalde elementen. Een specifiek element kan in sommige omgevingen als een sporenelement voorkomen en in andere als een van de hoofdbestanddelen: een hoofdelement. Zo komt chroom in grondwater of in klei als een sporenelement voor. In andere stoffen, zoals een chroomerts dat 10 % chroom bevat, of in een mes van roestvrij staal met ongeveer 8 % chroom, is chroom daarentegen een hoofdelement.

Het begrip sporenelement verwijst evenwel naar geen enkele chemische of fysische eigenschap van dat element. Het zegt helemaal niets over het mogelijk giftige of schadelijke karakter, het soortelijk gewicht of de chemische reactiviteit van een element.

Bij nader toezien kan men bovendien aan bijna alle chemische elementen een schadelijk karakter toeschrijven. Veel hangt af van onder andere de concentratie waarin een element voorkomt en de chemische vorm of combinatie met andere elementen. Zelfs het levensnoodzakelijkste element zuurstof wordt een gif indien het zich in de vorm van ozon voordoet. Koolstof kan in combinatie met zuurstof koolstofmonoxide vormen, een dodelijk gas dat bij onvolledige verbranding vrijkomt. Kalium is, in combinatie met chloor als kaliumchloride, dodelijk indien het per ongeluk met natriumchloride verwisseld en intraveneus toegediend wordt.

Een van de eerste toepassingsgebieden waarin sporenelementen een betekenis met praktisch en economisch nut kregen, en ze om die reden ook het onderwerp van doorgedreven onderzoek waren, was de geochemische prospectie naar metaalvoerende ertsen.

Geochemie is de wetenschap die over de kwalitatieve en kwantitatieve verdeling van de chemische elementen in de aarde gaat. Het kwalitatieve aspect nam slechts van-



af de jaren '40 van de twintigste eeuw een hoge vlucht. De sleutel tot de vooruitgang hiervoor zat hem immers in de technologische stand van zaken bij de ontwikkeling van snelle analytische technieken voor zulke extreem lage concentraties. Tijdens de oorlogsjaren was een acute vraag naar het opsporen en lokaliseren van nieuwe voorkomens van strategisch belangrijke metaalvoerende ertsen ontstaan.

In die geochemische ertsprospectie werd de gewoonte aangenomen sporenelementen te doseren als “aantal deeltjes per miljoen”:

$$1 \text{ ppm} = 1 \text{ part per million}$$

Deze grootheid is volkomen analoog aan de alledaagse uitdrukingsvorm “deeltjes per honderd” of “percent”.

Daarbij geldt de verhouding:

$$1 \text{ percent} = 10.000 \text{ ppm}$$

Naast geologen en analisten hadden ook mijnningencurs en ertsbereiders met de lage gehalten te doen. Zij rekenden echter veeleer met het gewicht aan metaal dat men uit een erts kon winnen. Daarom spraken zij meer in termen van “gram per ton”, waarbij:

$$1 \text{ g/t} = 1 \text{ ppm}$$

$$\text{want } 1.000.000 \text{ gram} = 1 \text{ ton}$$

Later is men de studie van sporenelementen ook in andere takken van wetenschap en techniek gaan toepassen, bijvoorbeeld in de voedingsindustrie. Omdat men daar met veel kleinere hoeveelheden werkt, gingen de analytische chemici in die sector veeleer spreken over “milligram per kilogram”, waarbij:

$$1 \text{ mg/kg} = 1 \text{ ppm}$$

Bij het onderzoek naar sporenelementen in vloeistoffen, zoals water en olie, ging men op analoge wijze een overeenkomstige grootheid hanteren: “milligram per liter”, waarbij:

$$1 \text{ mg/l} \text{ is het analoog van } 1 \text{ ppm}$$

Vloeistoffen worden in de praktijk immers niet afgewogen maar in volumes verhandeld. Grote uitzondering is de lucht- en ruimtevaart. De eenheid liter komt overeen met de eenheid kilogram. De twee zijn echter niet geheel gelijkwaardig, want het soortelijk gewicht van vloeistoffen verschilt meestal van de eenheid 1 kg per 1 liter. Zelfs een liter water weegt niet steeds één kilogram. En dat is niet alleen afhankelijk van de temperatuur ervan. Water bevat immers meestal een hoeveelheid opgeloste stoffen, zoals zout in water, of kalk. Toch verwijzen de

mg/l en de ppm naar een zeer vergelijkbaar niveau van concentraties.

Bij nog lagere concentraties gebruikt men meestal de volgende grootheden, refererend aan het miljardste in plaats van het miljoenste deel:

$$1 \text{ ppb} = 1 \text{ part per billion}$$

$$1 \mu\text{g/kg} \text{ (microgram per kg)} = 1 \text{ ppb}$$

$$1 \mu\text{g/l} \text{ (microgram per liter)} \text{ is analoog aan } 1 \text{ ppb}$$

1.4 BEMONSTERINGSPROBLEMEN

Doordat sporenelementen zowat in alle soorten materie aanwezig zijn, wordt hun opsporing een probleem op zichzelf. Het begint reeds bij de monstername. Bij bemonstering van een zand bijvoorbeeld, is het gebruik van een stalen lepel, schop of spatel uit den boze. Des te meer nog indien het werktuig uit roestvrij staal vervaardigd is, wat doorgaans een garantie voor kwaliteit is. Roestvrij staal bevat immers, afhankelijk van het type legering, meestal ongeveer 18 % nikkel en 8 % chroom.

De meest voorkomende zanden bestaan voor het grootste deel uit korrels van het mineraal kwarts. Dat mineraal is harder dan staal en zal dus bij wrijving over het staaloppervlak kleine deeltjes ervan afslijten. Dergelijke monstername brengt dus onvermijdelijk een introductie van chroom en nikkel in het zand mee. In een dergelijk geval zou het gebruik van een houten of plastic werktuig te verkiezen zijn.

Ook bij de verpakking en het transport van de monsters moet omzichtig te werk gegaan worden en moeten contaminaties vermeden worden. Voor geologische monsters is het gebruik van papieren of kartonnen zakjes het veiligst. Zo kan men bovendien het monster in de zon te drogen leggen zonder de verpakking te moeten openen.

Ook bij de behandelingen in het laboratorium blijven zich problemen voordoen. Oplossingen van het monster mogen niet in glazen recipiënten bewaard worden. Van glas is namelijk bekend dat het makkelijk ionen uit de oplossing adsorbeert. De metaalionen blijven als het ware aan de glaswanden plakken. Bij gebruik van een nieuwe beker kan dat fenomeen daarom op storende wijze de concentraties aan sporenelementen beïnvloeden. Bij een reeds eerder gebruikte beker kan het glas deze ionen weer loslaten en voor andere ionen omruilen. Dat verschijnsel is moeilijk te vermijden. Zelfs grondig wassen van het materiaal volstaat niet om daaraan te verhelpen.

Grootste probleem in de hele keten is de beschikbaarheid van uiterst zuivere chemicaliën. Die behoren zo weinig mogelijk sporenelementen te bevatten. Zoniet leiden ze a priori tot foutieve resultaten. De chemische industrie



heeft voor deze doeleinden zelfs een buitengewone kwaliteitsklasse van reagentia moeten commercialiseren.

Zo boden de producenten van chemicaliën traditioneel twee kwaliteiten aan:

- technische kwaliteit: voor algemeen gebruik in handel en industrie. Deze reagentia kunnen als onzuiverheden nog andere dan de bedoelde elementen bevatten;
- analytische kwaliteit: voor gebruik als reagentia in laboratoria voor analytische doeleinden. Deze reagentia zijn zeer zuiver en ontdaan van alle storende elementen.

Voor het opsporen van sporenelementen voldeed zelfs de analytische kwaliteit niet meer. Want hoewel zeer zuiver, kwamen daarin nog steeds concentraties aan nevenelementen voor die voor onderzoek naar elementen in de orde van grootte van de ppm, nog steeds te hoog lagen. Daarom werden er reagentia op de markt gebracht die men met het kwaliteitslabel *ultrazuiver* zou bedenken.

1.5 CHEMISCHE ANALYSEN

Voor de snelle uitvoering van grote aantallen goedkope en accurate analyses van elementen in dergelijke uiterst lage concentraties, moest de technologie nieuwe wegen bewandelen. De methodes van de klassieke chemie bestaan uit het isoleren van de te doseren elementen, ze dan met een of ander middel herkenbaar maken en ze tellen, wegens of hun gezamenlijk volume meten. Het werkte net alsof men alle op te zoeken atomen uit een massa individuen moest afzonderen en ze in een nieuwe groep samenbrengen. Zodra die nieuwe groep atomen samengebracht was, kon men de grootte van de groep inschatten. Het was een kwestie van scheidingen uitvoeren. Vandaar de naam scheikunde.

Wanneer men uit duizend atomen er een honderdtal moet afzonderen, werken die methodes opperbest. Men zou zich bij wijze van vulgariserende beeldvorming kunnen voorstellen dat een soort politiemacht erop afgestuurd wordt. Die zouden dan wel makkelijk bij de te arresteren atomen kunnen geraken, ze herkennen en in hechtenis nemen.

Moeilijker wordt het wanneer men uit een miljoen atomen er slechts een tiental moet isoleren. Diezelfde politiemacht zou heel wat meer zoek- en spoorwerk moeten verrichten om bij die tien te geraken en ze nog te herkennen ook.

Men kan het best de formidabele prestatie van de moderne analysetechnieken voor sporenelementen illustreren met het volgende beeld:

stel dat men 1 ppm wil doseren. Bedenk dan dat België tien miljoen inwoners telt. Daarvan moet men er in een minimum van tijd tien gaan uitzoeken: slechts tien individuen met heel bijzondere kenmerken of eigenschappen.

In het geval van 1 ppb is het contrast nog scherper. China telt ongeveer één miljard inwoners. Daarvan moet men er snel slechts één individu uitpikken.

De nieuwste analytische technieken gaan anders te werk. Ze laten alle atomen op de plaats waar ze zich bevinden, in een massa, en stellen ze allemaal tegelijk aan eenzelfde fysisch fenomeen bloot, bijvoorbeeld een lichtstraal of een trilling. Daarop wordt er vanop afstand naar de massa atomen gekeken, met een soort verrekijker, om te zien wie er zoal op de prikkel reageert. Deze handelwijze laat de atomen zichzelf verraden, zonder ze te isoleren.

De omstandigheden van een dergelijk proces zijn veel gemakkelijker op identiek dezelfde wijze te herhalen en de herkenning van de op te zoeken atomen gebeurt, in de goed uitgekende gevallen, vrijwel steeds volkomen foutloos. De rest is een kwestie van ijken.

Voor het doseren van sporenelementen worden momenteel in hoofdzaak de volgende drie technieken gebruikt: AAS, XRF en ICP. Hierna een zeer bondige uitleg over de werking daarvan.

- **ATOMIC ABSORPTION SPECTROSCOPY (AAS)**
In deze methode wordt het te analyseren monster in een vlam op hoge temperatuur gebracht, wat de atomen uit elkaar rukkt. Men bestraalt deze atomen met licht van een zeer specifieke golflengte. Deze is voor elk te doseren element speciaal geselecteerd omdat elk element bepaalde golflengtes van het lichtspectrum makkelijker absorbeert. Door ijking komt men dan te weten hoeveel van dergelijke atomen in het monster aanwezig zijn.
- **X-RAY FLUORESCENCE SPECTROMETRY (XRF)**
In deze methode bestraalt men het monster, dat in normale vaste toestand gehouden wordt, met licht van een zeer korte golflengte, en dus met zeer hoge energie-inhoud. Deze energie is zo groot dat ze in staat is de bestraalde atomen te “exciteren”, zodat ze zelf licht van een vergelijkbare frequentie gaan uitstralen. Elk specifiek element heeft daarbij zijn eigen karakteristieke straling. De golflengtes waarvan hier sprake is behoren tot het gebied van de röntgen- of x-straling. Wanneer men dan met een daartoe speciaal ontworpen lichtmeter het hele spectrum van het door de atomen uitgestraalde licht gaat aftasten, komt men te weten welke atomen in het monster aanwezig zijn en door ijking ook hoeveel.



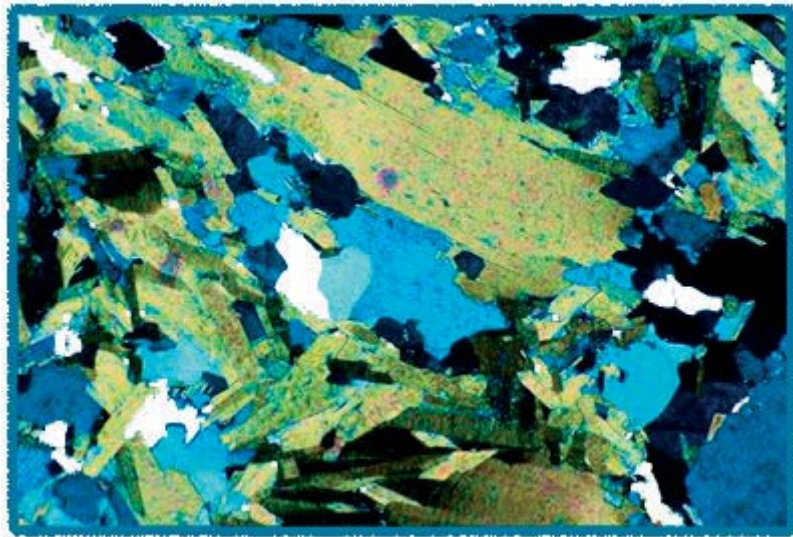
- **INDUCTIVELY COUPLED PLASMA (ICP)**

Bij deze methode wordt het monster voorafgaandelijk in oplossing gebracht. Vervolgens wordt het in een vlam geïntroduceerd. De daarin heersende temperatuur wordt supplementair sterk opgedreven door middel van een hoogfrequente elektrische stroom. Deze inductieoven is te vergelijken met een soort microgolf-oven. Op die wijze worden alle atomen uiteengerukt tot een plasma van losse elektronen en ionen. Bij het hervallen naar de oude toestand stralen de atomen licht uit, met een voor elk type atoom specifieke golflengte in de buurt van de ultravioletstraling. Net zoals bij XRF wordt dan het hele spectrum met een bijzondere lichtmeter afgetast, en detecteert men de verschillende aanwezige elementen, in aard en aantal.

Bijzonder interessant aan deze methodes is dat de detectielimieten uitzonderlijk laag liggen. Dat zijn de allerlaagste concentraties waarbij het systeem nog net in staat is de aanwezigheid van een element op te merken.



HOOFDSTUK 2: **Dichterbij dan je denkt**



DICHTERBIJ DAN JE DENKT

Zware metalen hebben bij veel mensen een negatieve bijklank. Ze denken daarbij aan metaalverwerkende en chemische industrie, rookspuwende hoogovens, allesvretende mijnbouw en daverende machines. Kortom, alles wat nu bij industriële archeologie gegooid wordt en niet meer tot de attributen van een moderne informaticamaatschappij hoort. Verschillende van de daarmee geassocieerde afvalproducten zijn beruchte giftige stoffen: bijvoorbeeld arseen, kwik en cadmium.

Bij het bestrijden van verontreinigingen in het leefmilieu en de natuur is men gericht op de aanwezigheid van zware metalen gaan letten. Zware metalen komen er steeds als sporenelementen in voor. Daardoor hebben sporenelementen bij een omvangrijke groep mensen een kwalijke reputatie gekregen.

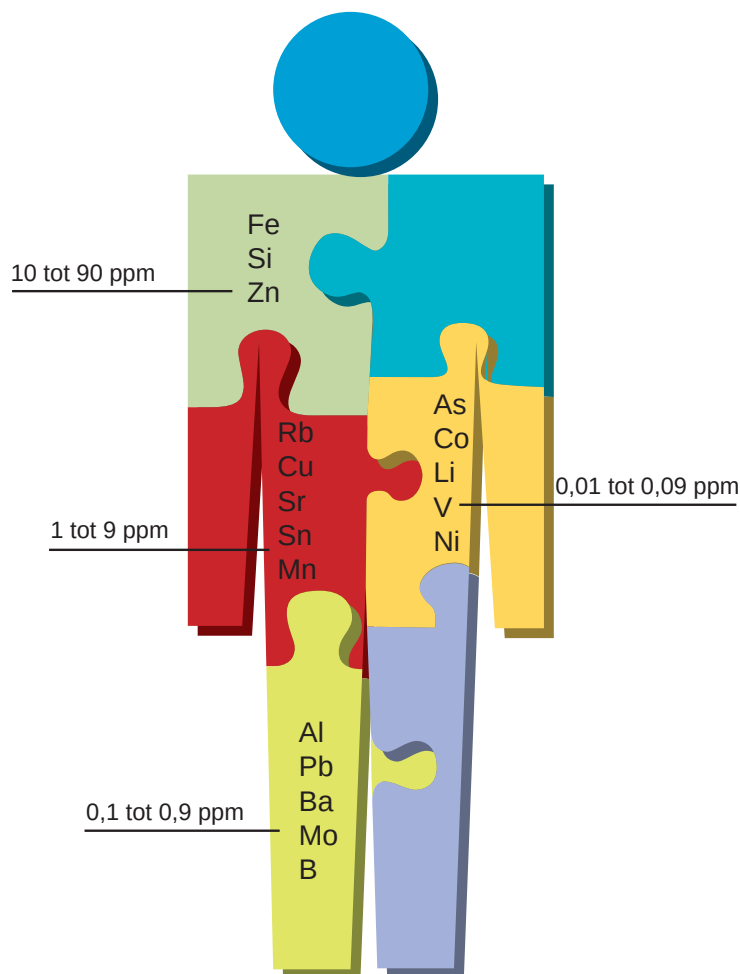
In de volgende alinea's en hoofdstukken willen wij echter aantonen dat ook zware metalen deel uitmaken van de natuur. Meer nog, verscheidene van de zware metalen spelen een essentiële en constructieve rol in het lichaam van mens en dier, en in de planten. Zonder die elementen zou geen levend wezen kunnen overleven. Maar ook in de grond, in en onder uw tuin, en in het water van de zee

en de rivieren zijn ze aanwezig. Ze zijn dus overal aanwezig, zonder dat er een vuiltje aan de lucht is.

2.1 SPORENELEMENTEN IN MENS EN DIER

En groot aantal elementen wordt in het menselijk lichaam als sporen aangetroffen (zie afbeelding 2.1). Die kunnen toevallig met de voeding opgenomen worden, en het is pas sinds de laatste veertig jaar dat de wetenschap van de biochemie vorderingen maakt in het ontrafelen van hun precieze functie. Men neemt aan dat een veertiental sporenelementen onmisbaar zijn voor het normaal functioneren van het menselijk lichaam: ijzer, jodium, koper, zink, mangaan, kobalt, molybdeen, selenium, chroom, nikkel, tin, silicium, fluor en vanadium. De functie en het voorkomen van de meeste hiervan worden hieronder nader besproken.

Het lichaam heeft van deze elementen slechts zeer minuscule hoeveelheden nodig om goed te functioneren. Het bouwt er diverse stoffen als hormonen, vitamines en enzymen mee op. Een tekort aan deze elementen kan ziekteverschijnselen veroorzaken. Zo is bekend dat te kleine opnames van ijzer, fluor, chroom, zink en jodium deficiëntieziekten doen ontstaan bij de mens. Omgekeerd kan overdadige opname ervan in sommige gevallen

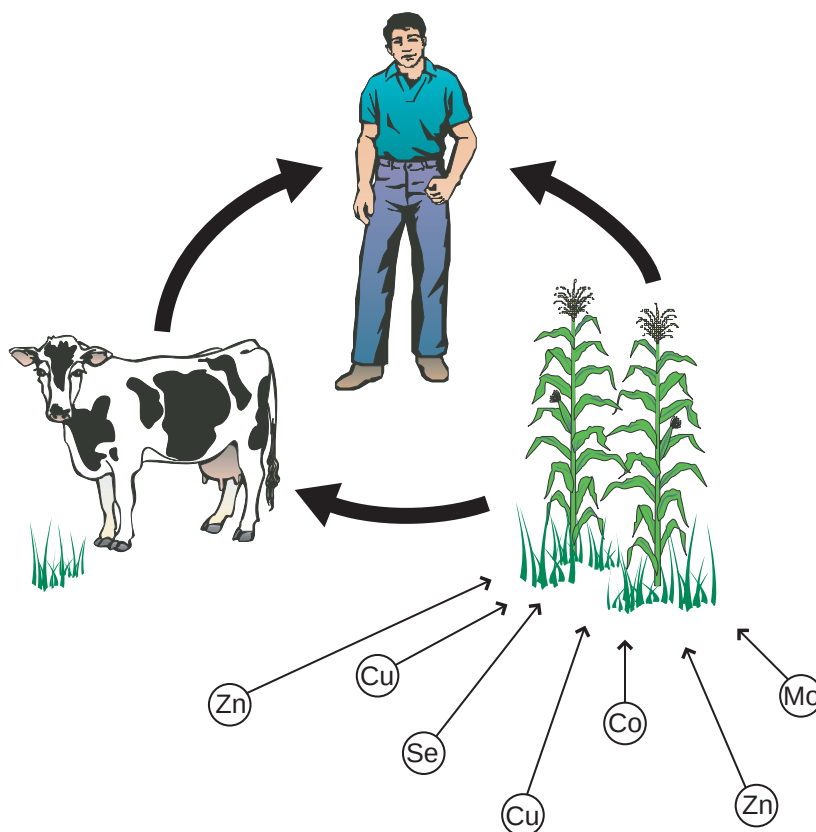


Afb. 2.1: Sporenelementen in het menselijk lichaam

evenwel tot vergiftigingen leiden. Bij andere elementen wordt de overdaad langs stoelgang en urine weer afgescheiden.

Van andere sporenelementen is de functie bij de huidige stand van kennis nog niet helemaal bekend. Zo bevat ons lichaam tot 0,1 ppm aan arseen (7 mg voor een mens van 70 kg). Arseen wordt in sommige geneesmiddelen gebruikt voor het stimuleren van de aanmaak van normale rode bloedlichaampjes, zoals bij leukemie.

De mens kan deze elementen alleen via zijn voeding opnemen: dierlijke en plantaardige producten, en drinkwater. Dieren nemen de sporenelementen op hun beurt op uit planten en drinkwater, en andere dieren. Planten halen ze uit het grondwater en de bodem (zie afbeelding 2.2). Als de bodem niet op natuurlijke of artificiele wijze weer zou aangerijkt worden door middel van dierlijke, plantaardige en kunstmatige meststoffen, dan zou hij na verloop van tijd een uitputting aan deze elementen vertonen.



Afb. 2.2: Opname van sporenelementen door mens en dier

IJZER

Ijzer is meestal geen sporenelement maar is wel het bekendste metaal dat in het menselijk lichaam voorkomt. Het is het sleutelement bij de aanmaak van hemoglobine, het belangrijkste bestanddeel van de rode bloedlichaampjes. De functie daarvan is het opnemen en naar de diverse lichaamsdelen en organen transporteren van zuurstof. Een mensenlichaam bevat ongeveer 3 tot 4 gram ijzer. Als een patiënt aan bloedarmoede lijdt, wordt hem een extra dosis ijzer voorgeschreven.

KOPER

Koper werd al in 1848 als een onmisbaar bestanddeel van het ademhalingspigment bij lagere dieren herkend. Zo bevatten schelpdieren, zoals oesters, koper als essentiële bouwsteen van hemocyanine, een dierlijk equivalent van het menselijk hemoglobine.

Bij planten en dieren maakt koper ook deel uit van een aantal enzymen die tussenkomen bij de aanmaak van het donkere pigment melanine.

Koperdeficiënties komen vaker voor bij dieren dan bij mensen. Zo kunnen runderen en schapen aan een soort bloedarmoede lijden die men "likzucht" noemt.

In zeldzame gevallen treedt ook bij menselijke zuigelingen die uitsluitend met koemelk gevoed worden, een bloedarmoede door kopergebrek op. Bij ernstige ondervoeding bij kinderen werd in een aantal landen chronische diarree en afwijkingen van het skelet ten gevolge van kopertekort waargenomen. Ook bij de mens speelt koper dus een belangrijke rol bij de aanmaak van bloed. Het bevordert de absorptie van ijzer en de synthese van hemoglobine.

Het menselijk lichaam bevat ongeveer 100 tot 150 mg koper.

Granen, groenten en fruit bevatten ongeveer 2 mg koper per kg.

Lever, chocolade, oesters en andere schaaldieren, en noten zijn rijk aan koper.

ZINK

Zink kan bij varkens en schapen tot huidveranderingen en verminderde eetlust en groei leiden. Bij mensen kan het aanleiding geven tot groeivertraging en seksueel infantilisme op adolescentenleeftijd, slechte wondgenezing en verminderd smaak- en reukvermogen.

Zink zit onder andere in een enzym dat de ontleding van koolzuur in het bloed tot CO₂ en water laat plaatsvinden, een voor het leven onmisbaar proces. Zink activeert ook een aantal spijsverteringsenzymen.

Het menselijk lichaam bevat ongeveer 2 tot 3 gram zink.

Het zinkgehalte van menselijke haren is vrij hoog, 140 tot 160 mg/kg, evenals dat van de beenderen, 100 mg/kg. Bijzonder hoog is het zinkgehalte van de testes: tot 300 mg/kg.

Melk bevat 3 tot 5 mg/l zink, lever 30 tot 150 mg, vlees 20 tot 60 mg, vis meer dan 15 mg, granen 22 tot 35 mg, groenten 2 tot 5 mg, telkens per kg.

MOLYBDEEN

Molybdeen blijkt voor de mens ook onontbeerlijk te zijn. Het maakt deel uit van meerdere enzymen. Molybdeen vervult een belangrijke rol bij vetzuuroxidatie, de bloedvorming en heeft cariësremmende eigenschappen.

Melk bevat ongeveer 0,07 mg/l molybdeen, erwten 3 tot 9 mg, groenten, aardappelen en rijst 0,06 mg, vlees 0,15 mg, telkens per kg.

KOBALT

Kobalt is een essentieel bestanddeel van de vitamine B12 en is dus onmisbaar bij de bloedvorming. Het kan door de mens uitsluitend uit dierlijke producten en bacteriën opgenomen worden.

Vlees bevat 0,01 tot 0,5 mg/kg kobalt, bladgroenten 0,2 mg/kg en graanproducten 0,01 mg/kg.

CHROOM

Chroomdeficiënties kunnen bij dieren door ondervoeding veroorzaakt worden. Ze kunnen aanleiding geven tot afscheiding van suikers met de urine, en groeivertragingen.

NIKKEL

Nikkel is bij de mens een essentiële voedingsstof. Het zit in menselijke weefsels. Bovendien heeft het een bindend vermogen met A2-globuline in bloedplasma en activeert het sommige enzymen.

Nikkel komt onder andere voor in witte bonen en thee.

VANADIUM

Vanadiumgebrek veroorzaakt groeiremming bij ratten en gestoorde vedervorming bij kippen. Het komt onder andere voor in garnalen, schaal- en schelpdieren, lever, zonnebloempitten en rijst.

SELENIUM

Selenium blijkt bij de mens in meerdere lichaamsprocessen een rol te spelen. Het controleert het metabolisme van de schildklierhormonen, die bijdragen aan de aanmaak van groeihormonen. Seleniumtekorten leiden dus tot groeivertraging. Selenium is ook belangrijk bij de voorplanting: het is een onmisbaar bestanddeel van een essentieel eiwit bij de opbouw van zaadcellen. Het is ook onontbeerlijk voor een evenwichtig testosteronmetabolisme. Selenium is tevens belangrijk bij het voorkomen van sommige kankers. Hierbij bestaat een interrelatie met vitamine E. Het is een essentieel bestanddeel van bepaalde enzymen die het opruimen van vrije radicalen tot taak hebben. Vrije radicalen ontstaan in levende cellen bij het verbranden van zuurstof.

Selenium zit vooral in slachtafval, eigeel, schaal- en schelpdieren en in mindere mate in volkorenbrood, graanproducten, vlees, vis en geogelte.

2.2 SPORENELEMENTEN IN PLANTEN

De rol van sporenelementen in de fysiologische processen die zich binnen een plant afspelen, is minder goed gekend. Men weet wel dat ze ook daar in specifieke stoffen aanwezig zijn, door de plant zelf aangemaakt worden en noodzakelijk zijn voor het functioneren en leven van een plant. Het is bekend dat planten bij een tekort aan bepaalde metalen in de grond deficiënties gaan vertonen: trage groei, vergeelde bladeren, verwelking, makkelijk afsterven en dergelijke. Te hoge concentraties aan metalen in de grond daarentegen werken dan weer als gifstoffen en doen de planten snel afsterven.

Sommige planten nemen belangrijke hoeveelheden van sommige elementen op om ze bij de opbouw van hun houtvezels te verwerken. Zo is silicium niet meteen een sporenelement, en zou men het niet in een plant verwachten, maar eerder in gesteenten. Toch bestaan er een aantal tropische houtsoorten welke uitzonderlijk veel silicium bevatten. Zoals naar analogie met de minerale wereld te verwachten is, zijn dit zeer harde houtsoorten waar nauwelijks een spijker in te kloppen valt en waar zagen op stukgemaakt worden. In tropische landen werden die vaak gebruikt voor de bouw van aanlegsteigers en havendokwanden.

Heel andere organismen waarvan bekend is dat ze andere elementen opnemen zijn sommige zeewieren. Die bevatten belangrijke hoeveelheden jodium.

Planten nemen deze elementen, net zoals al hun voedingsstoffen, via de worteltippen op. Op die worteluiteinden scheiden planten organische zuren af. Die zijn in staat om minerale materie, zand- en kleipartikeltjes, in oplossing te brengen zodat ze de voor hen nuttige componenten kunnen opnemen. Dat is voor alle aardse leven een uiterst cruciaal proces omdat het de belangrijkste, en



De as van loofbomen bevat :



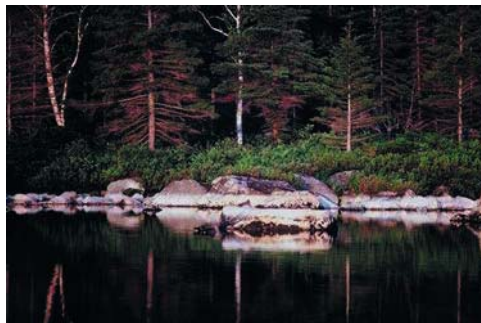
Cr :	5
Co :	5
Ni :	87
Cu :	249
Zn :	2303
Mo :	7
Pb :	54
V :	16



De as van naaldbomen bevat :



Cr :	8
Co :	7
Ni :	57
Cu :	133
Zn :	1127
Mo :	5
Pb :	75
V :	21



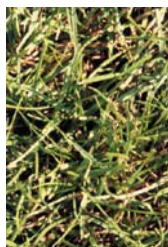
De as van struiken bevat :



Cr :	14
Co :	10
Ni :	91
Cu :	223
Zn :	1585
Mo :	15
Pb :	85
V :	25



De as van grassen bevat :



Cr :	19
Co :	10
Ni :	54
Cu :	119
Zn :	850
Mo :	34
Pb :	33
V :	25



Afb. 2.3: Sporenelementen in de as van planten (in ppm.)

voor vele elementen de enige weg is waarlangs minerale stoffen in de voedingsketen van mens en dier kunnen terechtkomen.

Planten kunnen uiteraard alleen de sporenelementen opnemen die in hun onmiddellijke omgeving voorradig zijn. Sommige planten lijken zelfs gespecialiseerd te zijn in het opnemen van bepaalde elementen. Zo bestaan er specifieke plantensoorten die in staat zijn om extra grote



terzijde latend, zoals koper, nikkel, zink, lood, chroom en tin, economisch van doorslaggevend belang. Dat zijn ook de metalen waarmee we, in de vorm van gebruiksvoorwerpen, het meest frequent in onze onmiddellijke omgeving in aanraking komen. Een reeks andere metalen zijn technisch gesproken even belangrijk, maar worden in minder massale hoeveelheden geproduceerd. Ze vallen ook niet rechtstreeks in onze omgeving op omdat ze meestal in legeringen versmolten zijn en dus verdoken voorkomen. We denken hier aan metalen zoals kobalt, wolfram, molybdeen, antimoon en tantaal.

Intuïtief wordt hieruit de conclusie afgeleid dat de metalen, zoals ze hier werden opgesomd en gegroepeerd, in die getrapte belangrijkheid ook als de meest voorkomende elementen in de aardkorst moeten worden gerangschikt.

In de eerste helft van de 20^{ste} eeuw probeerden verscheidene geochemici zich een beeld van de aardkorst in haar geheel te vormen. Zij dachten uiteraard uitsluitend aan de continentale aardkorst. In die tijd waren de continentverschuivingen nog maar een hypothese die de verbeelding aansprak, zonder enige concrete bewijzen. Van oceanische korst was dus helemaal nog geen sprake. De geochemici bestudeerden eerst de gehalten aan sporenelementen in diverse gesteentetypes. Vervol-

Er bestaat een duidelijk onderscheid tussen de werkelijke hoeveelheden elementen in de aardkorst en

Afb. 2.4: Gemiddelde gehalten aan sporenelementen in de aardkorst

gens zochten zij alle beschikbare geologische kaarten van over de hele wereld bij elkaar om er de proporties van diverse gesteenten mee in te schatten. Op die wijze wilden zij een indruk krijgen van de gemiddelde gehalten aan sporenelementen op de continenten. De gegevens die in afbeelding 2.4 schematisch en stilistisch sterk vereenvoudigd voorgesteld worden dateren van een latere revisie uit 1964.



De verschillen met het voorgaande zijn opvallend, vooral als de samenstelling van de aardkorst, in gewicht, nader bekeken wordt. De acht meest voorkomende elementen stellen samen zowat 99 % van het gewicht van de aardkorst voor. De vier volgende staan voor nog slechts 0,5 % van het totaalgewicht. En alle andere resterende elementen samen vertegenwoordigen nauwelijks 0,5 %.

Deze scheefgetrokken verdeling wordt nog scherper gesteld als men de gehalten als volumes uitdrukt. Dan blijkt dat zuurstof en silicium samen reeds meer dan 94 % van het volume vertegenwoordigen.

Het springt in het oog dat enkele weinig courante elementen zoals strontium, zirconium en rubidium in hogere gehalten voorkomen dan de meeste non-ferrometalen.

Koper en zink komen ongeveer evenveel voor als yttrium en cerium, hoewel dat laatste toch wel tot de lanthaniden behoort. Die laatste worden in handboeken van chemie als zeldzame aardmetalen bestempeld.

Tin vertoont dezelfde concentraties als hafnium, dysprosium, scandium, gadolinium, samarium en nog enkele andere, voor de meesten totaal onbekende elementen.

Lood komt ongeveer even vaak voor als lanthaan en gallium en zelfs minder dan neodymium.

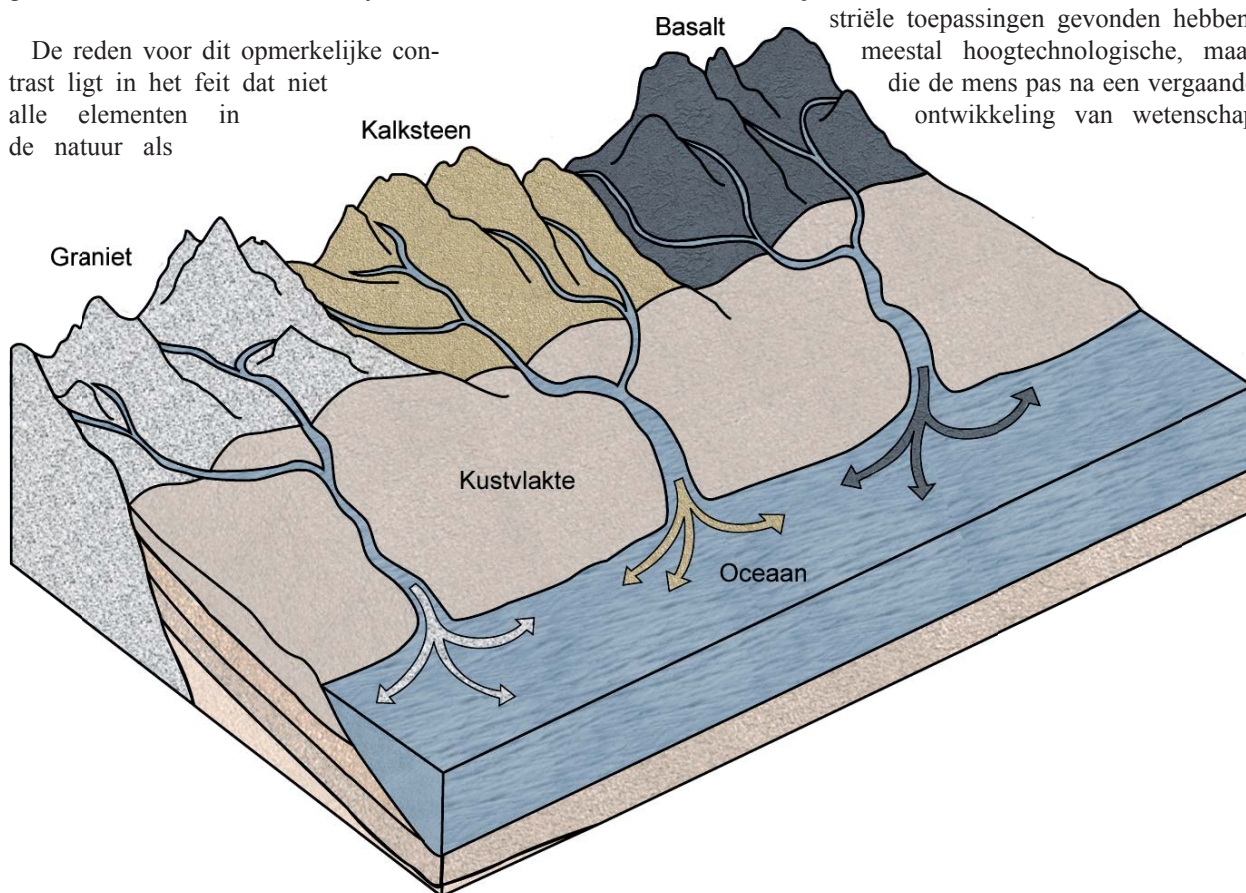
De reden voor dit opmerkelijke contrast ligt in het feit dat niet alle elementen in de natuur als

hoofdbestanddeel van een specifiek mineraal voorkomen. Sommige elementen verbinden zich makkelijk met een of meer atomen van een andere soort om zich in een gemeenschappelijke structuur aan elkaar vast te klinken. Men zegt dan dat deze elementen een eigen mineraal vormen. Dat heeft te maken met de energetische stabiliteit van het gevormde mineraal. De atomen schikken zich zo dat ze zo weinig mogelijk potentiële energie bevatten. Atomen die deze aanpassing makkelijk uitvoeren, leggen zichzelf dus makkelijk vast in een mineraal.

Als zich dan op bepaalde plaatsen in de aardkorst specifieke fysische en chemische omstandigheden voordoen waarbij dit type mineraal gemakkelijk gevormd kan worden, ontstaat er een opeenhoping van dergelijke mineraalkorrels. Geologen spreken dan van een gesteente. Als dat gesteente bovendien elementen bevat die voor de mens een grote economische waarde vertegenwoordigen en indien de opeenhoping voldoende groot is, spreekt men van een ertsafzetting. Dat is wat gebeurt met de ons zo vertrouwde metalen.

Andere elementen sluiten zichzelf slechts zelden op in een eigen mineraal. Ze worden zo zelden in interessante hoeveelheden aangetroffen dat economische benutting vrij onbekend blijft. Voorbeelden van dergelijke elementen zijn cerium, zirconium, thorium, iridium en osmium.

Dat zijn allemaal elementen die nu wel industriële toepassingen gevonden hebben, meestal hoogtechnologische, maar die de mens pas na een vergaande ontwikkeling van wetenschap



Afb. 2.5: Stroomgebieden

en techniek heeft kunnen ontdekken en in kleinere hoeveelheden aanwenden.

En dan zijn er de elementen die vrijwel nooit een mineraal vormen waarin ze zelf het hoofdbestanddeel zijn. Het is dus onmogelijk deze elementen ooit in grote of ontginbare geconcentreerde hoeveelheden aan te treffen. Ze zijn daarentegen wel in een groot aantal mineralen aanwezig, maar dan steeds in lage tot zeer lage concentraties. Ze vertegenwoordigen in die samenstelling slechts een achtergrond. Men zegt van die elementen dat ze *dispers* voorkomen, tot een onopvallend laag gehalte verspreid.

2.4 SPORENELEMENTEN IN OPPERVLAKTEWATER

Iedereen kent wel de meest frappante eigenschap van zeewater: het rijkelijk aanwezige natrium en chloor, in het dagelijkse taalgebruik keukenzout genoemd. Rivierwater is daarentegen eerder berucht voor zijn meestal

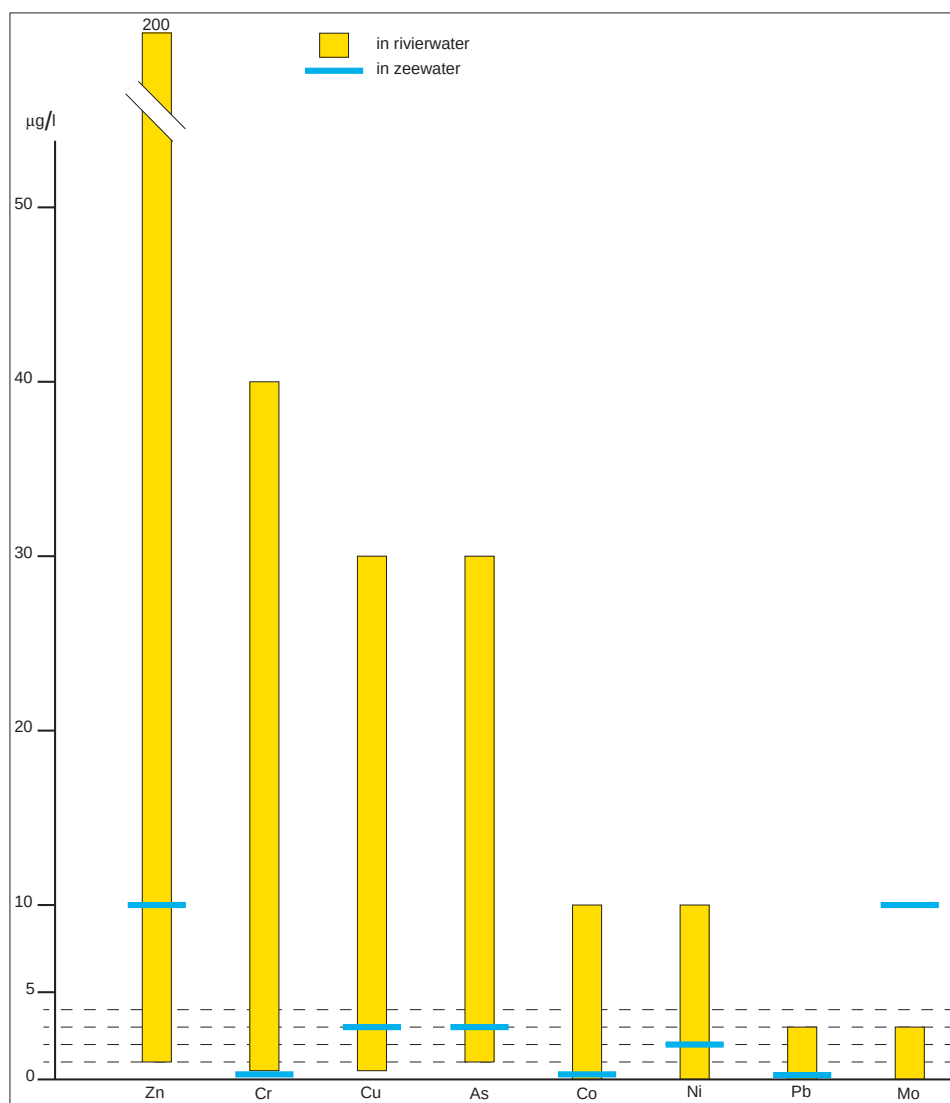
nadelige gehalte aan calcium. Beide bevatten echter alle net genoemde elementen, maar wel in verschillende concentraties.

Zowel zoetwater als zeewater bevatten daarbuiten nog een uitgebreide reeks sporenelementen in oplossing. Hier gaat het echter om concentraties in een behoorlijk aantal ordes van grootte lager: tienduizend maal ongeveer, op het niveau van de ppb.

Stromen worden gevoed door hun rivieren: al het van regenval afkomstige afvloeingswater, met opgelost materiaal en een lading vaste korrels die over de bodem meegesleurd worden, komt erin samen. Deze worden op hun beurt door het samenvloeien van meerdere bijrivieren bevoorrad. Zo gaat het stroomopwaarts verder tot men uiteindelijk bij een groot aantal kleinere beekjes terechtkomt. Het geheel van al deze waterlopen ontwatert een reusachtig gebied. Dat noemt men een stroomgebied.

Het opgeloste materiaal en de vaste lading die samen

met het water afgevoerd worden, zijn de afbraakmaterialen van de gesteenten, vast zoals rots of los zoals zand, waaruit de ondergrond van het stroomgebied is samengesteld. Verwerking en erosie ontbinden de gesteenten in kleinere fragmenten. In volgorde van afnemende grootte bestaan die fragmenten uit blokken, grind, zand, silt en kleipartikeltjes. Sommige bestanddelen van de verwerde gesteenten gaan echter rechtstreeks, of pas na traag tijdsverloop, in oplossing in het afvloeingswater. De opgeloste bestanddelen, en ook de vaste lading, zijn dus restanten van de oorspronkelijke samenstelling van de gesteenten die in het stroomgebied voorkomen. Die samenstelling varieert echter van streek tot streek. Daarom varieert de aard van het opgeloste materiaal in het rivierwater eveneens sterk. Onderzoek naar de aard van en de hoeveelheden opgeloste elementen in rivierwater resulteert



Afb. 2.6: Sporenelementen in oppervlaktewater



dus in een aanzienlijke variabiliteit, variërend van rivier tot rivier. Zowel lagere als hogere concentraties aan een bepaald element kunnen voorkomen. Het effect van de variërende inhoud aan gesteenten in een stroomgebied wordt duidelijk in afbeelding 2.5. De cijfers omtrent sporenelementen in rivierwater worden in afbeelding 2.6 weergegeven.

Bijzonder sterk uiteenlopend blijkt vooral het gehalte aan zink te zijn. Dat loopt van nauwelijks 1 µg/l tot bij de 200 µg/l.

Voor andere elementen liggen de minimale concentraties beneden de 1 µg/l of zelfs bij enkele honderdsten daarvan. De maximale gehalten overschrijden nooit de enkele tientallen µg/l.

Een vergelijking met enkele hoofdelementen geeft het volgende:

Mn : 0,3 tot 300 µg/l

Fe : 40 tot 1500 µg/l

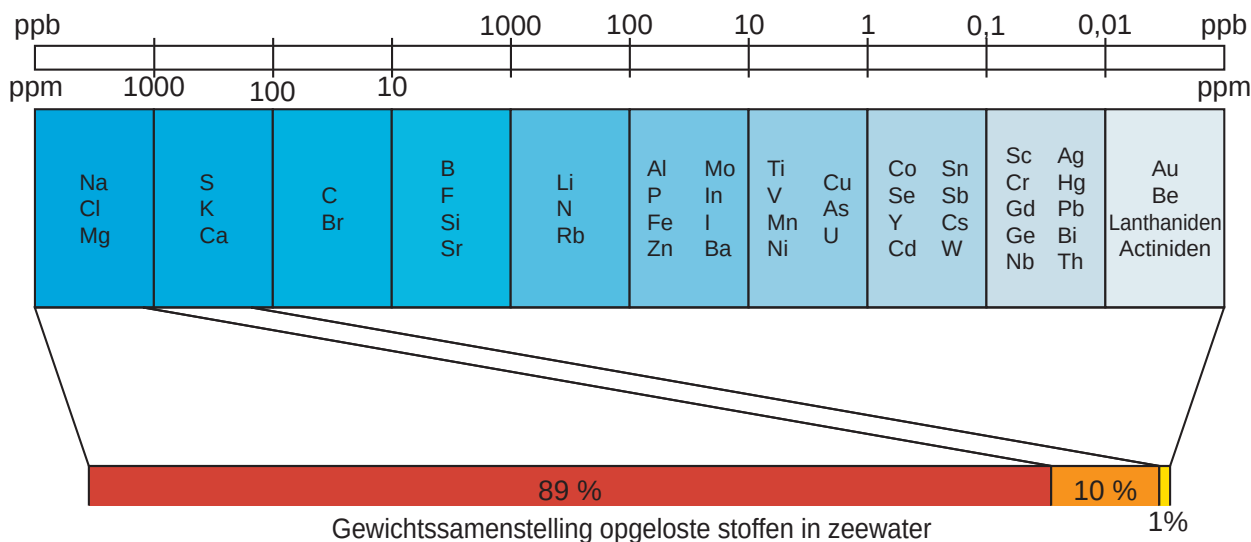
S : gemiddeld 5500 µg/l

Heel anders is het gesteld met de analyses van zeewater. Daar lopen de gehalten aan sporenelementen veel minder uiteen. Rivierwater, met een uiteenlopende samenstelling

Een opmerkelijke uitzondering daarop in de figuur is molybdeen, waarvan de concentratie in zeewater hoger ligt dan in rivieren.

Er zijn echter nog dergelijke elementen. Zwavel bijvoorbeeld, vertoont met 900.000 µg/l in zeewater behoorlijk hogere concentraties dan in rivierwater. De hoge concentraties aan natriumchloride in zeewater vallen evenmin door de inhoud van rivierwater te verklaren.

De verklaring valt misschien te zoeken in de tweevoudige invoerbronnen van chemische elementen in het zeewater. Invoer via rivieren is een eerste bron. Een tweede bron ligt in het midden van de oceanen. Dat heeft met de verschuiving van de continenten te maken. De aarde is opgebouwd uit een kern, een mantel en een aardkorst. In de mantel komen convectiestromingen voor, als gevolg van de grote hitte in het binnenste van de aarde. Aan de buitenkant van de aardbol zijn die stromingen in staat grote stukken van de aardkorst los te scheuren en die mee te sleuren. Op de plaatsen waar twee stukken aardkorst van elkaar wegdrijven wordt door het onderliggende magma, dit zijn gesmolten gesteenten, de ontstane spleet weer opgevuld met nieuw gestold gesteente. Zo groeit de oceanische korst continu verder aan, en zo ontstaan ook de oceanen. Een gebied waar een dergelijke gebeurtenis zich voordoet, noemt men een midoceanische rug (zie afbeelding 2.8).

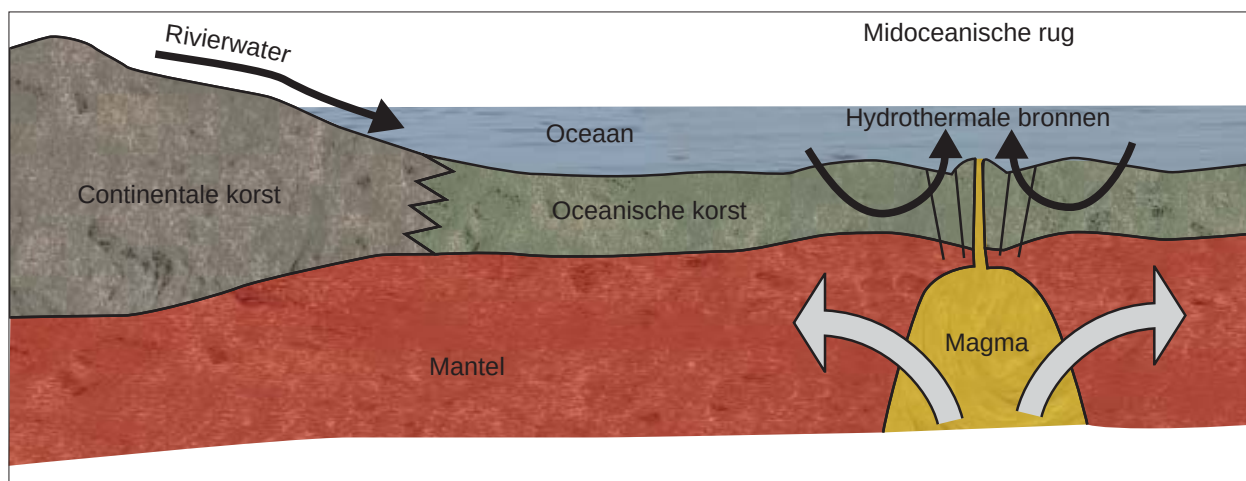


Afb. 2.7: Gemiddelde gehalten aan sporenelementen in zeewater

aan sporenelementen, uit verschillende stroomgebieden afkomstig, wordt bij aankomst in zee door stromingen, golfwerking en getijden goed door elkaar gemengd. Uiteraard zijn er ook in zee nog verschillen aanwezig, maar in de open oceaan zijn die veel kleiner. De algemene niveaus van concentratie in zeewater zijn eveneens in afbeelding 2.7 aangegeven. Het valt hierbij sterk op dat deze gehalten meestal aan de lage kant liggen.

Bij een midoceanische rug komt het magma dus vrij dicht aan het oppervlak voor. De temperatuur van de gesteenten daar neemt daarom zeer snel toe met de diepte. Men spreekt van een steile geothermische gradiënt.

Aangezien de gesteenten in die omgeving sterk aan mechanische druk en vervorming blootstaan komen



Afb. 2.8: Invoer van chemische elementen in de oceaan

er ook veel breuken in voor. Door die breuken kan het zeewater op de bodem van de oceaan makkelijker in de ondergrond doordringen. Het doorsijpelende water komt zo vrij snel in gesteenten op hogere temperatuur terecht, waardoor het tot ver boven het kookpunt opgewarmd wordt. Onder de daar heersende zeer hoge drukken blijft dit oververhitte water echter in de vorm van vloeistof verder bestaan en wordt het zeer corrosief. Het is in staat gesteenten uit te logen en bepaalde bestanddelen ervan in oplossing te brengen.

Heet water heeft een lagere densiteit dan koud water. Het zal dus door convectie weer een weg naar de oppervlakte zoeken. Langs spleten en gaten in de zeebodem spuit het als een zwarte rookpluim weer de oceaan in. In de Engelstalige literatuur spreekt men van “black smokers”. De zwarte kleur wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van grote hoeveelheden zeer fijnkorrelige sulfiden. Het zijn sulfiden van metalen zoals ijzer, mangaan, koper, zink, nikkel en nog andere. Ook oxiden en hydroxiden van ijzer en mangaan worden het water ingeslingerd, evenals waterstofsulfide, het naar rotte eieren stinkend gas dat zo vaak bij vulkanen ontsnapt.

Deze activiteiten vallen onder de noemer *hydrothermale* fenomenen en zijn te vergelijken met wat op het land in vulkanische gebieden als heetwaterbronnen gezien wordt.

Via twee wegen worden continu opgeloste stoffen in zee geloosd. Men zou verwachten dat de zee dan uiteindelijk in een oververzadigde brij verandert, maar dat is niet het geval. Er moet dus ook een stroom bestaan die opgeloste materie uit het zeewater verwijdert. Het zeewater is actueel zelfs onderverzadigd aan opgeloste materie. De verklaring kan daarom niet gezocht worden in gewone precipitatie, neerslag, als gevolg van verzadiging. Er moeten nog andere actieve factoren aan het werk zijn die er voor zorgen dat zelfs het verzadigingspunt niet bereikt wordt. Die kunnen in de volgende twee categorieën samengevat worden.

- Op de bodem van de zee worden continu nieuwe mineralen gevormd. Twee of meer elementen beginnen een structuur op te bouwen, in de vorm van een microscopisch klein korreltje. Bij die groei kunnen ook nog andere elementen als bouw materiaal gebruikt worden omdat ze zich toch toevallig in de buurt bevinden. Een vrij bekend voorbeeld hiervan zijn de mangaanknollen die wijdverspreid over de oceanbodems aangetroffen worden. Die bestaan hoofdzakelijk uit mangaanoxiden, maar bevatten eveneens waardevolle hoeveelheden andere metalen zoals koper, nikkel, kobalt, zink en andere. Over deze processen meer in een volgend hoofdstuk.
- Veel planten en dieren gebruiken eveneens anorganische elementen voor de opbouw van een aantal levensnoodzakelijke functies. Best bekend zijn de uit CaCO_3 opgebouwde schelpen van de mollusken: schelpdieren, zeeslakken, enzovoort. Van schelpdieren hebben we al vermeld dat ze het element koper gebruiken voor de aanmaak van een dierlijk equivalent van hemoglobine, in het bloed. Honderden meters dikke krijtlagen werden 100 miljoen jaar geleden gevormd door de opeenstapeling van de kalkskeletjes van een minuscule diersoort: de foraminiferen.

2.5 ENKELE NABESCHOUWINGEN

Sporenelementen zijn dus overal in onze omgeving aanwezig. Zelfs in ons eigen lichaam zijn ze opgenomen. Ze spelen er bovendien een actieve en levensnoodzakelijke rol. Ze hebben dan wel als gevolg van de opeenvolgende industriële revoluties een negatieve bijklank gekregen, ze maken wel degelijk een onmisbaar deel uit van onze natuurlijke omgeving. Ze zijn er altijd geweest, van bij het ontstaan van het leven op aarde en van bij de vorming van de aardkorst.

Terwijl in Vlaanderen sommige middens de term sporenelementen bijna als synoniem van verontreiniging laten doorgaan, voert de *British Geological Survey* onderzoek uit in gebieden waar deficiënties aan sommige



sporenelementen zouden kunnen ontstaan als gevolg van de samenstelling van de ondergrond en waardoor de gezondheid van de veestapel in gevaar zou kunnen komen. Dat is bijvoorbeeld het geval in gebieden waar lage kopergehalten voorkomen in combinatie met hoge molybdeengehalten.

Sporenelementen komen meestal in gehalten voor die voor de leek onvoorstelbaar laag zijn. Zo laag dat ook wetenschap en technologie een hoge graad van ontwikkeling moesten bereiken vooraleer men ze zelfs maar kon detecteren, laat staan meten. Hoe meer deze wereld van uiterst lage gehalten werd onderzocht, hoe meer men hun aanwezigheid vaststelde. Men kan nu met zekerheid beweren dat hoe lager de concentratieniveaus zijn in het onderzoek, hoe meer elementen herkend worden op plaatsen waar men ze vroeger nooit vermoed had. Het is niet onjuist te beweren dat, als men het concentratieniveau maar laag genoeg bekijkt, zelfs gewoon zeewater goud gaat bevatten. Uiteindelijk komt het merendeel van de elementen uit de tabel van Mendelejev vrijwel overal voor.

Hieruit volgt dat zuivere stoffen in wezen niet bestaan. Zuivere stoffen zoals men die graag gebruikt in onze technologische processen, zijn in feite slechts wensdromen. Strikt genomen bestaan ze niet, het zijn utopieën. Bekijk de zuiverheid van een stof met een voldoende sterk vergrootglas, en de zuiverheid verdwijnt vanzelf. Zuiverheid is een relatief begrip, door mensen bedacht, dat naarmate wetenschap en technologie vorderen steeds verder verlegd wordt.

Omgekeerd kan men de natuurlijke aanwezigheid van sporenelementen ook niet als een vervuiling of verontreiniging bestempelen. Men kan hooguit van een onzuiverheid spreken, wat een heel andere betekenis heeft. Onzuiverheid verwijst slechts naar een onvolkomenheid in een overigens extreem monotone samenstelling. Als de natuur geen perfect zuivere stoffen kent, dan kunnen daar logischerwijze ook geen verontreinigingen in voorkomen. Sommige kringen bedenken sporenelementen wel eens met de bijnaam “natuurlijke vervuiling”. Dat is een fraai voorbeeld van een *contradictio in terminis*.

Vanuit objectieve hoek kan men niet anders dan besluiten dat de termen *zuivere stoffen* en *verontreiniging* menselijke subjectieve creaties zijn. Ze bestaan niet, maar worden wel op die manier geïnterpreteerd. Het is de tijdsgeest van de geschiedenis die de betekenis van deze begrippen bepaalt. Omdat men nu de nadelen van de industriële ontwikkeling heeft ingezien, en er daaromtrent een zekere sfeer van doemdenken ontstaan is, projecteert men het begrip *vervuiling* op talrijke aspecten van het leven, ook op de natuur. Wat vroeger een zegen was, wordt nu een vervloeking. Voorbeelden liggen voor het grijpen: in landbouw en veeteelt, in mijnbouw, in milieu, enzovoort.

Ironisch genoeg betekent het begrip “natuurlijke verontreiniging” vanuit een natuurfilosofisch standpunt een terugkeer naar een denkwijze die veeleer in de wereld van aan het begin of zelfs van voor onze tijdrekening thuishoort. Die denkwijze houdt immers uitgesproken platonische elementen in.

Zo was Plato van mening dat alles wat wij hier tijdens dit aardse leven kunnen waarnemen van vergankelijk en onvolmaakte aard is. Alles wat hij om zich heen zag, ervoer hij als onderhevig aan ziekte, dood, bederf, vernieling, gebrekkigheid en desintegratie. Hij dacht dat alles wat wij kunnen voelen, zien of horen, slechts een afstraling is van wat ergens in een andere, parallelle wereld als een perfecte, volmaakte, intacte en oorspronkelijke uitgave voorhanden moet zijn. Dat was wat Plato een *idee* noemde, en die toestand was dus *ideaal* of een *ideaal*. Zo is het ook met degenen die het begrip “natuurlijke verontreiniging” gebruiken: zij zijn op zoek naar een ideaal, de perfectie van een zuivere materie. De ervaring leert echter dat dat op aarde niet voorkomt.

Aristoteles daarentegen toonde reeds aan, zoals geïllustreerd in de tekst op de voorpagina, dat alle samengestelde stoffen alle elementen bevatten, ook al waren er dat in zijn tijd slechts vier. Voor hem bestond elke soort materie uit een mengsel van alle in die tijd vermeende elementen, in variërende proporties.

De natuur evolueert, verandert in de tijd, maar heeft geen bedoelingen, heeft geen toekomstvisie, en is er dus zeker niet op uit om “zuivere” stoffen te produceren. De natuur is een passieve entiteit, die alleen maar haar eigen natuurwetten ondergaat. De natuur kan dus ook geen materie tot iets hoogwaardigers opwaarderen of tot iets minderwaardigs ontwaarden of verontreinigen. De mens kan dat wel.

Ook vanuit natuurhistorisch standpunt komt men tot een gelijklopende conclusie. Sinds ongeveer een miljard jaar ontwikkelden zich op de aarde talloze levensvormen. Meest recent daarin evolueerden zoogdieren, waaronder ook de primaten, door natuurlijke selectie onzichtbaar traag tot hun huidige verschijningsvormen. De levensvormen die we vandaag zien zijn die welke als succesvolste overlevers het best aan hun natuurlijke omgeving aangepast zijn. Zij hebben zich niet alleen kunnen aanpassen aan de concurrentie van andere levende wezens, maar ook aan fysische voorwaarden, zoals klimatologische omstandigheden en zwaartekracht, en de chemische omgeving. Veruit de meeste levensvormen op aarde hebben zo geleerd hun energie te halen uit de zuurstof van de atmosfeer door middel van een aantal chemische reacties. Andere, zoals schimmels, gebruiken eveneens zuurstof als brandstof maar bij gebrek aan lucht voorzien zij zich daarvan door andere stoffen, zoals suikers en andere koolwaterstoffen, chemisch af te breken. In een aantal omgevingen met zeer uitzonderlijke chemische



samenstelling, zoals de rivier Rio Tinto in Andalusië, komen bacteriën en wieren voor die men nergens anders aantreft. Het agressieve zure karakter van dat rivierwater doet evenwel vermoeden dat eender welk levend wezen daarin vernietigd wordt. Op de bodem van de oceanen komen hete bronnen voor die verband houden met vulkanische activiteiten, de reeds genoemde “black smokers”. Sinds de laatste decennia van de twintigste eeuw worden daarin levensvormen aangetroffen die hun energie uit het element zwavel halen in plaats van uit zuurstof. De voorgaande pagina’s hebben al aangetoond dat mens en dier ook geleerd hebben zelfs de in hun omgeving voorkomende sporenelementen nuttig te gebruiken door ze in de samenstelling van hormonen, enzymen, bloedlichaampjes en vitamines op te nemen, en zo een aantal noodzakelijke chemische reacties te laten plaatsvinden.

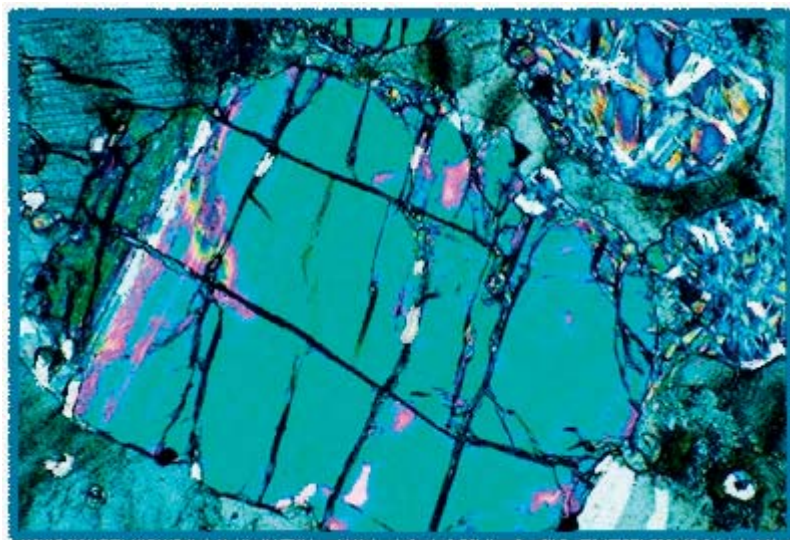
Men kan hieruit afleiden dat mens en dier aangepast zijn aan de chemische samenstelling van hun omgeving: lucht, water, plantengroei en bodem. Die bodem is samengesteld uit afbraakproducten van diverse gesteenten,

niet alleen uit losse gesteenten zoals klei, zand en leem, maar ook uit vaste gesteenten zoals graniet, basalt, kwartsiet, kalksteen en talrijke andere. Al die gesteenten komen zeer frequent en overal ter wereld aan de oppervlakte voor en maken dus deel uit van de natuurlijke omgeving. De chemische samenstelling van mens en dier is daarom te beschouwen als in overeenstemming of in evenwicht met die van de meest voorkomende gesteenten. Van evenwicht is uiteraard geen sprake meer als die wezens zich te midden van een uitzonderlijk gesteente bevinden dat bijvoorbeeld een opeenhoping bevat van radioactieve mineralen of van sulfiden en arseniden van zware metalen. Die bestanddelen komen normalerwijze immers maar als sporenelementen voor. Uit deze vaststellingen vloeit voort dat een omgeving van klei, zand, graniet of andere frequent voorkomende gesteenten voor mens en dier niet als een verontreiniging kan beschouwd worden. Verontreinigingen ontstaan pas als de mens gesteenten, of vloeistoffen of gassen, van uitzonderlijke of artificiële samenstelling, die geen normaal hoofdbestanddeel van zijn milieu uitmaken, in zijn omgeving aanbrengt of concentreert.

**SPORENELEMENTEN, IN SE,
ZIJN GEEN VERONTREINIGINGEN,
OOK GEEN NATUURLIJKE.**



HOOFDSTUK 3: Verstoppertje spelen



VERSTOPPERTJE SPELEN

Om de aanwezigheid van al die sporenelementen in de natuur te verklaren, is het handig om te weten waar zij zich ergens in de materie bevinden, hoe zij daar terechtgekomen zijn en waarom ze zich uitgerekend daar bevinden waar ze nu zitten. Omdat dat probleem in dit werk vanuit de hoek van delfstoffen en ondergrond benaderd wordt, zal hier uitsluitend hun aanwezigheid in de aardkorst uiteengezet worden. Die bestaat uit gesteenten en mineralen.

3.1 WAT ZIJN MINERALEN ?

Mineralen zijn *natuurlijke* stukjes materie in *vaste* en *kristallijne* toestand.

Stoffen in een andere toestand, zoals vloeistoffen en gasen, worden dus niet als mineralen aangezien, ook al komen ze in de vrije natuur voor.

Diamant is ook een mineraal, maar kunstmatige diamant wordt dus niet als een mineraal beschouwd.

Alle materie op onze aarde, in ons zonnestelsel en zelfs in de gehele ruimte, is uit atomen opgebouwd, de meest elementaire bouwsteentjes. Kristallijn wil zeggen dat de atomen waaruit de massa van een specifieke stof bestaat, netjes gerangschikt en opeengestapeld zijn volgens een geometrisch regelmatig driedimensionaal patroon. Men noemt dat een kristallijne structuur of een kristalrooster.

Stoffen die niet kristallijn zijn, worden *amorf* genoemd. Het beste voorbeeld hiervan is glas. In glas liggen al de atomen op een vrij ordeloze manier opeengegoooid, zonder goed ontwikkelde structuur of regelmaat. Alleen als glas gedurende langere tijd verhit wordt, gaan de atomen zich langzaam netjes rangschikken en wordt het glas kristallijn. Het glas wordt dan ook mat en ondoorzichtig. Dat is wat er zich vaak in een vaatwasmachine afspeelt.

Een stollingsproces of een chemische neerslag levert dus niet automatisch een mineraal op. Er ontstaat pas een mineraal als de atomen gedurende langere tijd de gelegenheid krijgen om zich ruimtelijk te organiseren. Glas is daarvoor veel te snel afgekoeld geworden.

Een mineraal kan uit één enkele soort atomen opgebouwd zijn, of twee, of meerdere.

Mineralen met maar één element zijn bijvoorbeeld zwavel en metalen in natuurlijke metallische, *gedegen* toestand, zoals bijna zuiver goud, zilver en koper, of ijzer in meteorieten.

Mineralen met twee verschillende elementen erin zijn bijvoorbeeld hematiet, ijzeroxide met ijzeratomen en

zuurstofatomen, en kwarts, siliciumdioxide met silicium en zuurstof.

Bij de mineralen met meerdere elementen rekenen we bijvoorbeeld de kleimineralen met daarin minstens vier soorten atomen: aluminium, silicium, zuurstof en waterstof, maar meestal veel meer.

Er kunnen ook meerdere mineralen bestaan met eenzelfde inhoud aan elementen. Zo zijn grafiet en diamant twee mineralen die beide uitsluitend uit het element koolstof opgebouwd zijn, maar waarin die atomen op verschillende manieren opeengestapeld zijn.

Een combinatie van twee elementen kan ook verschillende mineralen doen ontstaan, afhankelijk van de chemische valentiestaat van een van die elementen. Driewaardig ijzer geeft samen met zuurstof het mineraal hematiet, met samenstelling Fe_2O_3 . Met gedeeltelijk tweewaardig en gedeeltelijk driewaardig ijzer wordt daarentegen het mineraal magnetiet gevormd, met samenstelling Fe_3O_4 .

Een korrel van een mineraal dat uit slechts één continue, ononderbroken dergelijke kristallijne structuur opgebouwd is, wordt een *kristal* genoemd.

Als meerdere kristallen, van eenzelfde of van verschillende mineralen, tot één massa aan elkaar vastkitten, spreekt men van een gesteente. Mineralen zijn dus de bouwstenen waaruit gesteenten zijn opgebouwd.

Twee voorbeelden: kalksteen bestaat in hoofdzaak uit slechts één mineraal, als hij tenminste zuiver is, namelijk calciet (CaCO_3) terwijl graniet dan weer essentieel bestaat uit drie mineralen: kwarts, biotiet en veldspaat.

3.2 DE KRISTALLIJNE TOESTAND

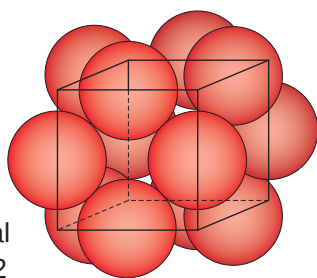
Atomen gaan niet zomaar op een willekeurige manier op een rijtje naast of op elkaar liggen. Een aantal fysische krachten dwingen de materie om dat proces uitsluitend op een systematische en geordende wijze te laten plaatsvinden.

Zo moet de minerale constructie in haar geheel elektrisch neutraal zijn. We vinden in de natuur immers nergens elektrisch geladen materialen. Dat zou een instabiele toestand doen ontstaan waarbij uiteindelijk een positief en een negatief geladen stuk materie elkaar zouden aantrekken en toch weer een elektrisch neutraal geheel zouden produceren. Het betekent dat in een mineraal de som van alle positieve ladingen gelijk is aan de som van de negatieve.

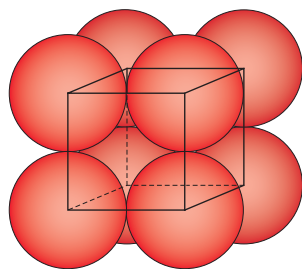
Atomen met een elektrische lading op overschot worden ionen genoemd. Ionen kunnen verschillende valentietoestanden aannemen, meestal variërend tussen 1 en 6, positief of negatief. Door dit alles is in een mi-



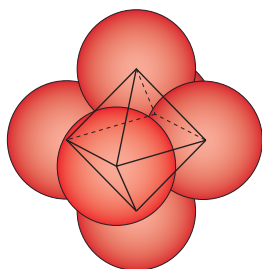
Coördinatiegetal
12



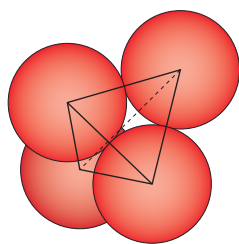
8



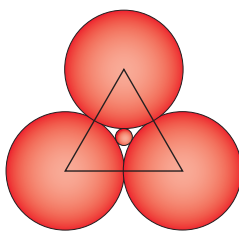
6



4



3



neraal, vanwege het neutrale geheel, ook de verhouding tussen het aantal kationen en het aantal anionen steeds vast bepaald.

Ionen van tegengestelde lading trekken elkaar aan. Aangezien bij zowat tachtig procent van alle gekende mineralen, een kleine tweeduizend, de atomen door dergelijke ionische bindingen aan elkaar gekluisterd zitten, zal onze verdere uitleg uitsluitend aan de hand van dat type binding gevoerd worden.

Bij het ordenen van de atomen zal een kation, zoals verwacht, steeds door anionen omringd zijn, en omgekeerd. Daarin schuilt echter een beperking, namelijk de relatieve grootte van de ionen. Het aantal anionen dat een kation kan omringen, wordt bepaald door de onderlinge verhouding van hun diameter. Om het concreet te houden, kan hier best een voorbeeld met tennisballen en tafeltennisballetjes aangehaald worden. Leg een tennisbal op tafel en omring hem zo goed mogelijk met tafeltennisballetjes. Er zullen er een achttal nodig zijn om de eerste geheel en goed aaneengesloten te omringen. Of omring een knikker met tennisballen: dan zullen drie ervan reeds volstaan. Terwijl er wel een viertal tennisballen rond dat tafeltennisballetje gelegd kunnen worden. Dit beeld is er nog maar een in twee dimensies, op een tafel. In werkelijkheid moet men zich dat in de driedimensionale ruimte voorstellen. Het is de lezer inmiddels duidelijk geworden dat hoe kleiner de centrale bol is ten opzichte van de omringende bollen, hoe groter het aantal omringende bollen wordt. Het getal dat uitdrukt door hoeveel atomen een centraal atoom omgeven is, noemt men het *coördinatiegetal*.

De in mineralen meest voorkomende coördinatiegetallen zijn 3, 4, 6, 8 en 12. Afbeelding 3.1 toont hoe dat in de werkelijkheid eruitziet. Vanaf coördinatiegetal 4 en groter nemen deze configuraties de geometrische vorm van regelmatige veelvlakken aan. Bij coördinatie 12 bevinden de omringende atomen zich op de middelpunten van de ribben van de kubus.

De relatie tot de verhouding tussen de diameters van centraal gelegen kationen en omringende anionen, zoals die uit de ervaring in de werkelijkheid blijkt, wordt in tabel 3.1 samengevat, alsmede de namen van de gevormde regelmatige veelvlakken in mineralogisch vakjargon.

Toch kunnen de meeste atomen in structuren met verschillende coördinatiegetallen ingebed worden. Ze worden daarin beïnvloed door de aanwezigheid van andere elementen. Zo kan aluminium zowel in coördinatie 4 als 6 voorkomen, calcium en natrium in 6 en 8, en kalium in 8 en 12.

Fysische omstandigheden kunnen hierbij ook een rol spelen. Zo bevorderen hogere temperaturen en een lagere druk de vorming van lage coördinaties. Die laten

Afb. 3.1: Atomen en coördinatiegetallen

COORDINATIE	VEELVLAK		VERHOUDING R_K/R_A
3	Gelijkzijdige driehoek	-	0,15 – 0,22
4	Viervlak	Tetraëder	0,22 – 0,41
6	Achtlvlak	Octaëder	0,41 – 0,73
8	Zesvlak = kubus	Hexaëder	0,73 – 1,0
12	Zesvlak = kubus	Hexaëder	> 1,0

Tabel 3.1: Relaties tussen ionenstralen en coördinatiegetallen

de atomen immers veel harder trillen, zodat de ionen een schijnbaar grotere ionenstraal meekrijgen.

Hiermee zijn nu de geometrische verhoudingen binnen kleine groepjes van atomen beschreven. Die moeten nu nog in het ruimer kader van een compleet rooster geplaatst worden.

De uitleg daarvan kan het best geïllustreerd worden aan de hand van een eenvoudig voorbeeld: de minst complexe structuur van een mineraal zoals *haliet*, samenstelling NaCl, gewoon keukenzout.

We vertrekken van een Na-kation dat door Cl-anionen omringd is. De Na-bollen hebben een diameter die ongeveer half zo groot is als die van de Cl-bollen, $R_K/R_A = 0,53$. Zoals verwacht volgens de tabel doet zich hier een coördinatie in 6 voor, een achtlvlakconfiguratie.

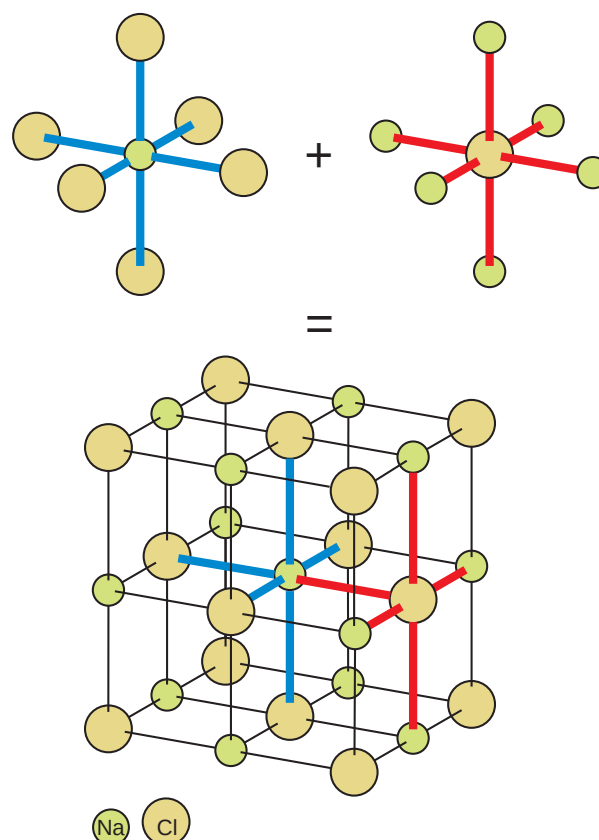
Een andere voorwaarde waaraan steeds voldaan moet worden werd reeds vermeld: de gehele structuur moet elektrisch neutraal zijn. Aangezien zowel Na-kationen als Cl-anionen een eenwaardige lading dragen, moeten er in die structuur evenveel Na- als Cl-atomen aanwezig zijn.

Stel dat er een achtlvlak met een Na-ion in het centrum voorhanden is. Die houdt zesmaal meer Cl-ionen in dan Na-ionen. Omwille van die neutraliteit moeten er ook locaties zijn waar zesmaal meer Na-ionen dan Cl-ionen voorkomen. Laat dat ook een achtlvlak zijn. Als we dan deze twee achtlvlakken op elkaar leggen zodat identieke onderdelen van beide gemeenschappelijk worden, en die som een oneindig aantal malen in de drie hoofd-richtingen herhalen, dan ontstaat een rooster zoals dat in afbeelding 3.2. Dat is ontegensprekelijk herkenbaar als een kubische structuur. Het toont duidelijk de 1/1-verhouding van het aantal ionen alsook de zesvoudige coördinatie van Na.

Dit voorbeeld is uiterst eenvoudig. Het wordt behoorlijk ingewikkeld als men een structuur wil ontrafelen waarin meerdere elementen aanwezig zijn, met verschil-

lende valenties. Meer complexe structuren zullen verder in dit werk getoond worden bij het bespreken van enkele belangrijke mineralen.

Toch sluit het goed aan om nu een idee van de geometrische basis te geven waarmee structuren van silicaatmineralen uitgelegd kunnen worden. Silicaatmineralen zijn immers zeer belangrijk, ze vertegenwoordigen de overgrote massa van de aardkorst (zie afbeelding 2.4).



Afb. 3.2: Kristalrooster van keukenzout (NaCl)

Het in de natuur veruit meest voorkomende structurele element is het atoom Si, in viervoudige coördinatie omgeven door zuurstofatomen, in de vorm van een regelmatig viervlak. Als men dat viervlak op een van zijn

vlakken neerlegt, wordt het makkelijker herkenbaar als een driezijdige piramide, drie poten op de grond, één punt in de lucht. Velen zullen zich nu herinneren dat Si een valentie +4 heeft, en O een valentie -2, zodat de chemische formule SiO_2 wordt, en daarbij denken dat de verhouding 1 Si tegen 4 O niet correct is. Een siliciuma- toom geeft inderdaad 4 elektronen vrij en verdeelt die over de vier dichtstbijzijnde zuurstofatomen. Dat bete- kent dat elk O-atoom nog een tweede negatieve lading zou willen verkrijgen. Dat tekort wordt echter naar de buitenkant van het viervlak gericht, klaar om nog een tweede elektron van een ander atoom te ontvangen. Dat laatste kan dan eender welk atoom zijn dat een neiging vertoont om elektronen af te geven, kationen dus. Elk O-atoom wordt dus maar voor de helft aan een Si-atoom gekoppeld, zodat de verhouding 1 tegen 2 wel degelijk gerespecteerd wordt.

Als zich in de nabijheid nog een tweede Si-atoom bevindt, dan kan dit zichzelf aan een punt van het eer- ste viervlak vasthaken, en zich door nog drie andere O-atomen laten omringen. Er ontstaat aldus een tweede viervlak, vastgeklonken aan het eerste viervlak. Op ver- gelijkbare wijze kunnen nog een aantal andere viervlak- ken aan het rijtje toegevoegd worden.

Door meervoudige herhaling van het voorgaande wordt nu een hele waaier van mogelijkheden opengegooid om ruimtelijke structuren op te bouwen: het aaneenrijgen van siliciumviervlakken. Afbeelding 3.3 toont hoe dat verloopt, vertrekkend van het eenvoudigste geval, een geïsoleerd viervlak. De afbeelding toont de driezijdige piramides in bovenaanzicht. De in de lucht stekende

punten zijn aldus in het centrum van de driehoeken ge- lokaliseerd.

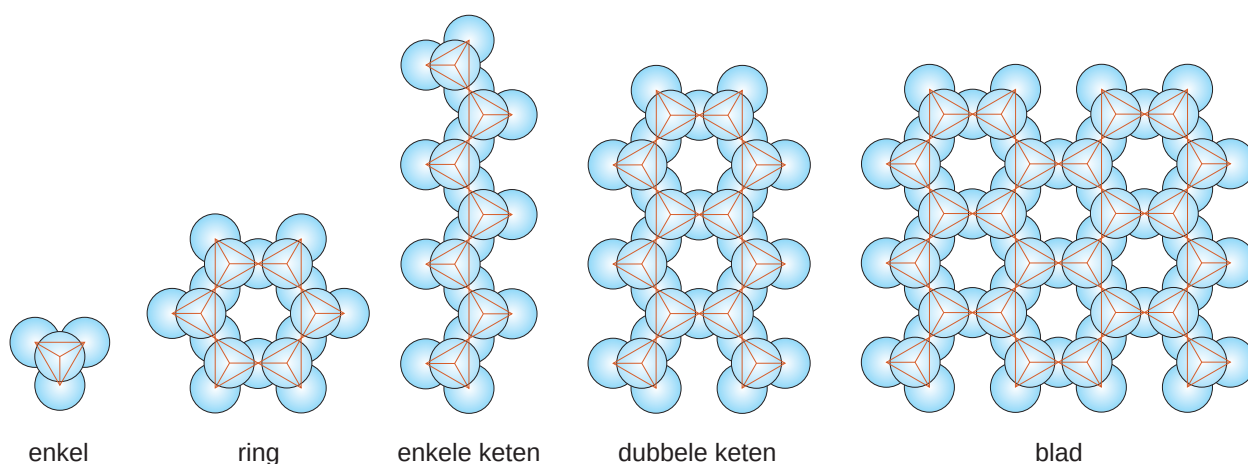
Aan de buitenkant van elk van zijn vier hoekpunten heeft het geïsoleerde viervlak nog één vrije negatieve lading beschikbaar. Om die te neutraliseren kunnen aan het viervlak vier kationen toegevoegd worden: ijzer of magnesium of een ander element. Die kationen hebben meestal ook nog extra positieve ladingen beschikbaar. Die kunnen op hun beurt geneutraliseerd worden door de negatieve zuurstofionen die behoren tot nieuwe silicium- viervlakken. Zo begint de opbouw van een driedimensi- onaal kristalrooster.

Met een aaneenschakeling van zes van die viervlakken kan een ringstructuur gevormd worden. Ringen van drie of vier viervlakken zijn ook mogelijk. Silicaatmineralen van dit type noemt men *cyclosilicaten*.

Een lange rechte keten van viervlakken geeft aanleiding tot de vorming van een *inosilicaat* (van het Grieks voor keten). Eventueel kunnen daarin twee ketens aan elkaar gekoppeld worden.

Meerdere ketens in hetzelfde vlak geven bladvormige structuren. Die liggen aan de basis van een groep mine- ralen die men de *phyllosilicaten* noemt (van het Grieks voor blad).

De laatste stap behelst het herhalen van een blad in de derde dimensie zodat een driedimensionale aaneengeslo- ten opeenstapeling van siliciumviervlakken ontstaat. Dat zijn dan de *tektosilicaten*.



Afb. 3.3: Kristalstructuren van silicaatmineralen

3.3 IONENSTRAAL

Elk ion kan beschouwd worden als een bol met een welbepaalde straal, traditioneel gemeten in angström ($= 0,1$ nanometer, $= 10^{-7}$ mm). Dergelijke bol omvat dan een kern, samengesteld uit een aantal protonen en neutronen, en een aantal schillen daarrond waarin meerdere elektronen rondcirkelen. De hierna gebruikte voorstelling van deze fenomenen komt waarschijnlijk niet meer overeen met de meest recente inzichten in de werkelijkheid, maar als model om ze te verklaren is ze afdoend.

Aan de hand van de periodieke tabel van Mendelejev kunnen systematische variaties in de grootte van de ionen als volgt uitgelegd worden.

- Voor elementen die behoren tot eenzelfde groep, dat is een verticale kolom, vergroot de ionenstraal naarmate het een zwaarder element betreft. Dat komt doordat het aantal elektronenschillen in een atoom van boven naar onder in de tabel toeneemt.
- Voor de positieve ionen van eenzelfde periode, dat is een horizontale rij, neemt de ionenstraal toe met toenemende elektrische lading. Het gaat hier immers over atomen die een aantal elektronen afgestaan hebben. Hoe meer elektronen verdwenen zijn, hoe meer de aantrekkingskracht tussen kern en elektronen op de resterende elektronen geconcentreerd wordt.
- Voor een element dat meerdere ionen met verschillende valenties kan vormen, neemt de ionenstraal met de grotere positieve lading toe. De verklaring is gelijklopend met die in het vorige punt.
- Negatieve ionen hebben alle relatief grote afmetingen. Deze nemen toe naarmate de elektrische lading nog negatiever wordt. Dit komt doordat bij opname van nog extra elektronen, de aantrekkingskracht tussen kern en elektronen over een groter wordend aantal elektronen verdeeld wordt.

De ionenstraal kan ook door het coördinatiegetal beïnvloed worden. De zeer nabije aanwezigheid van de elektronen van omringende atomen kan voorgesteld worden alsof een aantal elektronen aan het centraal gelegen ion toegevoegd werden. Volgens een van bovenstaande regels betekent dat een vergroting van de ionenstraal van het centraal gelegen ion.

Er kan dus een aanvullende regel geformuleerd worden: de ionenstraal neemt toe met een toenemend coördinatiegetal.

Een voorbeeld:

aluminium coördinatie 4: ionenstraal 0,48 Å
 coördinatie 6: ionenstraal 0,51 Å

Aan de hand van deze vuistregels is het mogelijk om het veelvuldig voorkomen van sommige complexe ionen, zoals sulfaat-, carbonaat-, nitraat- en fosfaationen, en de sterke bindingen daarin, te verklaren.

Zo hebben de ionen van zwavel, fosfor, stikstof, borium en koolstof allemaal een grote positieve elektrische lading: S^{+6} , P^{+5} , N^{+5} , B^{+3} , C^{+4} , hoewel die ionen zeer klein zijn (zie de waarden in de tabel).

Zuurstof is het meest voorkomende element in de aardkorst: het staat voor zowat 47 % van het gewicht ervan. Veel structuren van mineralen worden dus in belangrijke mate door zuurstof beïnvloed. Het is een vrij groot ion met een dubbele negatieve lading.

De sterk positief geladen kernen van de net genoemde kationen kunnen dus tot op minieme afstand van de elektronenwolk van de zuurstofionen naderen om de volgende ionen te vormen: SO_4^{-2} , PO_4^{-3} , CO_3^{-2} , NO_3^{-1} .

De bijzonder korte afstand tussen de twee elementen resulteert in een zeer sterke binding en bemoeilijkt het openbreken van deze complexe ionen.

Een ander vaak voorkomend ion is OH^- . Het heeft dezelfde afmetingen als het zuurstofion. Een waterstofion is een waterstofatoom dat zijn enig elektron afgestaan heeft en dus in feite slechts uit één enkel proton bestaat. Protonen, op zichzelf, zijn verwaarloosbaar klein en kunnen zich daarom als het ware binnenin het zuurstofion verbergen.

Tabel 3.2 is een periodieke tabel van Mendelejev waarin de meest gangbare ionenstralen van de chemische elementen vermeld zijn. Het betreft hier de ionenstralen die bij de meest voorkomende coördinaties horen die in mineralen voorkomen.

3.4 ELEMENTEN VANGEN

Mineralen ontstaan doorgaans in een vloeistofmilieu. Dat kunnen oplossingen zijn, meestal waterige oplossingen van diverse ionen, afkomstig van zouten, al of niet op hogere temperaturen. Bij gewone omgevingstemperaturen kunnen zowel in zeewater als in rivieren en grondwater mineralen ontstaan. Een andere soort vloeistoffen zijn de smelten: gesmolten gesteentemateriaal die altijd bij zeer hoge temperaturen ontstaan.

Minder frequent voorkomend is de vorming van mineralen in een gasvormig milieu, bijvoorbeeld bij gasuitwasemingen in vulkanische gebieden.

Bij een plaatselijke verandering van fysico-chemische factoren zoals druk, temperatuur, zoutconcentraties, zuurtegraad, oxiderend of reducerend vermogen van het milieu, kunnen evenwichtsdrempels overschreden



PERIODIEKE TABEL																														
I	II	Elektrische lading en ionenstralen van de meest voorkomende ionen, in de meest voorkomende coördinaties () Ionenstralen in ångström: 1Å = 0,1 nanometer															III	IV	V	VI	VII									
Li¹ 0,59 (4) 0,74 (6) 0,92 (8)	Be² 0,16 (3) 0,27 (4) 0,45 (6)	Na⁺ 0,99 (4) 1,02 (6) 1,18 (8) 1,39(12)	Mg² 0,57 (4) 0,72 (6) 0,89 (8)	Sc³ 0,75 (6) 0,87 (8)	Ti⁴ 0,42 (4) 0,61 (6) 0,74 (8)	V⁵ 0,36 (4) 0,54 (6) V³ 0,74 ()	Cr⁶ 0,26 (4) Cr³ 0,62 (6)	Mn⁴ 0,53 (6) Mn³ 0,65 (6) Mn² 0,83 (6) 0,96 (8)	Fe³ 0,65 (6) 0,78 (8) Fe² 0,63 (4) 0,78 (6) 0,92 (8)	Co² 0,74 (6) 0,90 (8)	Ni² 0,55 (4) 0,69 (6)	Cu² 0,57 (4) 0,73 (6) Cu¹ 0,46 (2) 0,77 (6)	Zn² 0,60 (4) 0,74 (6) 0,90 (8)	Ga³ 0,47 (4) 0,62 (6)	Ge⁴ 0,39 (4) 0,53 (6)	As⁵ 0,34 (4) 0,46 (6) As³ 0,58 (6)	Se² 1,98 (6)	Br⁻ 1,95 (6)												
																			B³ 0,11 (4) 0,27 (6)	C⁴ 0,15 (4) 0,16 (6)	N⁵ 0,13 (6)	O⁻² 1,38 (4) 1,40 (6) 1,42 (8)	F⁻ 1,31 (4) 1,33 (6)							
																								Al³ 0,39 (4) 0,54 (6)	Si⁴ 0,26 (4) 0,40 (6)	P⁵ 0,17 (4) 0,38 (6)	S⁶ 0,12 (4) 0,29 (6) S⁻² 1,84 (4)	Cl⁻ 1,81 (6)		
Rb⁺ 1,52 (6) 1,61 (8) 1,72(12)	Sr² 1,18 (6) 1,26 (8)	Y³ 0,90 (6) 1,02 (8)	Zr⁴ 0,72 (6) 0,84 (8)	Nb⁵ 0,64 (6) 0,74 (8)	Mo⁶ 0,65 (6) Mo⁶ 0,41 (4) 0,59 (6)	Ru⁴ 0,67	Rh³ 0,60 (6)	Pd² 0,64 (4) 0,86 (6)	Ag¹ 1,15 (6) 1,28 (8)	Cd² 0,58 (4) 0,74 (6) 0,90 (8)	In³ 0,62 (4) 0,80 (6) 0,92 (8)	Sn⁴ 0,69 (6) 0,81 (8)	Sb⁵ 0,60 (6) Sb³ 0,76 (6)	Te⁶ 0,56	I⁻ 2,20 (6)															
																Cs⁺ 1,67 (6) 1,74 (8) 1,88(12)	Ba² 1,35 (6) 1,42 (8)	La³ 1,03 (6) 1,16 (8)	Hf⁴ 0,71 (6) 0,83 (8)	Ta⁵ 0,64 (6) 0,74 (8)	W⁶ 0,42 (4) 0,60 (6)	Re⁴ 0,63 (6)	Os⁶ 0,69	Ir⁴ 0,68	Pt² 0,80 (6)	Au¹ 1,37	Hg² 0,96 (4) 1,02 (6) 1,14 (8)	Tl¹ 1,47	Pb² 1,19 (6) 1,29 (8)	Bi³ 1,03 (6) 1,17 (8)

Tabel 3.2: Periodieke tabel van Mendelejev

worden en begint de uitkristallisatie van een of meerdere minerale substanties. Bij waterige oplossingen spreekt men vaak van een chemische neerslag of precipitaat, bij smelten heeft men het over een stollingsproces.

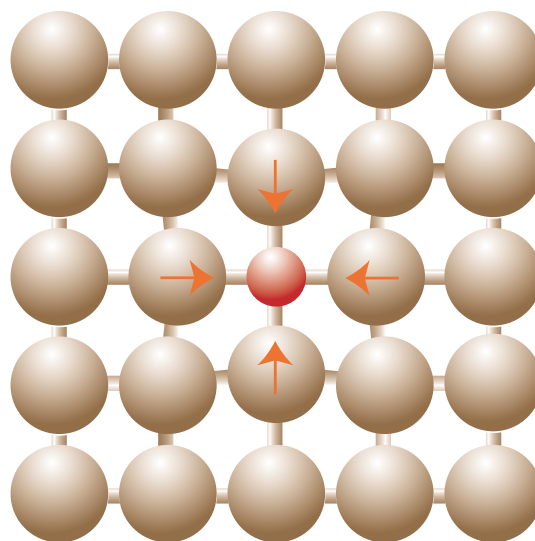
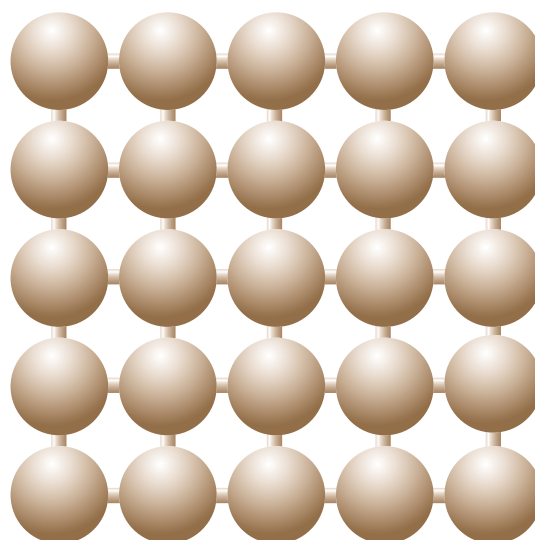
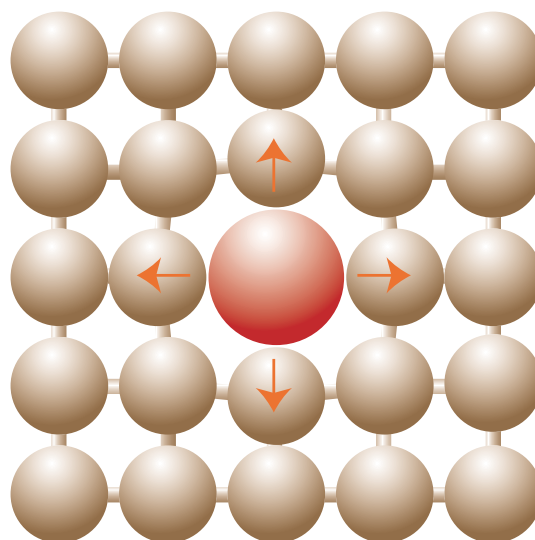
Het kristallisatieproces onderhoudt zichzelf door te putten uit de grote voorraad atomen die aanwezig zijn in de onmiddellijke omgeving. Een element dat in de nabijheid niet voorhanden is, kan uiteraard niet mee opgenomen worden in de structuur die in opbouw is. De chemische inhoud van een mineraal en het voorkomen van dat mineraal zeggen dus iets over de samenstelling van de moedervloeistof.

Bij het neerslaan van een specifieke minerale samenstelling worden steeds dezelfde ionen betrokken. Een oplossing of smelt is evenwel een goed gemengde wirwar van diverse elementen. Zo zijn er bij de uitkristallisatie steeds nog andere elementen in de buurt. Het gebeurt dan ook van tijd tot tijd dat een atoom van een heel ander type mee in de structuur opgenomen wordt, in de plaats van de meer courante.

Deze substitutie of vervanging is alleen maar mogelijk als tussen het vervangende en het te vervangen atoom enige gelijkenis bestaat wat betreft afmetingen en elektrische lading. Op die wijze wordt de structuur van het mineraal dat in aangroei is niet te zeer verstoord. Bij te grote verschillen wordt de structuur dermate vervormd dat verdere groei van het kristal niet meer mogelijk is. De kristallisatie zal zich dan wel elders voortzetten. Dit fenomeen wordt in afbeelding 3.4 geïllustreerd. Bij substitutie door te kleine ionen kan men zich ook voorstellen dat het veel ruimte vrijlatende ion door zijn trillende bewegingen te makkelijk uit de structuur ontglipt. Uit de ervaring in de werkelijkheid blijkt dat het verschil tussen de ionenstralen niet meer dan 15 % mag bedragen opdat uitwisselbaarheid mogelijk zou blijven.

Bovendien mag het verschil in elektrische lading tussen de ionen niet te groot zijn. Als in een bepaalde structuur een ion met een kleine lading door een ander ion met een grote lading wordt vervangen dan moet dat op een of andere wijze elektrisch weer gecompenseerd worden. Het geheel moet immers elektrisch neutraal blijven. Daardoor moeten er weer andere ionen, of dezelfde ionen in andere aantallen, in de structuur geïncorporeerd worden. Dat brengt op zijn beurt zo'n sterke vervorming van de structuur teweeg dat verdere uitbouw ervan niet meer mogelijk is. Waarneming van de werkelijkheid leert nogmaals dat een ladingsverschil dat gelijk is aan 1, de maximale afwijking is om uitwisseling van atomen toe te laten.

In de mineralogie spreekt men in dergelijke situaties van *atomaire substitutie* of, wat nog sprekender is, van een *vaste oplossing* van twee elementen. Een vaste oplossing is dus een homogene kristallijne, vaste stof waarin



Afb. 3.4: Atomaire vervanging

twee elementen elkaars plaats in het rooster kunnen innemen en dus een variabele samenstelling veroorzaken. De vaste oplossing kan bestaan uit twee elementen in vergelijkbare proporties, bijvoorbeeld 4 tegen 6 of 1 tegen 9, of in zeer uiteenlopende verhoudingen zoals 1 tegen 1000 of nog extremer. In dat laatste geval kan men het vervangende element het etiket sporenelement opplakken.

Als een sporenelement dezelfde positieve elektrische lading en dezelfde ionenstraal heeft als een hoofdelement, dan zegt men dat het eerste door het tweede in het kristalrooster gecamoufleerd wordt. Dat is bijvoorbeeld het geval met Ga^{+3} (0,62 Å) in aluminiummineralen, en Hf^{+4} (0,78 Å) in zirkoniummineralen. Het ene atoom kan met dezelfde graad van gemakkelijker de plaats van het andere innemen.

Als een sporenelement een vergelijkbare ionenstraal heeft als een hoofdelement, maar een grotere positieve elektrische lading, dan zegt men dat het eerste door het tweede in het rooster gevangen wordt. Hetzelfde geldt voor een sporenelement met een gelijke lading maar een iets kleinere ionenstraal. Hier is dus één factor licht veranderd zodat het sporenelement net wat makkelijker in het rooster opgenomen wordt dan het hoofdelement in kwestie. Door de hogere positieve lading wordt het immers sterker aangetrokken door de negatieve elektronenwolk van de zuurstofatomen die de reeds ingebedde kationen omringen. Een voorbeeld: Ba^{+2} (1,34 Å) wordt in kaliummineralen gevangen.

Als een sporenelement een vergelijkbare ionenstraal heeft als een hoofdelement maar een kleinere positieve lading, dan zegt men dat het eerste door het tweede in het rooster getolereerd wordt. Hetzelfde geldt voor een sporenelement met een gelijke lading maar een iets grotere ionenstraal. Hier werd dus weer één factor licht veranderd maar ditmaal zo dat het sporenelement net wat moeilijker in het rooster opgenomen kan worden. Een voorbeeld: Li^+ (0,68 Å) wordt in magnesiummineralen getolereerd.

Er zijn nog andere factoren die in deze fenomenen meespelen, zoals de elektronegativiteit van de elementen. Dat is het effect van de grootte van de elektronenwolk rond de atoomkernen. Toch zijn deze regels op zich al een afdoende leidraad om de verspreiding van sporenelementen in mineralen te verklaren.

3.5 ADSORPTIE

Bij het voorgaande konden sommige chemische elementen zich in zeer kleine hoeveelheden in het kristalrooster van een in aangroei zijnde mineraal als het ware verbergen. Die mogelijkheid dankten zij aan de sterke gelijkenis van sommige van hun eigenschappen met die van de gastelementen. Er bestaat nog een tweede mechanisme waarbij sommige elementen zich met een

mineraalkorrel van een heel andere samenstelling kunnen associëren.

In de vorige paragrafen werd uitgelegd hoe in minerale structuren een kation door een aantal anionen wordt omringd. Bij de silicaatmineralen bleek dat de zuurstofionen aan de buitenkant van het viervlak nog een negatieve lading over hadden. Die negatieve lading vormde dan de aanleiding om hieraan een tweede viervlak vast te haken. Bij een voldoende groot aantal herhalingen van dit proces ontstaat een mineraalkorrel. Het proces vindt echter niet verder plaats dan aan de rand van de korrel. Het moet toch ergens ophouden. Het oppervlak van die korrel bestaat dus voornamelijk uit zuurstofionen waarvan de resterende negatieve lading nog niet door verdere aangroei van de structuur geneutraliseerd werd. Er ontstaat hier een oppervlakte-effect waarbij de buitenkant van een korrel een negatieve lading vertoont. Op afbeelding 3.5 wordt dat schematisch weergegeven. Een dergelijke korrel kan dan nog verder aangroeien met dezelfde elementen, of, als de omstandigheden zich voordoen, kan hij andere toevallig in de buurt aanwezige kationen aantrekken. Elementen van uiteenlopende aard kunnen op deze wijze aan het oppervlak van de korrel gehecht blijven. Dit fenomeen wordt *adsorptie* genoemd.

Uit de afbeelding kan afgeleid worden dat ionen met een grotere positieve lading makkelijker geadsorbeerd zullen worden dan kationen met een kleinere lading. In het eerste geval is de aantrekking tot de korreloppervlakte sterker. De hoeveelheid geadsorbeerde elementen is ook groter als hun concentratie in het omgevende waterige milieu groter is.

De grootte van het adsorptief vermogen van een korrel is recht evenredig met zijn oppervlakte. Hoe groter de oppervlakte, hoe groter het adsorptievermogen.

Stel dat een korrel een bepaalde oppervlakte heeft. Het is makkelijk in te zien dat als die korrel in twee gespleten wordt, de oppervlakte veel groter wordt. Bij nog verdergaande opsplitsing in kleinere partikels groeit de oppervlakte nog meer. Het betekent dat voor een bepaald volume aan materie de oppervlakte toeneemt bij een kleinere korrelgrootte. Het fenomeen adsorptie is dus het meest uitgesproken bij de allerkleinste partikeltjes.

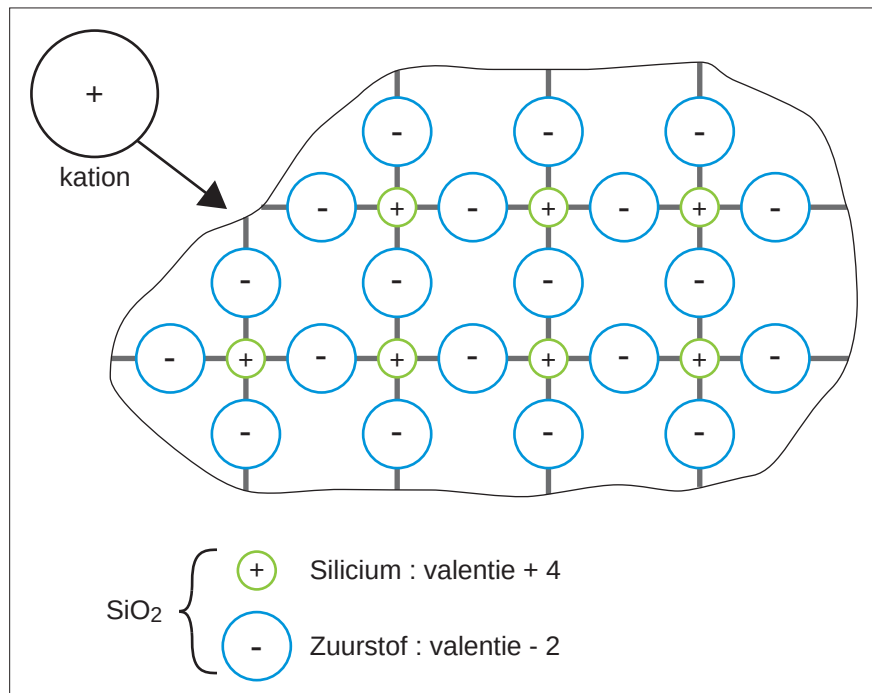
Dat is het geval bij kleideeltjes, de fijnste partikeltjes in sedimenten: kleiner dan 2 µm. Het neervallen van kleideeltjes op de zeebodem is een vrij rustig proces. De deeltjes dwarrelen traag neer en worden zeer langzaam als het ware ondergesneeuwd. Maar ook na die neerslag bevindt er zich tussen de deeltjes nog veel zeewater. In de loop van de tijd wordt dat poriënwater uitgedreven, maar tot zolang blijven de kleideeltjes nog de hele tijd in contact staan met het zeewater. Ze hebben dus alle tijd om ermee te reageren. Dat doen ze door bepaalde ionen aan hun oppervlak met het water uit te wisselen, maar



ook door de in het water voorkomende ionen op hun oppervlak te vangen.

Hieruit volgt ook dat adsorptie in staat is het zeewater van een aantal opgeloste elementen te ontdoen. In de praktijk kunnen kleien daarom ook toepassing vinden als chemische filters om verontreinigd water te reinigen.

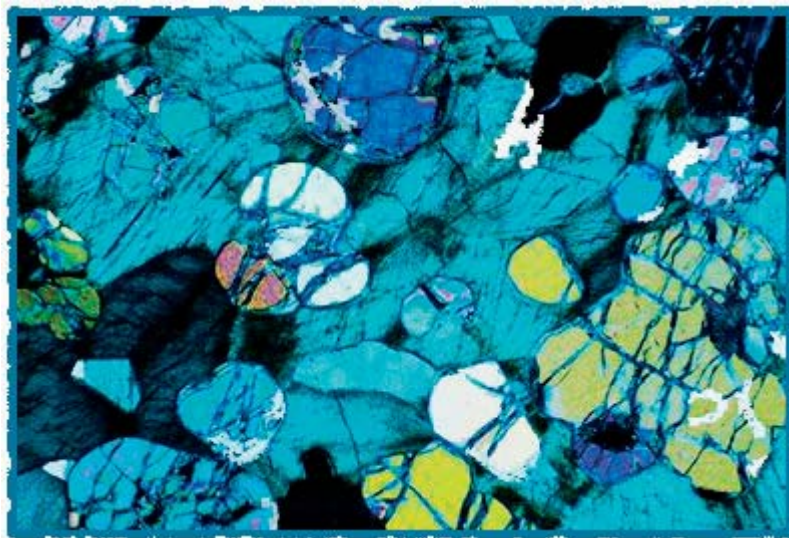
Ook op grovere partikels, zoals zandkorrels, wordt adsorptie vaak waargenomen. Zo wordt ijzer, in oplossing of als uiterst fijne suspensie in grond- en rivierwater, vaak door het oppervlak van zandkorrels vastgehouden. Er ontstaat aldus een dun omhulsel van ijzeroxide rond de kwartskorrels. Daarom hebben veel zandsoorten vaak een gele of lichtbruine kleur.



Afb. 3.5: Adsorptie

Daarbij kunnen vanzelfsprekend nog andere metallische elementen geadsorbeerd worden. Daardoor kan de zandfractie van een sediment vaak ook sporenelementen dragen, hoewel kwarts doorgaans een zeer zuiver mineraal is.

HOOFDSTUK 4: Geochemische processen



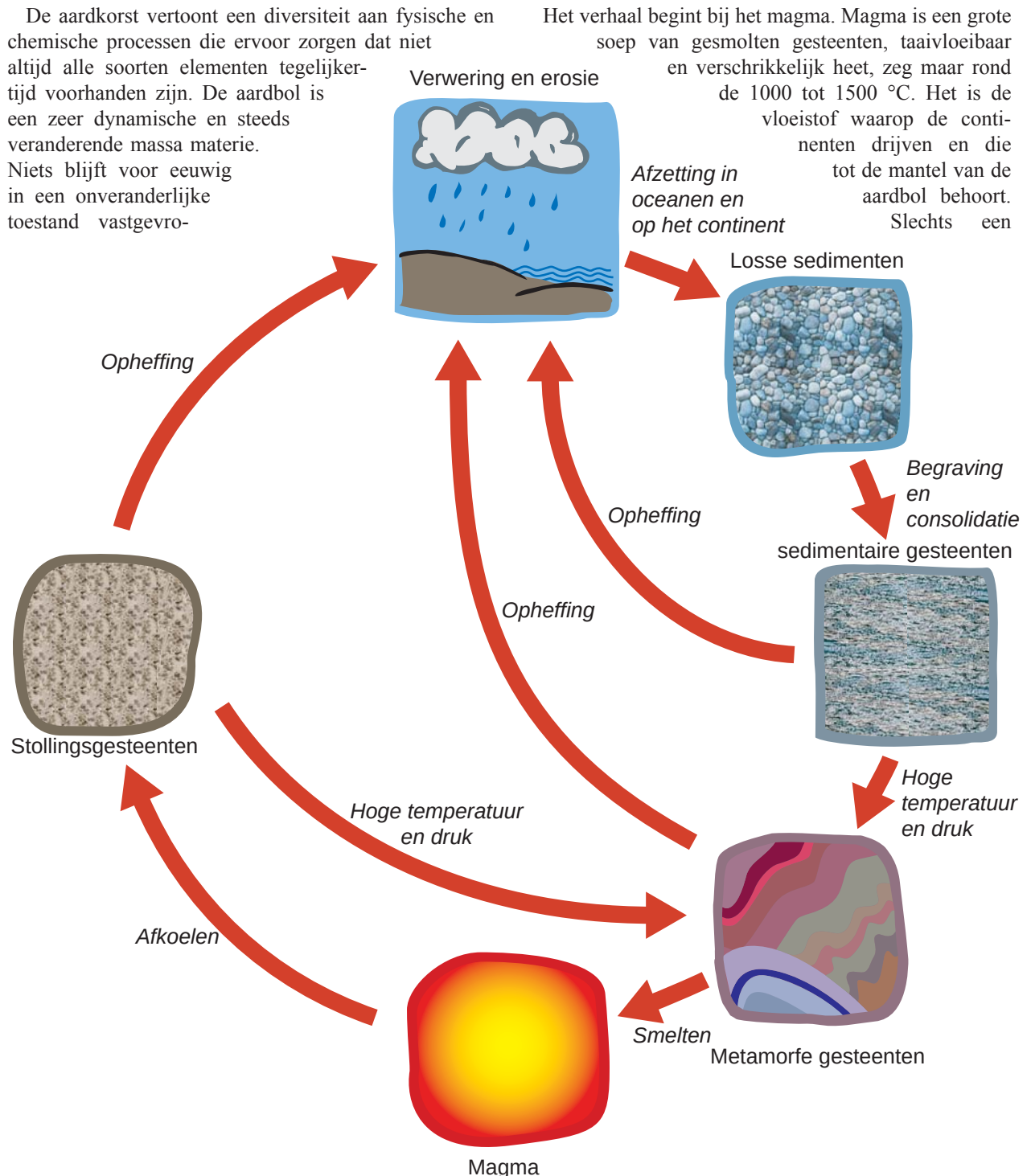
GEOCHEMISCHE PROCESSEN

In het vorige hoofdstuk werd uitgelegd op welke wijze met atomen complete structuren opgebouwd kunnen worden en welke mechanismen ervoor zorgen dat in dergelijke structuren wel eens een vreemde eend mee opgenomen wordt. Dit hoofdstuk gaat over de plaats en het tijdstip waarop die nieuwe mineralen gevormd worden en over de scheidingsprocessen die aan de basis daarvan liggen.

De aardkorst vertoont een diversiteit aan fysische en chemische processen die ervoor zorgen dat niet altijd alle soorten elementen tegelijkertijd voorhanden zijn. De aardbol is een zeer dynamische en steeds veranderende massa materie. Niets blijft voor eeuwig in een onveranderlijke toestand vastgevro-

ren. Steeds zijn er gebeurtenissen waarbij de materie in twee of meerdere fracties opgesplitst wordt. Die fracties kunnen elk een eigen verdere evolutie volgen. Op andere plaatsen worden meerdere fracties weer tot een geheel samengevoegd en kan alles weer van voren af aan beginnen. Op deze wijze ontstaan cyclische evoluties.

De belangrijkste van de in en op de aardkorst voorkomende cycli en gebeurtenissen zijn in afbeelding 4.1 schematisch samengevat.



Afb. 4.1: Geochemische kringloop

deel ervan is een echte vloeistof, de rest is zo taai dat men het zou kunnen vergelijken met een blok afgekoelde pek. Magma kan alleen op uitzonderlijke plaatsen waargenomen worden, met name bij vulkanen waaruit lava borrelt en wegstroomt.

Waar magma tot in de aardkorst kan doordringen, begint het uiterst langzaam af te koelen. Vanaf welbepaalde temperaturen beginnen de stollingsprocessen: kristallen van een aantal mineralen, vrijwel steeds silicaten, groeien in aantal en grootte, tot ze een aaneengesloten vaste massa vormen. Dat zijn dan de stollingsgesteenten. De hele aardkorst bestaat voor het overgrote gedeelte uit stollingsgesteenten. De twee types van stollingsgesteenten die aan het aardoppervlak veruit het meest voorkomen, zijn graniet en basalt. Ze worden in hoofdzaak gevormd nabij de plaatsen waar grote stukken aardkorst, of platen, tegen elkaar aanbotsen of uiteenscheuren (voor meer uitleg over continentverschuivingen zie Gullentops en Wouters, 1996).

Basalt komt als uitvloeiingsgesteente vrij vaak aan het aardoppervlak voor. Graniet daarentegen wordt binnenin de aardkorst gevormd, op een diepte van enkele kilometers. Door het aanbotsen van stukken aardkorst tegen een continent wordt dit laatste samengeperst, geplooid en verwrongen. Het neemt in dikte toe zodat grote delen ervan boven het zeewater gaan uitsteken. Zo ontstaan gebergtes. Op die wijze worden allerlei gesteenten, zowel nieuwgevormde als oudere, in contact gebracht met de lucht en de weersomstandigheden. Een reeks verweringsprocessen worden daardoor in gang gebracht. Regenwater, licht zuur gemaakt door de opname van CO_2 uit de lucht, doet de gesteenten als het ware rotten en desintegreren. IJsvorming tijdens koude perioden prangt kleine barstjes verder open en door de wind meegejaagde zandkorrels doen van de rotswanden kleine splinters afspringen.

Datzelfde regenwater spoelt vervolgens alle losliggende deeltjes mee, aanvankelijk naar de rivieren en uiteindelijk tot in de zee. Hele gebergtes kunnen door deze erosie afgesleten en afgevlakt worden. Daarbij komt zelfs die diepe graniet mee aan het oppervlak te liggen.

Rivieren zetten de meegevoerde erosieproducten op de bodems van zeeën en oceanen af. Die afzettingen worden zo onder een dikke afdeklaag van losse sedimenten bedolven, tientallen tot honderden meters dik. Tussen de zandkorrels bevinden zich aanvankelijk nog grote hoeveelheden lege ruimtes: de poriën. Die zijn met water gevuld en blijven nog lange tijd open, zelfs lang na de begraving van het sediment onder nieuwe gedeponeerde afzettingen. Toch worden de onderliggende sedimenten door het gewicht van de sedimenten die er bovenop liggen langzaam maar zeker samengedrukt. Ook het volume van de poriën vermindert dan, zodat het poriënwater uitgedreven wordt.

Het grondwater in die poriën bevat echter een aantal elementen in opgeloste toestand. Die kunnen na verloop van tijd uitkristalliseren en de poriën ermee opvullen. Daardoor worden de korrels van het sediment aan elkaar vastgekit en ontstaat een vast gesteente. De duur van dat proces is sterk uiteenlopend: het kan zich relatief snel voordoen, enkele honderden jaren, of het kan enkele tientallen miljoen jaren in beslag nemen.

Bij het samenplooiën van gesteentelagen naar aanleiding van tegen elkaar botsende stukken aardkorst kunnen ook deze sedimentgesteenten betrokken raken. Soms worden die hierbij naar grotere dieptes meegesleurd. Wanneer zij tot op dieptes van zowat 10 km belanden, komen ze in omgevingen terecht van hoge temperatuur, 300 °C en meer, en zeer hoge druk. Deze omstandigheden zetten een aantal chemische reacties in gang waardoor de bestaande mineralen afgebroken worden en nieuwe mineralen, stabiel in de nieuwe omgeving, gevormd worden. Dat proces wordt metamorfisme genoemd. Het betekent letterlijk verandering van gedaante.

Nog verdergaande verhitting van metamorfe gesteenten op grote diepte leidt uiteindelijk tot het hersmelten ervan. Dan is de cirkel helemaal rond: er ontstaat opnieuw magma, maar dan een magma met een samenstelling die mogelijk wel verschillend is van het magma waarmee de cyclus begonnen is. Er hebben zich intussen immers een aantal scheidingsprocessen voorgedaan.

De cyclus kan evenwel op alle mogelijke momenten kortgesloten worden. Indien de vervormingen als gevolg van botsende stukken aardkorst de gesteenten naar boven stuwen in plaats van naar diepere oorden, dan worden ze, als nieuwe gebergtemassa's, aan verwerking en erosie blootgesteld.

Hierna worden enkele van de stadia uit die cyclus meer uitgebreid besproken.

4.1 STOLLINGSGESTEENTEN

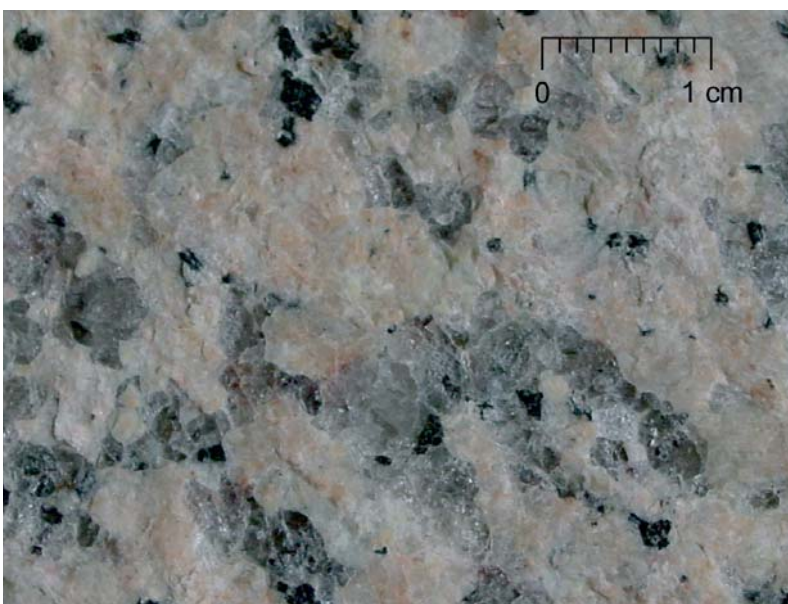
4.1.1 STOLLINGSVERHAAL

Wanneer magma afkoelt gaat het, eenmaal beneden een bepaalde temperatuur, kristalliseren. Zeg maar dat het gaat bevriezen, net zoals water dat in ijs verandert. Zuiver water bevat echter slechts twee soorten atomen, waterstof en zuurstof, en die vormen bij stolling maar één enkele component: watermoleculen. IJs heeft per definitie een smelttemperatuur van 0 °C. Daarom stolt water ook op één bepaalde temperatuur. Bij magma ligt dat helemaal anders. Het bevat vrijwel alle natuurlijk voorkomende atomen, zij het in zeer uiteenlopende verhoudingen: sommige atomen komen in grotere hoeveelheden voor dan andere. Bij afkoeling van het magma gaan bepaalde types van atomen een sterke neiging vertonen om zich samen met een of meerdere an-



dere atoomsoorten in een gemeenschappelijke structuur, een mineraal, te laten invriezen. Gezien de grote variëteit aan aanwezige atomen zullen op die wijze meerdere mineralen kunnen ontstaan.

Die mineralen hebben niet allemaal hetzelfde smeltpunt. Integendeel, sommige mineralen hebben een hoog smeltpunt. Die gaan dan ook bij afkoeling op hogere temperatuur uitkristalliseren. Andere hebben een laag smeltpunt. Die zullen dan op een lagere temperatuur de vaste vorm aannemen. Het stollen van magma gaat dus gepaard met het ontstaan van meerdere mineralen: eerst die met hoog smeltpunt, daarna die met laag smeltpunt. Het stollingsproces heeft daarom niet op een bepaalde temperatuur plaats maar doet zich over een brede vork van temperaturen voor.



Afb. 4.2: Graniet

Op deze wijze ontstaan in het magma kleine kristalletjes van diverse mineralen. Die nemen tijdens de uiterst trage verdere afkoeling in grootte toe. Steeds meer atomen sluiten zich bij de in opbouw zijnde kristallijne constructie aan. Door de zwaartekracht kunnen deze kristallen naar de bodem van de met magma gevulde ruimte zakken en daar tot een specifiek type van gesteente samenkoeken. De overblijvende vloeistof heeft daardoor een andere samenstelling gekregen. Fracties van sommige componenten werden er immers uit weggehaald. Bij verdere afkoeling kunnen nog meer kristallen, van weer andere mineralen, gevormd worden. Die kunnen op hun beurt weer aanleiding geven tot het ontstaan van andere types van gesteenten. En ondertussen verandert de samenstelling van het magma nog maar eens. Deze gebeurtenissen volgen elkaar in een continue beweging op, tot uiteindelijk het gehele magma gestold is en geen vloeistof meer overblijft.

De snelheid waarmee de afkoeling plaatsvindt heeft ook zijn invloed op de grootte van de kristallen in het stollingsgesteente. Wanneer de afkoeling zeer traag gebeurt, over een tijdsspanne van minstens enkele tienduizenden jaren, hebben kristallen alle gelegenheid om tot relatief grote korrels van meerdere millimeters groot, goed zichtbaar met het blote oog, aan te groeien. Dergelijke gevallen doen zich voor wanneer het magma op grote diepte binnen de aardkorst, met traag warmteverlies, kan stollen. Het beste voorbeeld van zo'n grofkorrelig gesteente is graniet. Omdat dit gesteente binnenin de aardkorst ontstaat, noemt men het een *intrusief* gesteente. Wanneer echter het magma door een plotse scheur in de aardkorst snel naar de oppervlakte kan doorbreken, kan het door het massale warmteverlies aldaar snel afkoelen en verharden. Dat is wat men bij vulkaanuitbarstingen waarneemt. De kristallen hebben dan vrijwel geen kans gekregen om te groeien. In een dergelijk stollingsgesteente zijn de kristallen meestal zo klein dat ze slechts door een microscoop kunnen herkend worden. Het beste voorbeeld van zo'n gesteente is basalt. Omdat het magma hier uit de aardkorst uitgeperst worden, spreekt men van *extrusieve* gesteenten. Het onderscheid tussen intrusief en extrusief is duidelijk te zien op afbeeldingen 4.2 en 4.3.



Afb. 4.3: Basalt

Graniet en basalt zijn ontegensprekelijk de best geschikte voorbeelden omdat ze op het aardoppervlak veruit de meest voorkomende stollingsgesteenten zijn. Daarbij vertegenwoordigen ze ook de twee uitersten van de magmatische afkoelingsevolutie. Basalt is daarin een van de eerste zich vormende gesteenten, graniet vrijwel het laatste. Het zijn daarom ook twee tegengestelden voor wat mineralogische en chemische samenstelling aangaat. Dat laatste is evenwel het resultaat van de volgorde waarin mineralen in het magma uitkristalliseren.

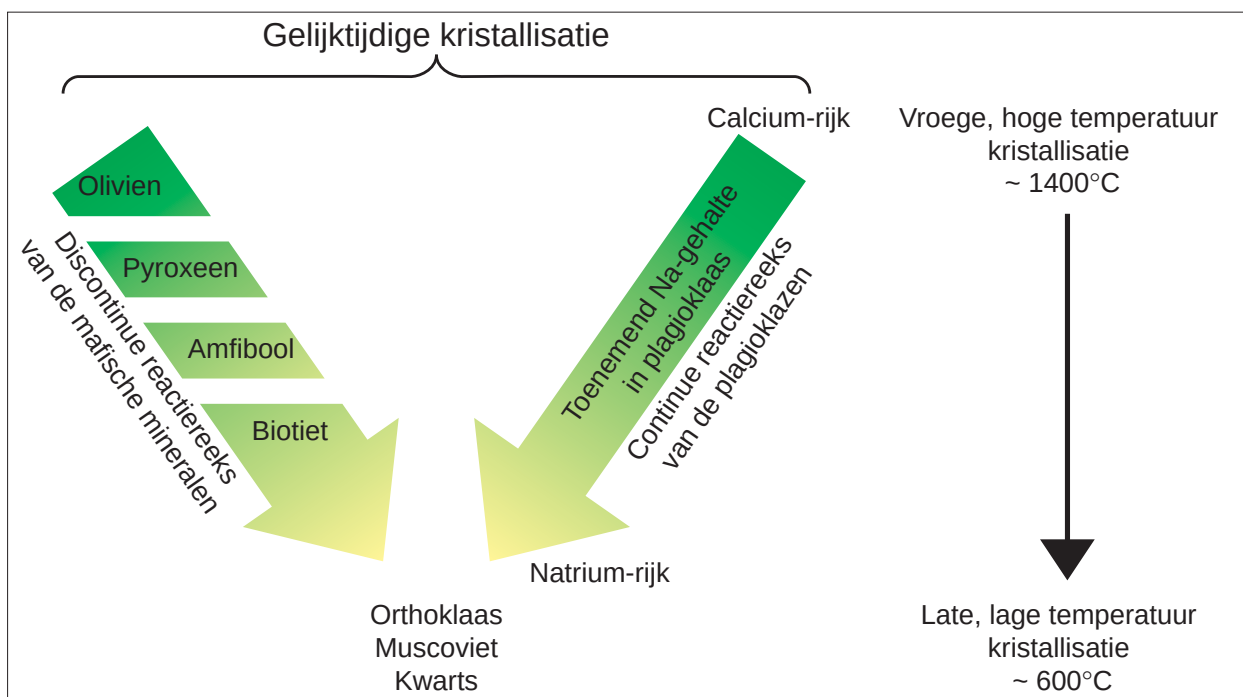
4.1.2 GEFRACTIONEEERDE KRISTALLISATIE

Het ligt in de lijn van de verwachtingen dat de eerste zich vormende mineralen zullen bestaan uit atomen die in grote proporties in de smelt voorkomen. Afbeelding 2.4 geeft hiervan reeds een goed beeld. De meest frequent in de aardkorst voorkomende elementen, meer dan 1 % van de massa, zijn zuurstof, silicium, ijzer, magnesium, calcium, natrium, kalium en aluminium.

Met deze acht elementen kan reeds een behoorlijk groot aantal combinaties samengesteld worden, die bovendien in verschillende kristallijne structuren, mineralen dus, ingevroren kunnen worden.

structuur. Zo kunnen de eerste kristallen van het mineraal olivien reeds bij 1800 °C gevormd worden. De eerste kristallen van het mineraal pyroxeen ziet men pas bij 1560 °C ontstaan, enzovoort.

Bij de tweede reeks, die tegelijkertijd met de eerste reeks uitkristalliseert, ontstaan opeenvolgend mineralen met een gelijkaardige structuur. Alleen de kationen die erin opgenomen worden variëren met dalende temperatuur. Deze variatie verloopt echter geleidelijk aan, zonder onderbrekingen. Het gaat hier over een reeks mineralen die men als reeks de plagioklazen noemt en die behoren tot de groep van de veldspaten. De eerste leden van die reeks bevatten hoofdzakelijk calcium als kationen. De



Afb. 4.4: Gefractioneerde kristallisatie

De opeenvolging van de bij dalende temperatuur zich vormende mineralen is bij geologen goed gekend. Zij noemen dat de reactiereeks van Bowen, als samenvatting van diens theorie over magmatische differentiatie. Bowen had deze reeks in 1928 opgesteld na meer dan tien jaar experimenteel onderzoek rond dit probleem. Zijn schema kan niet alles verklaren van wat er in de natuur rond stollingsgesteenten waargenomen wordt, maar de geologische kennis stond in die tijd dan ook nog niet zo ver als nu. Toch blijven de groten lijnen en principes ervan nog steeds geldig. Bowens schema kan ook voor de beschouwingen in dit hoofdstuk volstaan.

Bowen stelde vast dat er in feite twee reactiereeksen bestaan: een discontinue en een continue (zie afbeelding 4.4). Bij de eerste reeks stelt men het opeenvolgend uitkristalliseren vast van een aantal mineralen waarvan de structuren weinig of niets met elkaar gemeen hebben. Bij afkoeling ontstaat dus telkens weer een ander type van

laatste daarentegen, bij de lagere temperaturen, bevatten hoofdzakelijk natrium als kationen. Naarmate de afkoeling van de smelt vordert verandert dan geleidelijk aan de verhouding Ca/Na van het ene uiterste naar het andere.

Het verloop van de twee reactiereeksen mondt op een bepaald ogenblik uit in een derde groep van mineralen. Na de natriumrijke plagioklazen ontstaat plots een nieuw type van veldspaatmineraal: orthoklaas, met een andere structuur dan de vorige groep en rijk aan kalium. De vorming van nieuwe veldspaten is bij de relatief lagere temperaturen eveneens een discontinu proces geworden. Het andere belangrijke mineraal van deze derde groep is kwarts, zuiver siliciumdioxide. Kwarts is in volume een van de belangrijkste mineralen aan het aardoppervlak.

Het is bijzonder merkwaardig dat ook de uitkristalliserende types van mineraalstructuren in de loop van de afkoeling op een systematische wijze evolueren. Zo bezit

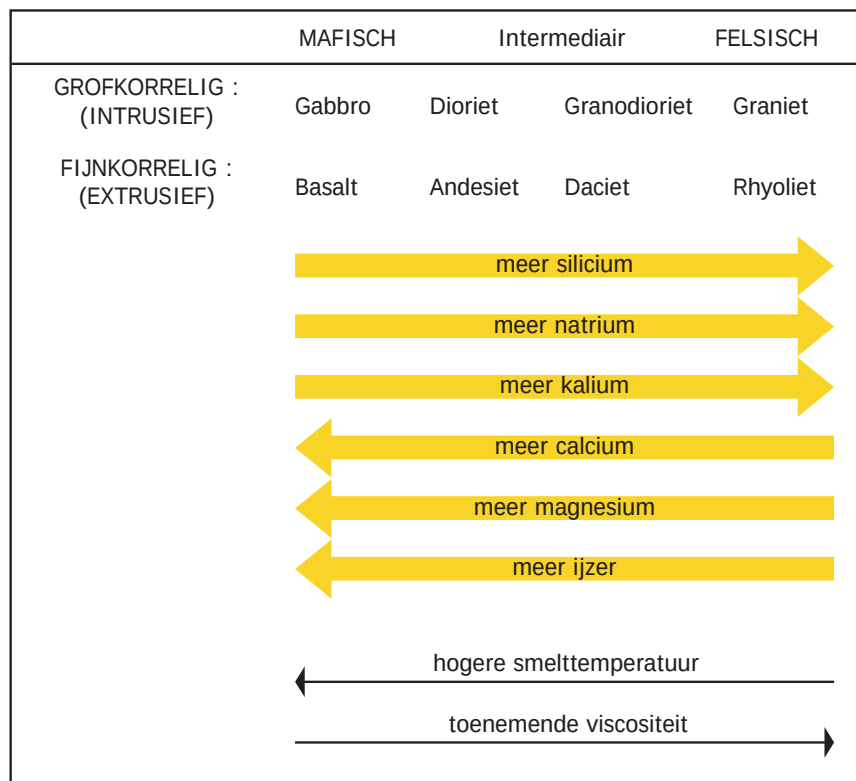
het eerst zich vormende mineraal, olivien, een structuur die bestaat uit enkelvoudige SiO_4 -viervlakken. Daaropvolgend komen de pyroxenen tevoorschijn, met een structuur van enkelvoudige ketens. Als derde kristalliseren de amfibolen uit met een structuur van dubbele ketens. Ten slotte verschijnen de mica's, zoals biotiet, met een bladstructuur. De mineralen van de derde groep hebben bladstructuren en driedimensioneel gestapelde roosters. De evolutie gaat dus van zeer eenvoudig naar complex.

De evolutie van de veldspaat-mineralen kan eveneens op een logische wijze verklaard worden. Bij het rangschikken van de SiO_4 -viervlakken in mineraalstructuren zullen de in de buurt vertoevende kationen op een eerder toevallige wijze hun plaatsen daarin innemen. Het is statistisch te verwachten dat van de, qua afmetingen en elektrische ladingen mogelijke plaatsbezitters, die met een iets kleinere ionenstraal de meeste kansen hebben om hierin te gelukken. Calcium en natrium hebben daarom meer kansen om lege plaatsen in te nemen dan kalium. Bovendien hebben van de kationen van vergelijkbare grootte, die met een iets grotere elektrische lading een betere kans, want die worden sterker aangetrokken. Dat verklaart waarom calcium eerst geïncorporeerd wordt, nog voor natrium. Langs dezelfde lijn is het nu te begrijpen dat magnesium, met een ionenstraal van 0,72 Å, en Fe^{2+} , met een ionenstraal van 0,78 Å, steeds als een van de eerste elementen uit het magma weggehaald worden door opsluiting in de mineralen van de discontinue reeks.

	Ionenstraal	Elektrische lading
Ca	0,99	+2
Na	0,97	+1
K	1,33	+1

4.1.3 GEDIFFERENTIEERDE SAMENSTELLINGEN

De eerste gesteenten die tijdens het stollingsproces ontstaan bestaan voornamelijk, zonet uitsluitend, uit mineralen van de eerste en tweede reactiereeksen. De gesteenten van de discontinue reeks zijn alle zeer donker- tot zwartgekleurd. Die van de continue reeks zijn



Afb. 4.5: Gehalte aan enkele elementen in stollingsgesteenten

aanvankelijk donkergekleurd, maar evolueren in de loop van het proces naar de intermediaire tinten. Gesteenten die vroeg tijdens de afkoeling van het magma ontstaan hebben daarom alle een vrij donker uitzicht. Ze zijn alle rijk aan magnesium en ijzer (Lat: ferrum), vandaar hun gezamenlijke benaming *mafische* gesteenten. Dat is ook het geval bij het frequent voorkomende basalt. Basalt is zo fijnkorrelig dat men met het blote oog op het gesteenteoppervlak geen details kan waarnemen. Soms kan men er toch nog enkele grotere korrels van olivien op herkennen. Dat zijn dan kristallen die al gedurende een behoorlijke periode hadden kunnen groeien vooraleer het basaltmagma naar de oppervlakte is gevloeid.

De laatste gesteenten van het stollingsproces bestaan hoofdzakelijk uit mineralen van de derde groep. Vooral het volumeaandeel van kwarts is in die gesteenten zeer prominent. Kwarts is, net zoals orthoklaas, zeer licht- tot witgekleurd. Men vindt in dit stadium daarom steeds lichtgekleurde gesteenten. Omdat ze veel veldspaten en silicium bevatten, worden ze onder de naam *felsische* gesteenten samengebracht. Ook graniet hoort hierbij. Op monsters van graniet kan men met het blote oog vrijwel steeds duidelijk drie mineralen herkennen: biotiet, kwarts en veldspaat.

De mineralogische differentiatie die deze gesteenten hebben ondergaan heeft tevens een chemische differentiatie teweeggebracht. Er werd hiervoor al enkele malen naar verwezen, maar is in afbeelding 4.5 geeft een algemeen overzicht.

4.1.4 BELANGRIJKSTE MINERALEN

De chemische samenstelling van de in stollingsgesteenten meest voorkomende mineralen is in tabel 4.1 schematisch samengevat. In de chemische formules van de mafische mineralen herkent men het aandeel van de SiO_4 -viervlakken. Die vertegenwoordigen het constructieve element van de mineraalstructuur. Links ervan staan de kationen opgesomd, die de constructielementen als het ware aan elkaar lijmen.

ten nemen in de structuur dezelfde plaats in. Er bestaan dus olivinen die hoofdzakelijk Mg bevatten en andere die vooral Fe voeren. De uitersten van de reeks bevatten uitsluitend het ene of het andere element. Ze worden respectievelijk forsteriet (Mg_2SiO_4) en fayaliet (Fe_2SiO_4) genoemd. Daartussen zijn alle overgangen mogelijk. De samenstelling van olivinen beïnvloedt tevens de smelttemperatuur, variërend tussen 1205 °C voor fayaliet en 1890 °C voor forsteriet.

	MINERAAL	CHEMISCHE SAMENSTELLING	STRUCTUUR
MAFISCH	Olivien	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	Enkelvoudige viervlakken
	Pyroxeengroep	$(\text{Mg,Fe,Ca,Al})\text{SiO}_3$	Enkele ketens
	Amfiboolgroep	$(\text{Mg,Fe,Ca,Na})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	Dubbele ketens
	Biotiet (mica)	$(\text{K,Mg,Fe,Al})\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Blad
FELSISCH	Muscoviet (mica)	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	Blad
	Plagioklaas	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	3D-rooster
	Kaliumveldspaat	KAlSi_3O_8	3D-rooster
	Kwarts	SiO_2	3D-rooster

Tabel 4.1: Vaak voorkomende mineralen in stollingsgesteenten

De constructie van de felsische mineralen steunt niet alleen op SiO_4 -viervlakken, maar ook op AlO_4 -viervlakken. Ook hier moeten kationen de overschotten aan elektrische ladingen neutraliseren.

De kennis van de structuur van de mineralen is van belang om te begrijpen welke elementen zich op welke specifieke atoomsites in die structuur kunnen installeren.

OLIVIEN

Olivien vormt een reeks mineralen met variabele samenstelling en is een mooi voorbeeld van vaste oplossing. De erin opgenomen kationen zijn immers ijzer en magnesium, in diverse verhoudingen. Die twee elemen-

Forsteriet kan tot 65 % FeO bevatten in gewicht, en fayaliet tot 54 % MgO.

PYROXENEN EN AMFIBOLEN

De pyroxenen en amfibolen worden hier samengenomen omdat het zelfs voor professionele geologen niet altijd gemakkelijk is ze met het blote oog in een gesteente te onderscheiden. Ze vormen twee vrij uitgebreide groepen mineralen met weliswaar verschillende structurele kenmerken. De structuur van de pyroxenen bestaat fundamenteel uit enkelvoudige ketens van SiO_4 -viervlakken, die van de amfibolen uit dubbele ketens. Algemeen bekeken lijken de twee groepen chemisch sterk op elkaar. Toch is er in hun chemische samenstelling heel wat va-



riatie mogelijk. Die variatie kan met geschematiseerde chemische formules als volgt weergegeven worden:



De komma's tussen de letters W, X en Y wijzen erop dat hun onderlinge verhoudingen kunnen variëren. Dat verklaart meteen het aantal mineralen binnen deze groepen. Voor elke groep zou men minstens een twintigtal mineraalnamen kunnen opsommen. De letters zelf staan voor:

W = Ca, Na in mindere mate ook K
= grote kationen

X = Mg, Fe²⁺ in mindere mate ook Mn²⁺ en Li
= kleinere kationen

Y = Al, Fe³⁺ in mindere mate ook Ti

De drie letters worden gebruikt omdat ze aangeven dat de eronder begrepen elementen verschillende types van positie in het kristalrooster innemen.

De Al-ionen in positie Y bevinden zich in een zesvoudige coördinatie.

Silicium kan op zijn beurt ook door Al-ionen vervangen worden tot een maximale verhouding van Al/Si die gelijk is aan 1/3 bij de pyroxenen en 1/4 bij de amfibolen. Aluminium bevindt zich in deze gevallen in een viervoudige coördinatie. Het verschil in elektrische ladingen moet dan weer door de aanwezigheid van een ander kation gecompenseerd worden.

Ook de (OH)-ionen bij de amfibolen kunnen gedeeltelijk nog door fluorionen vervangen worden.

Al deze mogelijke vervangingen leiden tot het voorkomen van meerdere reeksen van vaste oplossingen binnen deze mineralengroepen.

BIOTIET EN MUSCOVIET

Biotiet en muscoviet zijn de twee meest voorkomende mineralen van de groep van de mica's. Die hebben allemaal een bladstructuur. Met het blote oog zijn ze zeer gemakkelijk te herkennen. De dunne blaadjes zijn zo met de vingernagel los te peuteren. Biotiet is evenwel typisch zwartgekleurd terwijl muscoviet kleurloos is en doorzichtig. Hun samenstelling kan in de volgende geschematiseerde chemische formule genoteerd worden:



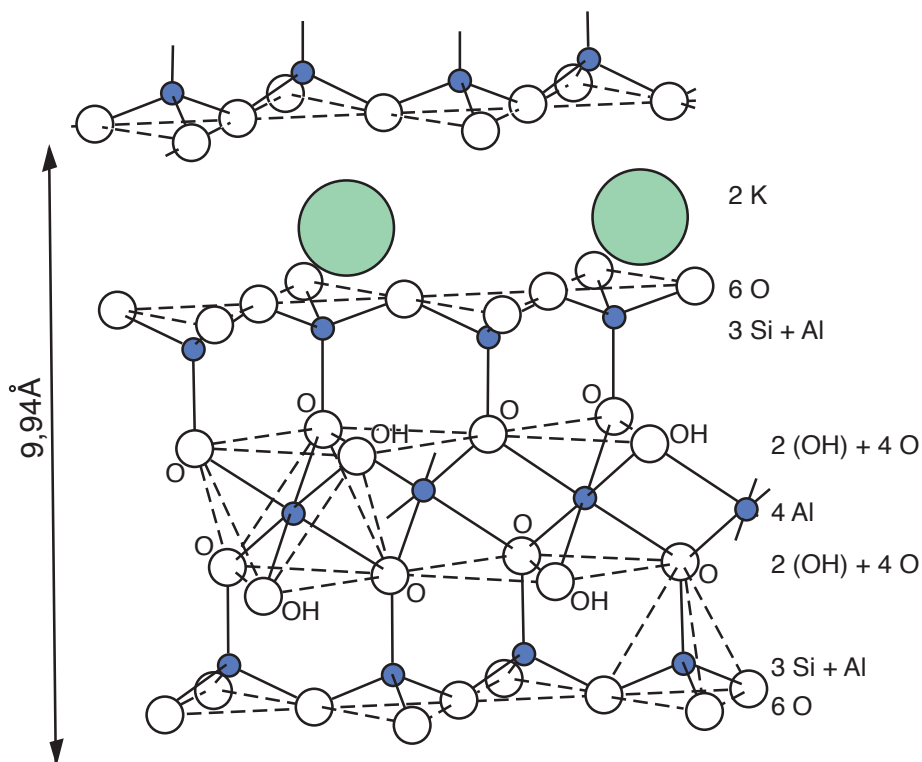
Zowel bij biotiet als bij muscoviet bestaat W uit kaliumionen.

Y bestaat bij biotiet uit Fe en Mg, met een totaal van drie atomen.

Y bestaat bij muscoviet uit twee atomen Al.

Merk bij dit laatste op dat het totaal aan positieve ladingen steeds gelijk is: $3 \times 2^+$ en $2 \times 3^+$.

De bladstructuur van de mica's is complexer dan een gewoon blad met aaneengevlochten SiO₄-viervlakken laat vermoeden. De bladen bestaan in werkelijkheid uit een sandwich van drie opeengestapelde lagen. Twee SiO₄-lagen vormen boven- en onderkant van het broodje. Het beleg bestaat uit een aaneenrijging van AlO₆-achtvlakken. Zie de visuele voorstelling daarvan in afbeelding 4.6.



Afb. 4.6: Bladstructuur van muscoviet

In de SiO_4 -lagen werd van elke vier Si-atomen er eentje door een aluminium vervangen. Die vier atomen krijgen daarom gezamenlijk bekeken een negatieve lading. Vier vierwaardige Si-atomen, som $16+$, worden vervangen door drie vierwaardige Si plus één driewaardig Al, som $15+$. Netto blijft er één negatieve lading over. De negatieve buitenkanten van de sandwich worden als gevolg daarvan door positieve kaliumionen aan elkaar gelijmd.

VELDSPATEN

De veldspaten zijn samen met kwarts de meest voorkomende mineralen in de aardkorst. Ze bestaan essentieel uit driedimensionale aaneenrijgingen van SiO_4 -viervlakken. Her en der werd in die opeenstapeling echter een Si^{+4} door een Al^{+3} vervangen. Om de elektrische neutraliteit van de structuur te bewaren is het dus nodig dat enkele extra kationen dat verlies aan positieve ladingen weer goedmaken. Dat veronderstelt wel dat de structuur van de veldspaten niet helemaal compact is. Er komen een aantal holtes in voor waarin de kationen een onderkomen kunnen vinden.

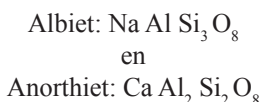
Men onderscheidt twee groepen van veldspaten: de kaliumveldspaten, met als meest bekende mineraal orthoklaas, en de natriumcalciumveldspaten, gewoonlijk de plagioklasten genoemd.

Aandachtige lezing van de chemische formule van orthoklaas geeft reeds een inzicht in de structuur ervan:



Viermaal SiO_2 geeft Si_4O_8 . Vervang één Si door een Al en compenseer met één K.

De vorming van plagioklasten berust op de bijna aan elkaar gelijke ionenstralen van Na^+ en Ca^{+2} (zie tabel 3.2). Beide elementen komen in zesvoudige coördinatie voor. Daardoor bestaat er ook een volledige reeks van vaste oplossing tussen de twee. De extremen van de reeks heten:



Om de dubbele positieve lading van Ca te compenseren was het nodig nog een extra Si door een Al te vervangen.

Het verschil in grootte tussen Na- en K-ionen verhindert tevens dat er veel vervanging van het ene door het andere kan plaatsvinden. Er bestaat dus geen reeks van vaste oplossing tussen orthoklaas en albiet.

KWARTS

Kwarts bestaat net als de veldspaten uit een driedimensionale aaneenrijging van SiO_4 -viervlakken. De structuur is echter veel compacter, waarbij geen interne ruimtes meer voorkomen. Er kunnen daarom geen kationen in het rooster opgenomen worden. Aangezien elektrische compensatie niet mogelijk is, kunnen de Si^{+4} -ionen niet door Al^{+3} vervangen worden. Kwarts is inderdaad een mineraal dat steeds zeer zuiver van samenstelling is. Chemische analyses geven bijna altijd een gehalte van ongeveer 100 % SiO_2 aan.

Kwarts is meestal wit tot kleurloos. Een eerder zeldzame keer vertoont het een kleurtje en dan wordt het ook als een halfedelsteen behandeld, zoals amethyst (= paarse kwarts).

Er bestaan ook andere mineralen met dezelfde samenstelling van siliciumdioxide, waarvan de structuur afwijkt van die van kwarts. Die mineralen zijn echter van ondergeschikt belang.

4.1.5 VERDELING OVER MINERALEN

Deze korte uitweiding over mineraalstructuren helpt mee inzien op welke manier sommige elementen bij de chemische samenstelling van de vaste materie betrokken worden. Tot zover werd uitsluitend over de hoofdelementen gepraat. In een vorig hoofdstuk werd evenwel reeds aangetoond dat ongeveer alle elementen uit de tabel van Mendelejev in de aardkorst voorkomen en dus ook in het vloeibare deel ervan: het magma. Sporenelementen zijn in niets verschillend van hoofdelementen. Ze komen wel aanzienlijk minder veelvuldig voor in de natuur. Dat is dan ook de enige aanleiding om ze onder een andere benaming te groeperen. Als een sporenelement zich toevallig in de buurt van een hoofdelement bevindt tijdens de uitkristallisatie van een mineraal kan het aan die opbouw evenzeer deelnemen. Enige voorwaarde: het ion moet ongeveer even groot zijn en een gelijkaardige elektrische lading dragen.

Er kan nu bondig overlopen worden hoe enkele van de meest bekende sporenelementen zich in zulke gevallen gedragen.

VANADIUM

Vanadium komt in magma waarschijnlijk in zijn driewaardige vorm voor. Zijn ionenstraal, in zesvoudige coördinatie, is iets groter dan die van Fe^{+3} , maar het is minder elektronegatief. Het grootste deel ervan wordt uit het magma verwijderd door opname in het mineraal magnetiet ($\text{Fe}^{+2}\text{Fe}^{+3}\text{O}_4$), een dubbeloxide van ijzer. Magnetiet kan tijdens alle stadia van de stolling van magma gevormd worden, maar het blijkt dat V^{+3} hoofdzakelijk bij de vroegste kristallisatieproducten meegenomen wordt. Vanadium komt ook voor in pyroxenen, amfibolen en biotiet.



CHROOM

Chroom komt in magma eveneens in zijn driewaardige vorm voor. Zijn ionenstraal, bij zesvoudige coördinatie, is iets kleiner dan deze van Fe^{+3} , waardoor het ook iets makkelijker dan Fe in de magnetietstructuur opgenomen wordt. Bij voldoende hoge concentraties aan Cr wordt om diezelfde reden tijdens de vroegste stadia van de stolling Cr in een eigen mineraal opgenomen, met name chromiet. Dat is een mineraal met samenstelling $\text{Fe}^{+2}\text{Cr}_2^{+3}\text{O}_4$ en met een aan magnetiet identieke structuur. Chroom komt ook in pyroxenen voor.

MANGAAN

Mangaan komt in magma voor in zijn tweewaardige vorm, namelijk Mn^{+2} . Zijn ionenstraal, bij zesvoudige coördinatie, is iets groter dan die van Fe^{+2} . Het wordt daardoor vaak in ijzervoerende mineralen getolereerd. Mangaan komt ook vaak voor in olivien en pyroxenen.

KOBALT

De ionenstraal van Co^{+2} is net iets kleiner dan die van Fe^{+2} . Daardoor wordt het iets makkelijker op de sites van Fe-ionen ingevangen. Tijdens de afkoeling van magma neemt de verhouding Co/Fe in de uitgekristalliseerde mineralen gestaag af naarmate de afkoeling vordert. Kobalt wordt dus voor het grootste deel bij de eerste kristallisaties door Fe-voerende mineralen uit het magma verwijderd, vooral in olivien.

NIKKEL

De ionenstraal van Ni^{+2} , bij zesvoudige coördinatie, is net iets kleiner dan die van Mg^{+2} . Daardoor wordt het makkelijker in de sites van dit laatste ingevangen. De verhouding Ni/Mg is inderdaad het grootst in de vroegst uitgekristalliseerde mineralen. Nikkel komt dus vooral in olivien voor. In de later gevormde mineralen is het zeer schaars aanwezig.

KOPER

De ionenstraal van Cu^{+2} is, bij zesvoudige coördinatie, iets kleiner dan die van Fe^{+2} . Het zou dus eveneens vrij gemakkelijk in de sites van dit laatste ingevangen kunnen worden. Het komt dan in de eerst uitkristalliserende ijzerrijke mineralen voor. Koper is echter een metaal dat tot de triade van edelmetalen behoort, samen met zilver en goud. Het laat zich minder gemakkelijk met zuurstof verbinden.

ZINK

De ionenstraal van Zn^{+2} is, bij zesvoudige coördinatie, net iets kleiner dan die van Fe^{+2} . Het wordt dus eveneens vrij gemakkelijk in de sites van dit laatste ingevangen. Het komt daarom ook vooral voor in de vroegst uitgekristalliseerde mineralen. Vooral in olivien komt het voor, alsook in het dubbelijzeroxide magnetiet. Het vormt zelfs een eigen mineraal, frankliniet, met dezelfde structuur als magnetiet.

	Plagioklaas	K-veldspaat	Pyroxeen	Amfibool	Biotiet	Magnetiet
Ga	15	10	5	20	25	100
Cr	-	-	4	30	5	250
V	-	-	-	175	55	1100
Mo	-	-	-	3	-	100
Li	15	10	7	15	260	
Ni	-	-	10	5	<5	20
Co	-	-	12	10	15	40
Zr	-	-	-	250	45	-
Sr	75	130	-	10	-	
Ba	125	2500	-	60	2000	
Rb	-	600	-	10	1750	

- < detectielimiet  geen gegevens

Tabel 4.2: Sporenelementen in enkele mineralen (in ppm)



CADMIUM

Bij zesvoudige coördinatie is de ionenstraal van Cd^{+2} volkomen identiek aan die van Zn^{+2} . Het wordt in de aardkorst dan ook steeds in het gezelschap van dit laatste teruggevonden. Uit afbeelding 2.4 blijkt echter dat het daarin in veel kleinere hoeveelheden voorkomt. De verhouding Cd/Zn ligt in gesteenten vaak rond de 1/500.

BARIUM

Barium is een veel te groot ion om zelfs grote kationen zoals Na en Ca te vervangen. Het enige veel voorkomende element met gelijkaardige afmetingen als barium is kalium.

Als gevolg daarvan vindt het slechts plaats in mineralen zoals kaliumveldspaten en biotiet. Aangezien het een hogere elektrische lading draagt dan K, wordt het door K makkelijk gevangen. Ba komt inderdaad vooral voor in de vroegst gevormde K-mineralen.

LOOD

Het loodion Pb^{+2} is eveneens een zeer groot kation, net wat kleiner dan K. Het is echter een erg elektronegatief ion zodat het minder makkelijk de plaats van K kan innemen. Het wordt op de sites van K slechts getolereerd. Als gevolg daarvan wordt het vooral in de laatst uitgekristalliseerde K-mineralen opgevangen. Sporen van lood komen in meerdere stollingsgesteenten voor, maar vooral in graniet.

Bij wijze van samenvatting en voorbeeld worden in tabel 4.2 de gehalten aan een aantal sporenelementen in de belangrijkste groepen van mineralen uit het stollingsproces getoond. Het zijn gegevens uit een onderzoek op gesteenten van een locatie in Californië.

4.1.6 VERDELING OVER GESTEENTEN

Het is nu duidelijk dat de meeste elementen, zowel hoofd- als sporenelementen, niet in dezelfde mate in alle mineralen aanwezig zijn. Die mineralen komen op hun beurt ook niet in dezelfde mate in alle stollingsgesteenten voor. Het ligt dus voor de hand dat de vroegste en de laatst gevormde gesteenten bij het afkoelingsproces van een magma ook een verschillende inhoud aan sporenelementen bevatten. Tabel 4.3 geeft hiervan een beeld aan de hand van onze twee voorbeelden: basalt en graniet. Het zijn geen gemiddelden, maar ze behoren bij de samenstelling van twee internationaal vaak gebruikte standaardmonsters.

Sommige sporenelementen zijn echter zo goed als afwezig in zowel graniet als basalt. Waar zijn die gebleven?

Bij het afkoelen van het magma werden sommige elementen in sterkere of mindere mate in diverse gesteenten opgenomen. De elementen die niet opgenomen

Element	Graniet (G-1)	Basalt (W-1)
3 Li	24	12
9 F	700	250
21 Sc	3	34
22 Ti	1500	6400
23 V	16	240
24 Cr	22	120
25 Mn	230	1320
27 Co	2,4	50
28 Ni	2	78
29 Cu	13	110
30 Zn	45	82
31 Ga	18	16
32 Ge	1,0	1,6
33 As	0,8	2,2
37 Rb	220	22
38 Sr	250	180
39 Y	13	25
40 Zr	210	100
41 Nb	20	10
42 Mo	7	0,05
47 Ag	0,04	0,06
48 Cd	0,06	0,3
50 Sn	4	3
51 Sb	0,4	1,1
55 Cs	1,5	1,1
56 Ba	1220	180
72 Hf	5,2	1,5
73 Ta	1,6	0,7
74 W	0,4	0,45
80 Hg	0,2	0,2
81 Tl	1,3	0,13
82 Pb	49	8
83 Bi	0,1	0,2
90 Th	52	2,4
92 U	3,7	0,52

Tabel 4.3: Sporenelementen in stollingsgesteenten (in ppm)

werden worden uiteraard geconcentreerd in wat er van het magma nog overblijft. Dat zijn dan wel de elementen die in geen enkel mineraal een plaats vonden omdat het ofwel veel te grote ionen zijn ofwel omdat ze te grote elektrische ladingen dragen (zie tabel 3.2). Dergelijke elementen zijn onder andere:

wolfram, tantalum, niobium, tin, thorium,
uranium, cesium

Deze elementen vormen uiteindelijk toch nog specifieke, vaak zeldzame mineralen, tijdens het allerlaatste stadium van de magma-afkoeling. Ze komen vaak samen voor in eerder uitzonderlijke maar economisch zeer interessante ertsafzettingen. Die zijn ook uitzonderlijk doordat zich daarin soms grote kristallen van die mineralen bevinden: meerdere centimeters tot zelfs een meter. Niet elk granitisch magma produceert echter dergelijke ertsafzettingen. Uit wat men tegenwoordig weet van de geografie van de ertsvoorkomens, leidt men af dat veel van die elementen niet overal in magma voorkomen, maar uitsluitend in een aantal regionaal afgeleide “metaalprovincies”.

Een ander aantal elementen komen niet zo gauw in de tot nu toe vermelde silicaatmineralen voor. Ze vormen veel gemakkelijker verbindingen met zwavel, om sulfiden te vormen. In een magma vormen de sulfiden echter een vloeistof die niet mengbaar is met de silicaatsmelt. Dat fenomeen is te vergelijken met de wijze waarop vetten zich gedragen in water. Men kan in de keuken soep bereiden door er een stuk vlees in te leggen. Het vet gaat echter niet in oplossing in het water. Het vormt een afzonderlijke vloeistof die op het oppervlak van de soep, in de vorm van vetogen, blijft drijven. Hoe lang men de soep ook roert, men kan de twee vloeistoffen niet mengen. Ander voorbeeld: benzine kan niet met water gemengd worden.

Op gelijkaardige wijze ontstaat in het magma een afzonderlijke vloeistofbel. Daarin worden die elementen gevangen die veeleer een verbinding met zwavel zouden aangaan dan met zuurstof. Enkele van deze elementen zijn:

arsen, zink, koper, selenium, cadmium, antimoon,
kwik, lood, zilver, bismuth, molybdeen

Bij sommige van deze elementen is die neiging minder sterk uitgesproken, zodat ze af en toe ook wel in silicaatsmelten terechtkomen. Dat is bijvoorbeeld het geval met koper, lood en zink.

Ook hier geldt de beperking dat niet elk magma dergelijke sulfidesmelten bevat.

4.2 VERWERING

Wanneer gesteenten aan de oppervlakte komen te liggen, worden zij meteen blootgesteld aan de wispelturigheden van de atmosfeer. De lucht bevindt zich op erg variabele temperaturen. Soms lopen die op tot bijna 40 °C en op andere tijdstippen duiken ze tot bijna –20 °C. Dergelijke temperatuurverschillen doen gesteenten uitzetten en krimpen. Veelvuldige herhaling van dat fenomeen kan tot barstvorming leiden. Vooral wanneer die barstjes met regenwater gevuld raken kunnen ze bij vriesweer door het uitzettende ijs nog meer opgeprangd worden. Als gevolg hiervan wordt de oppervlakte van het gesteente steeds maar groter en krijgt die steeds meer dieper in het gesteente doordringende vertakkingen. Bovendien staat de lucht niet steeds stil. Behoorlijke windsnelheden zijn in staat om zandkorreltjes mee te voeren en tegen de rotsen aan te ketsen. Soms springen er aldus wel eens kleine brokstukjes van het verzwakte rotsoppervlak af. Die verschijnselen worden gezamenlijk onder de benaming *fysische verwerking* geplaatst.

Nog veel doortastender zijn evenwel de chemische reacties die atmosfeer en gesteente met elkaar kunnen aangaan. Die worden daarom ook *chemische verwerking* genoemd. De meest reactieve bestanddelen van de atmosfeer zijn zuurstof (O₂), koolzuurgas (CO₂) en water. Die veroorzaken diverse processen zoals oplossing, oxidatie, verbinding met water, ontbinding in nieuwe stoffen, waarbij vooral de combinatie water en koolzuurgas zich als een bijtend zuur gedraagt. Wat zich daar afspeelt kan het best met een voorbeeld uit het dagelijks leven verduidelijkt worden. IJzeren of stalen voorwerpen kunnen in een droge omgeving binnenshuis een behoorlijke tijd lang intact bewaard worden. Legt men die voorwerpen evenwel in de vochtige buitenlucht, dan ontstaat als reactie daarop al gauw roest.

Niet alle mineralen ondergaan even snelle en diepgaande veranderingen als gevolg van de atmosferische omstandigheden. Sommige hebben een samenstelling die vrij veel weerstand tegenover de nieuwe omstandigheden biedt. Andere zijn totaal instabiel geworden en worden vrij snel chemisch afgebroken. Een belangrijke factor daarbij is de oplosbaarheid van de mineralen. In een vorig hoofdstuk werd al het mineraal haliet vermeld. Dat bestaat uit zuiver keukenzout en is dus zeer oplosbaar. Calciet, of calciumcarbonaat, is eveneens behoorlijk oplosbaar. Denk maar aan de talrijke uit kalksteen vervaardigde gebouwen en kunstwerken waarvan de tekening en vormgeving door de beruchte “tand des tijds” bijna onherkenbaar verminkt werden. De meeste mineralen zijn echter veel minder oplosbaar. Ze hebben soms duizenden jaren nodig eer er een millimetertje van gedisintegreerd geraakt. Ook de gevoeligheid van mineralen ten aanzien van de net genoemde fysische verwerking speelt een rol. Sommige mineralen bevatten van nature reeds talrijke splijtingsvlakken, dat zijn vlakken waarlangs de mine-



raalkorrels zeer gemakkelijk in stukken breken. Andere zijn daarentegen zeer massief en compact. Dat is erg belangrijk omdat daardoor het contactoppervlak waarlangs lucht, water en gesteente met elkaar kunnen reageren, sterk vergroot wordt. Wanneer de chemische verwerking haar werk gedaan heeft zijn de mineralen dermate mechanisch verzwakt dat ze nog gemakkelijker door fysische factoren afgebroken kunnen worden.

Tabel 4.4 geeft een opsomming van de meest voorkomende mineralen, gerangschikt volgens hun relatieve gevoeligheid ten aanzien van chemische verwerking. Daarin herkent men een aantal reeds vernoemde groepen van mineralen en stelt men vast dat die opsomming zeer sterk op de reactiereeks van Bowen lijkt (zie afbeelding 4.4), maar dan in omgekeerde volgorde.

In ons gematigd klimaat is kwarts een van de meest stabiele mineralen. Het is er haast onverweerbaar. Dat is de reden waarom gesteenten die veel kwarts bevatten in het reliëf steeds als heuvels of bergen blijven uitsteken. Enkel de fysische verwerking heeft er enige vat op. Chemisch verandert er dus vrijwel niets aan en geeft het ook geen nieuwe afbraakproducten.

4.2.1 VAN VELDSPAAT NAAR KAOLIEN

Een van de eenvoudigste en in alle schoolboeken van chemie besproken chemische reacties is de verbinding van koolzuurgas met water om er een zuur mee te vormen:



Dat is precies wat er met regenwater gebeurt door opname van CO_2 uit de lucht. De regendruppels worden

aldus voldoende zuur om hun bijtende werking zelfs op relatief stabiele mineralen te laten gelden. Laten we de veldspaten hier als voorbeeld nemen, omdat zij toch een van de meest voorkomende mineralen op de aardkorst zijn, en nagaan wat ermee gebeurt.

De destructieve actie ontstaat doordat het zuur in staat is sommige onderdelen van de kristallijne structuur van die mineralen te verstoren. Die actie is in wezen driedig:

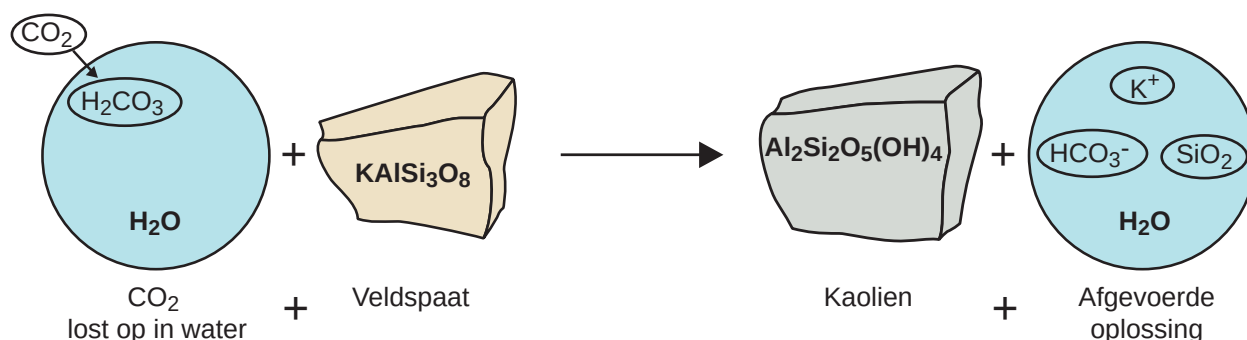
- Het kan de kaliumionen in oplossing brengen en uit de structuur verwijderen.
- Het kan een deel van de SiO_4 -viervlakken afbreken en in oplossing brengen.
- Tijdens zijn werking staat het H_2CO_3 één waterstof-ion af om dat met een van de zuurstofatomen van de AlO_6 -achtvlakken te verbinden. Dat komt neer op het toevoegen van water, in de vorm van OH -ionen, aan de veldspaatstructuur.

Wat er van dat laatste nog overblijft is compleet instabiel geworden en stort in mekaar. Al die aanwezige atomen blijven echter nog wel hun karakteristieke aantrekkingskrachten en elektrische ladingen behouden en reorganiseren zich ongeveer tegelijkertijd in een nieuw type structuur. Geleidelijk, micrometer per micrometer, wordt een bestaande structuur door een andere vervangen. Zo ontstaat een nieuw mineraal: kaolien. Het verloop van deze gebeurtenissen wordt in afbeelding 4.7 geïllustreerd. Noteer dat het gepaard gaat met het uitlogen van elementen zoals K en SiO_2 . Deze worden met het doorsijpelende regenwater naar elders afgevoerd.



Tabel 4.4: Weerstand van mineralen tegen verwerking





Afb. 4.7: Verwerking van veldspaten

4.2.2 KLEIMINERALEN

Het mineraal kaolien behoort tot de groep van de kleimineralen. Dat is een zeer uitgebreide groep met aardig wat variaties erin, zowel wat structuren als samenstellingen betreft. Andere silicaatmineralen verwerken eveneens, met productie van kleimineralen als reactieresten. Die processen zijn allemaal verschillend maar gelijkaardig en laten andere types van kleimineralen achter. Men kan algemeen stellen dat de meeste kleimineralen het resultaat zijn van verweringsprocessen.

De belangrijkste ondergroepen van de kleimineralen zijn kaolien, illiet, smectiet, vermiculiet en chloriet.

Zoals te verwachten uit het verweringsverhaal zijn de verhoudingen aan silicium ten opzichte van aluminium bij kleimineralen licht verschillend van die in bijvoorbeeld veldspaten. Ze zijn ook gehydrateerd: zie de (OH)-groepen in de chemische formule.

Kleimineralen hebben alle een bladstructuur. Ze zijn opgebouwd, net zoals de mica's, uit een aaneenrijging van groepen bladlagen, te vergelijken met een sandwich. Elke sandwich bestaat uit een opeenstapeling van twee of drie lagen.

De chemische samenstelling van kaolien is zeer monotoon en constant. Bij andere types worden de ruimtes tussen de sandwiches vaak door watermoleculen of dikke kationen zoals kalium, natrium of calcium opgevuld. In een waterig milieu kunnen deze laatste relatief gemakkelijk met de omgeving uitgewisseld worden, afhankelijk van de in het water voorkomende kationen. Ook minder frequente elementen zoals rubidium en cesium kunnen die plaatsen innemen. Men zou hier van "intersandwich"-kationen kunnen spreken.

In de uit Al(OH)₆-achtvlakken bestaande lagen kan de plaats van het aluminium eveneens door andere elementen ingenomen worden: driewaardig ijzer, magnesium, mangaan, nikkel, chroom, zink, titanium en lithium. Die elementen worden uiteraard in het kristalrooster opgenomen indien ze zich toevallig in de buurt bevinden nadat ze uit andere mineralen door verwerking vrijgemaakt

werden. Omdat ze zich binnenin het rooster op een door O²⁻ en OH⁻-ionen vastgeketende plaats bevinden, kunnen ze daar niet zo gemakkelijk uit verwijderd worden. Men moet de mineraalstructuur al bijna afbreken, met sterke zuren of verhitting op hoge temperaturen, wil men ze daaruit loskrijgen.

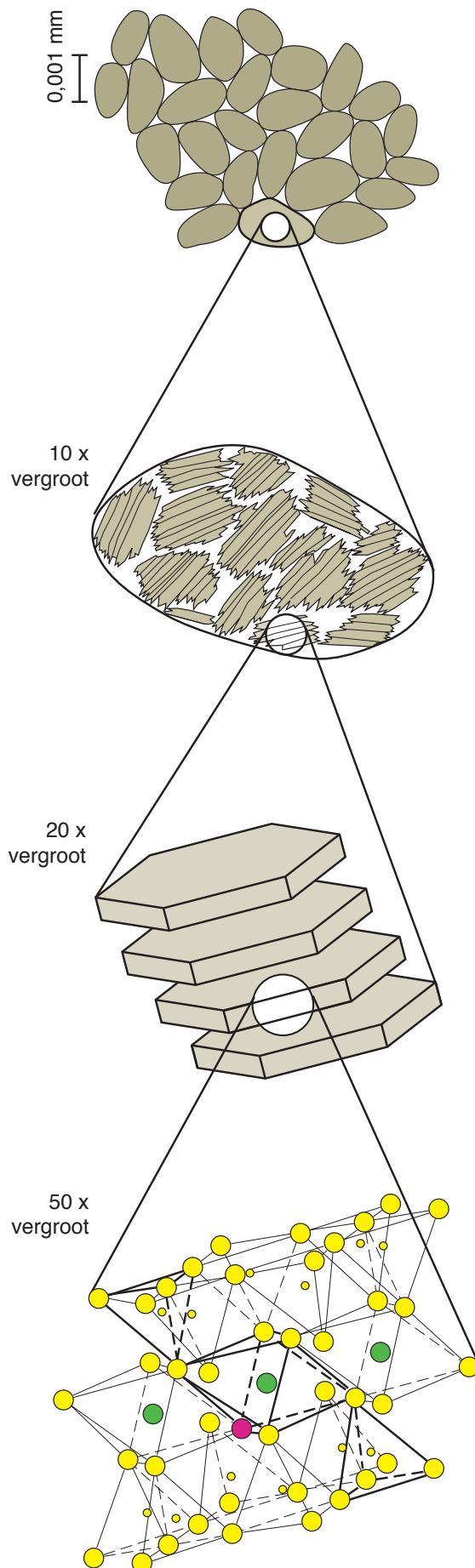
De OH-plaatsen worden in sommige kleien wel eens door fluor bezet. Dat element wordt bij het bakken van klei voor baksteenproductie daarom ook uit zijn verband gerukt en via de schoorsteen in de lucht uitgestoten.

Omdat er zoveel variaties mogelijk zijn op de stapeling van lagen bij de kleimineralen, wat zich in de natuur zeer frequent en op zeer kleine schaal voordoet, worden de structuren door deze defecten vaak ook begrensd. Dat is de reden waarom korrels van kleimineralen nooit veel groter worden dan 0,002 mm. In afbeelding 4.8 is geschematiseerd hoe die in werkelijkheid in de natuur waargenomen worden.

4.2.3 VAN PYROXEEN NAAR IJZEROXIDE

IJzer is een element dat in de aardkorst zeer veel voorkomt. Verwerking van mineralen die veel ijzer bevatten is dan ook een belangrijk proces in de chemische afbraak van gesteenten. Een verwerking die geheel andere residu's achterlaat. Dat is bijvoorbeeld het geval met pyroxeen-mineralen. IJzer komt daarin voor in de vorm van Fe⁺², de minst geoxideerde staat.

Onder invloed van het regenwater wordt een minuscule dun laagje aan de buitenkant van de korrel in oplossing gebracht. Het kristalrooster valt uiteen zodat siliciumdioxide (SiO₂) en tweewaardig ijzer afzonderlijk vrijkomen. Het SiO₂ kan vrij snel in de onmiddellijke buurt weer neerslaan als een bijzondere variëteit van kwarts of door het water een eindje meegenomen worden. Alles hangt af van de fysische en chemische omstandigheden ter plaatse. Omdat het mineraal aan de oppervlakte blootgesteld wordt aan de werking van zuurstof, zal het ijzer snel naar een hogere oxidatiegraad omgezet worden en de toestand Fe⁺³ aannemen. Dat laatste zal zich snel met zuurstof verbinden om een oxide te vormen. De binding tussen de ijzer- en zuurstofatomen is echter zo sterk dat



KLEIMASSA

is een verzameling van kleikorrels.
Een kleikorrel is het kleinste kleipartikel dat met de huidige technieken kan afgezeefd worden.

KLEIKORREL

is een verzameling van kleimineralen.
Een kleimineraal is een opeenstapeling van bladvormige kristallen.

BLADVORMIGE KRISTALLEN

zijn opgebouwd uit lagen van vier- en achtlakken met tussen de lagen een interlaminaire ruimte, opgevuld met kationen.

KRISTALSTRUCTUUR, opgebouwd uit :

„viervlakken :

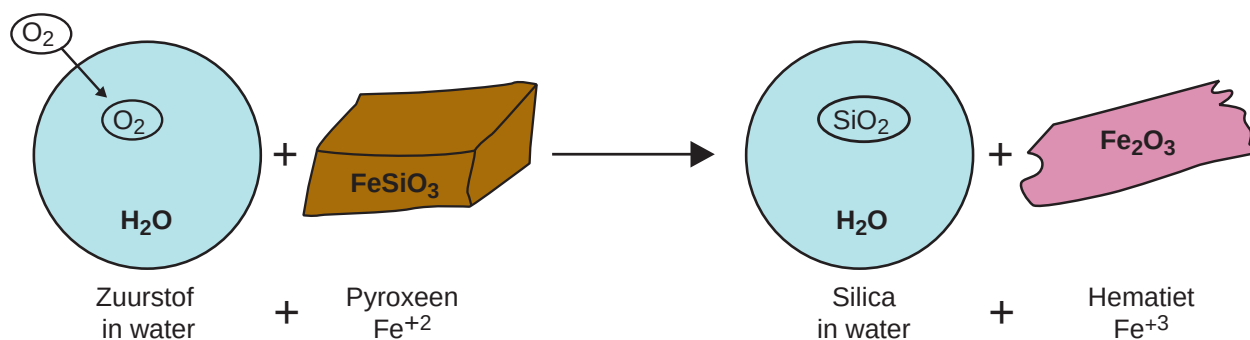
deze bestaan uit één centraal siliciumatoom omringd door vier zuurstofatomen

„achtlakken :

deze bestaan uit één centraal magnesium - of aluminiumatoom omringd door zuurstofatomen en hydroxylgroepen (OH)

● Fluor

Afb. 4.8: Structuur van kleimineralen



Afb. 4.9: Verwerking van ijzerhoudende silicaten

RELATIEVE MOBILITEIT	OMGEVINGSCONDITIONES			
	Oxiderend	Zuur	Neutraal tot Basisch	Reducerend
Zeer hoog	Cl, I, Br S, B	Cl, I, Br S, B	Cl, I, Br S, B Mo, V, U, Se, Re	Cl, I, Br S, B
Hoog	Mo, V, U, Se, Re Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra Zn	Mo, V, U, Se, Re Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra Zn Cu, Co, Ni, Hg Ag, Au	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra	Ca, Na, Mg, F, Sr, Ra
Medium	Cu, Co, Ni, Hg Ag, Au As, Cd	As, Cd	As, Cd	
Laag	Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl	Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl Fe, Mn	Si, P, K Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl Fe, Mn	Si, P, K Fe, Mn
Zeer laag tot Immobiel	Fe, Mn Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, zeldzame aarden	Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, zeldzame aarden	Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, zeldzame aarden Zn Cu, Co, Ni, Hg Ag, Au	Al, Ti, Sn, Te, W Nb, Ta, Pt, Cr, Zr Th, zeldzame aarden Mo, V, U, Se, Re Zn Cu, Co, Ni, Hg Ag, Au As, Cd Pb, Li, Rb, Ba, Be Bi, Sb, Ge, Cs, Tl

Tabel 4.5: Mobiliteit van elementen aan het oppervlak van de aardkorst
Gegevens van Perelman 1967, Hawkes & Webb 1962, Ginzburg 1960

het meteen een vaste stof vormt en neerslaat. Aldus ontstaat het mineraal hematiet (Fe_2O_3) dat zeer stabiel is. Men moet het al met zuren aanvallen om het weer opgelost te krijgen. Hoewel water niet rechtstreeks aan de reactie deelneemt, doet het toch dienst als een hulpmiddel dat de reactie makkelijker laat verlopen. Dat is de reden waarom het roesten van ijzer of staal sneller verloopt in een vochtige omgeving. Afbeelding 4.9 stelt dit schematisch voor.

4.2.4 MOBILITEIT

Hierboven werd al vermeld dat opgeloste stoffen meer of minder ver met het water kunnen meereizen. Dat hangt af van een aantal chemische condities, die in de onmiddellijke omgeving heersen. In het ene geval zorgen die ervoor dat de opgeloste stof verder in oplossing blijft. In het andere geval zorgen ze voor een spoedige, zoniet onmiddellijke, omzetting naar een vaste stof en wordt de stof in kwestie uit de oplossing afgescheiden. De wijze waarop de diverse chemische elementen uit die condities reageren noemt men *mobiliteit*. Onder welke bepaalde omstandigheden zijn sommige zeer mobiel en andere helemaal niet.

Oxiderende condities zijn omstandigheden waarin de elementen in contact staan met een zuurstofrijke omgeving, hetzij met de lucht, of hetzij met oppervlaktewaters. Ook ondiep zeewater bevat veel zuurstof, anders kon er daarin geen plantaardig of dierlijk leven voorkomen. Door zeestromingen kan zuurstofrijk water nog tot op relatief grote dieptes gebracht worden.

Anders is het gesteld met water dat zich onder het oppervlak van de zeebodem bevindt. Dat vult de poriën op van sedimenten, zoals zand en klei. De resten van afgestorven planten en dieren raken eveneens mee onder het sediment bedolven. Die sedimenten rotten langzaam weg doordat hun materie geoxideerd raakt. Daarbij verbruiken ze evenwel de in het poriënwater aanwezige zuurstof. De condities in zuurstofarm water worden *reducerend* genoemd. Dezelfde condities kunnen in stilstaande oppervlaktewaters voorkomen, zoals vijvers. De bodems van dergelijke plassen raken al eens dik bedekt met plantenresten. Identieke rottingsverschijnselen veroorzaken daar eveneens een zuurstofarm milieu, des te meer omdat het water niet dooreengewoeld wordt.

Daarnaast is er de zuurtegraad van het water. Het bestaan van licht zuur water door opname van CO_2 uit de lucht werd al vermeld. Zure omstandigheden kunnen eveneens ontstaan door het weggroten van dierlijke of plantaardige resten waarbij zwavelwaterstof (H_2S) vrijkomt. Dat is op zichzelf al een zuur. Ook dode plantenresten in humuslagen produceren zuren (zie *bodemvorming* hierna). Meer basische omstandigheden worden nabij het oppervlak van kalkgesteenten waargenomen. Wanneer calciëet (CaCO_3) de tijd krijgt wordt om in

evenwicht te komen met zijn waterige omgeving, brengt dat een licht basisch milieu teweeg. Er ontstaat dan een hydroxide van calcium.

4.2.5 BODEMVORMING

Het water dat tot de verwerking van gesteenten bijdraagt kan na afloop van zijn destructieve werking verder wegstromen. Daarbij kan het letterlijk verschillende kanten op. Het kan vooreerst aan de oppervlakte wegvloeiën. Dat kan op twee manieren gebeuren. Indien de helling van het plaatselijke terrein voldoende steil is, kan het op enigszins turbulente manier de van de gesteenten losgewrikte en al verweerde partikels meesleuren. Dat fenomeen wordt *erosie* genoemd. Het oorspronkelijke gesteente wordt zo als het ware langzaam weggesleten en blijft onbedekt aan de oppervlakte zichtbaar. Dat noemt men dan een gesteente in *ontsluiting*.

Indien het plaatselijke terrein slechts zwak hellend is of wanneer het er volkomen vlak bij ligt, kan het water langzaam weglipen. Het bezit dan te weinig energie om losliggende en verweerde deeltjes te vervoeren. Als resultaat blijven de verweringsproducten van het plaatselijke gesteente boven op de oorspronkelijke onverweerde massa liggen. Aardwetenschappers zeggen dan dat het gesteente door een bodemlaag bedekt wordt. Dat kan voor de leek eigenaardig klinken omdat het woord bodem in alledaags taalgebruik voor een onderkant voorbehouden wordt: bodem van een vat, een put of een oceaan. Die dient dan om de inhoud van de recipiënt tegen te houden en te beletten nog lager te vallen. In eenzelfde denkwijze is een bodem, in de aardkundige betekenis, evenwel de onderste begrenzing van de atmosfeer, met name het contactvlak tussen lucht en aarde.

Het bijzondere aan de vorming van bodem is dat planten daarbij ruimschoots de tijd krijgen om wortel te schieten en alles met een rijkdom aan groen te bedekken. Die plantenwortels zijn zeer effectief om stromend water af te remmen. Ze zorgen ervoor dat het verweringsmateriaal goed bij elkaar gehouden wordt en niet zo gemakkelijk verplaatst kan worden.

Bovendien sterven de planten tijdens de late herfst gedeeltelijk of geheel af. Elk jaar laten bomen en struiken een dik pak bladeren op de grond achter. Andere planten verliezen telkens al hun bovengrondse delen. Deze opeenhoping rot slechts langzaam weg. Ze vormt een donkergekleurde humusrijke laag waarin de plantenresten door oxidatie aan de lucht en de levensactiviteiten van bacteriën en andere micro-organismen ontbonden worden.

Voor landbouwkundigen plegen de betekenis van het woord bodem tot deze bovenste, aan organisch materiaal rijke toplaag te beperken (in het Engels: *topsoil*). Wij hebben het vaak ook over teelaarde. Omdat deze toplaag



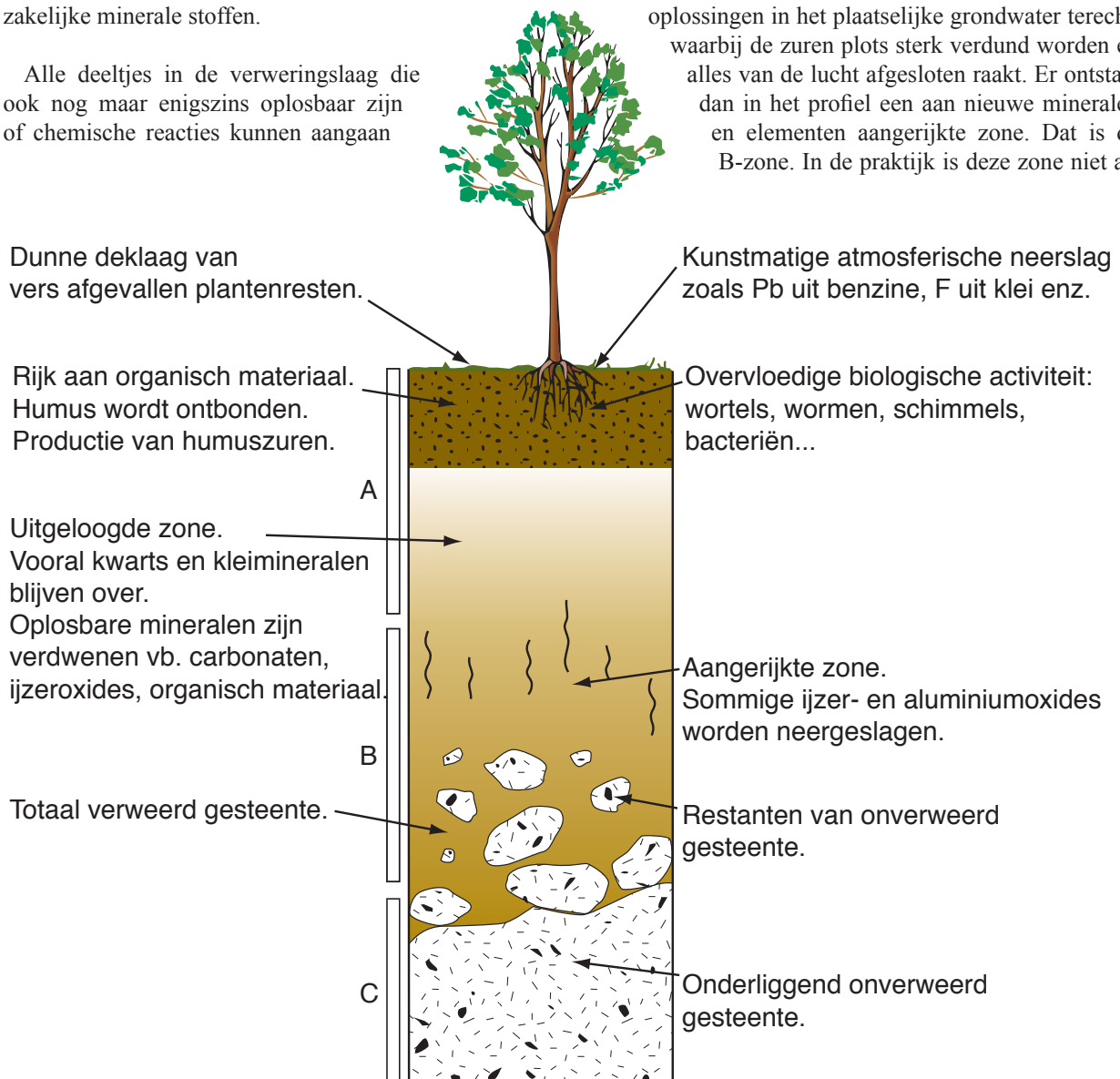
zo rijk is aan voedingsbestanddelen voor gewassen is dat immers de laag waarin landbouw bedreven wordt (zie afbeelding 4.10).

Bij die ontbindingsprocessen komen humuszuren vrij. Dat zijn, net als de meer bekende minerale zuren, bijtende producten die evengoed in staat zijn gesteenten aan te tasten, te verweren en gedeeltelijk op te lossen. Aan gezien een humuslaag boven op een verweringslaag rust, die per definitie erg gefragmenteerd en poreus is, kan het regenwater nu ook benedenwaarts in het onderliggende materiaal doorsijpelen. Humuslagen versterken en versnellen daarom in sterke mate de destructieve werking van het licht zure regenwater. Maar ook levende wortels van planten kunnen sommige mineralen op kleine schaal chemisch aantasten. De tippen van de wortels scheiden tijdens de groeiperiode organische zuren af waarmee ze de omringende gesteenten ten dele in oplossing brengen. Ze betrekken op die wijze de voor hun groei noodzakelijke minerale stoffen.

Alle deeltjes in de verweringslaag die ook nog maar enigszins oplosbaar zijn of chemische reacties kunnen aangaan

worden nu grondig afgebroken of gedeeltelijk uitgeleegd. Zelfs de in dit aan de lucht blootgestelde milieu zeer stabiele kleimineralen kunnen aangetast worden. Zo ontstaan soms zelfs nieuwe types van kleimineralen. Alles wat kalk (CaCO_3) is, wordt integraal opgelost. De laatste restjes ijzeroxide die vaak als een omhulselt rond kwartskorrels kleven, ondergaan hetzelfde lot. De kwartskorrels zelf blijven intact, want ze zijn zo goed als onoplosbaar. In een verticale doorsnede van een bodem worden de sporen van die uitlogingsprocessen vaak herkend in de vorm van een lichtgekleurde zone, ontstaen van organisch materiaal en roest. Deze A-zone wordt ook wel eluvatiezone genoemd, of, zeer vrij vertaald, de “uitgespoelde” zone.

Naarmate het regenwater dieper doorsijpelt en de zuren uitgewerkt raken, veranderen de chemische omstandigheden nogmaals. Sommige van de opgeloste stoffen kunnen weer neerslaan. Eventueel komen de oplossingen in het plaatselijke grondwater terecht, waarbij de zuren plots sterk verdund worden en alles van de lucht afgesloten raakt. Er ontstaat dan in het profiel een aan nieuwe mineralen en elementen aangerijkte zone. Dat is de B-zone. In de praktijk is deze zone niet al-



Afb. 4.10: Schematische voorstelling van een bodem in een vochtig gematigd klimaat

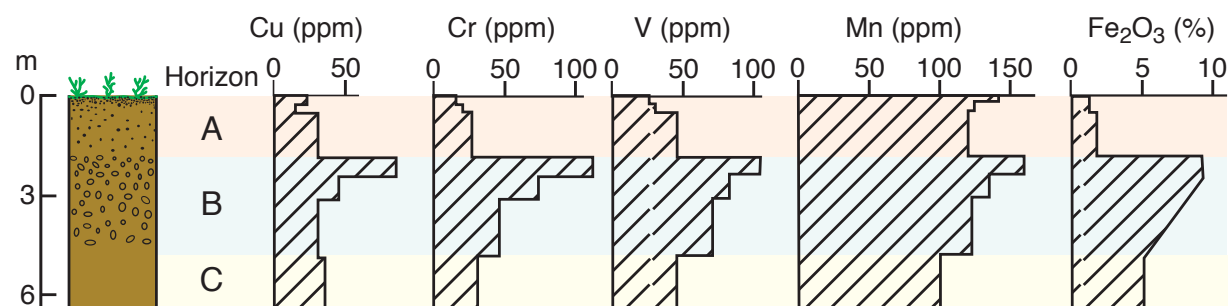
tijd duidelijk zichtbaar. Een herhaaldelijk stijgen of dalen van het grondwaterpeil kan de fenomenen immers doen vervagen.

Bodems kunnen bovendien ook door verhoogde waterdebieten, zoals bij zware regenval, vaak geheel weggespoeld worden en elders, in lagere gebieden of dalen, weer neergezet worden. Alle bodemstructuren worden daarbij vernietigd.

Indien de ondergrond uit zand bestaat, zoals in Vlaanderen vaak het geval is, kunnen er slechts weinig bestanddelen opgelost worden. Zand bestaat immers meestal uit inerte kwartskorrels. Daar kunnen dan eveneens minder details in het bodemprofiel onderscheiden worden. Ongeveer hetzelfde kan gezegd worden bij een ondergrond van klei. Kleien zijn ook zeer resistent tegen vertering.

Uit het voorgaande kan al worden afgeleid dat bij bodemvorming het klimaat een belangrijke rol speelt. Koud of warm, nat of droog, het klimaat bepaalt in sterke mate hoe snel en diep reikend een bodem gevormd kan worden. De dikte van het bodemprofiel varieert daarom sterk. In woestijnklimaten kan dat profiel een totale dikte van slechts een tiental cm bereiken, terwijl dat in tropische klimaten tot een tiental meter kan oplopen. In gematigde streken, zoals bij ons, kan dat een of twee meter zijn. De toplaag met al haar organisch materiaal is dan hooguit een halve meter dik.

Afbeelding 4.11 illustreert wat er in een bodem met zowel hoofd- als sporenelementen kan gebeuren. Het is slechts een voorbeeld, afkomstig uit Zambia. Het profiel van het tropische bodemtype waarin het voorbeeld te situeren valt, is erg gelijkaardig aan dat van de bodems van vochtige gematigde streken, zoals bij ons. Alleen de intensiteit en dus de snelheid van de vertering liggen daar een stuk hoger. Bemerkt de sterkere uitloging van vele elementen nabij het oppervlak, tot op zowat 20 cm diepte.



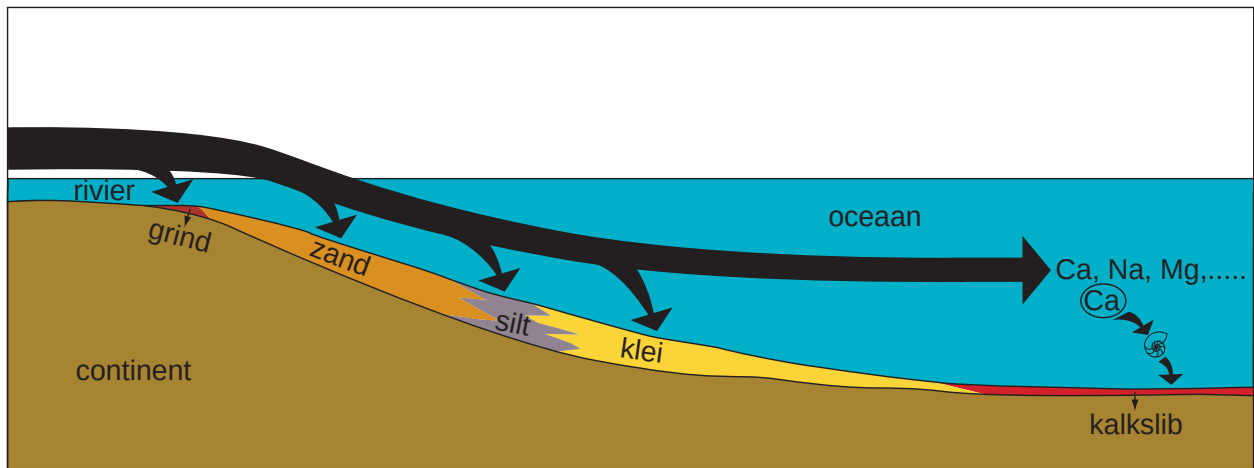
Afb. 4.11: Variatie van het gehalte aan enkele elementen in tropische bodems

4.3 SEDIMENTATIE

Vertering heeft de gesteenten mechanisch en chemisch grondig afgebroken. Talrijke mineralen werden op zijn minst gedeeltelijk opgelost en met het regenwater afgevoerd. Andere mineralen, en ook tijdens dit proces nieuwgevormde mineralen, bleven achter. IJzeroxides, kwarts en kleimineralen zijn hierbij de belangrijkste bestanddelen. Nu kan het werk van de erosie beginnen. Het afstromende regenwater sleurt de losliggende deeltjes mee. Kleine beekjes monden uit in kleine rivieren, en kleine rivieren in grotere. Uiteindelijk komen aanzienlijke debieten water in zee terecht. Dat gaat met een geleidelijke maar drastische vermindering van de stroomsnelheid gepaard, zodat het water niet meer in staat is zijn meegevoerde vracht in suspensie te houden of verder over de zeebodem te verplaatsen. Eerst vallen de grotere en zwaardere deeltjes op de bodem, daarna de iets kleinere en lichtere, tot aan het einde van de rit ook de allerfijnste partikeltjes neerdwarrelen (zie afbeelding 4.12).

4.3.1 GRIND

De allergrootste partikels, met afmetingen groter dan 2 mm, bestaan uit keitjes en keien, gezamenlijk grind genoemd. Dat zijn heuse brokstukken van gesteenten, meestal in onverweerde tot weinig verweerde toestand. Dat kunnen stukken graniet zijn, basalt of andere gesteenten met een voldoende hoge hardheid en mechanische weerstand. Veelal bevatten ze veel kwarts, omdat dat een zeer hard en chemisch inert mineraal is. Ze worden al in de monding van de rivier of in de benedenloop ervan afgezet.



Afb. 4.12: Afzetting van sedimentgesteenten

4.3.2 ZAND

Partikels die kleiner zijn dan 2 mm, maar groter dan 0,063 mm, worden onder de noemer zand gerangschikt. Ze bestaan voor 90 % of meer uit kwartskorrels. De overige 10 % houden mineralen in, zoals veldspaten, ijzeroxides, mica's en *accessorische* mineralen.

De kwartskorrels worden in de loop van het transport door de rivier tegen elkaar aan gewreven of geketst. Daardoor worden gestaag zeer fijne fragmentjes losgerukt en verkleinen de afmetingen van de korrels. Hetzelfde gebeurt met de andere mineraalkorrels in zand. De snelheid van dat afslijtingsproces hangt echter van de hardheid van het mineraal af. Als door de erosie een nog niet helemaal verweerde veldspaatkorrel meegenomen wordt, dan wordt die tijdens het transport heel wat sneller afgesleten, omdat hij minder hard is dan kwarts. Hoe langer het transport, hoe kleiner de korrels worden. Een zand dat over zeer grote afstanden vervoerd werd, of dat zelfs op de zeebodem herhaaldelijk verplaatst werd, bevat daarom meestal nog slechts weinig of geen veldspaat.

Soms worden van de geheel of gedeeltelijk verweerde gesteentes op het land nog andere mineralen weggespoeld, zoals korrels van mica's, waaronder voornamelijk biotiet en muscoviet. Die vormen bladvormige korrels die daarom makkelijker in het water in suspensie kunnen blijven hangen en dus ook verder meegevoerd kunnen worden. Ze komen dan ook vaker in fijnere zanden voor.

Hoewel de door verwerking vrijgekomen ijzeroxides aanvankelijk ter plaatse weer neergeslagen worden, kan de erosie ze daarna toch weer losrukken en als zandkorrels meevoeren.

4.3.3 ACCESSORISCHE MINERALEN

Buiten deze meest voorkomende mineralen bevatten zanden vrijwel altijd ook nog korrels van een hele reeks andere mineralen, maar dan in veel lagere gehalten. Al die mineralen samen maken meestal minder dan 0,1 % van de massa van het zand uit. Uitzonderlijk kan dat gehalte toch tot bijna 1 % oplopen. Het gaat om mineralen die ook in de moedergesteenten in kleinere hoeveelheden voorkomen. Ze hebben vrijwel allemaal een hoger soortelijk gewicht dan het alomtegenwoordige kwarts. Om ze uit een zand af te scheiden van de andere courante mineralen maakt men gebruik van een gravitatie separatietechniek middels een zware vloeistof, bromoform, met dichtheid 2,85. Daarom noemt men deze groep mineralen ook vaak "zwarte" mineralen.

Om samen met de lichtere mineralen in een zand te kunnen voorkomen, moeten deze korrels, vanuit een hydrodynamisch standpunt, van iets kleinere afmetingen zijn. Ze komen dus uitsluitend tussen de fijnere kwartskorrels voor. Voor de rest bezitten ze net als kwarts een behoorlijk hoge hardheid. Onder deze mineralen zijn er een groot aantal die zeer kenmerkend zijn voor bepaalde gesteentesoorten. Zo zijn er enkele die bijna uitsluitend in specifieke metamorfe of stollingsgesteenten voorkomen. Het zijn dus indicatoren voor de diverse types moedergesteenten in het stroomgebied van de aanvoerende rivieren. Deze groep mineralen kan metalen bevatten zoals chroom, titanium en ijzer, maar soms ook meer zeldzame elementen zoals zirconium, cerium, thorium of yttrium.

4.3.4 SILT

Sedimentpartikels die kleiner zijn dan 0,063 mm, maar grover dan 0,002 mm, worden silt genoemd. Hieronder vallen onder andere de zeer fijne deeltjes welke door de wrijving tussen de korrels onderling tijdens het transport geproduceerd worden. Hun mineralogische samenstelling verschilt daarom niet erg veel van zanden. Die fractie kan door het water verder meegenomen worden dan zand, maar minder ver dan de kleipartikels. Ze vormt in feite een overgangsfraction die vaak als bijmenging bij de twee andere voorkomt.

4.3.5 KLEI

De correcte definitie van klei is de verzameling sedimentpartikeltjes fijner dan 0,002 mm. Een aantal silicaatmineralen met bladvormige structuur komen in de natuur steeds als korrels van dergelijke kleine afmetingen voor. Ze worden daarom ook gezamenlijk kleimineralen genoemd. Alle kleipartikels zijn dus niet noodzakelijk kleimineralen, hoewel die laatste wel het hoofdbestanddeel van kleien zijn.

Door hun kleine afmetingen en hun bladvorm kunnen ze gedurende lange tijd in het water in zwevende toestand blijven hangen. Hun valsnelheid bedraagt slechts enkele centimeter tot millimeter per uur, afhankelijk van de grootte. Het water moet al zeer traag stromen, minder dan 20 cm/s, voor er op de bodem een modderlaag kan worden afgezet. Daardoor worden kleilagen slechts op een wat grotere afstand van de kustlijn gevormd.

Ook op het land kunnen soms kleilagen afgezet worden. Dat is onder andere het geval bij overstromingen. Als het waterpeil van een buiten zijn oevers getreden rivier weer zakt, komt het water buiten de oevers meestal bijna volkomen tot rust en blijft een smerige modderlaag achter.

4.3.6 OPGELOSTE STOFFEN

Elementen die tijdens de verwerking in oplossing gebracht werden en door de fysisch-chemische omstandigheden, zoals zuurtegraad en al of niet aanwezigheid van zuurstof, niet opnieuw neergeslagen werden, kunnen eindeloos door het water meegevoerd worden. Ook in het zeewater, na verdunning door menging met het rivierwater, kunnen ze opgelost blijven en over de hele oceaan verspreid worden. Zwaartekracht heeft daarop vrijwel geen invloed.

Bij de verwerking van veldspaten kwam veel kalium, natrium en calcium vrij. Bij andere, zoals olivien, eveneens veel magnesium. Kalium wordt echter in hoofdzaak meteen weer opgenomen door de kleimineralen die tijdens de bodemvorming ontstaan. De andere bereiken vrij

de zee, samen met een deel van het in oplossing gebleven SiO_2 , algemeen bekend als silica.

In theorie zouden door de aanhoudende aanvoer van die elementen via de rivieren, over de hele wereld en gedurende lange geologische tijden, alle oceanen daar nu mee volgepropt zitten. Dat is niet het geval. Er zijn dus processen die deze elementen op tijd en stond uit het zeewater verwijderen. Dat wordt aangetoond door het feit dat zeewater zelfs niet eens verzadigd is aan die elementen.

Sommige planten en dieren die al zwemmend of zwevend, of stilzittend op de bodem, de oceanen bevolken, nemen voortdurend calcium uit het zeewater op om er een skelet of schaal mee op te bouwen. Hierbij tellen we de talrijke soorten schelpdieren, koralen, sommige algen en andere, soms microscopisch kleine diertjes zoals foraminiferen. Die laatste zijn in aantal en totaalvolume zeer belangrijke CaCO_3 -verbruikers. Tijdens hun leven bouwen deze minuscule eencellige diertjes zich een kalkig schaalje. Na hun afsterven vallen ze op de zeebodem neer en vergaan hun organische delen. Zo ontstaan dikke modderlagen van kalkslib die later tot heuse kalksteenlagen kunnen evolueren. Op die wijze zijn onder andere de zo bekende krijtlagen van Calais en Dover en oostelijk Limburg ontstaan.

Er bestaan nog andere manieren waarop kalkstenen gevormd kunnen worden, net zoals gesteenten waarin kalium en magnesium opgenomen worden, maar dit overstijgt het kader van dit werk.

4.3.7 SPORENELEMENTEN

Als men het frequente voorkomen en de reusachtige volumes van sedimentgesteenten bekijkt, zowel in Vlaanderen als elders in de wereld, dan stelt men vast dat zand-, klei- en kalksteenlagen daarin een essentieel trio vertegenwoordigen, in Vlaanderen vooral de eerste twee. Als men dan in de lijst van de door erosie en transport aangevoerde mineralen de minder belangrijke bestanddelen buiten beschouwing laat, kan men daaruit afleiden dat kwarts en kleimineralen op overweldigende wijze de belangrijkste erosieproducten zijn, samen met calciumcarbonaat.

Die vaststelling is van fundamenteel belang om de verdere verdeling van sporenelementen over de aardkorst te begrijpen. Alle zand- en kleimassa's werden door de rivieren in hun eigen stroomgebied verzameld. Die stroomgebieden bestrijken meestal reusachtige oppervlaktes waarin vele soorten gesteenten voorkomen: diverse stollingsgesteenten, metamorfe gesteenten en sedimentgesteenten. De grote rivieren maken de primaire verdeling van sporenelementen, op basis van de aard van de aanwezige stollingsgesteenten, gedeeltelijk weer ongedaan. Door de selectieve afzetting van sedimenten



FREQUENTE ACCESSORISCHE MINERALEN			
Mineraal	Samenstelling	Mineraal	Samenstelling
Zirkoon	ZrSiO_4	Granaat	$(\text{Fe,Mg,Ca})_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$
Toermalijn	$\text{NaMg}_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)\text{SiO}(\text{OH})_4$	Kyaniet	Al_2SiO_5
Augiet	$\text{Ca}(\text{Mg,Fe,Al})(\text{Al,Si})_2\text{O}_6$	Stauroliet	$\text{FeAl}_4\text{Si}_2\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Chromiet	$(\text{Mg,Fe})\text{Cr}_2\text{O}_4$	Hoornblende	$\text{NaCa}_2\text{Mg}_5(\text{Si,Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH})$
Ilmeniet	FeTiO_3	Magnetiet	Fe_3O_4
Rutiel	TiO_2	Epidoot	$\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$
Andalusiet	Al_2SiO_5	Apatiet	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$
MINDER FREQUENTE ACCESSORISCHE MINERALEN			
Mineraal	Samenstelling	Mineraal	Samenstelling
Bariet	BaSO_4	Monaziet	$(\text{Ce,L a,Y,Th})\text{PO}_4$
Cassiteriet	SnO_2	Spinel	MgAl_2O_4
Corund	Al_2O_3	Topaas	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{OH})_2$
Fluoriet	CaF_2	Xenotiem	YPO_4
Spheen	CaTiSiO_5	Sillimaniet	Al_2SiO_5
Hematiet	Fe_2O_3	Zoisiet	$\text{Ca}_2\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$

Tabel 4.6: De meest voorkomende accessorische mineralen

veroorzaken ze een herverdeling ervan. Kwarts is immers een mineraal waarvan de structuur weinig ruimte bezit voor de opname van sporenelementen. Van kleimineralen werd intussen aangetoond dat ze behoorlijk wat mogelijkheden bieden om minder vaak voorkomende elementen de plaats van andere te laten innemen. De meeste sporenelementen zijn daarom na het sedimentatieproces vooral in de kleiige aardlagen terug te vinden. De herverdeling vond ditmaal plaats op basis van de korrelgrootte.

Toch kunnen ook zandlagen sporenelementen bevatten. Een van de redenen daarvoor is de ondergeschikte aanwezigheid van mineralen als veldspaten en de zogenaamde accessorische of “zware” mineralen (zie tabel 4.6).

Het belang van die zware mineralen bestaat erin dat op het moment van de vorming van die mineralen, de in hun chemische samenstelling vermelde metallische elementen eveneens door andere elementen vervangen konden worden, zoals koper, zink, nikkel, kobalt en andere. De regels hiervoor zijn dezelfde als de regels die in het kader van de stollingsgesteenten aangehaald werden. Augiet is ten andere een pyroxeen, en hoornblende een amfibool.

Zo kan korund ook chroom bevatten, worden in rutiel soms niobium, tantaal en tin op de plaats van titaan waargenomen en komt in magnetiet en spinel behoorlijk

wat zink, mangaan, nikkel, chroom, titaan en vanadium voor. Het volstaat dat in de zeer kleine hoeveelheid zand die voor chemische analyse fijngemalen wordt, er slechts enkele dergelijke korrels aanwezig zijn, opdat eventueel een verhoogd gehalte aan die specifieke sporenelementen zou worden gemeten.

De structuren van de mineralen calciet en aragoniet, beide met chemische samenstelling CaCO_3 , bieden relatief weinig vervangingsmogelijkheden. Soms bevatten ze wat ijzer of magnesium, in de plaats van calcium. Het meest voorkomende sporenelement in deze carbonaten is strontium.

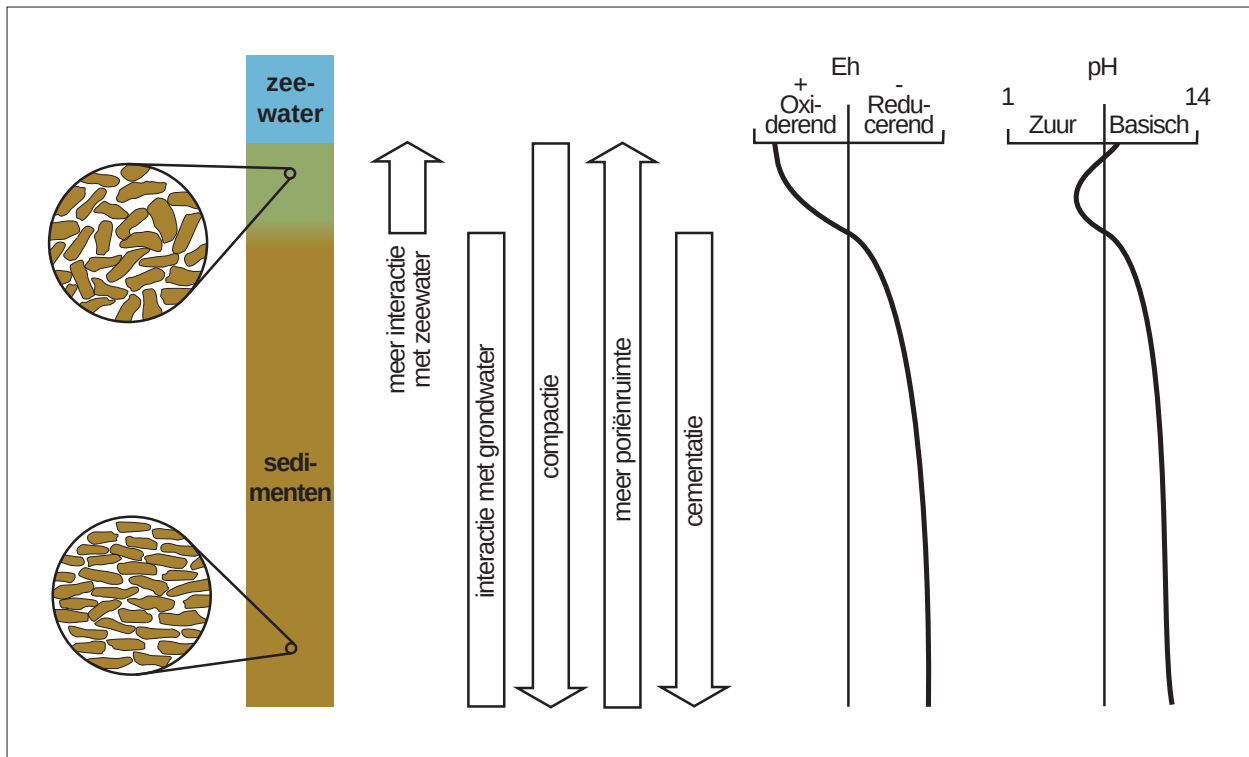
De hoeveelheden sporenelementen in sedimenten, zoals waargenomen in de Vlaamse ondergrond, zullen in een later hoofdstuk gedocumenteerd worden.

4.4 DIAGENESE

Vanaf het ogenblik dat een sediment op de bodem van de zee werd neergelegd, kunnen weer andere processen daarop invloed uitoefenen. Met zowel het zeewater dat zich erboven bevindt als met het zeewater dat zich in de poriën tussen de korrels ophoudt, kunnen zich chemische uitwisselingen voordoen. Daardoor kunnen sommige al aanwezige mineralen in samenstelling licht gewijzigd worden en kunnen nieuwe mineralen ontstaan.

Deze veranderingen vinden plaats gedurende de hele tijdspanne dat het sediment onder nog recentere sedimenten begraven wordt en onder hun gewicht samengedrukt wordt. Al deze processen worden in het wetenschappelijk jargon onder de benaming “diagenese” gecatalogeerd. Een overzicht ervan wordt schematisch in afbeelding 4.13 voorgesteld.

leid wordt. Het ijzer dat erin aanwezig is, werd aan het zeewater onttrokken en neemt in de mineraalstructuur de plaats van aluminium in. Glauconiet bevat ook veel kalium, als “intersandwich”-kationen. Door herhaaldelijke verplaatsingen op de bodem ten gevolge van stromingen worden de schaaltes al botsend gebroken en blijft enkel de ietwat meer vervormbare inhoud geheel. De vorming



Afb. 4.13: Diagenetische processen

Eenmaal op de bodem beland liggen de sedimentpartikels gedurende enige tijd blootgesteld aan het zeewater, met zijn karakteristieke chemische samenstelling. Sommige kleimineralen die makkelijk hun “intersandwich”-kationen kunnen loslaten, zullen die voor een deel omruilen voor andere kationen die in het zeewater in grotere aantallen voorkomen. Een mineraal dat typisch in dit mariene milieu gevormd wordt en dat in verschillende Vlaamse zandlagen aanwezig is, is wel glauconiet. Het is een zeer specifiek kleimineraal dat veel tweewaardig ijzer bevat. Het komt meestal voor in de vorm van korrels die door hun afmetingen als zand geklasseerd moeten worden. Elke korrel is in feite een agglomeraat van kleine kristalletjes. Het ontstaat in microlocaties met een bijzonder micromilieu, zoals in de holtes van sommige kleine diertjes met een schaal. Het levend materiaal daarin rot weg waardoor zure en zuurstofarme omstandigheden ontstaan. Het mineraal slaat dan neer uit een gel van aluminosilicaten. Men leidt dit af uit het feit dat de korrels vaak een gelobd uiterlijk hebben: ze hebben de vorm van de binnenkant van een microfossiel aangenomen. Microscopisch onderzoek toont aan dat het vaak uit bestaande kleimineralen, mica’s of veldspaten afge-

van glauconiet wordt ook tegenwoordig in warmere zeeën waargenomen, op dieptes die variëren tussen 15 en 500 meter.

Buiten ijzer en kalium kunnen tijdens de opbouw van de glauconietkorrels ook nog andere elementen uit het water betrokken worden. Uiteraard betreft het hier uitsluitend de elementen die, net zoals in de andere fasen van de geochemische cyclus, de geschikte ionenstralen en elektrische ladingen bezitten om de plaats van ijzer te kunnen innemen. In meer beperkte mate kunnen ook aluminium en silicium op die wijze vervangen worden. In afbeelding 2.6 werd al getoond dat de gehalten aan sporenelementen in zeewater merkkelijk lager zijn dan in rivierwater, en dus a fortiori nog veel lager dan in het verweringsmilieu. Door de relatief verminderde beschikbaarheid van deze elementen in het zeewater valt het te verklaren dat hun aanwezigheid in de nieuwgevormde mineralen veel minder uitgesproken is. Op die wijze worden zware metalen zoals koper, lood, zink, chroom en zelfs complexe ionen van arseen uit het zeewater verwijderd. Voor cijfers hierover, zie de volgende hoofdstukken.

Buiten glauconiet kunnen nog andere nieuwe mineralen gevormd worden. Zo kunnen nieuwe micakorrels ontstaan, vooral muscoviet, en diverse kleimineralen.

In een vorig hoofdstuk werd al vermeld dat ook kwartskorrels door adsorptie met een dun laagje ijzeroxide omgeven kunnen worden. Dat gebeurt eveneens dicht bij het bodemoppervlak. Ze geven zand een geel tot zwak rood kleurtje mee.

De interactie met zeewater zorgt er soms zelfs voor dat de structuur van de aangevoerde kleimineralen verandert. Zo kan klei van het type kaoliniet tot een illiet omgezet worden.

Elke verse sedimentlaag bestaat uit een verzameling minerale korrels met daartussenin vrije ruimtes, de poriën, die met water gevuld zijn. Vanaf het ogenblik dat een sediment onder een nieuw laagje bedolven raakt, krijgen de erin aanwezige plantjes en diertjes geen verse zuurstof en geen licht meer aangevoerd. Daardoor sterven ze af. Het daarop volgend rottingsproces wordt door bacteriën op gang gebracht. Die verbruiken daarbij alle in het poriënwater nog aanwezige restjes zuurstof en breken het organisch materiaal af, met productie van zuren, net zoals de humuszuren tijdens de bodemvorming. Als gevolg daarvan neemt met de diepte de zuurtegraad van het poriënwater toe, de pH verlaagt naar ongeveer 6, en het plaatselijk milieu evolueert van oxiderende naar bijna reducerende omstandigheden, de Eh wordt neutraal. De zure condities maken dat sommige mineralen nu gedeeltelijk weer opgelost worden. Dat is het geval met eventueel aanwezig CaCO_3 , calciet en aragoniet, alsook ijzeroxiden. De zwavel die uit het organisch materiaal vrijgekomen is, en die ook in het zeewater overvloedig aanwezig is in de vorm van het ion SO_4^{2-} , wordt als sulfaten neergeslagen. Deze vroeg-diagenetische zone kan 10 tot 50 cm diep zijn.

Bij nog meer toenemende diepte neemt het gewicht van de bovenliggende sedimenten toe en worden de onderliggende steeds meer samengedrukt. Door deze compactie verkleinen de poriënruimtes. Resterend poriënwater wordt daarbij naar boven toe uitgedreven.

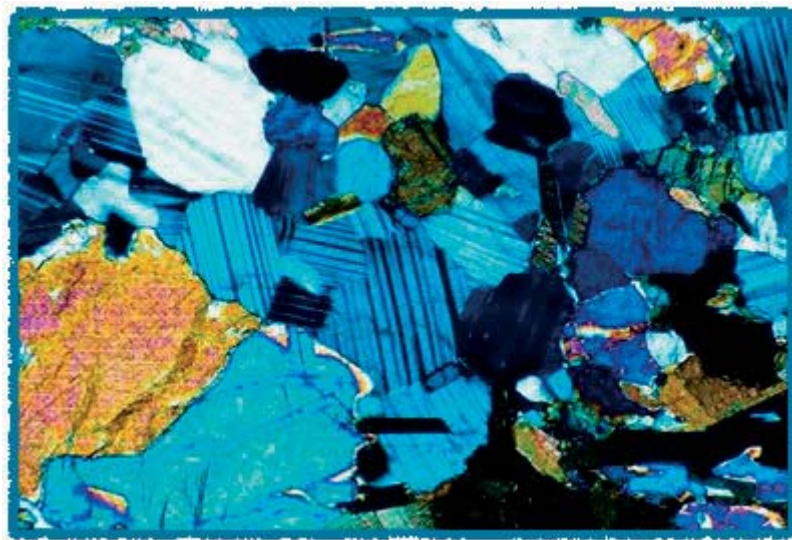
Als alle zuurstof opgebruikt is kunnen ook de meeste bacteriën niet meer leven. Slechts anaërobe bacteriën blijven over. Dat zijn diertjes die, om in leven te blijven, de nodige energie uit andere chemische substanties halen. Dat doen ze door die stoffen te reduceren en hun zuurstof daaruit te betrekken. De Eh evolueert naar negatief. Zo worden bijvoorbeeld sulfaten tot sulfiden gereduceerd. Uit de laatste restjes organisch materiaal wordt onder andere zwavel vrijgemaakt in de vorm van H_2S . Dat laatste vormt in aanwezigheid van opgelost ijzer meteen knollen van ijzersulfide, FeS en FeS_2 (pyriet). Maar ook veel ammoniak, NH_3 , wordt geproduceerd, waardoor het milieu erg basisch wordt: de pH klimt naar ongeveer 9.

Onder die basische omstandigheden wordt CaCO_3 snel weer neergeslagen. Hetzelfde gebeurt met ijzeroxides en opgelost SiO_2 . Deze neerslagen kunnen finaal de hele poriënruimtes opvullen, verder aandikkend op de oppervlakken van de mineraalkorrels. Die aangroei blijft aanhouden zolang het grondwater doorheen de sedimenten kan blijven migreren en aldus continu nieuwe, nog in oplossing verkerende stoffen kan aanvoeren.

Als in een zandig sediment hoofdzakelijk CaCO_3 wordt neergeslagen, consolideert dit tot kalkzandsteen. Gaat het om opvulling van de poriën door SiO_2 , dan ontstaat kwartsiet. Veel nieuwe sporenelementen brengen deze nieuwe mineralen niet aan omdat kwarts er sowieso geen kan bevatten, en calciet slechts weinig. Slechts de neerslag van ijzervoerende mineralen kan eventueel nog andere zware metalen inbrengen.



HOOFDSTUK 5: Sporenelementen in de Vlaamse geologie

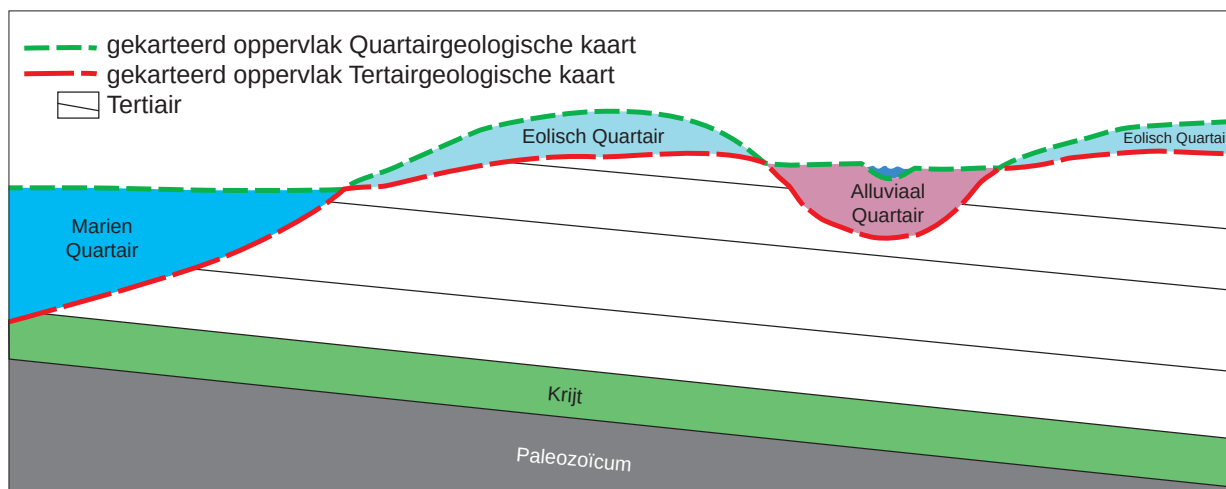


In de vorige hoofdstukken werd geprobeerd om de aanwezigheid van sporenelementen in diverse gesteenten te verklaren en de verschillen in gehalten toe te lichten. De toepassing hiervan op de Vlaamse ondergrond veronderstelt enige kennis van de lokale geologie. In deze publicatie wordt uitsluitend aandacht besteed aan losse, niet-geconsolideerde sedimentgesteenten. In Vlaanderen betekent dit dat enkel gesteenten van tertiaire en quartaire ouderdom bestudeerd worden. Het tertiair bevat hier slechts sporadisch enkele dunne verharde zandsteenbanken. Hiertoe behoren onder meer de bekende “Balegemse” steen, en de “Diestiaanse” ijzerzandsteen, waarmee zoveel historische gebouwen en kerken werden opgetrokken. Ze werden en worden in zandgroeven aangetroffen waar ze in banken van maximaal 1 meter dikte voorkomen, meestal zelfs in banken van minder dan een halve meter.

In Vlaanderen komen voor het overige slechts op twee plaatsen vaste gesteenten in aanzienlijke diktes voor. Dat zijn, ten eerste, de kwartsietische gesteenten van paleozoïsche ouderdom, een ontsluiting over slechts enkele vierkante kilometers van het Brabantmassief, de oudste geologische structuur waarop alle andere gesteenten rusten. Die ontsluiting bevindt zich op de plaats waar de bovenloop van de Zenne de grens met het Waalse Gewest nadert. Ten tweede zijn er de kalkstenen uit het Krijt in het zuidoostelijk hoekje van Limburg en de Voerstreek (zie afbeelding 5.2).

5.1 SCHEMATISCHE STRUCTUUR

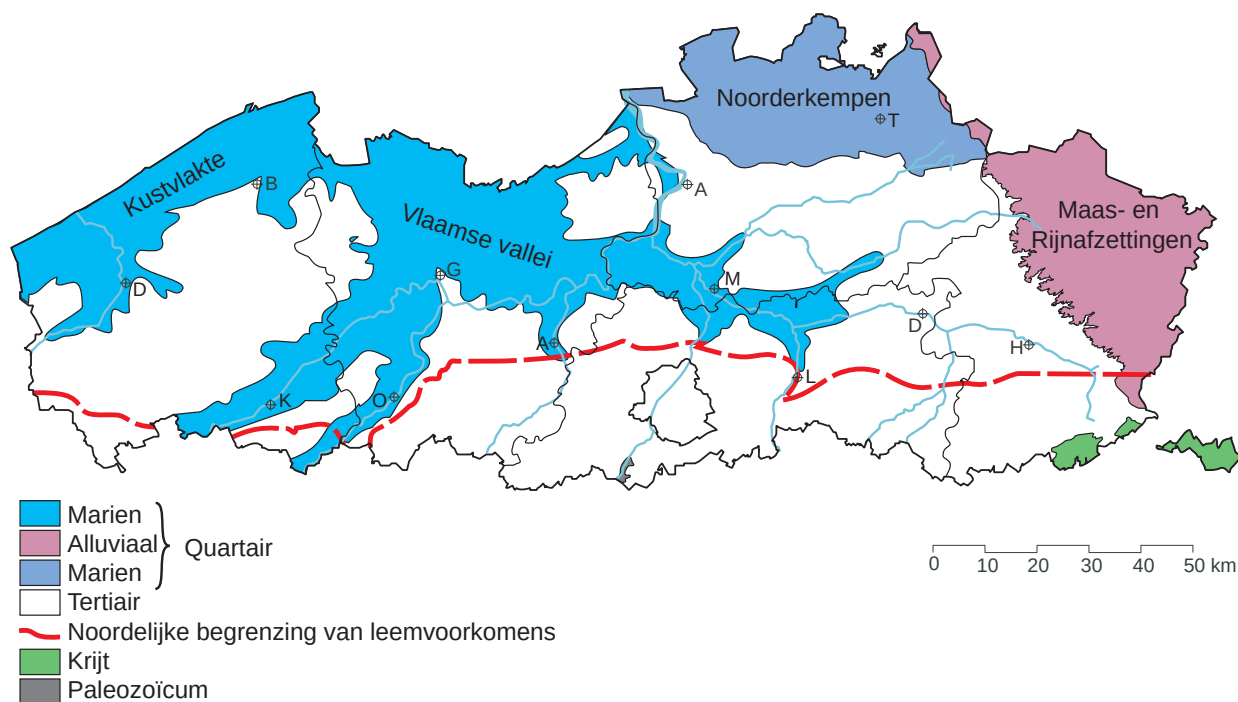
Als we abstractie maken van geologische lagen die ouder zijn dan het Tertiair, kan de geologische structuur van Vlaanderen zoals die ons interesseert in het kader van dit werk, schematisch voorgesteld worden zoals in afbeelding 5.1. Daarin wordt het tertiair als een pakket lagen voorgesteld, met daarbovenop een aantal tot het quartair behorende sedimentlichamen. In de geologische geschiedenis beschouwt men het tertiair als afgelopen wanneer men in de daarbovenop liggende lagen sporen vindt van fenomenen die erop wijzen dat het toen heersende klimaat zeer koud moet geweest zijn. Het Quartair begint, bij algemene conventie, op het moment dat de eerste ijstijden aanvangen, dat is zowat 1,6 miljoen jaar geleden. Het algemene klimaat op de aarde koelde destijds dermate af dat de ijskappen en gletsjers sterk begonnen aan te groeien. Op bepaalde momenten reikte het Scandinavisch ijs zelfs tot in de buurt van Amsterdam. Die reusachtige ijsmassa's breidden uit doordat de aanvoer van sneeuw bleef aanhouden en de randen van de ijskappen minder snel afsmolten. Als nettoresultaat werden gigantische hoeveelheden water aan de oceanen onttrokken en in de ijskappen opgeslagen. Het peil van het zeeniveau daalde daarom drastisch en stond tijdens de ijstijden ongeveer 100 meter lager dan nu het geval is. Zo kwam onder andere het grootste deel van de bodem van wat wij nu de Noordzee noemen, boven water te liggen. Alle rivieren op het Europese continent moesten dus een heel eind verder, en bergafwaarts, stromen om in zee uit te monden. Dat bracht een sterk toegenomen erosie met zich mee, waardoor de Europese landschappen diep wer-



Afb. 5.1: Schematische voorstelling van het Quartair en het Tertiair in Vlaanderen

Voor meer informatie over de geologische geschiedenis en structuur van Vlaanderen, de relatieve ouderdom van de onderdelen ervan en de samenvattende tabel met opsplitsing in paleozoïcum, mesozoïcum, tertiair en quartair, verwijzen we naar het boek *Delfstoffen in Vlaanderen* van Gullentops & Wouters.

den ingesneden en uitgeschuurd. Van de sedimenten die tijdens het Tertiair afgezet werden, werden grote volumes weer afgevoerd. De bovenkant van het op afbeelding 5.1 afgebeelde tertiair stelt daarom ook het landschap voor zoals het er tijdens bepaalde momenten van de ijstijden uitgezien moet hebben. Op latere momenten van het



Afb. 5.2: Geologie zonder quartaire dekzanden en lemen

Quartair werden dan opnieuw sedimenten afgezet, aangebracht door verschillende mechanismen. Die bedekten overal in Vlaanderen het tertiaire en vroeg-quartaire landschap. De onderbreking in de sedimentatie, gevolgd door een nieuwe periode van sedimentatie, verklaart waarom op het schema de contactlijn tussen tertiaire en quartaire lagen als een discontinuïteit te zien is.

Op de geologische kaarten van Vlaanderen werden tertiair en quartair afzonderlijk gekarteerd. De tertiairgeologische kaarten worden vaak als een “afgedekte kaart” bestempeld. Het betekent dat ze uitsluitend tertiaire lagen in kaart brengen, waarbij het wordt voorgesteld alsof de quartaire bedekking helemaal niet bestaat. Het onderscheid in gekarteerd oppervlak wordt in afbeelding 5.1 duidelijk gemaakt.

Tijdens de latere helft van het Tertiair onderging de aardkorst net ten zuiden van Vlaanderen een lichte opwaartse beweging. Alle sedimenten die tijdens het Tertiair afgezet zijn, werden dus zwak naar het noorden gekanteld. De zee werd op die wijze langzaam, in herhaalde stappen en soms een stap terug, zoals een processie van Echternach, naar het noorden teruggedrongen. Op een horizontale doorsnede, het gekarteerde oppervlak, kan men daarom aflezen dat de jongere lagen aan de oppervlakte steeds meer naar het noorden waargenomen worden. Die beweging zette zich tijdens het Quartair voort. In de Noorderkempen werden nog enkele quartaire sedimenten afgezet voor de zee definitief uit onze contreien verdween.

In zee afgezette sedimenten worden *marien* genoemd. Jongere quartaire mariene sedimenten werden in Vlaan-

deren nog later afgezet, toen tussen twee ijstijden in het zeepeil weer korte tijd steeg. De zee drong toen ver door in een dal dat door het rivierenstelsel diep uitgeschuurd was en vulde dat dal met nieuwe sedimenten op. Dat dal staat nu bij geologen bekend als de Vlaamse vallei. Het kan op sommige plaatsen vrij diep zijn. Ten noorden van Gent reikt het tot 30 meter diepte. Ten slotte kwam de zee na de laatste ijstijd, zowat 10.000 jaar geleden, nog eenmaal opzetten en vulde ze finaal ook onze huidige kustvlakte op.

In de loop van het Quartair voerde de toenmalige Rijn ontzaglijke hoeveelheden erosiemateriaal aan, afkomstig van de afbraak van het Eifelgebergte, het Westerwald, de Vogezen en het Zwarte Woud, richting Noordzee. De toenmalige Maas deed hetzelfde, maar dan met materiaal uit de Ardennen en de Vogezen. Bij het verlaten van de Ardennen en het Eifelgebergte, kwamen beide in de lage landen terecht en verminderde hun stroomsnelheid. Enorme ladingen erosiemateriaal, hoofdzakelijk zeer grof zand en grind, werden als gevolg daarvan ter plaatse achtergelaten in hun eigen vers uitgesleten dal. Soms verslikten de rivieren zich in hun eigen puinafzettingen en verplaatsten ze tijdens een periode van verhoogde debieten hun bedding naar elders. Over een langere geologische tijd beschouwd slingerden Maas en Rijn hun loop dus herhaaldelijk over en weer. Zo komt het dat tot in Belgisch Limburg ook Rijnsedimenten afgezet werden. Sedimenten die in zo'n milieu afgezet zijn, krijgen de benaming *alluviaal* toebedeeld.

Na de laatste ijstijd werden nog meer alluviale afzettingen gevormd. Doordat het zeepeil weer tot het huidige niveau ging stijgen, viel ook de erosie voor een groot

deel stil. Rivieren gingen weer trager stromen en deponeerden hun lading. De dalen van alle rivieren werden met *alluvium* opgevuld. Debieten waren zo gering geworden dat slechts kleien en fijnere zanden, geen grind, konden worden afgezet. Vanwege hun talrijkheid en fijn detail worden deze laatste alluviale afzettingen niet op afbeelding 5.2 aangegeven.

Tegen het einde van de laatste ijstijd werd heel Vlaanderen nog met *eolische* afzettingen bedekt. Dat zijn afzettingen die door de wind werden aangevoerd. Door de grote ijskappen hing boven Noordoost-Europa lange tijd een sterk hogedrukgebied. Dat wakkerde voortdurend noordoostenwinden aan die vanuit de Baltische vlaktes zand en stof uit dat koude kale landschap zuidwestwaarts bliezen. Een groot deel van de noordelijke helft van Europa werd met een laag zand bedekt, soms meerdere meters dik. Die kreeg de toepasselijke naam *dekzanden* toebedeeld. Meer naar het zuiden zwakte de windkracht geleidelijk af zodat hij nog slechts kleinere partikels, in de afmetingen van silt (fijner dan 0,062 mm), kon meesleuren. Deze stofwolken dwarrelden op hun beurt neer in een langgerekte zone die van onze streken tot in China reikt. Wij kennen deze afzetting onder de benaming leem.

De kaart van afbeelding 5.2 toont de sedimenten, quartaire, tertiaire of andere, die men in Vlaanderen aantreft als men zich zou inbeelden dat dekzanden en leem afwezig zouden zijn. Vanuit een geochemisch oogpunt, meer specifiek in het raam van sporenelementen, moet vastgesteld worden dat al de sedimenten die erop afgebeeld zijn, zowel zanden als kleien, van vergelijkbare oorsprong zijn. De mechanismen en chemische processen die hun mineralogische en chemische samenstelling hebben bepaald, zijn allemaal dezelfde en werden hiervoor al behandeld.

5.2 LEEM

Dekzanden en leem zijn op een heel andere wijze ontstaan. Het ijs van de ijskappen gedraagt zich onder zijn eigen gewicht als een zwak plastische vaste stof en gaat daardoor aan het stromen, met een snelheid van meerdere meters per jaar. Zo ontstaan gletsjers. Die vriezen alle losliggende rotsblokken in en sleuren ze over grote afstanden mee. Daarbij krassen ze met enorme kracht diep in de vaste gesteenten en malen ze alle brokstukken gestaag tot kleinere afmetingen, met overvloedige productie van zand- en siltfracties. Mechanische verwerking is hier vrijwel de enige erosiefactor. Chemische verwerking is bij dergelijke lage temperaturen zo goed als geïnactiveerd. De zand- en siltdeeltjes bestaan dus uit verse en vaak onverwerde fragmenten van gesteenten en mineralen. Door de constante frictie tegen elkaar worden de zachtste mineralen sneller tot zeer fijne afmetingen vermalen. De hardste mineralen, vooral kwarts, blijven het langst de afmetingen van zandkorrels

behouden. Dekzanden zijn bijgevolg mineralogisch en geochemisch zeer vergelijkbaar met andere zanden.

Aan de voet van de gletsjer, daar waar hij afsmelt, blijft het erosiemateriaal achter en kan het vervolgens door de wind meegenomen worden.

De deeltjes met siltafmetingen worden het verst meegewaaid. Ze hopen zich op tot een sediment dat met een Duitse benaming getypeerd wordt: *loess* (spreek uit “leus”). Waar loess in een sediment met andere fracties zoals zand- en kleideeltjes vermengd raakt, spreekt men van leem.

Loess bestaat, zoals te verwachten, hoofdzakelijk uit onverwerde fragmenten van diverse mineralen zoals pyroxenen, amfibolen, veldspaten, mica's, olivieren, kwarts en andere. Geochemisch, en qua sporenelementen, is loess daarom heel verschillend van klei. Na afzetting in een gematigd vochtig klimaat staan leemlagen eveneens blootgesteld aan verwerking en kan er evengoed bodemvorming op plaatsvinden. Het meest opvallend is daarbij ontkalking, een fenomeen dat toelaat niet alleen roodbakkende maar ook geelbakkende bakstenen te vervaardigen. Bij die verwerking kunnen ook nieuwe kleimineralen ontstaan.

5.3 LITHOSTRATIGRAFIE

Het tertiair in Vlaanderen bestaat uit een opeenstapeling van hoofdzakelijk zandige en kleiige lagen, plus daarbij allerlei overgangsvormen tussen die twee: kleihoudend zand en zandhoudende klei in diverse doseringen. Op de tertiairgeologische kaart worden die allemaal bij een of ander formatie ondergebracht. Die formaties worden op de bijbehorende stratigrafische tabel onder elkaar gerangschikt, de oudste onderaan, de jongste bovenaan. Om het predikaat *formatie* opgeplakt te krijgen, moeten de sedimenten in kwestie aan enkele voorwaarden voldoen:

- De lagen moeten een aantal gemeenschappelijke kenmerken bezitten, bijvoorbeeld op het vlak van mineralogische samenstelling, korrelgrootte, fysische eigenschappen zoals kleur of densiteit, of sedimentologische karakteristieken zoals afwisselingen van grof naar fijn, aanwijzingen voor diep of ondiep afzettingsmilieu. Ze moeten dus een zekere mate van verwantschap vertonen.
- Het pakket lagen moet vrij duidelijk als een geheel te onderscheiden zijn van andere lagen, zowel aan de boven- als aan de onderkant. De begrenzingen moeten dus vrij scherp en in het veld aanwijsbaar zijn.
- Het geheel van lagen moet over grote afstanden herkenbaar blijven. Het mogen dus geen fenomenen zijn die slechts op een of enkele locaties waar te nemen



CHRONO - STRATIGRAFIE	NEOGEEN		1.77
	PLIOCEEN		5.4
	MIOCEEN		23.8
	Laat OLIGOCEEN		28.4
CHRONO - STRATIGRAFIE	OLIGOCEEN		23.8
	Vroeg OLIGOCEEN		28.4
	Laatste EOCEEN		33.6
	Laat EOCEEN		37.0
CHRONO - STRATIGRAFIE	EOCEEN		41.2
	Midden EOCEEN		49.0
	Vroeg EOCEEN		54.8
	Laat PALEOCEEN		58.0
CHRONO - STRATIGRAFIE	PALEOCEEN		61.0
	Midden PALEOCEEN		65.0
	Vroeg PALEOCEEN		65.0
	TERTIAIR		

LITHOSTRATIGRAFIE				VOORNAAMSTE LITHOLOGISCH KENMERK	OUDE BENAMING (en/of symbool)		
GROEP	FORMATIE MERKSPLAS	LID					
	BRASSCHAAT LILLO POEDERLEE	Kiezelooliet MOL	Zandvliet \ Merksem \ Malle	Rees	Jagersborg		
			Kruisschans	Russendorp	Brunssum 1		
			Oorderen	Maathelde	Pey		
			Luchtbal	Donk	Brunssum 2		
	KATTENDIJK	KASTERLEE		Heideinde	Waubach		
	BERCHEM	BOLDERBERG	Antwerpen	Deurne	Deurniaan		
			Kiel	Dessel			
			Edegem				
	VOORT	EIGENBILZEN	Voort		Chattiaan		
			Veldhoven				
RUPEL	BOOM	BILZEN	Putte		R2d		
			Ternhagen				
			Belsele-Waas				
			Kerniel				
	BORGLOON	ZELZATE	Kleine Spouwen		R2c		
			Berg				
TONGEREN	MALDEGEM	S t. H. HERN	Kerkom	Alden Biesen	R1d R2a-b		
			Boutersem	Henis		R1c	
			Ruisbroek	Neerrepn			R1b+a
			Watervliet	Gimmerdingen			
	LEDE		Bassevelde		Tg1		
			Onderrijke			Tg2	
			Buisputten				
			Zomergem				
	BRUSSEL	AALTER	Onderdale		s3		
			Ursel				
			Asse				
			Wemmel				
ZENNE			Chauxmont-Gistoux \ Neerijse \ Diegem \ Kraalberg		Complex van van Kallo		
			Oedeleem				
			Beernem				
			Vierzele				
IEPER	GENT	TIELT	Pittern		Lediaan (Le) Laekenaan (Lk)		
			Merelbeke				
			Egem				
			Kortemark				
	KORTRIJK		Moens = Roubaix		Brusseliaan B		
			Saint-Maur = Orchies				
			Mont-Hérinbu				
LANDEN	TIENEN	HANNUT	Knokke		Boven (P2)		
			Loksbergen				
			Dormaal				
	HEERS	OPGLABBEK	Grandjise		P1d P1c P1m		
			Halen \ Lincent				
			Waterschei				
			Gelinden				
HASPENGOUW		HOUTHEM	Orp		Onder (P1)		
			Eisden \ Opoeteren				

Bron : ANRE 05/06/03

Afb. 5.3: Lithostratigrafie van het Tertiair in Vlaanderen. (Paleoogen gebaseerd op R Marechal en P. Laga ; 1988)

zijn, maar ze moeten eerder regionale afmetingen bezitten. In de praktijk betekent dit dat ze gekarteerd moeten kunnen worden.

De formatie is de basiseenheid van de lithostratigrafie. Het Griekse woord *lithos* slaat op kenmerken van gesteenten; het Latijnse woord *stratus* slaat op lagen. Het gehele woord betekent de studie van de opeenvolging van gesteentelagen. Lithostratigrafie klasseert formaties in een bepaalde volgorde zoals die in het veld waar te nemen valt, uitsluitend bouwend op gehelen van sedimentlichamen. De ouderdom wordt dus niet bepaald op basis van fossielen.

De onderdelen van een formatie worden *leden* genoemd. Een lid is dus gewoon een laag van de formatie, die door een of ander kenmerk in de formatie te onderscheiden is. Een lid kan eventueel ook slechts plaatselijk voorkomen, bijvoorbeeld wél in een bepaalde provincie maar niet in een naburige.

De mogelijkheid bestaat om een aantal formaties in een hiërarchisch hoger gerangschikte *groep* samen te brengen.

Afbeelding 5.3 bevat de lithostratigrafische tabel die bij de tertiairgeologische kaart van Vlaanderen hoort, in de actuele stand van kennis. Op de kaarten zelf worden formaties en leden met een code aangegeven. Elke code bestaat uit de combinatie van een hoofdletter en een kleine letter. De codering van een lid is bovendien de samenvoeging van een code voor de formatie waartoe het lid in kwestie behoort, gevolgd door de code van het lid zelf. Een voorbeeld: BmTe betekent het lid van Terhagen van de formatie van Boom.

Een lijst van de codes die in de monsterlijst van tabel 5.1 vermeld worden, is als bijlage bij deze publicatie gevoegd.

Ook het quartair wordt in formaties en leden ingedeeld. Het quartair is voor een groot deel van Vlaanderen echter niet dikker dan tien meter. Bovendien komt het aan de oppervlakte voor en zijn er daarom veel meer gegevens over beschikbaar. Om die reden is over het Quartair veel meer bekend, en wat men in meer detail kan bestuderen gaat men automatisch in veel meer vakjes onderverdelen. Formaties in het quartair hebben dan vaak betrekking op minder uitgebreide, soms zelfs zeer kleine diktes. In deze publicatie werd daarom de voorkeur gegeven om het quartair als een geheel te behandelen. Er wordt hier slechts onderscheid gemaakt tussen monsters afkomstig uit de kustvlakte, de Vlaamse vallei, de Noorderkempen en de Maas- en Rijnafzettingen.

5.4 ALLUVIALE VLAKTES

De studie van sporenelementen in stroomsedimenten, de materialen waarmee de huidige actieve rivieren hun dalen hebben opgevuld, wordt in dit werk niet onder de loep genomen. Stroomsedimenten zijn de sedimenten welke men in de alluviale vlaktes aantreft en die als alluviaal quartair bestempeld werden. In principe zijn dit sedimenten die in niets van andere sedimenten verschillen. Rivieren voeren immers een lading deeltjes mee die van het land afgespoeld werden. Geochemisch, en in het bijzonder wat sporenelementen betreft, zijn ze dan vergelijkbaar met de sedimenten die elders aangetroffen worden, ze zijn echter voortdurend in sterke mate blootgesteld aan de invloed van de industriële activiteiten van de mens. Het gaat hier immers om actueel bestaande rivieren. Die kunnen ook afvalwaters van mens en bedrijf bevatten. Er bestaat dus een groot risico dat de aangevoerde sedimenten een artificieel gewijzigde samenstelling verkregen hebben. Een uitvoerige studie over dit onderwerp werd in 1997 door de Belgische Geologische Dienst gepubliceerd (Van der Sluys J., et al.). Daarin blijkt duidelijk hoe gehalten aan sporenelementen sterk met de diepte van de monsternamen kunnen variëren. De van het oppervlak afkomstige monsters vertonen de sterkste afwijkingen van de natuurlijke waarden. Grote voorzichtigheid bij het maken van interpretaties in dat milieu is wenselijk.

Het is de bedoeling van dit werk om informatie te verschaffen over sporenelementen zoals die op natuurlijke wijze in de ondergrond voorkomen.

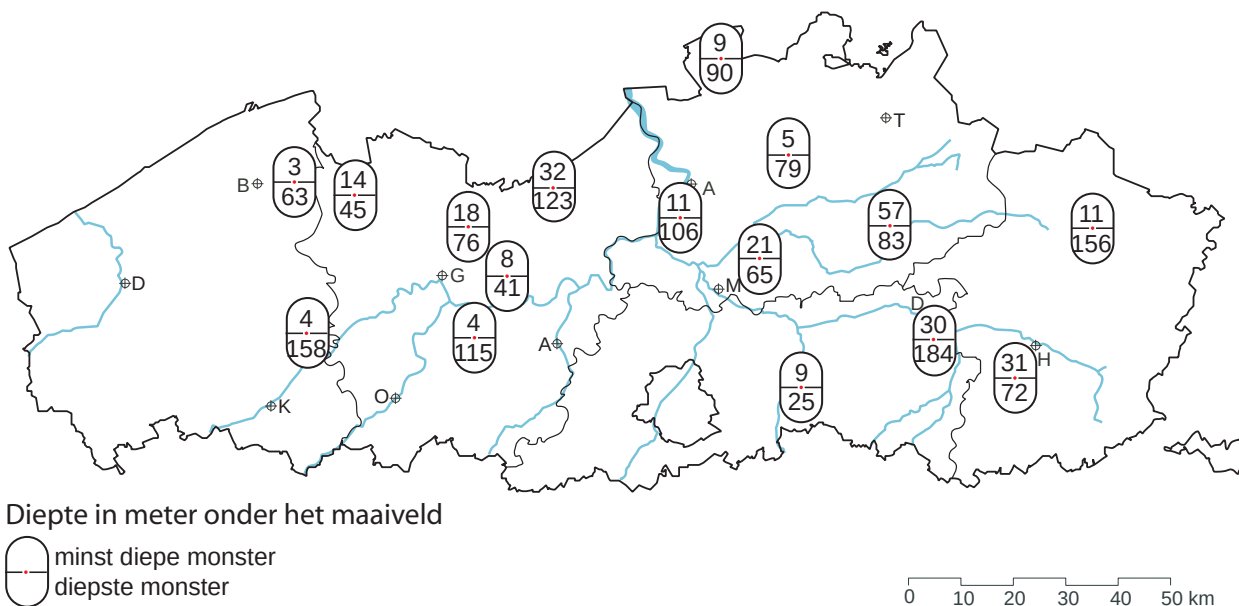
5.5 ONDERZOEKSPROGRAMMA

5.5.1 SPORENELEMENTEN IN BOORKERNEN

Het is inmiddels al duidelijk dat monsters die aan de oppervlakte genomen worden, door de mens geïntroduceerde elementen kunnen bevatten. Alle monsters van bodems vallen in deze categorie. Op de zoektocht naar gesteentemonsters die niet zo gemakkelijk van menselijke beïnvloeding verdacht kunnen worden, is de veiligste optie het winnen van informatie uit boorkernen. Dat zijn monsters die tijdens het uitvoeren van boringen, uit een behoorlijke diepte in de ondergrond opgehaald werden. De kans dat die monsters het voorwerp van menselijke interacties geweest zijn, kan redelijkerwijze als zeer klein tot verwaarloosbaar beschouwd worden.

Daarom werd een beroep gedaan op de verzameling boorkernen die in de archiefruimtes van de Belgische Geologische Dienst opgestapeld liggen. Een zestiental boringen, waarvan de locaties over zowat heel Vlaanderen verspreid liggen, werden geselecteerd. Er werd daarbij gestreefd naar een bemonstering die een zo representatief mogelijk beeld van het tertiair in Vlaanderen oplevert. Alleen het vroegpaleoceen werd niet mee





Afb. 5.4: Ligging bemonsterde boorputten

opgenomen omdat dit in hoofdzaak uit vaste gesteenten bestaat. In enkele boringen werd eveneens het quartair mee bemonsterd.

Het meest ondiepe monster uit de oogst werd op drie meter diepte genomen, het diepste op 184 meter. De minimale en de maximale bemonsteringsdiepte van elke boring en de approximatieve ligging van elke boring zijn op afbeelding 5.4 samengevat. De geologische formaties en leden die in de bemonstering van de respectievelijke boringen vertegenwoordigd zijn, worden op afbeelding 5.5 weergegeven. De samenstelling en de ruimtelijke en geologische situering van de individuele monsters worden in tabel 5.1 opgesomd.

5.5.2 SPORENELEMENTEN IN ONTGINNINGSGEBIEDEN

Boorkernen zijn een van de weinige plaatsen waar sedimenten van tertiaire ouderdom waargenomen kunnen worden. Doordat quartaire afzettingen het hele Vlaamse land als een deken bedekken, zijn ontsluitingen van tertiaire gesteenten eerder schaars. Alleen locaties waar sterke erosie het landschap diep heeft kunnen insnijden, zoals in de meer heuvelige delen van Vlaanderen, bieden die mogelijkheid. De enige andere geschikte plaatsen zijn die waar het tertiair artificieel blootgelegd werd. Dat zijn onder andere de ontginningsputten waaruit zand, klei, leem en andere delfstoffen gewonnen worden of werden. In een tweede bemonsteringscampagne werden daarom in een aanzienlijke reeks ontginningen in Vlaanderen, zowel actieve als inactieve, representatieve monsters verzameld. De ligging van de bemonsterde winningen zijn op afbeelding 5.6 aangegeven. De lithostratigrafische situering van de monsters uit ontginningen is in tabel 5.2 samengevat.

5.5.3 HOOFDELEMENTEN VERSUS SPORENELEMENTEN

In een vorig hoofdstuk werd reeds aangetoond dat sporenelementen vooral in bepaalde silicaatmineralen voorkomen zoals kleimineralen, mica's en veldspaten. In het op een na meest frequent mineraal in de aardkorst, kwarts, zitten daarentegen bijna geen sporenelementen gevangen. Samen vormen de net genoemde mineralen de hoofdbrok van de samenstelling van diverse zand- en kleisoorten. Men kan daarom verwachten dat in een bepaald monster het gehalte aan sporenelementen toeneemt naarmate er ook dergelijke silicaatmineralen in aanwezig zijn. Men zegt dan dat er een goede positieve correlatie tussen de twee bestaat. De silicaatmineralen in een monster bevatten evenwel ook elementen die tot de hoofdelementen gerekend worden. Ook daar neemt het gehalte aan hoofdelementen rechtevenredig toe met het gehalte aan silicaatmineralen. Dat is dus nogmaals een goede positieve correlatie. Door die twee positieve correlaties samen te nemen kan gesteld worden dat de gehalten aan sporenelementen en hoofdelementen in een monster allebei in eenzelfde mate toenemen of allebei afnemen. Als men dan weet welk hoofdelement in elk van die silicaatmineralen aanwezig is, zou men aan de hand daarvan een schatting van de hoeveelheid in het monster aanwezige silicaatmineralen kunnen maken, en van daaruit ook een schatting van de aanwezige hoeveelheid sporenelementen. Aluminium is zo een hoofdelement.

Met sommige silicaatmineralen werkt die correlatie evenwel iets minder goed. Dat is het geval met het in Vlaamse zanden vaak voorkomende mineraal glauconiet, omdat dat een relatief aluminium-arm mineraal is. Glauconiet bevat echter nog andere elementen die eventueel als maatstaf gebruikt zouden kunnen worden: ijzer en

	BGD - NUMMERS BORINGEN															
Formatie	48 W 180	92 W 382	6 E 115	24 W 141	56 W 138	70 E 183	68 E 169	76 W 273	23 E 88	43 W 301	59 W 192	45 E 162	26 E 93	89 E 401	29 E 264	40 E 373
Quartair																
Lillo - Mol																
Kattendijk – Kasterlee																
Diest																
Berchem – Bolderberg																
Voort																
Eigenbilzen																
Boom																
Bilzen																
Borgloon																
Zelzate – St-H-Hern																
Maldegem																
Lede																
Brussel																
Aalter																
Gent																
Tielt																
Kortrijk																
Tienen																
Hannut																
Heers																
Opglabbeek																
Houthem																

Afb. 5.5: Overzicht van het lithostratigrafisch bereik van de bemonsterde boorkernen

kalium. Met ijzer kan men de aanwezigheid inschatten van mineralen zoals glauconiet, diverse ijzeroxiden en in mindere mate de kleimineralen. Die laatste bevatten immers maar weinig ijzer. Men dient er ook rekening mee te houden dat in vele mineralen een aantal zware metalen uitgerekend de plaats van ijzer kunnen innemen.

Hoger dan normaal verwachte ijzer-gehalten kunnen wijzen op de aanwezigheid van ijzeroxiden, en eventueel zelfs van ijzersulfiden, zoals het mineraal pyriet (FeS_2). Voor aanrijkingen van zware metalen ten gevolge van aanwezige sulfiden is zwavel uiteraard een goede indicator.

Kalium kan een goede maatstaf zijn om de hoeveelheden glauconiet en mica-mineralen in te schatten omdat die allemaal veel kalium bevatten.

Een aantal auteurs hebben eerder reeds pogingen ondernomen om het gehalte aan sporenelementen in een monster rechtstreeks in te schatten aan de hand van het gehalte aan kleimineralen. Men voert dan zeefproeven uit op het monster en weegt de hoeveelheid fractie die fijner is dan 0,002 mm. Aangezien glauconiet frequent voorkomt in Vlaamse zanden is deze methode hier evenwel niet toepasbaar. Glauconiet is inderdaad een kleimineraal, maar het komt stevast voor in de vorm van korrels die tot de zandfractie behoren: grover dan 0,062 mm. Bij



het wege van kleimineralen mist men daardoor telkens de glauconietkorrels. Dat is een niet onbelangrijk feit aangezien glauconiet in sommige zanden tot 70 % van de massa kan vertegenwoordigen. Hetzelfde gebeurt ook met mica-korrels.

Vaak werd al vastgesteld dat zand- en kleilagen die veel organisch materiaal bevatten, dikwijls ook hogere gehalten aan zwavel en arseen vertonen. Die zijn meestal uit het organische materiaal zelf afkomstig. Bovendien

gaan dergelijke lagen vaak gepaard met aanrijkingen van variërende combinaties van zware metalen. Huisman toont in een doctoraalscriptie evenwel aan dat de precieze locatie van die aanrijkingen niet systematisch vast bepaald is. Soms komt die aangerijkte zone in de bovenkant van de laag in kwestie voor, soms in de onderkant. In andere gevallen komt de aangerijkte zone net onder de organisch-materiaalrijke laag voor, of op een kleine afstand ervan. Dat kan verklaard worden door het feit dat organisch materiaal tijdens het afbraakproces humuszu-

Boring	Monster-nummer	Lithostratigrafische code	Lithologische beschrijving
48W180	1	Ml	Wit fijn zand
	2	Ml	Glimmerrijk fijn wit zand
	3	Ml	Glimmerrijk fijn wit zand met een groenige kleur die in intensiteit naar onderen toeneemt
	4	Ml	Kleihoudend fijn zand, sterk gelimoniseerd, bruin
	5	Kl	Bruingrijs fijn zand met glimmers
	6	Kl	Fijn zand met glimmers en met zwarte klei
	7	Kl	Groengeel Zand
	8	Kl	Bleekgroen tot groen fijn zand met onregelmatig verdeelde glauconiet
	9	Di	Glauconietrijk kleioudend zand
	10	Di	Zwartgroen zeer glauconietrijk kleioudend fijn zand met glimmers
	11	Di	Zwartgroen zeer glauconietrijk kleioudend fijn zand, sterk glimmerhoudend
	12	Di	Zwartgroen zeer glauconietrijk kleioudend fijn zand met glimmers
	13	BbGe	Bruingrijs fijn zand
	14	BbGe	Horizont met kiezel (zandsteenconcreties)
	15	BbGe	Bruingrijs fijn zand met ijzerconcreties
	16	BbGe	Bruingrijs fijn zand met ijzerconcreties
	17	BbHo	Bruin fijn zand met grijze vlekken, glimmers
	18	BbHo	
	19	BbHo	
92W382	20	HnLi	Grijze siltsteen
	21	HnLi	
	22	HnLi	Kalkrijke siltsteen met schelpresten
	23	HnLi	Kalkhoudende kleisteen met bovenaan fosfaatkern
	24	HsGe	Mergel, homogeen uitzicht
	25	HsGe	
	26	HsGe	

Tabel 5.1: Monsters uit boorkernen



ren produceert. Die kunnen de metalen in oplossing brengen, die dan iets verder weer neerslaan. Andere metalen zoals chroom en vanadium worden dan weer precies in die reducerende omgeving geïmmobiliseerd.

Voor een specifiek monster kan dus geen werkbare relatie gevonden worden tussen sporenelementen enerzijds en organische koolstof en zwavel anderzijds.

Boring	Monster-nummer	Lithostratigrafische code	Lithologische beschrijving
6E115	27	Kw ⁽¹⁾	Bleek grijsgroen fijn zand, glimmerhoudend
	28	Kw ⁽¹⁾	Grijs half fijn zand, glimmerhoudend
	29	Kw ⁽¹⁾	Grof tot zeer grof grijs zand
	30	Kw ⁽¹⁾	Grof tot zeer grof zand, roestkleurig
	31	Li	Bleekbruin tot grijs fijn zand met schelpen
	32	Kt	Donkergroen glauconietrijk fijn zand
	33	BcAn	Groengrijs glauconiethoudend fijn zand, heteromorf, schelpen
	34	Di	Zwartgroen glauconietrijk fijn zand
24W141	35	MaUr	Grijsgroene zware klei
	36	MaUr	
	37	MaAs	Glauciethoudende klei, eerder grijze kleur
	38	MaWe	Grijze glauconiethoudende mergelhoudende silt
	39	AaOe	Groen zeer fijn zand, weinig schelpen
	40	AaOe	Grijsgroen fijn zand, veel schelpen
56W138	41	AaOe	Grijsgroen zeer fijn zand, weinig schelpen
	43	Kw ⁽²⁾	Heterogeen: grof zand, grind (silex, zandsteen...)
	44	Ld	Grijsgroen zand dat kalkrijk is
	45	GeVl	Groenachtig fijn zand met geen tot weinig kalk
	46	GeVl	Groenachtig fijn zand, kalkrijk
	47	GePi	Siltrijk zeer fijn zand
	48	GeMe	Grijze harde klei
70E183	49	GeMe	Bruingrijze vaste klei
	50	TtEg	Groen glauconiethoudend fijn zand
	51	TtEg	Bleek fijn tot zeer fijn zand, kalkhoudend, kiezel
	52	TtKo	Bruin grijsgroen zand
	53	TtKo	Bruin grijs zeer fijn zand, kleihoudend en kalkrijk
	54	KoAa	Groengrijze vaste klei
	55	KoMo	Grijze leemhoudend klei, kalkhoudend
	56	KoMo	Grijze leemhoudende klei
	57	KoMo	Grijze leemhoudende klei, glauconiethoudend, korrelig uitzicht

Tabel 5.1 (vervolg)

(1) Noorderkempen
(2) Vlaamse vallei



Boring	Monster-nummer	Lithostratigrafische code	Lithologische beschrijving
68E169	58	GePi	Complex van zand en klei, bleek en met roestvlekken
	59	TtEg	Zand en klei, roestkleurig
	60	TtEg	Zand en klei, grijs
	61	TtEg	Grijs fijn zand met schelpen
	62	TtEg	Grijs fijn zand met nu en dan klei
	63	TtKo	Zand, klei en silt wisselen elkaar af, grijs
	64	TtKo	
	65	KoAa	Silteuze harde klei, grijs
	66	KoAa	
	67	KoMo	Massieve, zware klei
	68	KoMo	
	69	KoMo	
	70	KoMo	
	71	La	Groengrijs fijn zand
76W273	72	Bm	Grijze kleiige silt
	73	Bm	
	74	BiKe	Beige fijn tot zeer fijn zand
	75	BiKe	
	76	Sh	Beige fijn tot zeer fijn zand, schelpresten
	77	Sh	Groengrijs leemhoudend zeer fijn zand
	78	KoMo	Licht leemhoudend zeer fijn zand, grijsgroen, glimmers
	79	KoMo	
	80	TiLo	Donkerbruin zeer fijn zandige leem
	81	TiLo	Lichtgrijs zeer fijn zandige leem
	82	TiLo	Lichtgrijs fijn tot zeer fijn zand
	83	Hn	Licht zeer fijn zandige leem, grijs
	84	Hn	
	85	Hn	
	86	HsGe	Licht zeer fijn zandige leem, grijs
	87	HsGe	

Tabel 5.1 (vervolg)



Boring	Monster-nummer	Lithostratigrafische code	Lithologische beschrijving
23E88	88	MaWe	Bleekbruin tot beide fijn tot zeer fijn zand, roestvlekken, schelpresten
	89	AaOe	Bleekgroen fijn tot zeer fijn zand, veel schelpen
	90	AaOe	Bleekgroen fijn zand tot zeer fijn zand, weinig schelpen
	91	AaOe	Bleekgroen fijn tot zeer fijn zand, veel schelpen
	92	AaOe	Bleekgroen fijn tot zeer fijn zand, graduele vermindering van schelpen naar onderen toe
	93	GeVI	Lichtgroen glauconiethoudend fijn zand
	94	GePi	Fijn zandhoudend leem, bruin paars
	95	GePi	Lichtgroen glauconiethoudend fijn zand
	96	GePi	Groenbruin fijn zandhoudende klei
	97	GePi	Licht groenbruin fijn zand, weinig schelpresten
	98	GeMe	Lichtbruine massieve klei met roestvlekken en zwavellenzen(?)
	99	GeMe	Donkerbruine massieve klei met roestvlekken en zwavellenzen(?)
	100	TtEg	Glauconiethoudend fijn zand
43W301	101	Bc	Grijsgroen kleiig zand met glimmers
	102	BmPu	Grijsbruine klei
	103	BmPu	
	104	BmTe	Licht tot donkerbruine vette klei, relatief homogeen uitzicht 35-37m en 40-41m: sterk zandig
	105	BmTe	
	106	BmTe	
	107	BmBw	Kleiig zand dat glimmerrijk is en kalk kan bevatten
	108	BmBw	Kleiig zand tot zandige klei dat pyrietconcreties kan bevatten
	109	Zz	Overwegend licht tot donkerbruin fijn zand met wisselend kleilenzen en –horizonten
	110	MaOd	Grijsgroene silteuse klei met wisselend gehalte aan zand. Tussen 67-68m rijk aan glauconiet en pyriet
	111	MaOd	
	112	MaBu	Grijs kleiig zand, glimmer-en glauconiethoudend. Tussen 71, 4-72m: rijk aan glauconiet en pyriet
	113	MaBu	
	114	MaZo	Grijsgroene vaste siltige klei
	115	MaOn	Zandige klei waarvan het kleigehalte naar onderen afneemt
	116	MaOn	Grijsgroen glauconiethoudend fijn zand met kleibrokjes
	117	MaWe	Glauconiethoudend kleiig zand
	118	Ld	Beige tot lichtbruin fijn zand

Tabel 5.1 (vervolg)



Boring	Monster-nummer	Lithostratigrafische code	Lithologische beschrijving
59W192	119	BmBw	Silteus fijn zand, homogeen uitzicht
	120	BmBw	
	121	Zz	Fijn zand dat kleiig kan zijn, donkerbruine horizonten wisselen af met lichtbruine, beige en roestgeklepte horizonten. Tussen 38, 8-37, 3m rijk aan pyriet
	122	Zz	
	123	Zz	
	124	MaZo	Kleiig fijn zand dat glauconiet- en glimmerhoudend is, kleur evolueert van bruin bovenaan tot groen onderaan, geel gevlekt op verschillende dieptes
	125	MaOn	Licht kleiig fijn zand dat rijk is aan glauconiet
	126	MaUr	Groengrijze compacte klei dat zandig kan zijn
	127	MaWe	Groengrijs silteus en kleiig fijn zand dat kalkrijk is
45E162	128	Di	Grijsgroen glimmer- en glauconiethoudend zand
	129	DiDe	Glauconiethoudend fijn zand, nagenoeg geen glimmers
	130	DiDe	Glauconiethoudend fijn zand, sterk tot zeer stek glimmerhoudend
	131	DiDe	Glauconiethoudend fijn zand, wisselend gehalte aan glimmers
	132	Bm	Grijze klei met pyriet
26E93	133	Bm	Vanaf 30m beschikbaar. Zandige en silteuze klei dat groenbruingrijs is
	134	ZzRu	Bruin kleiig zand dat naar onderen evolueert naar bruin fijn zand
	135	ZzRu	
	136	ZzRu	
	137	ZzBa	Fijn tot zeer fijn zand dat licht kleiig kan zijn, op wisselende diepte pyriet
	138	ZzBa	Kleiig zand met glauconiet, pyriet in sterk wisselende concentraties
	139	ZzBa	
	140	MaOd	Homogene klei met tussen 77,9-79,2m zeer fijn zandig silt
	141	MaOd	
	142	MaBu	Glauconiethoudend, kleiig fijn zand rijk aan pyriet
	143	MaZo	Bruine vaste klei
	144	MaZo	
	145	MaOn	Lichtgroen bruin kleiig fijn tot zeer fijn zand
	146	MaAs	Homogene bruine klei
	147	MaAs	
	148	MaWe	Glauconiethoudend fijn zand met talrijke kleilenzen, sterk gebioturbeerd

Tabel 5.1 (vervolg)

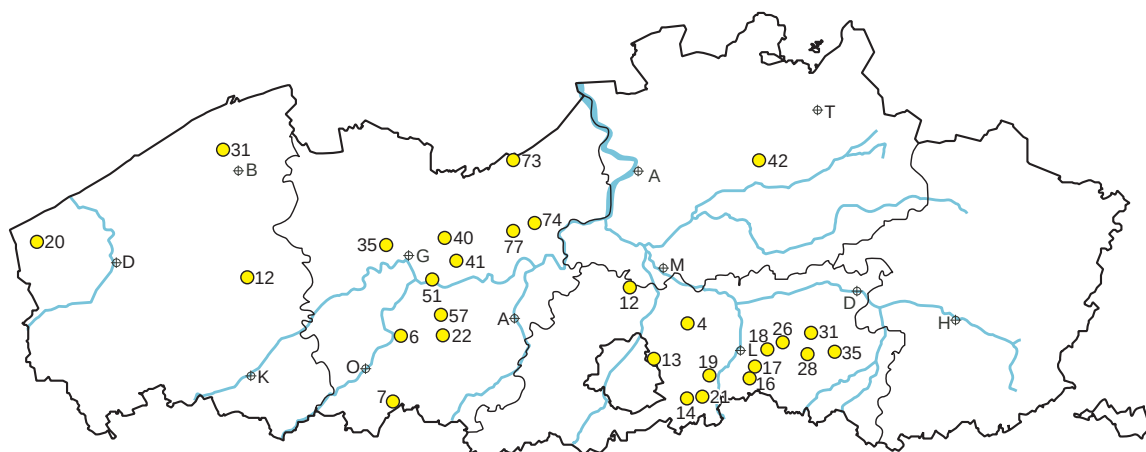


Boring	Monster-nummer	Lithostratigrafische code	Lithologische beschrijving
89E401	149	Br	Grof zand, grind: rolkeien, silex, zandsteen
	150	Br	Donkergrijs tot groengrijs silteus fijn zand dat glauconiethoudend kan zijn, heterogeen uitzicht
	151	Br	Donkergrijs tot groengrijs fijn zand dat glauconiethoudend kan zijn
	152	Br	Donkergrijs tot groengrijs fijn zand dat glauconiethoudend kan zijn
	153	Ko	Bleekbruingele silt
29E264	164	Li	Tussen 3-4m sterk verstoord. Donkergrijs kleig zand, glauconiet-, kalk- en glimmerhoudend
	165	Li	
	166	Kl	Kleig fijn zand, glauconiet- en glimmerhoudend
	167	Di	Stalen tussen 17-49m niet beschikbaar. Donkergrijsgroen fijn zand, rijk aan glauconiet
	168	Di	14-15m: afzonderlijk bemonsterd wegens donkerbruine kleur
	169	BcAn	50-59m: donkergroen kleig fijn zand rijk aan glauconiet
	170	BcAn	79-80m: fijn zand, sterk kleig, glauconiethoudend
40E373	171	Kw ⁽²⁾	18-19m: beige tot lichtbruin kleig fijn zand met roestvlekken
	172	MaUr	Grijze zware klei
	173	MaUr	
	174	MaAs	Grijze zandige klei
	175	MaWe	Grijs fijn zand met schelpresten
	176	MaWe	
	177	Ld	Grijs fijn zand
	178	Ld	
	179	AaOe	Groengrijs fijn zand met schelpen
	180	AaOe	
	181	GeVl	Grijs fijn zand met veenlaagjes, naar onderen beige middelmatig zand
	182	GeVl	Groengrijs fijn zand met veen
	183	GeVl	Groengrijs fijn zand
	184	GePi	Groengrijs kleig zand, glauconiethoudend
	185	GePi	Groengrijs zandige klei tot kleig zand
	186	Gepi	Groengrijs kleig fijn zand
	187	TtEg	Groengrijs fijn zand met schelpgruis

Tabel 5.1 (vervolg)

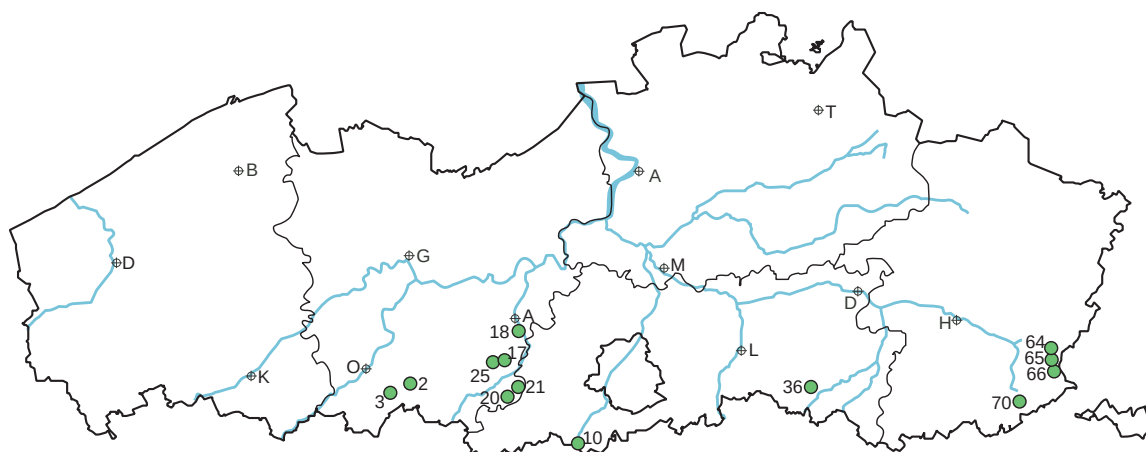
(2) Vlaamse vallei





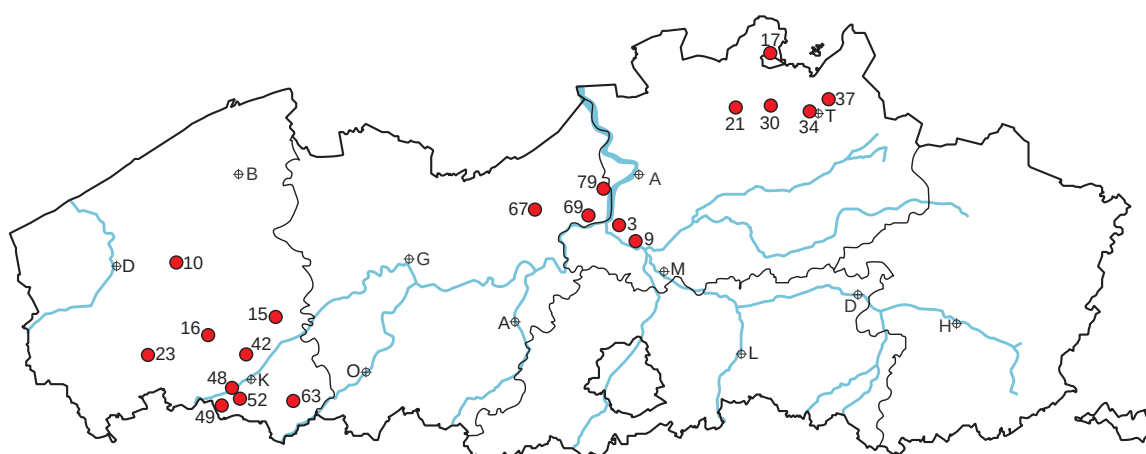
Bemonsterde zandwinningen

0 10 20 30 40 50 km



Bemonsterde leemwinningen

0 10 20 30 40 50 km



Bemonsterde kleiwinningen

0 10 20 30 40 50 km

Afb. 5.6: Geografische ligging van de bemonsterde delfstofwinningen

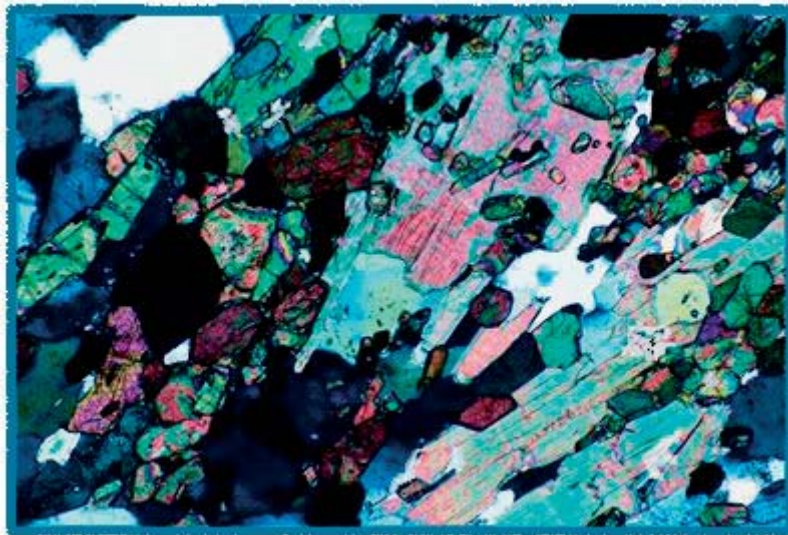
QUARTAIR	
	Nummers ontginningen
Leem	BRA 10, BRA 36, LIM 64, LIM 65, LIM 66, LIM 70, OVL 02A, OVL 02B, OVL 03, OVL 17, OVL 18, OVL 20, OVL 21A, OVL 21B, OVL 25
Kustvlakte	WVL 20, WVL 31
Vlaamse vallei	BRA 12A, BRA 12B, BRA 12C, OVL 06A, OVL 35, OVL 40, OVL 41, OVL 73, OVL 74, OVL 77 Klei: OVL 01
Maas- en Rijnafzettingen	
Noorderkempen	ANT 17A, ANT 21A, ANT 30A, ANT 34A, ANT 37A Klei: ANT 17B, ANT 21B, ANT 30B, ANT 34B, ANT 37B

TERTIAIR		
Formatie	Lithostratigrafische code	Nummers ontginningen
Lillo / Mol	Li / MI	ANT 42A, ANT 42B /
Kattendijk / Kasterlee	/ Kl	
Diest	Di	BRA 84
Berchem / Bolderberg	Bc / Bb	ANT 09B / BRA 26A, BRA 31
Voort		
Eigenbilzen		
Boom	Bm	Klei: ANT 03, ANT 09A BRA 26D, OVL 67, OVL 69, OVL 79
Bilzen	BiBe	BRA 26B
Borgloon	BoKr	BRA 18, BRA 26C
Zelzate / St-H-Hern	/ Sh	/ BRA 28, BRA 35, BRA 83
Maldegem		
Lede	Ld	BRA 04B, BRA 13A, OVL 22
Brussel	Br	BRA 04A, BRA 13B, BRA 14, BRA 16, BRA 17, BRA 19, BRA 21, BRA 22
Aalter		
Gent	GeVI	OVL 06B, OVL 07, OVL 51, OVL 57
Tielt	TtEg	
Kortrijk	Ko	Klei: WVL 10, WVL 12B, WVL 15, WVL 16, WVL 23, WVL 42, WVL 48, WVL 49A, WVL 49B, WVL 52, WVL 63A, WVL 63B
Tienen		
Hannut		
Heers		
Opglabbeek		
Houthem		

Tabel 5.2: Monsters uit ontginningen



HOOFDSTUK 6: Analyseresultaten



ANALYSERESULTATEN

6.1 ANALYSEMETHODEN

Bij het onderzoek van zowel de boorkernen als de ontginningsputten zijn geen puntmonsters genomen. De monsters zijn samengesteld uit minstens twee submonsters, verdeeld over een tweetal meter dikte van de specifieke sedimentlaag. Elk monster is representatief voor de hoofdmassa van het sedimentmateriaal. Er werd dus geen rekening gehouden met eventueel aanwezige keitjes, concreties, centimeterdunne laagjes met een van het geheel afwijkende samenstelling of fossielen. Op die wijze is elk monster representatief voor enkele meters van een lid of formatie. Ze vertegenwoordigen dus ook geen analyse van een specifiek stratigrafisch niveau, op een welbepaalde diepte, maar geven een algemeen beeld weer.

De chemische analyses van zowel hoofd- als sporenelementen van de twee bemonsteringscampagnes werden uitgevoerd door twee verschillende commerciële laboratoria, die door de Vlaamse regering erkend werden voor het pakket analyses van bodem en grondwater.

Het in oplossing brengen van de monsters gebeurde met koningswater ($\text{HCl} + \text{HNO}_3$) in een microgolfoven. De analyses zelf werden met de techniek ICP-AES uitgevoerd.

Slechts één uitzondering hierop: bij de analyse van As in de boorkernen werd gebruik gemaakt van Atomaire Absorptie Spectrofotometrie.

6.2 GEANALYSEERDE ELEMENTEN

De onderstaande sporenelementen werden geanalyseerd:
As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, V, Zn

Momenteel staan slechts een achttal elementen onder toezicht van de actuele milieuwetgevingen die betrekking hebben op de kwaliteit van bodems en ondergrond. Die elementen zijn: **As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn**. Die reeks werd in deze onderzoeken met een aantal andere elementen uitgebreid, een anticipatie op eventuele toekomstige toevoegingen aan de wetgeving.

Alle monsters werden eveneens onderzocht op hun gehalten aan de volgende vier hoofdelementen:
Al, Fe, K, S

Het is de bedoeling de gehalten aan sporenelementen binnen hetzelfde monster te vergelijken met die hoofdelementen. De reden daarvan werd in het vorige hoofdstuk toegelicht.

Deze werkwijze biedt zeer belangrijke voordelen. Ze houdt in dat alle elementen, zowel de sporen- als de hoofdelementen, aan de hand van slechts één in oplossing gebrachte hoeveelheid monster gemeten kunnen worden. De gemeten hoofdelementen doen dus dienst als een interne standaard, ingebouwd in elk monster. Het betekent een aanzienlijke verbetering op het vlak van de reproduceerbaarheid van de metingen.

In andere methodes, waarbij de sporenelementen bijvoorbeeld aan het kleigehalte gerelateerd worden, moet men elk monster in twee verdelen en vervolgens aan twee verschillende analysetechnieken onderwerpen. Twee stappen die extra systematische en statistische fouten accumuleren. Bovendien is de meting van het kleigehalte veel minder accuraat dan de ICP-techniek.

6.3 ACCURAATHEID EN PRECISIE

Er moet hier meteen op worden gewezen dat het absolute karakter van analyseresultaten op het niveau van de ppm sterk gerelativeerd moet worden. De kans is groot dat men bij de heranalyse van geologische materialen een ander resultaat krijgt. De redenen daarvoor zijn zowel bij de bemonstering als binnen elk specifiek monster te vinden. Hieronder volgt een kleine opsomming:

- de representativiteit van de monsternamen: er is weinig of niets bekend over de verticale en laterale variaties in gehalten aan sporenelementen in sedimentgesteenten. Dit zowel over kleine afstanden van enkele decimeters, als over grotere afstanden van meerdere tot tientallen meters. Dat zou nog ontzettend veel onderzoekswerk vergen. Wel kan worden uitgegaan van de veronderstelling dat een geologisch materiaal vanuit zijn ontstaanswijze een heterogeen materiaal is en daarom van nature een zekere variabiliteit inhoudt. Daarom is het ook wenselijk de verkregen cijfers voor een geologische eenheid niet als een absoluut en onveranderlijk gegeven te beschouwen, maar als een vork waarbinnen of waarrond de waarden kunnen schommelen.
- homogeniteit van de monsters: een perfecte menging van een al of niet samengesteld monster in het laboratorium, nog voor de ontsluiting in zuren, vergt een aanzienlijke voorbereidingstijd. Het mechanisch dooreenschudden van een monster moet minstens een half uur lang aangehouden worden. Elke onvolkomenheid op dat vlak kan door de reductie van het monstervolume tijdens de voorbereiding opnieuw uitvergroot worden.
- in het licht van het heterogene karakter van geologische materialen kan de toevallige aanwezigheid van een of twee korrels van een accessorisch mineraal in een monster, met daarin een of meerdere zware metalen, voor onverwacht hoge gehalten aan sporenelementen zorgen.



Hierbij moet bovendien nog rekening gehouden worden met de steeds aanwezige en onvermijdelijke statistische fouten. Uit de publicatie van Tack F. et al. (1997) kan een goed beeld van de statistische fouten aangehaald worden. Die auteurs vermelden, voor enkele elementen, de standaarddeviaties op de resultaten uit een analyse in drievoud op eenzelfde monster in eenzelfde laboratorium (tabel 6.1).

	Stand.dev.	Niveau
Cd	0,7	9,2
Cu	9	100
Co	1	11
Ni	3	40
Pb	12	140
Zn	75	538

in ppm

Tabel 6.1: Statistische fouten

In gewone taal betekent dat het volgende: indien men voor Cu een gehalte van 100 ppm verkrijgt, dan had het resultaat met een waarschijnlijkheid van 32 kansen op honderd evengoed groter dan 109 ppm of kleiner dan 91 ppm kunnen zijn. Een behoorlijke variatie op een resultaat is dus niet onverwacht.

Indien men dan zou vertrekken van twee afzonderlijk genomen monsters uit eenzelfde materiaal, al of niet in eenzelfde laboratorium geanalyseerd, of één monster in duplicaat dat in twee verschillende laboratoria geanalyseerd wordt, dan zouden de verschillen op de resultaten nog veel aanzienlijker worden.

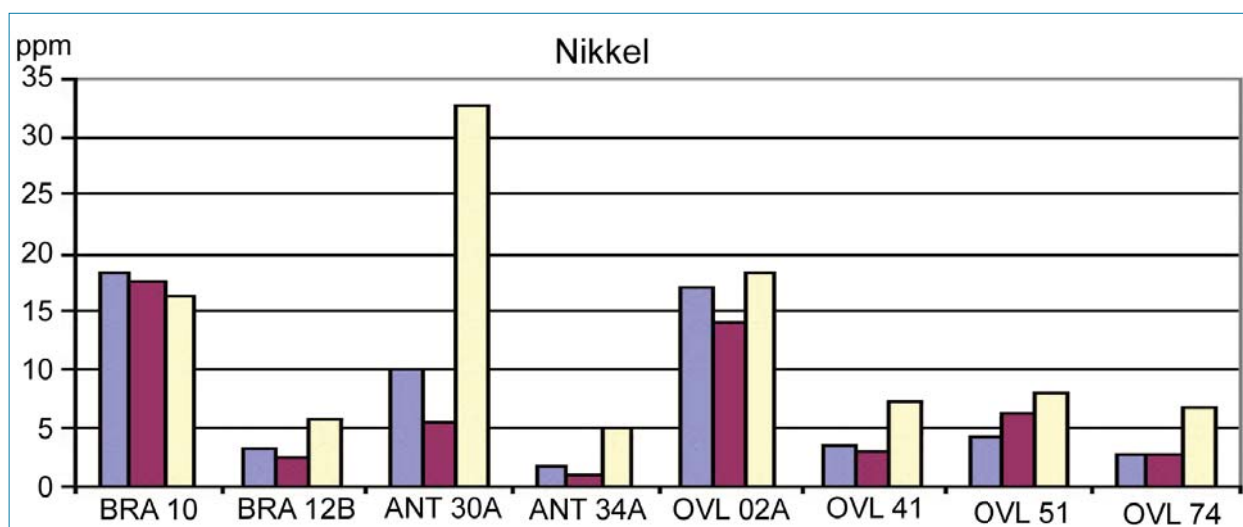
Dan wordt het duidelijk dat, zelfs in de veronderstelling dat instrumentele fouten zo goed als onbestaande zijn, het verkrijgen van identieke resultaten geen evidente zaak is.

6.4 VERGELIJKING TUSSEN LABORATORIA

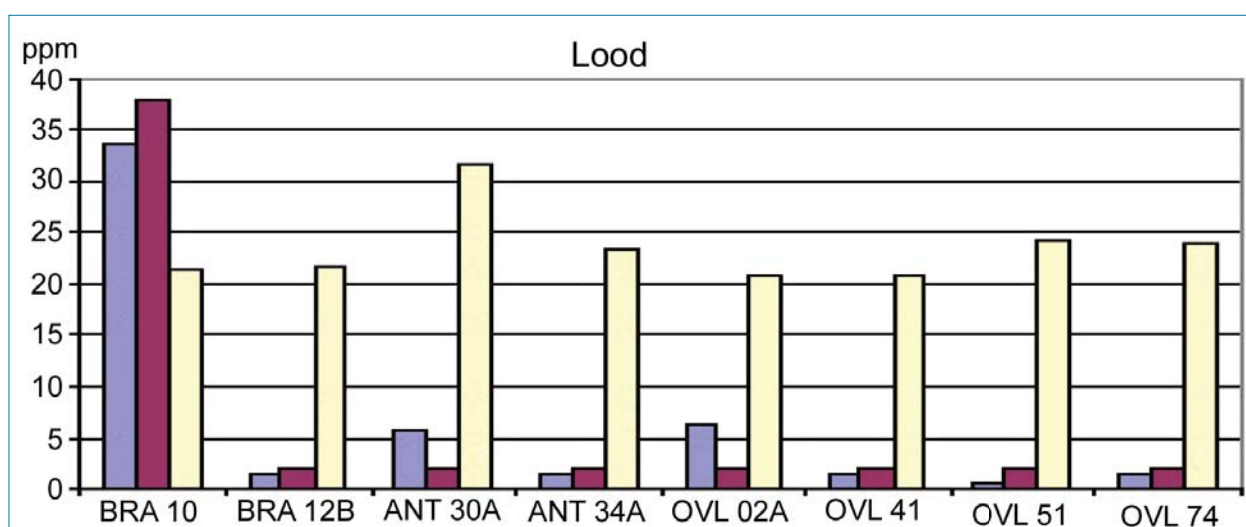
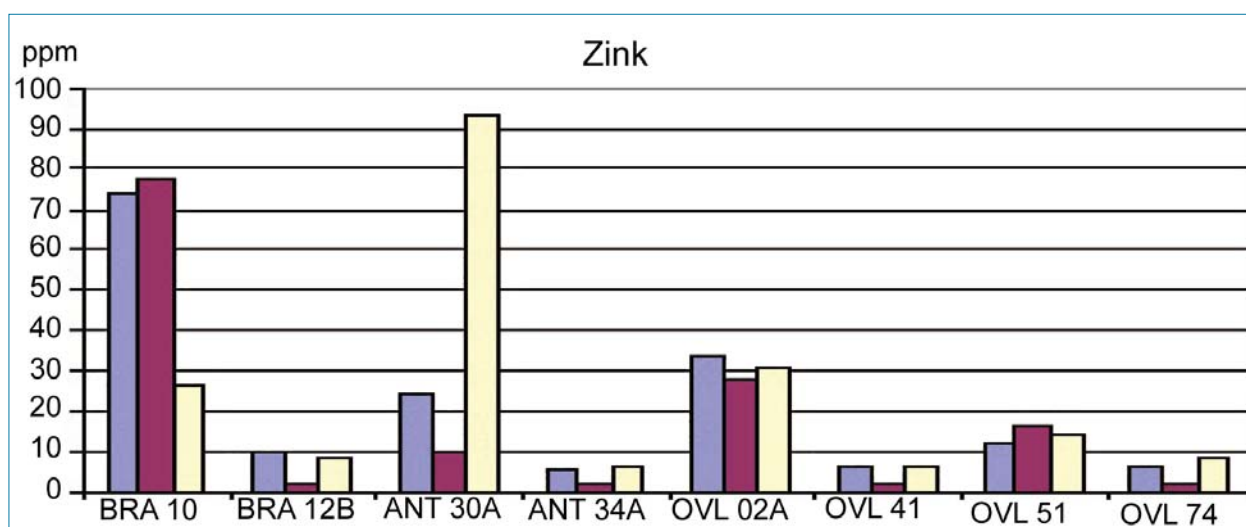
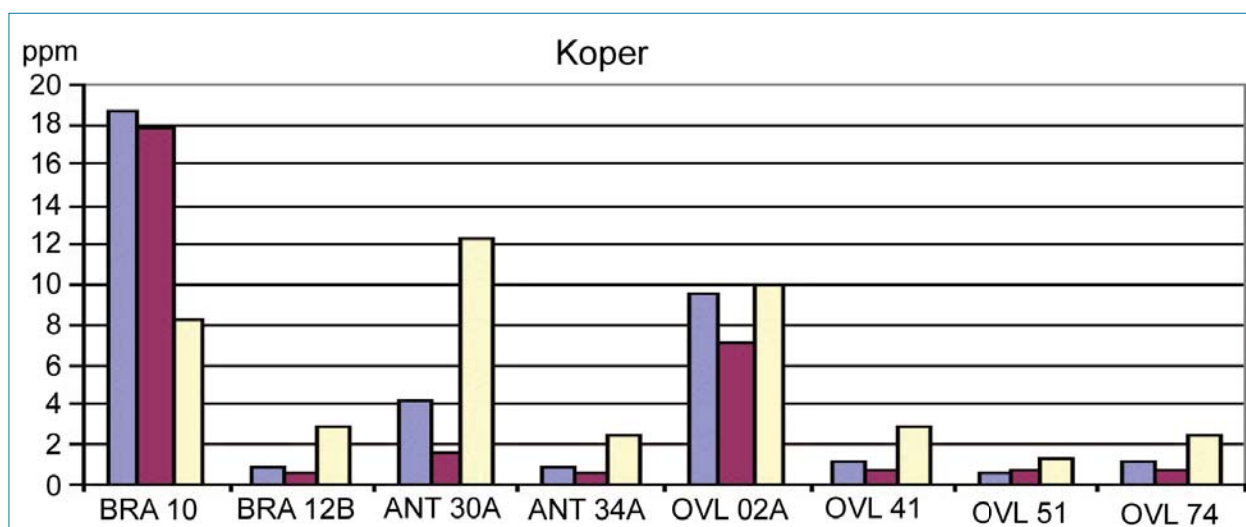
Om een idee te verkrijgen van de vergelijkbaarheid van resultaten uit verschillende laboratoria, werden een achttal monsters voor analyse aan drie laboratoria aangeboden, zonder hun medeweten. Die vergelijkingen worden in afbeelding 6.1 voor vier elementen voorgesteld. Ze wijzen het volgende uit:

- een labo kan soms voor één bepaald monster een afwijkend resultaat opleveren. Zie de gele kolom bij monster ANT 30A, voor nikkel en zink;
- een labo kan soms de neiging vertonen voor een of meerdere elementen een reeks licht hogere of licht lagere resultaten op te leveren. Zie de gele kolommen in de diagrammen voor nikkel en koper;
- in een labo kan er al eens wat mislopen voor een hele reeks monsters voor één specifiek element. Zie de gele kolommen voor lood.

Zoals de diagrammen aantonen zijn de vastgestelde tendensen of afwijkingen niet altijd systematisch. De steekproef gaat bovendien ook maar over een zeer beperkt aantal monsters. Ter informatie: de gegevens van het “gele” laboratorium worden in het volgende hoofdstuk niet aangewend om er een toetsingskader mee uit te bouwen. De diagrammen tonen wel op overtuigende wijze aan dat bij de interpretatie van analytische resultaten, in het kader van milieuzorg, een grote dosis voorzichtigheid aan de dag gelegd moet worden en dat enige bescheidenheid op dat vlak niet misplaatst is. Bij wijze van aanbeveling kan hier vermeld worden dat in gevallen van betwisting hetzelfde monster, of zelfs een geheel nieuw monster aan een tweede laboratorium voor analyse voorgelegd zou worden.



Afb. 6.1: Vergelijking van analyseresultaten uit drie laboratoria. Elke kolom stelt een laboratorium voor.



Afb. 6.1: (vervolg)



Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
1	0,8	25,6	<0,1	1,4	24,0	3,4	0,09	<1	5,4	9,0	<1	<1	<1	43,8	13,6	14760	2105	1938	34
2	10,2	9,7	<0,1	1,0	17,6	1,8	0,05	<1	4,2	3,1	<1	<1	<1	20,1	8,3	9757	1484	888	39
3	5,0	39,7	<0,1	3,6	103,0	5,5	0,14	<1	10,6	12,0	<1	<1	1,5	161,0	41,6	28329	15552	6266	64
4	13,5	29,6	<0,1	8,1	125,0	8,4	0,35	<1	14,0	14,0	7,6	21,8	<1		131,0	22461	58543	6179	67
5	3,8	30,0	<0,1	5,2	58,9	3,8	0,34	<1	12,9	6,9	<1	<1	3,8	92,0	53,1	20828	18382	4686	393
6	27,3	39,4	0,12	31,2	44,6	11,3	1,18	<1	28,4	9,8	<1	<1	<1	48,4	37,1	22163	15647	4103	6147
7	1,5	16,2	<0,1	1,6	15,3	1,7	0,14	<1	2,4	5,9	<1	<1	<1	17,1	13,3	6639	7305	1742	115
8	3,1	20,1	<0,1	1,7	19,8	1,8	0,37	<1	2,6	3,3	<1	<1	<1	26,2	16,8	8783	17194	3483	230
9	12,1	28,1	<0,1	2,3	65,7	2,4	0,07	<1	6,0	6,7	<1	<1	<1	101,0	37,5	15506	63649	11041	44
10	26,0	24,4	<0,1	3,5	57,4	2,6	0,17	<1	10,7	6,0	<1	<1	<1	89,3	38,8	16043	65655	16150	4133
11	8,7	27,7	<0,1	1,9	26,0	2,6	0,16	<1	5,5	1,9	<1	<1	<1	28,2	23,3	10959	27503	8330	2761
12	26,4	21,3	0,64	2,0	37,2	2,7	0,49	9,4	9,4	4,7	<1	<1	<1	177,0	31,3	8223	29524	5642	11083
13	6,5	8,7	<0,1	1,0	9,2	1,4	0,08	<1	2,7	2,4	<1	<1	<1	10,9	10,3	2731	3886	869	680
14	5,4	6,6	<0,1	1,0	4,2	1,0	0,19	<1	1,2	2,9	<1	<1	<1	4,9	8,2	1415	2022	406	376
15	13,9	11,5	<0,1	<1	9,4	1,5	0,14	1,3	3,6	2,9	<1	<1	<1	10,5	11,0	3592	7493	914	2497
16	3,7	14,6	<0,1	1,1	10,0	1,8	0,12	1,1	3,9	4,7	<1	<1	<1	11,2	13,5	4578	10894	1231	1486
17	3,7	15,4	0,1	1,5	10,2	1,9	0,17	1,0	4,7	3,8	<1	<1	<1	12,6	15,7	5634	9263	1584	2331
18	7,0	19,9	0,1	1,6	13,6	2,3	0,09	2,6	5,6	3,1	<1	<1	<1	15,4	17,4	7224	7668	1939	3147
19	4,7	17,2	<0,1	1,5	12,6	1,9	0,07	1,4	4,9	3,1	<1	<1	<1	14,1	16,9	6811	7332	1804	3556
20	11,3	54,0	0,1	8,1	78,9	7,2	0,37	3,5	25,7	6,2	<1	<1	<1	74,2	37,1	22404	37864	10458	22893
21	8,4	81,5	0,10	9,3	77,2	9,0	0,10	3,2	22,1	6,1	<1	<1	<1	80,5	46,6	32935	24192	11913	9479
22	5,0	67,1	<0,1	7,8	64,3	8,4	0,09	2,4	19,4	5,5	<1	<1	<1	62,2	38,0	28221	21058	10397	9433
23	9,9	76,1	<0,1	14,2	63,1	11,0	0,57	5,1	71,5	13,0	<1	<1	<1	69,9	85,5	37027	76660	11716	66180
24	2,4	32,0	0,12	6,7	33,8	10,9	0,20	<1	15,5	5,3	<1	<1	<1	39,9	29,5	20222	11250	4811	5787
25	2,5	20,9	0,17	5,7	19,7	8,3	0,11	<1	10,9	4,6	<1	<1	6,5	24,2	25,5	10679	7506	2905	7092
26	1,2	13,3	0,10	3,1	16,4	6,9	0,05	<1	5,5	3,5	<1	<1	<1	19,1	16,2	6384	5625	1347	6919
27	10,0	17,3	<0,1	2,7	12,1	1,2	0,11	<1	3,9	2,0	<1	<1	<1	16,4	17,3	7947	5267	1565	1471
28	8,7	15,5	<0,1	2,1	10,8	1,0	0,10	<1	3,4	2,0	<1	<1	<1	18,6	23,2	5857	7420	1667	3361

Tabel 6.2: Gegevens uit boorkernen (ppm)

Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
29	3,2	6,9	<0,1	1,5	7,7	1,0	0,07	<1	2,1	2,2	<1	<1	<1	11,8	9,2	2359	2228	703	329
30	21,7	5,0	0,10	2,5	6,4	1,0	<0,05	<1	2,3	3,2	<1	<1	<1	22,7	11,9	1356	14500	411	1212
31	15,8	38,6	<0,1	2,4	30,6	4,3	0,10	<1	9,6	8,7	<1	<1	<1	58,8	25,7	17817		4674	5020
32	17,0	5,4	<0,1	3,5	98,4	1,0	<0,05	<1	7,2	3,0	<1	<1	<1	65,4	22,7	17510	59238	23196	386
33	15,1	4,4	<0,1	2,9	80,2	<1	<0,05	<1	6,5	2,9	<1	<1	<1	61,6	19,8	15271	53812	21237	366
34	25,1	12,8	<0,1	4,4	117,0	1,9	0,06	<1	9,1	8,2	<1	<1	1,7	73,2	32,0	25105	69329	30253	2749
35	21,4	169,0	<0,1	15,2	114,0	16,0	0,08	<1	43,1	11,0	<1	<1	<1	181,0	82,9	80841	51293	23209	10109
36	24,3	162,0	0,10	14,1	112,0	16,4	0,11	<1	39,7	10,4	<1	<1	<1	174,0	77,0	74795	47180	21010	9315
37	12,0	89,6	<0,1	14,3	87,2	11,4	0,09	<1	30,3	8,1	<1	<1	<1	104,0	57,3	47585	52681	21436	6641
38	9,0	25,8	<0,1	5,6	48,2	4,3	0,09	<1	10,5	3,6	<1	<1	<1	55,9	26,0	13685	35146	12612	5044
39	4,2	14,8	<0,1	3,0	23,0	0,8	<0,05	0,7	5,3	1,9	<1	<1	<1	28,3	14,4	6094	12835	3772	2500
40	5,3	19,6	<0,1	4,4	26,3	1,5	0,06	<1	7,2	2,7	<1	<1	<1	35,7	20,3	8447	13377	4478	2762
41	4,2	15,1	<0,1	5,0	29,8	3,1	0,09	<1	7,7	3,1	<1	<1	<1	40,4	22,7	9969	21660	5369	1751
42	2,1	29,3	<0,1	3,1	21,4	3,4	0,08	<1	6,5	2,2	<1	<1	<1	25,4	16,3	9808	9117	2336	453
43	17,8	9,8	0,10	2,9	15,7	2,6	0,09	1,2	14,9	15,5	<1	<1	<1	16,4	9,7	2823	22963	1765	18016
44	4,7	16,6	0,10	3,7	34,3	3,1	0,08	<1	7,4	2,3	<1	<1	<1	33,4	21,8	7444	17930	4469	2563
45	3,2	13,1	<0,1	4,4	37,6	2,5	0,09	<1	6,7	1,2	<1	<1	<1	36,0	26,4	7298	19402	5741	1136
46	3,7	13,8	<0,1	6,3	47,6	2,8	0,07	<1	8,6	2,4	<1	<1	<1	50,7	23,5	8942	25030	7679	2097
47	5,7	26,7	<0,1	8,6	55,3	4,5	0,11	<1	12,8	4,0	<1	<1	<1	59,7	31,0	13696	30463	9637	3761
48	9,9	186,0	<0,1	19,2	97,6	14,6	0,12	<1	43,6	14,9	<1	<1	<1	132,0	86,9	68896	46508	21075	7758
49	11,9	195,0	<0,1	17,5	98,2	12,4	0,13	<1	35,4	12,5	<1	<1	<1	159,0	73,7	77510	44091	21124	4596
50	5,9	27,1	<0,1	8,0	65,5	3,1	0,08	<1	11,8	3,2	<1	<1	<1	71,2	34,5	12990	31251	10186	1886
51	8,3	37,4	<0,1	9,7	67,9	4,9	0,08	<1	15,5	4,1	<1	<1	3,3	69,3	25,2	17161	33637	11031	4325
52	10,2	87,6	<0,1	14,6	76,0	11,7	0,14	<1	28,6	16,9	<1	<1	3,1	78,1	67,6	36550	35582	10919	3928
53	7,1	69,2	<0,1	12,9	73,5	10,8	0,11	<1	23,6	9,6	<1	<1	<1	79,3	56,0	30169	33901	10762	2924
54	7,0	122,0	<0,1	13,8	79,2	12,8	0,11	<1	30,0	8,4	<1	<1	<1	89,7	59,1	48225	35037	14737	5165
55	8,2	126,0	<0,1	16,4	76,8	16,2	0,16	<1	39,4	11,3	<1	<1	<1	90,7	75,0	46794	36680	13629	3867
56	11,0	144,0	<0,1	17,8	85,4	17,7	0,11	<1	43,1	10,0	<1	<1	<1	97,2	84,2	52515	38618	14494	4943

Tabel 6.2 (vervolg)



Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
57	7,4	131,0	<0,1	17,2	81,0	19,9	0,19	<1	43,3	11,5	<1	<1	<1	97,3	98,3	51222	39657	14103	3997
58	5,7	49,9	<0,1	6,9	56,6	4,7	<0,05	<1	13,3	4,0	<1	<1	<1	60,3	25,9	19678	28128	9284	74,5
59	7,0	45,2	<0,1	11,2	58,1	4,7	<0,05	<1	17,0	5,3	<1	<1	<1	86,3	33,3	18600	37377	9777	148
60	6,4	42,2	<0,1	10,6	63,7	5,9	0,16	<1	18,0	3,9	<1	<1	<1	77,4	36,9	2066	34318	8699	3643
61	7,6	47,6	<0,1	10,2	53,9	6,0	0,10	<1	19,4	4,1	<1	<1	<1	70,3	39,8	22747	30137	9014	3239
62	8,8	57,9	<0,1	12,2	67,3	8,9	0,12	<1	22,8	6,5	<1	<1	<1	81,0	44,0	25950	31894	8494	2776
63	7,6	65,2	<0,1	12,6	67,8	10,1	0,16	<1	24,8	29,5	<1	<1	<1	79,5	55,2	30325	36740	9631	5141
64	5,0	62,7	<0,1	10,5	58,7	8,6	0,14	<1	21,4	5,1	<1	<1	<1	64,8	44,2	25150	24889	8132	3161
65	6,5	114,0	<0,1	13,9	71,7	13,5	0,16	<1	32,9	10,7	<1	<1	<1	92,7	62,0	45470	38973	13182	4810
66	6,0	143,0	<0,1	15,2	81,8	13,9	0,18	<1	35,3	8,6	<1	<1	<1	104,0	67,6	53245	35280	15348	4511
67	9,5	167,0	0,10	18,7	88,4	19,5	0,81	<1	48,0	10,3	<1	<1	<1	116,0	94,0	62868	43758	17671	6145
68	8,8	209,0	<0,1	20,9	93,7	22,5	0,11	<1	55,5	12,2	<1	<1	<1	134,0	92,5	75574	46037	19724	4154
69	7,5	213,0	<0,1	18,6	95,5	23,6	0,11	<1	49,9	15,4	<1	<1	<1	153,0	102,0	78065	46401	21069	4353
70	12,8	197,0	0,13	22,8	92,9	29,7	0,22	<1	65,5	18,6	<1	<1	<1	161,0	103,0	77314	71662	20837	6596
71	5,3	55,8	<0,1	7,4	56,9	8,8	0,22	<1	16,1	9,4	<1	<1	2,1	74,5	41,4	22563	70276	8375	6493
72	6,7	106,0	<0,1	8,2	71,2	11,2	1,76	<1	25,1	8,6	<1	<1	1,2	90,5	55,6	45631	25265	12526	7806
73	12,1	111,0	<0,1	8,1	74,5	12,8	1,84	3,6	26,9	9,1	<1	<1	<1	93,4	59,5	51980	30226	13228	11121
74	3,0	58,3	<0,1	1,1	10,7	4,2	0,16	<1	2,6	16,8	<1	<1	<1	10,0	16,8	3061	4618	1184	1111
75	2,8	34,9	<0,1	<1	10,3	5,2	0,37	<1	2,7	20,9	<1	<1	<1	9,1	19,5	1965	5105	1104	1141
76	3,9	34,8	<0,1	1,7	13,3	4,8	0,29	1,0	3,5	12,2	<1	<1	<1	13,1	18,9	2903	7890	1821	1341
77	13,5	95,6	<0,1	7,6	70,6	11,6	1,20	1,7	23,2	11,7	<1	<1	<1	92,6	52,0	40462	26638	10780	7453
78	6,9	54,7	<0,1	7,8	75,9	4,5	0,43	<1	15,2	4,5	<1	<1	<1	63,4	32,6	14566	27480	9032	1930
79	3,1	39,2	<0,1	5,4	67,4	3,0	0,1	<1	9,5	2,5	<1	<1	<1	58,4	23,3	11996	23956	7834	684
80	1,7	33,9	<0,1	2,2	106,3	15,8	1,54	1,4	9,6	6,7	<1	6,9	<1	91,1	8,2	50646	25306	1392	27309
81	19,1	56,9	0,12	23,3	53,9	4,7	0,66	0,7	94,6	7,8	<1	<1	<1	77,9	28,1	40238	21799	6399	2753
82	4,5	64,9	<0,1	3,7	27,7	3,7	0,32	<1	7,2	6,7	<1	<1	<1	24,5	26,6	7508	13508	3052	3109
83	2,0	51,2	<0,1	4,7	49,3	4,5	0,64	<1	11,4	5,8	<1	<1	<1	62,9	35,0	26677	16897	6845	2019
84	7,0	70,5	<0,1	8,5	82,4	8,2	0,42	1,0	20,2	6,9	<1	<1	2,6	76,9	44,6	27797	28179	11355	9069

Tabel 6.2 (vervolg)

Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
85	3,7	111,0	<0,1	13,2	76,9	13,3	0,44	<1	34,0	10,4	<1	<1	<1	94,6	68,8	51446	32071	14728	5752
86	10,0	93,6	0,14	22,9	138,0	18,9	0,91	<1	49,3	14,6	<1	<1	2,2	147,0	254,0	50628	65995	25237	6644
87	2,6	19,3	0,15	5,6	22,3	8,2	0,39	<1	8,4	4,1	<1	<1	<1	24,4	24,6	10710	9515	2912	5750
88	6,5	32,3	<0,1	5,3	43,3	4,4	<0,05	<1	10,2	4,1	<1	<1	<1	49,5	25,8	14616	23420	6757	4754
89	4,7	23,3	<0,1	3,9	24,7	1,9	<0,05	<1	7,0	2,5	<1	<1	<1	34,1	16,0	8373	12361	4587	2052
90	4,5	21,7	<0,1	6,3	38,4	2,0	<0,05	<1	8,2	2,8	<1	<1	<1	51,5	22,6	10681	20902	7151	1711
91	6,2	30,9	<0,1	6,3	33,2	2,9	<0,05	<1	10,2	3,5	<1	<1	<1	48,6	27,3	13062	18622	6337	2509
92	5,8	25,1	<0,1	7,5	48,8	2,8	<0,05	<1	11,5	3,4	<1	<1	<1	53,2	31,4	13695	27789	8877	2422
93	3,1	11,3	<0,1	3,5	33,2	1,3	<0,05	<1	5,5	1,7	<1	<1	<1	30,3	14,3	7825	17541	5834	2635
94	8,9	27,3	<0,1	4,8	45,3	3,3	<0,05	<1	11,0	4,3	<1	<1	<1	45,3	20,9	15320	25404	6922	9091
95	3,9	9,6	<0,1	4,5	28,7	1,4	<0,05	<1	5,7	3,8	<1	<1	<1	44,9	13,3	6278	19683	6422	390
96	10,9	59,6	<0,1	11,1	56,6	5,6	<0,05	<1	19,2	7,5	<1	<1	<1	74,2	39,4	23949	30735	10379	8056
97	5,6	38,8	<0,1	9,0	50,8	3,9	<0,05	<1	12,8	5,6	<1	<1	<1	59,4	30,1	17756	25862	8431	2994
98	9,7	178,0	<0,1	18,2	88,5	11,9	<0,05	<1	40,8	13,0	<1	<1	<1	133,0	80,3	70130	43898	19020	8642
99	9,5	193,0	<0,1	15,7	95,8	12,9	<0,05	<1	3,0	13,6	<1	<1	<1	150,0	80,3	78725	45005	20618	5447
100	5,4	23,7	<0,1	7,7	62,3	3,6	<0,05	<1	10,7	3,2	<1	<1	<1	79,9	25,6	12522	26557	8851	1467
101	12,2	67,4	<0,1	6,7	70,7	10,8	<0,05	4,0	23,6	6,0	<1	2,0	<1	77,7	43,1	33895	43845	12194	19630
102	24,8	126,0	<0,1	8,8	94,0	23,4	0,11	<1	57,8	11,0	<1	3,3	1,3	115,0	64,0	58000	63749	13725	67023
103	17,7	121,0	0,12	9,5	109,0	24,6	0,06	4,7	42,2	10,0	<1	2,0	<1	113,4	70,8	56512	34682	13867	15169
104	17,9	124,0	0,24	12,0	98,1	20,6	0,06	2,8	39,6	13,8	<1	<1	<1	122,0	76,0	62211	38958	15792	14003
105	10,7	115,0	<0,1	11,2	78,4	16,6	<0,05	<1	40,1	11,4	<1	<1	<1	97,3	69,3	53273	35388	13226	16785
106	8,2	109,0	<0,1	11,1	73,5	13,8	<0,05	<1	39,9	9,9	<1	<1	<1	93,0	73,2	51780	30034	13622	9189
107	8,3	53,3	<0,1	7,1	45,1	8,1	<0,05	<1	19,9	6,5	<1	<1	<1	55,3	42,2	25715	20428	7122	7260
108	8,8	55,4	<0,1	6,8	44,9	7,6	<0,05	<1	17,6	5,7	<1	<1	<1	56,9	40,1	26035	20917	7451	6000
109	9,5	31,2	<0,1	5,2	36,5	4,7	<0,05	<1	11,1	3,7	<1	<1	<1	49,9	26,1	16540	17636	6019	3161
110	14,7	51,9	<0,1	8,1	64,2	8,3	<0,05	<1	18,5	6,8	<1	<1	<1	91,7	41,5	27664	31805	11279	6529
111	16,4	57,1	<0,1	7,5	78,9	8,0	<0,05	<1	17,9	6,8	<1	<1	<1	113,0	44,1	30216	39300	15155	5440
112	7,7	22,8	<0,1	3,3	31,7	3,0	<0,05	2,0	7,0	2,7	<1	1,1	<1	48,4	19,1	10288	15354	5412	3095

Tabel 6.2 (vervolg)



Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
113	13,1	34,2	<0,1	5,8	59,4	5,3	<0,05	<1	11,3	5,3	<1	<1	<1	93,0	33,1	17528	44000	15319	7319
114	10,5	108,0	<0,1	9,6	66,0	10,5	<0,05	<1	23,3	10,6	<1	<1	<1	91,9	51,7	43056	31762	15328	9442
115	9,4	41,5	<0,1	4,5	44,8	5,3	<0,05	<1	11,5	4,1	<1	<1	<1	71,5	27,8	17611	21003	7947	3986
116	10,9	29,4	<0,1	4,0	43,4	4,1	<0,05	<1	9,5	2,9	<1	<1	<1	75,0	23,0	12844	20386	7293	3755
117	6,9	23,3	<0,1	5,1	53,2	3,1	<0,05	<1	9,1	3,1	<1	<1	<1	50,5	24,6	10590	26550	9293	2900
118	3,3	11,3	<0,1	1,9	22,5	1,6	<0,05	<1	4,4	1,6	<1	1,0	<1	21,9	9,7	3985	8178	2700	2303
119	6,3	43,8	<0,1	4,3	34,3	5,3	<0,05	<1	11,2	3,9	<1	1,2	<1	39,9	31,6	17658	14601	5260	4270
120	8,4	31,6	<0,1	4,1	28,1	3,8	<0,05	<1	8,9	4,0	<1	1,2	<1	33,7	23,7	12046	13647	3900	3884
121	6,4	39,8	<0,1	4,4	28,0	4,4	<0,05	<1	11,2	5,6	<1	<1	<1	39,9	26,5	15653	13227	4947	3570
122	6,7	44,4	0,08	3,9	32,0	4,9	<0,05	<1	10,2	5,0	<1	1,2	<1	44,8	28,5	19532	16383	6337	5387
123	5,5	28,3	<0,1	2,7	24,6	3,7	<0,05	<1	7,2	3,3	<1	<1	<1	32,9	19,6	12300	10953	3737	2857
124	12,2	22,9	<0,1	7,4	50,9	4,4	<0,05	<1	9,3	4,2	<1	<1	<1	58,6	28,2	14328	27950	8937	4895
125	17,7	27,8	<0,1	5,6	51,9	4,0	<0,05	<1	9,8	5,2	<1	<1	<1	121,0	24,6	14259	43921	15083	5962
126	15,7	62,5	<0,1	10,3	78,1	6,6	<0,05	<1	18,6	8,9	<1	<1	<1	112,0	42,6	29564	46722	18973	5809
127	6,5	22,4	<0,1	3,3	39,2	3,2	<0,05	<1	8,0	4,3	<1	1,0	<1	39,4	21,2	9836	19186	6934	3329
128	20,3	10,8	0,32	3,3	72,5	3,6	<0,05	<1	9,5	3,0	<1	<1	<1	56,4	26,2	20472	52028	20528	1731
129	15,4	12,7	0,11	2,7	78,1	4,1	0,06	5,9	11,6	3,8	<1	<1	<1	49,4	36,3	22861	58262	25311	3812
130	13,3	27,6	<0,1	3,3	68,3	5,6	0,06	11,3	15,3	2,0	<1	<1	<1	44,7	44,0	21895	46661	18960	4693
131	15,8	42,0	<0,1	4,3	84,2	6,4	0,4	2,7	18,8	4,6	<1	<1	<1	62,3	59,7	29195	68948	26555	7517
132	16,2	113,0	0,10	8,5	95,7	18,1	0,13	14,1	39,1	9,4	<1	<1	<1	101,0	79,6	56197	51440	21906	14094
133	10,9	50,4	<0,1	8,1	46,4	7,1	<0,05	<1	16,7	4,8	<1	<1	<1	57,4	39,1	23465	23983	8138	8253
134	11,8	37,7	<0,1	8,4	52,9	5,1	<0,05	<1	12,8	4,6	<1	<1	<1	65,4	33,9	19063	28328	9351	6074
135	8,9	23,3	<0,1	7,7	53,3	3,3	<0,05	<1	8,5	3,3	<1	<1	<1	62,1	25,9	14511	26894	9540	1976
136	9,9	26,0	<0,1	7,9	57,2	3,7	<0,05	<1	9,1	2,4	<1	<1	<1	62,2	27,9	15482	27288	9862	2097
137	9,5	29,8	<0,1	7,7	78,0	6,1	<0,05	<1	12,4	3,1	<1	<1	<1	84,7	32,8	17784	34206	11243	2969
138	16,9	23,2	<0,1	5,5	77,7	5,1	<0,05	<1	9,7	2,9	<1	<1	<1	101,0	27,4	15205	48000	15707	9771
139	8,2	22,4	<0,1	4,6	41,3	3,5	<0,05	<1	7,8	1,6	<1	<1	<1	66,2	20,5	11096	20871	7557	3859

Tabel 6.2 (vervolg)

Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
140	11,2	73,3	<0,1	8,4	56,6	7,9	<0,05	<1	22,5	8,1	<1	<1	<1	71,6	41,6	29761	31448	10879	12189
141	14,4	102,0	<0,1	9,6	66,5	9,4	<0,05	<1	23,8	9,6	<1	<1	<1	108,0	53,3	46006	33320	15216	12820
142	10,8	31,5	<0,1	4,6	51,6	4,7	<0,05	<1	10,2	3,7	<1	<1	<1	75,2	25,4	16901	29400	9851	6105
143	11,1	79,8	<0,1	8,1	64,0	9,4	<0,05	<1	20,8	21,4	<1	<1	<1	92,0	44,8	39030	35204	14149	11034
144	10,3	97,0	<0,1	9,2	66,0	10,7	<0,05	<1	26,9	10,0	<1	<1	<1	93,2	49,7	43691	31027	14115	6859
145	7,0	41,3	<0,1	5,5	64,1	7,1	<0,05	<1	14,1	3,3	<1	<1	<1	78,4	29,1	20164	24911	9176	5621
146	19,4	125,0	<0,1	13,4	86,2	13,8	<0,05	<1	35,0	14,6	<1	<1	<1	147,0	67,6	59130	39177	18974	9960
147	9,0	75,2	<0,1	12,8	67,4	8,3	<0,05	<1	28,3	9,4	<1	<1	<1	85,0	51,8	36204	37550	15817	9128
148	16,6	14,4	0,15	4,6	65,0	2,7	<0,05	3,1	11,2	2,3	<1	<1	<1	62,4	23,1	10007	38341	14144	6043
149	1,8	11,5	0,10	2,1	30,8	2,4	<0,05	<1	5,2	1,1	<1	<1	<1	20,3	12,7	4697	6446	2479	397
150	14,7	10,0	0,14	3,6	45,6	1,3	<0,05	1,2	7,8	1,6	<1	<1	<1	24,3	17,1	6325	19469	6884	2351
151	3,9	13,9	<0,1	1,7	28,8	1,0	<0,05	<1	4,0	1,2	<1	1,1	<1	16,8	10,3	4151	10586	3743	1617
152	4,5	19,0	<0,1	2,7	32,4	1,2	<0,05	1,2	5,8	0,7	<1	<1	<1	24,6	14,3	5934	16085	5173	4367
153	7,4		<0,1	6,6	63,7	4,1	<0,05	<1	11,5	3,0	<1	<1	<1	53,4	28,1	10877	25374	6863	10806
154	6,2	69,7	<0,1	7,0	34,1	9,5	<0,05	<1	17,1	6,2	<1	<1	<1	40,4	33,5	18134	18010	5008	493
155	1,0	11,3	<0,1	1,2	11,1	1,1	<0,05	<1	2,9	1,5	<1	<1	<1	8,5	6,3	3294	3477	1090	34,9
156	2,1	16,6	<0,1	2,4	15,5	2,4	<0,05	<1	4,1	2,4	<1	<1	<1	16,5	9,1	5366	7125	1874	21,7
157	2,2	9,3	<0,1	3,6	28,7	<1	<0,05	<1	4,3	<1	<1	<1	<1	31,8	12,1	5419	15246	4756	356
158	1,3	11,8	<0,1	1,8	12,4	1,1	<0,05	<1	3,4	1,3	<1	<1	<1	10,4	6,7	3521	4173	1334	126
159	3,1	7,4	<0,1	1,7	14,5	0,9	<0,05	<1	3,2	1,3	<1	<1	<1	16,8	9,7	3057	17534	2783	277
160	9,1	95,2	0,33	8,4	39,2	18,6	0,07	<1	18,5	33,7	<1	<1	<1	56,6	73,4	22320	20658	5524	188
161	1,9	8,0	<0,1	0,8	4,7	<1	<0,05	<1	1,7	0,7	<1	<1	<1	5,4	4,6	1984	1901	815	669
162	0,4	12,9	<0,1	0,8	7,2	0,9	<0,05	<1	1,7	1,5	<1	<1	<1	7,5	6,1	4683	1902	918	35,3
163	17,8	40,8	<0,1	4,1	26,9	4,1	<0,05	<1	9,9	5,7	<1	<1	<1	49,8	24,4	17277	12639	5267	94,2
164	20,7	44,2	0,12	6,4	41,4	4,6	<0,05	<1	11,7	14,4	<1	<1	<1	56,4	34,5	22499	33777	7166	4579
165	34,5	44,0	<0,1	6,6	54,5	5,1	0,05	<1	12,3	18,5	<1	<1	<1	72,6	40,1	23671	49861	10873	6915
166	26,1	42,4	<0,1	5,9	68,0	4,3	<0,05	<1	12,4	9,5	<1	<1	<1	85,3	38,3	23676	51084	15522	5418
167	15,1	5,5	<0,1	3,1	89,4	1,5	<0,05	<1	6,5	4,2	<1	<1	<1	77,2	24,7	16783	68685	25668	290

Tabel 6.2 (vervolg)



Nr.	As	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	V	Zn	Al	Fe	K	S
168	16,1	6,4	<0,1	3,8	88,2	2,1	<0,05	<1	8,1	5,7	<1	<1	<1	80,5	28,3	15455		21637	373
169	16,0	6,8	<0,1	5,1	121,0	2,6	<0,05	<1	9,9	5,1	<1	<1	<1	80,3	38,7	22669	80646	35308	1037
170	11,1	56,2	<0,1	6,7	73,9	7,0	<0,05	3,6	20,8	5,6	<1	<1	<1	62,9	48,5	29536	39536	17225	8731
171	1,4	19,4	<0,1	1,4	17,7	2,6	<0,05	<1	5,2	2,8	<1	<1	<1	15,9	13,2	5835	6116	2001	181
172	17,3	150,0	<0,1	14,5	91,4	15,5	<0,05	<1	35,8	10,6	<1	<1	<1	1,4	77,7	66404	41745	20600	10195
173	7,9	112,0	<0,1	13,7	81,5	10,9	<0,05	<1	30,7	9,6	<1	<1	<1	105,0	61,4	51456	37043	18884	4826
174	7,0	40,9	<0,1	7,4	51,0	5,7	<0,05	<1	14,5	5,7	<1	<1	<1	57,7	31,5	18759	25178	9739	5483
175	9,0	14,7	<0,1	5,0	49,7	2,9	<0,05	<1	8,8	2,5	<1	<1	<1	51,0	27,0	8697	26010	9857	3783
176	12,2	13,0	<0,1	4,7	53,2	2,6	<0,05	2,0	9,8	2,6	<1	<1	<1	56,5	23,7	8705	32207	11891	6179
177	7,5	10,8	<0,1	3,4	41,5	2,0	<0,05	<1	7,4	1,9	<1	<1	<1	42,0	19,2	6733	20979	7500	2880
178	6,9	13,0	<0,1	3,5	40,9	2,4	<0,05	1,0	7,9	2,1	<1	<1	<1	46,6	15,9	7204	19442	7312	3684
179	7,3	21,4	<0,1	5,5	33,7	2,8	<0,05	1,1	9,5	3,8	<1	<1	<1	44,0	20,7	10899	17847	7140	3985
180	4,8	24,0	<0,1	6,0	41,9	2,2	<0,05	<1	10,2	2,9	<1	<1	<1	44,4	19,9	11670	20613	8548	2171
181	1,6	6,3	<0,1	1,6	13,1	0,6	<0,05	<1	3,4	0,9	<1	<1	<1	16,2	11,2	3735	7971	4747	1187
182	4,5	7,7	<0,1	2,8	31,8	1,4	<0,05	<1	5,2	1,8	<1	<1	<1	37,3	12,8	6603	19503	6602	3946
183	5,0	11,6	<0,1	5,0	38,2	1,6	<0,05	<1	7,7	2,7	<1	<1	<1	41,7	15,8	8623	22126	7564	2720
184	5,3	25,9	<0,1	7,4	52,8	2,5	<0,05	<1	11,5	6,8	<1	<1	<1	61,3	26,5	14119	28208	9774	3581
185	6,7	30,6	<0,1	7,4	54,7	3,3	<0,05	<1	13,3	3,9	<1	<1	<1	61,9	28,1	15980	28987	9372	4691
186	9,9	26,3	<0,1	9,8	62,0	3,1	<0,05	<1	13,8	6,0	<1	<1	<1	91,6	27,8	14959	38658	13427	4609
187	5,8	23,1	<0,1	7,2	42,3	3,0	<0,05	<1	12,1	3,4	<1	<1	<1	55,7	24,8	11369	21457	7118	2870

Tabel 6.2 (vervolg)

Nummer	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Al	Fe	K	S
BRA10	9,9	85,0	8,8	38,4	17,8	17,7	37,8	48,5	77,6	21200	17600	4110	210
BRA 36	7,0	73,9	9,4	37,0	8,3	22,5	5,7	41,9	32,0	20900	18100	3790	16
LIM 64	6,1	59,1	6,2	30,2	5,7	13,5	< 5	33,2	25,4	17300	13300	3350	86
LIM 65	6,1	52,8	6,5	29,9	6,4	14,6	< 5	33,5	23,6	16300	14100	3270	110
LIM 66	6,8	67,4	7,0	31,1	8,2	16,0	< 5	36,4	28,6	19100	15000	3890	66
LIM 70	6,3	61,7	6,3	30,7	7,3	14,2	< 5	35,1	27,9	18200	14400	3860	80
OVL 02A	5,4	55,4	6,7	27,3	7,1	14,1	< 5	32,5	27,9	16200	13500	3250	77
OVL 02B	7,6	67,0	8,2	33,8	8,8	19,6	< 5	39,7	32,6	19400	16800	3220	34
OVL 03	7,7	65,9	8,5	37,2	10,1	26,0	5,5	41,3	178,7	20800	18100	4000	44
OVL 17	6,1	56,2	6,3	32,3	5,9	14,0	< 5	36,0	27,7	17500	14900	3090	71
OVL 18	8,7	73,5	8,4	36,1	8,7	21,9	< 5	41,6	29,8	20640	17900	3760	40
OVL 20	7,4	76,7	8,3	35,5	8,0	17,6	6,8	38,4	37,0	20900	16400	3650	160
OVL 21A	6,1	63,3	6,7	32,0	6,4	15,3	< 5	35,3	22,7	16900	14700	3200	91
OVL 21B	7,3	74,5	8,4	35,2	7,6	18,9	< 5	39,7	29,2	19700	16100	3170	82
OVL 25	8,7	93,6	9,0	40,5	9,9	22,7	5,5	45,4	35,6	23600	19000	4180	62
WVL 31	< 5	8,4	0,8	6,3	< 0,5	2,5	< 5	5,2	< 2	2300	2110	510	210
WVL 02	15,1	90,0	11,5	60,1	6,8	25,1	8,5	77,1	54,2	36400	22500	9010	3890
BRA 12A	< 5	5,3	2,4	8,3	< 0,5	3,0	< 5	8,8	< 2	1720	4190	560	140
BRA 12B	< 5	3,9	1,3	10,5	< 0,5	2,4	< 5	9,0	< 2	1900	6890	1190	200
BRA 12C	8,8	54,9	7,4	32,5	4,1	10,9	< 5	34,1	22,0	13800	3170	3175	1500
OVL 06A	< 5	14,9	2,2	13,6	1,2	4,0	< 5	13,8	2,2	4500	5790	870	31
OVL 35	< 5	22,5	2,4	18,6	2,3	4,9	< 5	13,3	28,6	5290	4940	1110	120
OVL 40	< 5	11,3	1,4	10,4	0,9	3,1	< 5	8,4	4,0	2950	3540	610	63
OVL 41	< 5	9,9	1,5	9,5	0,7	3,0	< 5	8,7	< 2	2970	3510	650	79
OVL 73	< 5	12,3	0,7	8,0	0,6	2,5	< 5	4,5	< 2	2990	1740	420	31
OVL 74	< 5	10,4	1,1	11,5	0,8	2,7	< 5	7,1	< 2	3020	3060	600	25
OVL 01	16,9	119,6	12,0	59,1	10,2	25,1	12,2	66,1	54,8	32300	41800	2360	340
ANT 17A	< 5	10,2	0,5	6,2	< 0,5	1,8	< 5	4,8	< 2	4000	1530	270	55
ANT 21A	10,0	58,9	4,3	34,1	4,5	8,5	< 5	50,9	20,1	25100	10800	3630	700
ANT 30A	6,9	29,2	2,6	16,8	1,6	5,5	< 5	23,9	9,7	10500	6160	1670	63
ANT 34A	< 5	9,3	0,4	5,5	< 0,5	< 1	< 5	5,3	< 2	3370	1510	310	31
ANT 37A	< 5	7,9	0,4	4,9	1,1	1,2	< 5	6,1	< 2	2670	1580	320	150
ANT 17B	7,1	110,0	16,0	64,6	13,9	53,3	12,3	84,0	150,0	47600	19700	7430	1340
ANT 21B	27,5	120,0	13,1	76,8	9,7	30,6	15,7	120,0	82,9	50200	27700	10000	16900
ANT 30B	< 5	83,0	2,2	40,0	1,7	11,1	15,1	26,1	2,5	28300	2760	2630	220
ANT 34B	23,7	99,3	12,9	65,5	9,0	30,4	9,9	90,0	68,9	43600	21500	8590	3590
ANT 37B	20,0	86,8	10,0	57,0	7,1	23,6	9,0	78,3	62,3	37600	20400	6580	6180
ANT 42A	< 5	9,1	3,1	16,6	< 0,5	3,4	< 5	20,5	7,0	3130	4890	830	220
ANT 42B	< 5	10,4	2,6	16,2	< 0,5	2,6	< 5	19,7	11,3	3850	5810	1170	150
BRA 84	26,1	6,6	8,7	81,9	< 0,5	8,7	6,1	81,7	33,0	16700	44100	10300	38
ANT 09B	11,5	23,7	6,5	56,7	2,1	11,4	< 5	49,5	37,8	16000	26200	8120	6470
BRA 26A	6,9	22,4	2,6	23,7	2,6	3,8	5,4	28,1	8,6	9020	12300	1700	210

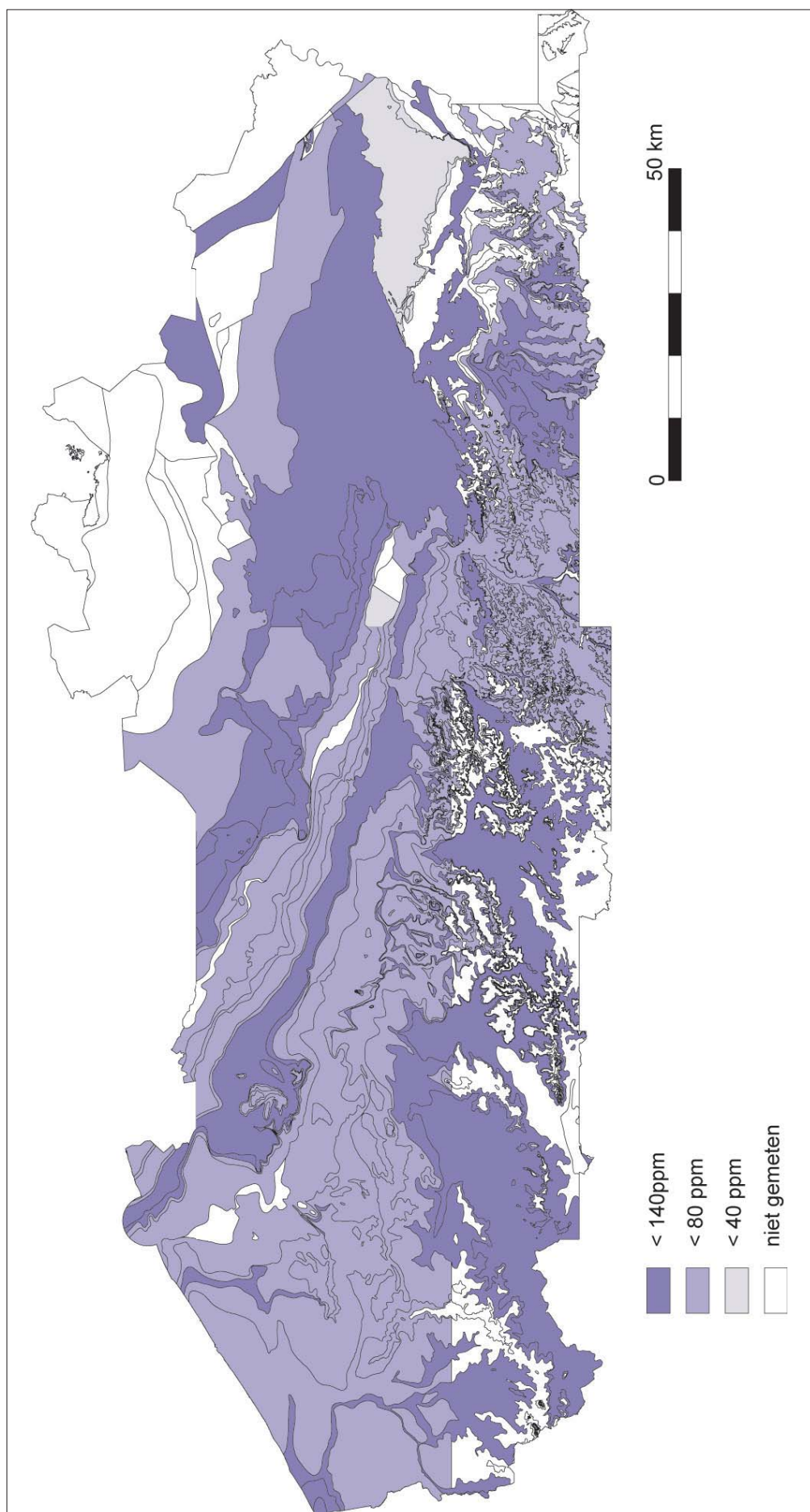
Tabel 6.3: Gegevens uit ontginningsgebieden (ppm)



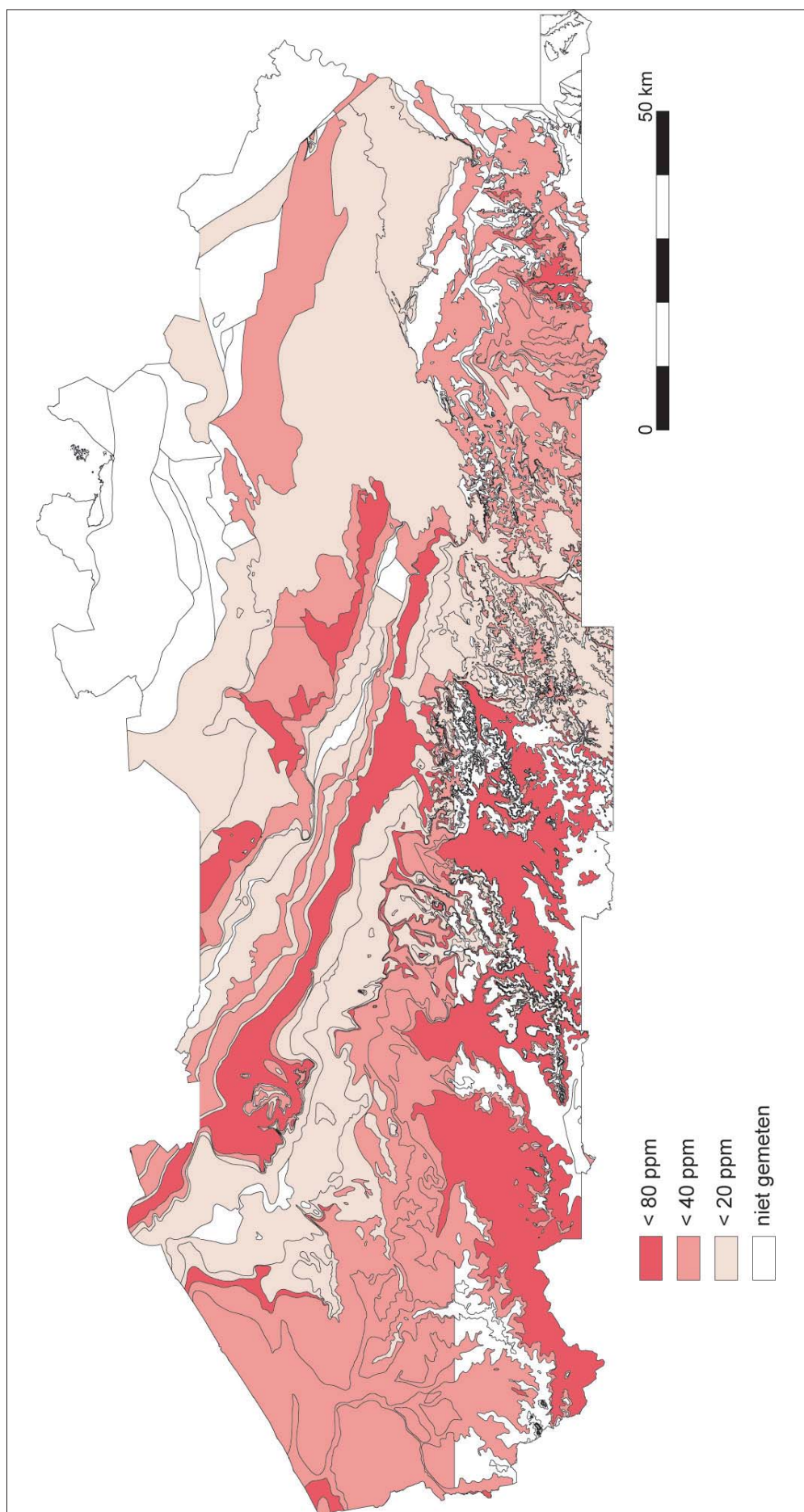
Nummer	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Al	Fe	K	S
BRA 31	6,9	15,4	1,9	11,1	1,2	3,5	< 5	12,7	5,1	5110	3910	670	24
ANT 03	11,3	90,5	11,4	109,9	24,1	42,9	12,7	100,2	69,7	45100	36900	11200	15200
ANT 09A	7,4	93,5	10,6	81,1	15,6	31,0	15,6	94,1	66,3	50500	24800	11300	8780
BRA 26D	7,0	52,4	7,7	53,4	7,6	21,6	9,7	54,2	49,3	29900	21400	6360	10400
OVL 67	7,4	72,0	10,9	63,1	11,8	25,5	12,8	73,0	63,1	40300	23500	8550	8130
OVL 69	11,0	100,0	11,4	92,4	22,5	40,4	13,7	91,8	75,5	51700	28800	11300	11800
OVL 79	18,2	97,1	12,6	91,2	26,2	41,7	20,5	110,0	100,0	47400	33900	11700	21400
BRA 26B	< 5	16,0	1,2	13,6	1,8	2,9	< 5	17,3	8,1	5470	4720	1200	380
BRA 18	< 5	6,2	1,4	6,0	0,5	2,0	< 5	8,6	3,1	1880	5140	680	57
BRA 26C	< 5	1,6	0,2	2,2	< 0,5	< 1	< 5	2,4	< 2	630	570	81	14
BRA 28	< 5	9,2	0,8	7,3	0,8	2,8	< 5	8,0	6,3	4070	2090	570	10
BRA 35	5,7	20,1	4,3	30,3	1,6	5,8	< 5	41,6	13,9	9370	17600	4210	210
BRA 83	20,7	6,7	2,0	47,9	0,8	3,7	< 5	31,5	12,4	7360	8830	750	48
BRA 04B	< 5	3,4	0,3	2,3	< 0,5	< 1	< 5	2,7	< 2	840	670	110	19
BRA 13A	< 5	6,9	0,9	17,5	0,9	2,9	< 5	13,8	4,5	1440	3070	470	13
OVL 22	< 5	7,1	3,1	22,9	0,7	3,6	< 5	22,0	5,8	3940	13400	3250	210
BRA 04A	< 5	16,1	2,2	23,5	1,6	4,4	< 5	15,3	10,9	2880	6460	1920	280
BRA 13B	< 5	17,7	2,2	31,6	1,6	6,0	< 5	24,2	9,6	4100	6470	1520	140
BRA 14	< 5	11,1	3,3	46,4	1,3	7,5	< 5	26,1	18,0	4660	12100	2210	14
BRA 16	< 5	4,8	4,7	72,4	< 0,5	9,7	< 5	22,6	11,3	5020	16400	5560	13
BRA 17	< 5	6,0	3,5	51,0	0,7	7,1	< 5	17,1	7,7	3710	12100	3230	7
BRA 19	< 5	13,1	1,9	30,9	1,2	5,2	< 5	16,6	6,7	3610	8170	1410	32
BRA 21	< 5	12,5	2,1	33,4	1,0	5,9	< 5	16,5	7,7	3650	7680	1500	42
BRA 22	< 5	4,5	3,5	36,0	0,9	9,3	< 5	16,1	26,6	4300	11800	4110	34
OVL 06B	< 5	5,0	3,3	19,9	< 0,5	5,9	< 5	22,2	19,0	4140	12500	3450	11
OVL 07	< 5	8,1	3,0	18,3	1,3	6,2	< 5	20,0	25,8	5050	8000	1220	25
OVL 51	< 5	8,3	4,6	29,0	0,6	6,2	< 5	31,6	16,5	5630	14900	3610	300
OVL 57	< 5	5,6	6,5	26,4	0,9	6,5	< 5	28,5	28,8	5360	16100	3940	51
WVL 10	9,5	110,0	13,2	77,4	11,6	28,4	22,6	92,4	119,9	48800	32700	12700	11000
WVL 12B	< 5	22,9	12,7	33,3	7,6	22,7	10,8	26,6	60,2	18100	18300	5180	4690
WVL 15	36,4	63,1	11,7	82,4	18,7	23,7	18,5	92,2	58,1	32400	45700	6200	260
WVL 16	< 5	38,7	3,6	29,5	2,9	11,4	< 5	26,0	19,0	11200	10600	1970	22
WVL 23	7,4	196,6	20,6	97,4	14,3	49,5	18,6	128,4	104,7	73400	34900	18800	5790
WVL 42	9,8	155,5	23,7	95,6	34,3	49,3	27,7	130,0	140,0	68100	34100	16900	3910
WVL 48	5,3	4,9	15,1	14,6	10,5	31,5	6,1	8,7	71,8	9120	10100	1820	2790
WVL 49A	8,9	23,2	14,3	90,6	4,1	22,6	9,1	68,9	68,6	20300	37400	10600	25
WVL 49B	10,7	220,0	18,5	97,1	15,1	42,1	23,2	110,4	120,0	63900	30300	15600	450
WVL 52	7,0	95,9	10,9	50,6	9,1	24,7	8,8	57,3	48,8	30000	20000	6200	17
WVL 63A	< 5	71,8	7,5	48,8	7,2	17,6	10,9	19,8	47,9	27200	23000	5290	13
WVL 63B	8,4	147,1	15,6	78,6	13,1	37,0	16,8	100,0	80,7	59400	26800	14400	2860
OVL 77	< 5	10,9	2,2	12,3	1,1	4,3	< 5	7,5	16,9	3720	5950	1290	< 2
BRA 82	16,9	12,9	6,5	76,2	0,9	12,6	11,4	62,3	44,6	23200	51400	28800	300
BRA 85	22,6	24,2	9,0	110,0	1,0	17,4	12,7	110,0	52,7	22400	51100	21500	94

Tabel 6.3 (vevolg)

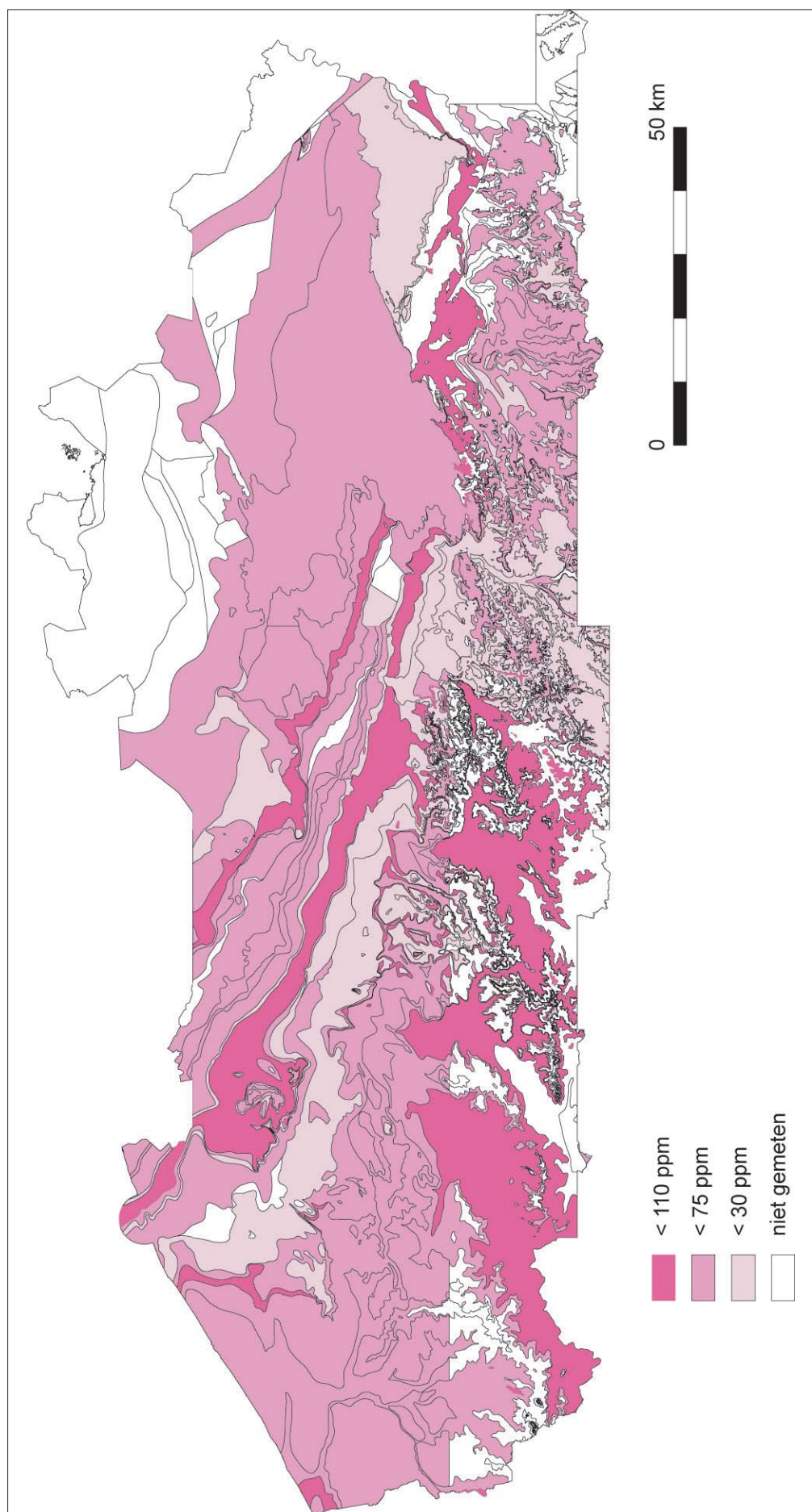




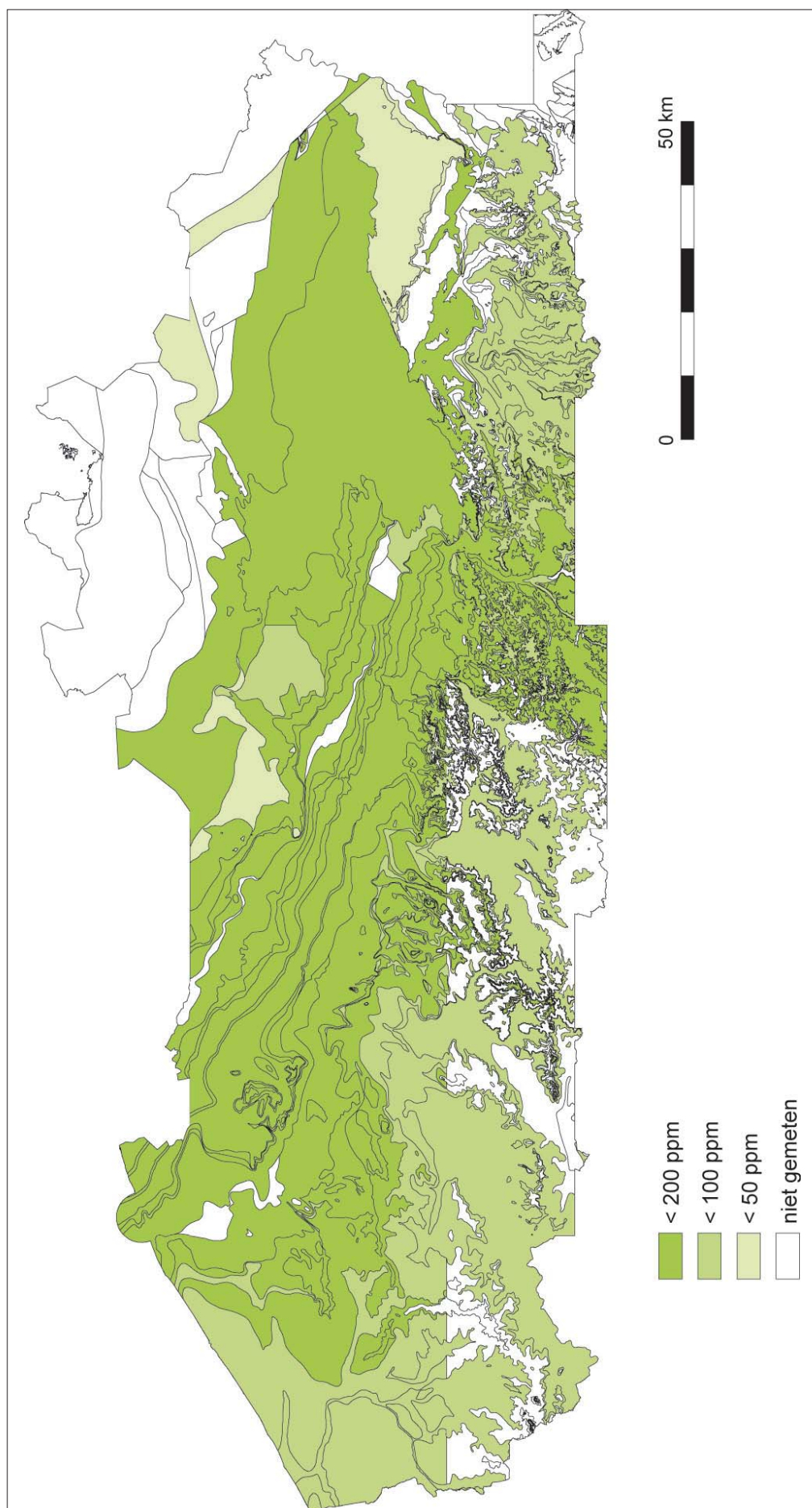
Afb. 6.2: Chroom in het tertiair



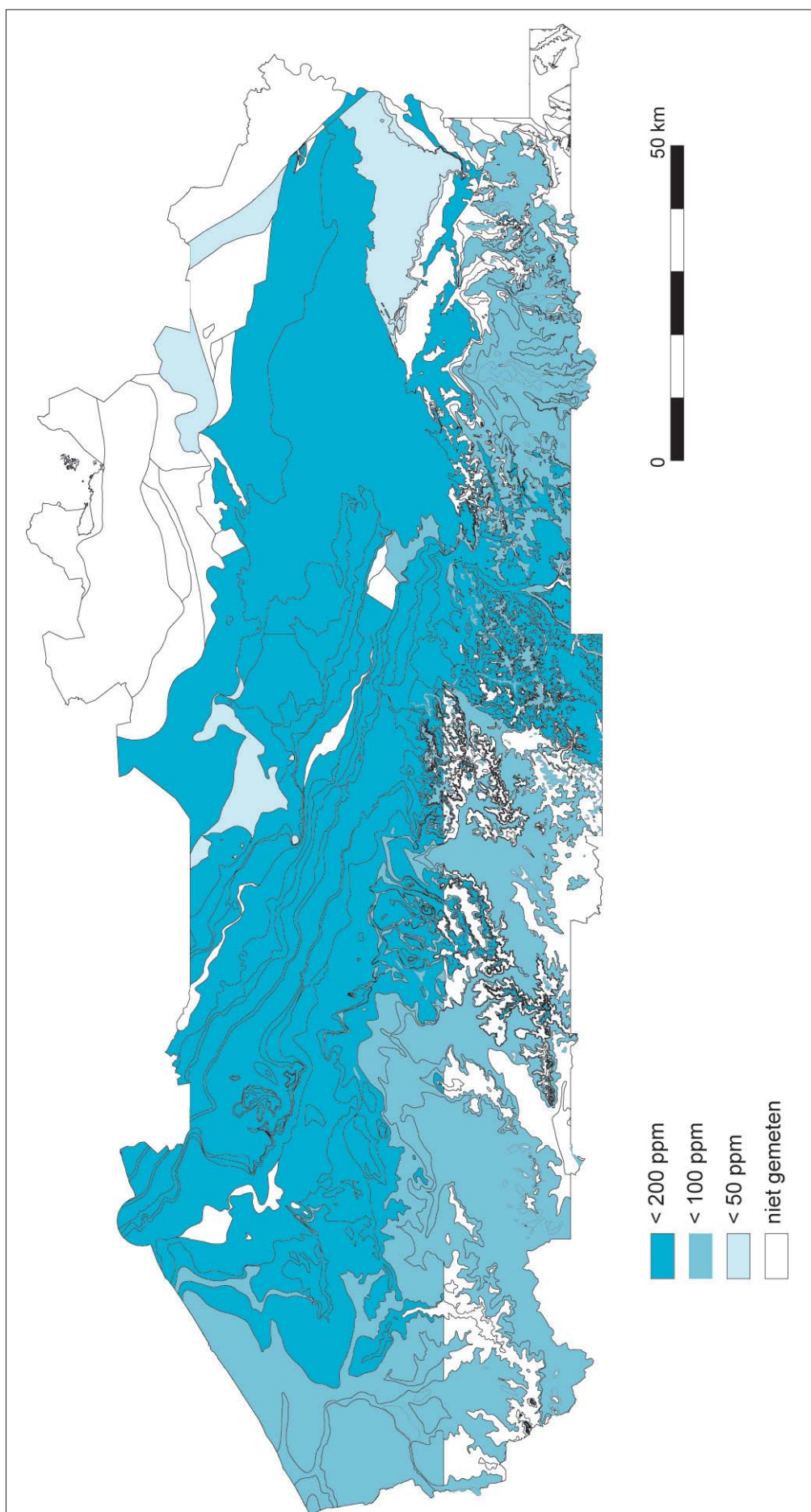
Afb. 6.2: Nikkel in het tertiair



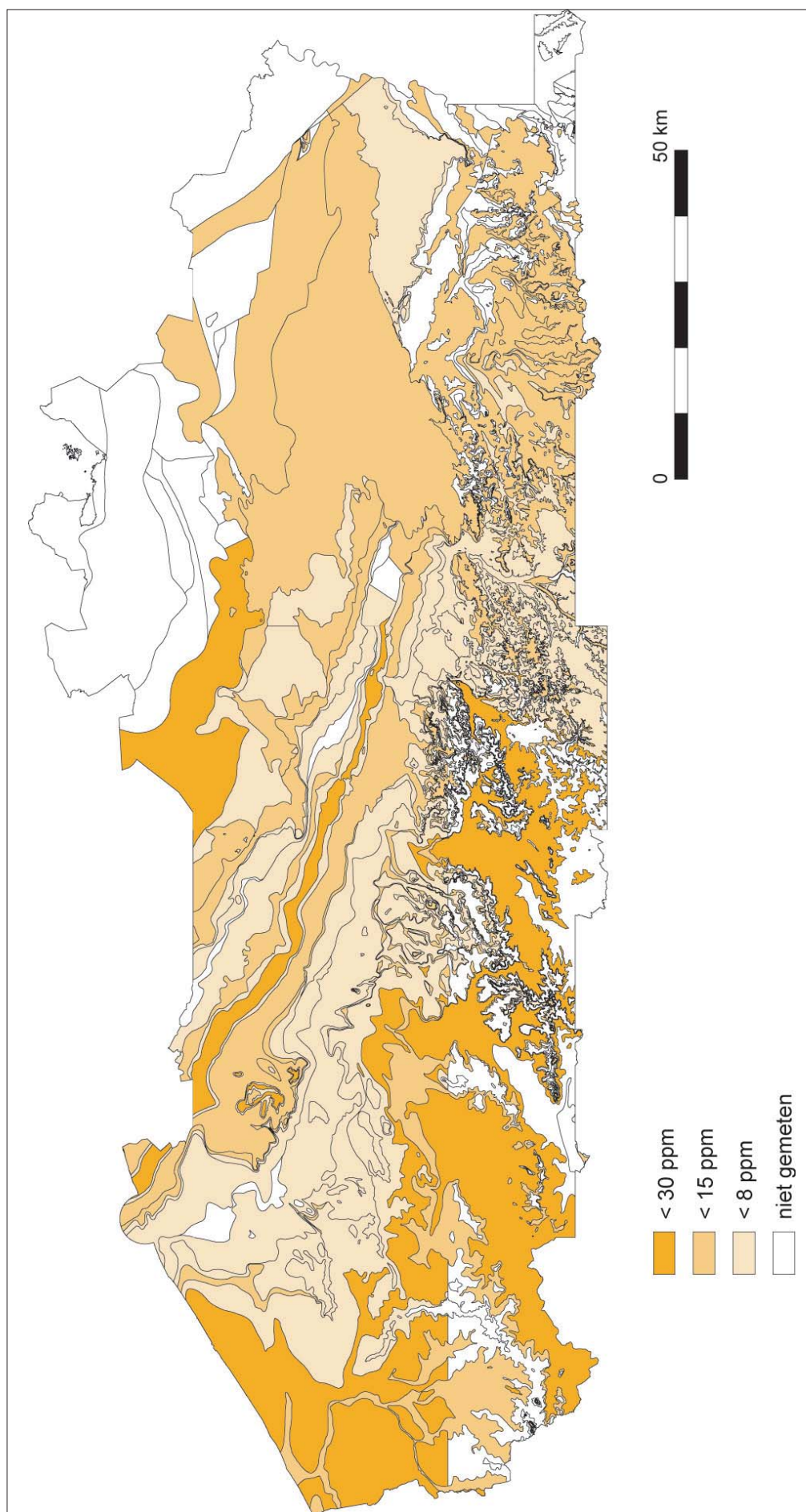
Afb. 6.2: Zink in het tertiair



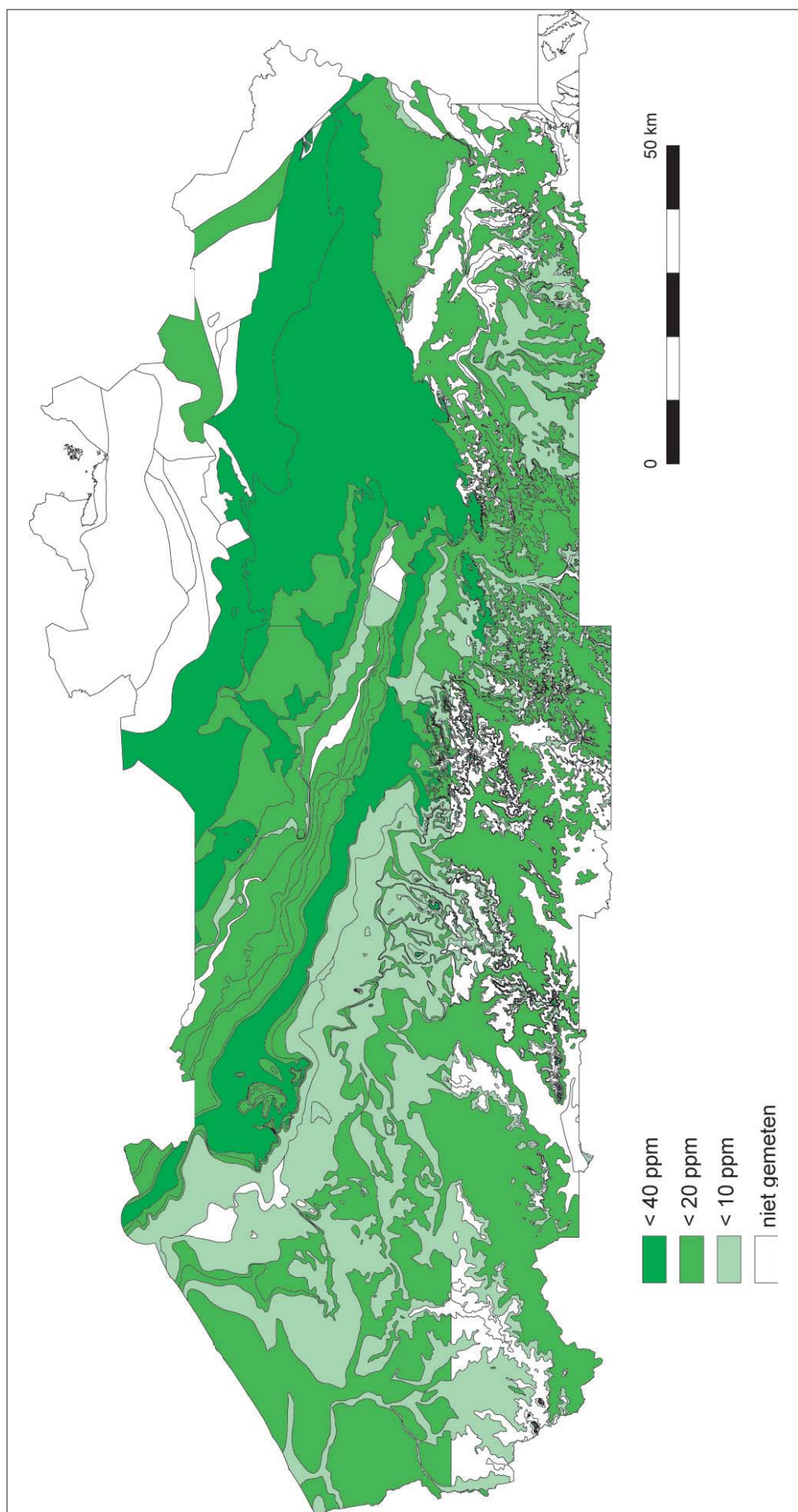
Afb. 6.2: Kobalt in het tertiair



Afb. 6.2: Koper in het tertiair



Afb. 6.2: Lood in het tertiair



Afb. 6.2: Arseen in het tertiair

6.5 RESULTATEN

De analyseresultaten van het onderzoek op de boorkernen worden in tabel 6.2 opgesomd. De resultaten van het onderzoek op ontginningen staan in tabel 6.3. Alle gegevens zijn in ppm genoteerd.

6.5.1 GEHALTEN ROND DETECTIELIMIETEN

Uit onderzoeken op monsters van zowel boorkernen als ontginningen is gebleken dat een aantal elementen in de overgrote meerderheid van de gevallen in gehalten kleiner dan de detectielimiet voorkomen, zoniet in gehalten zeer dicht bij de detectielimiet. Met de gegevens uit de boorkernen werd hiervan in tabel 6.4 een overzicht samengesteld.

6.5.2 GEOCHEMISCHE KAARTEN

De uit de boorkernen afkomstige resultaten werden tevens per geologische formatie, of per lid, gegroepeerd. Voor de meeste formaties of leden van afbeelding 5.3 werden aldus per sporenelement twee tot acht gegevens verzameld. Het bereik van de cijfers per geologische eenheid werd vervolgens op de tertiairgeologische kaart uitgezet. Op die wijze ontstaat een reeks geochemische tertiairkaarten (zie afbeelding 6.2).

Deze kaarten hebben om de volgende redenen slechts een indicatieve waarde:

- het kleine aantal gegevens per geologische eenheid is nog ontoereikend om echt representatief te zijn voor zulke grote volumes aan sedimenten, verspreid over zulke grote afstanden en met soms aanzienlijke diktes.
- de meeste monsters komen uit grotere dieptes. Er zijn geen garanties dat de chemische samenstelling van een geologische eenheid op grotere diepte dezelfde zou zijn als nabij een ontsluiting van het tertiair. Tussen de twee kunnen immers belangrijke afstanden liggen, met enige variatie in de mineralogische samenstelling niet uitgesloten.

De kaarten kunnen geenszins de chemische analyse van een individueel monster vervangen. Ze geven wel een goed overzicht van tendensen en algemene geografische verspreiding.

De kaarten van afbeelding 6.2 bevatten nog een aanzienlijk aantal blanco vlekken, omdat niet altijd en overal adequate gegevens voorhanden zijn. Hiervoor zijn er meerdere verklaringen:

- voor een aantal formaties of leden waren in de onderzochte boorkernen geen monsters voorhanden;

- de mineralogische samenstelling van sommige formaties of leden is op het territorium van bepaalde kaartbladen verschillend van wat in de onderzochte boorkernen aangetroffen werd, zodat de genomen monsters op die specifieke kaartbladen of locaties niet representatief zijn;

	Aantallen waarnemingen			Maximum (ppm)
	< d.l.	>= d.l.	> 1 ppm	
Hg	98	90	4	1,84
Cd	160	28	0	0,64
Sn	177	11	11	6,45
Se	176	11	9	6,91
Mo	158	30	30	14,1
Sb	187	0	0	< 1

d.l.: detectielimiet

Tabel 6.4: Analytische resultaten van sporenelementen met gehalten in de buurt van de detectielimiet

- de geologische datering van de genomen monsters is in sommige gevallen onvoldoende specifiek om ze aan een van de op een kaartblad voorkomende formaties of leden toe te kennen.

6.5.3 CORRELATIES

In de reeks puntendiagrammen van afbeelding 6.3 worden de gegevens uit boorkernen op onderlinge relaties onderzocht. De gehalten aan een aantal sporenelementen werden in verband gebracht met gehalten aan hoofdelementen.

Alleen de diagrammen die het sterkst een correlatie suggereren worden afgebeeld. Die vertonen allemaal grosso modo een positieve min of meer lineaire correlatie tussen de twee types elementen. Bij nader toekijken wordt het duidelijk dat die correlaties niet het gevolg van enkelvoudige interacties tussen twee specifieke elementen zijn, maar van meerdere fenomenen. Wat logischerwijze verwacht kon worden, omdat een sporenelement in meerdere mineralen kan voorkomen, in diverse verhoudingen tot het hoofdelement.

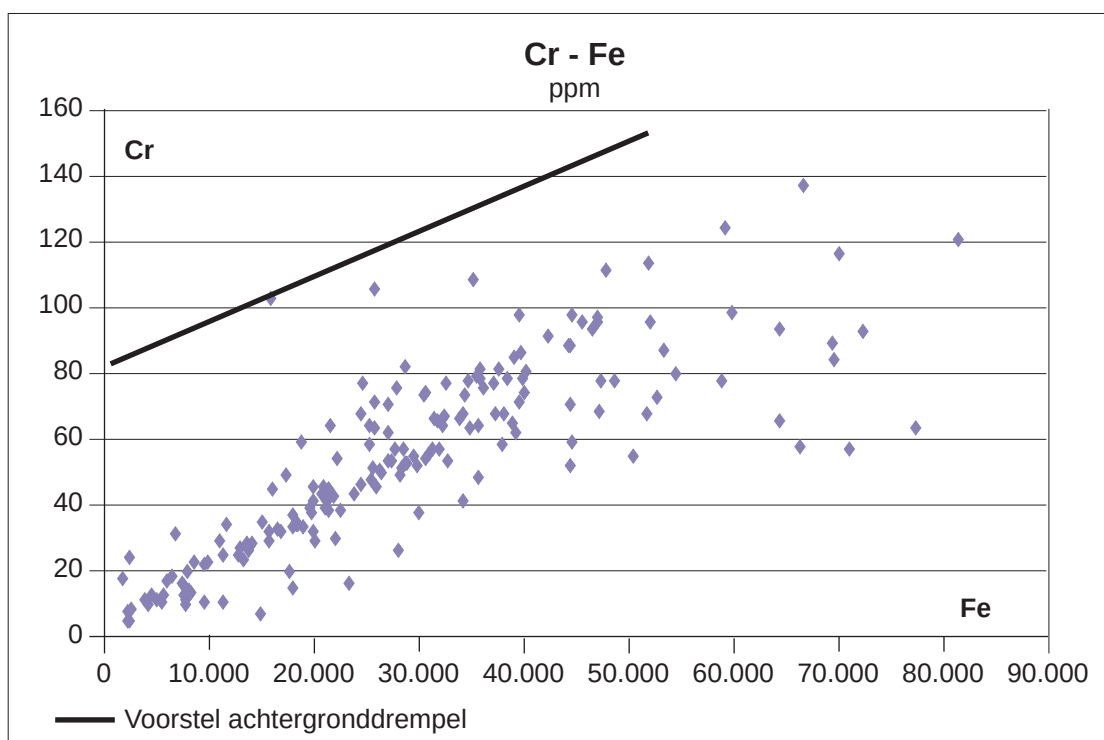
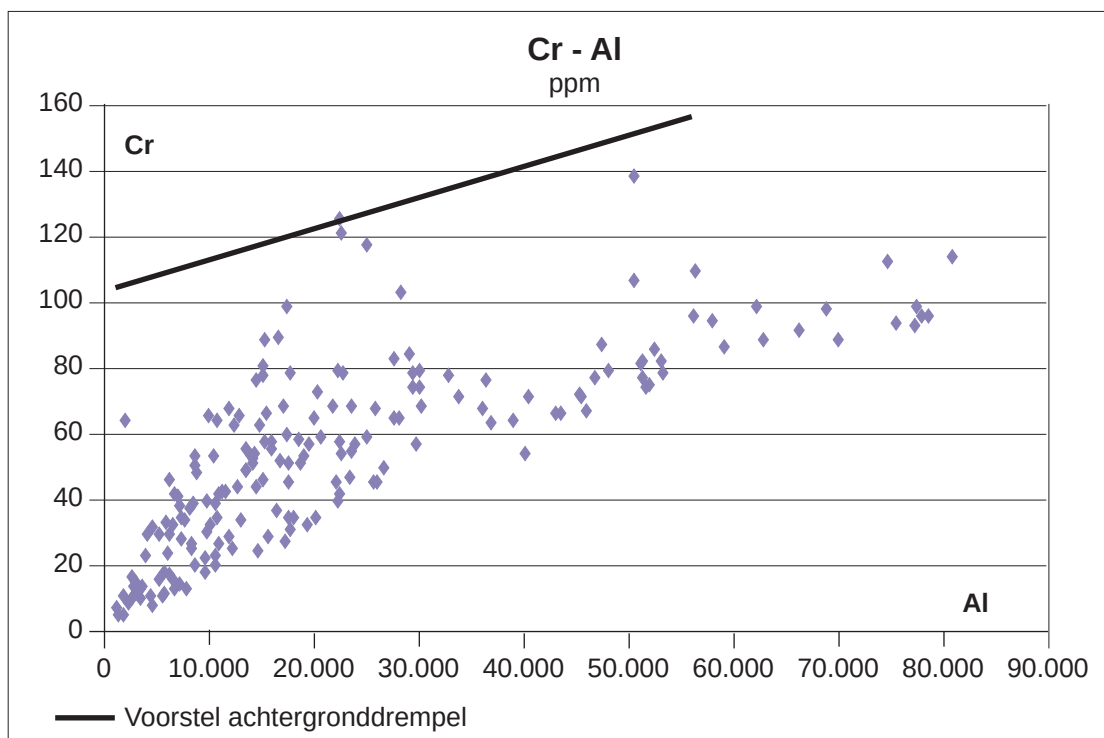
Sommige diagrammen (Cr-Al) vertonen bij de lagere gehalten een vrij scherp afgelijnde waaier. Bij de hogere gehalten laat de puntenwolk soms een eerder niet-lineaire correlatie vermoeden. In andere diagrammen (Ni-Fe en Zn-Fe) splitst de puntenwolk zich bij de hogere gehalten op in twee afzonderlijke staarten. In alle diagrammen zijn er talrijke punten buiten de eigenlijke wolk te zien. Alles



wijst erop dat meerdere storende factoren de correlaties afzwakken en dat het zoeken naar een verklaring ervoor een complexe zaak is.

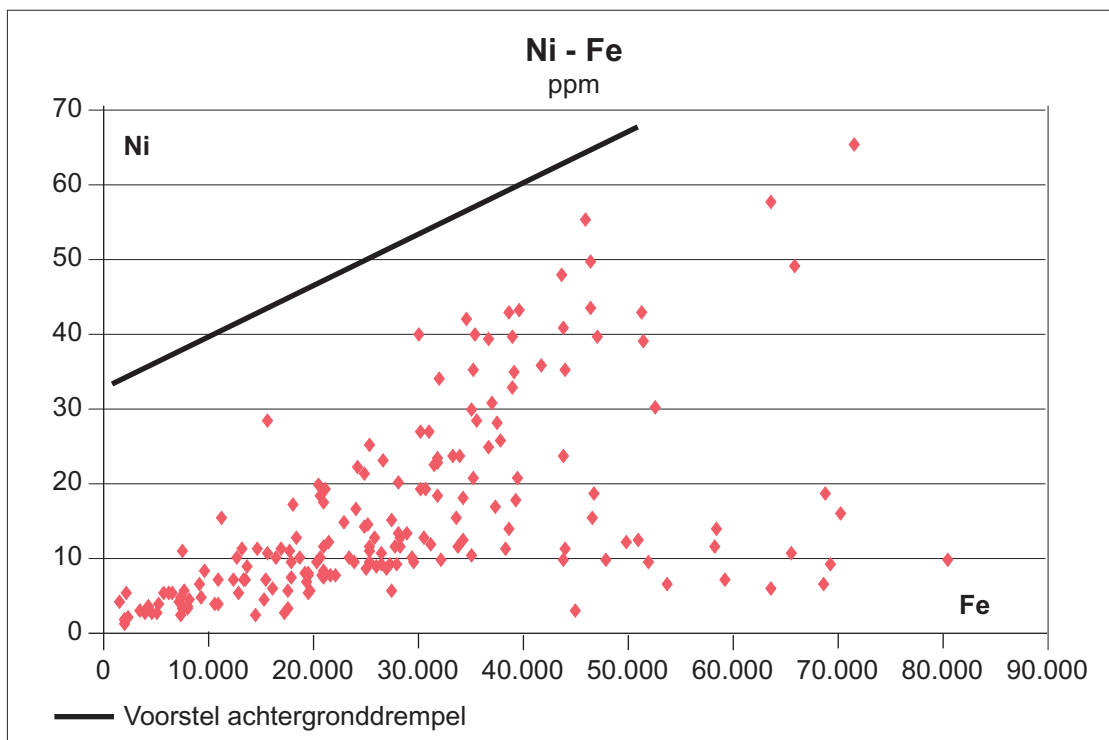
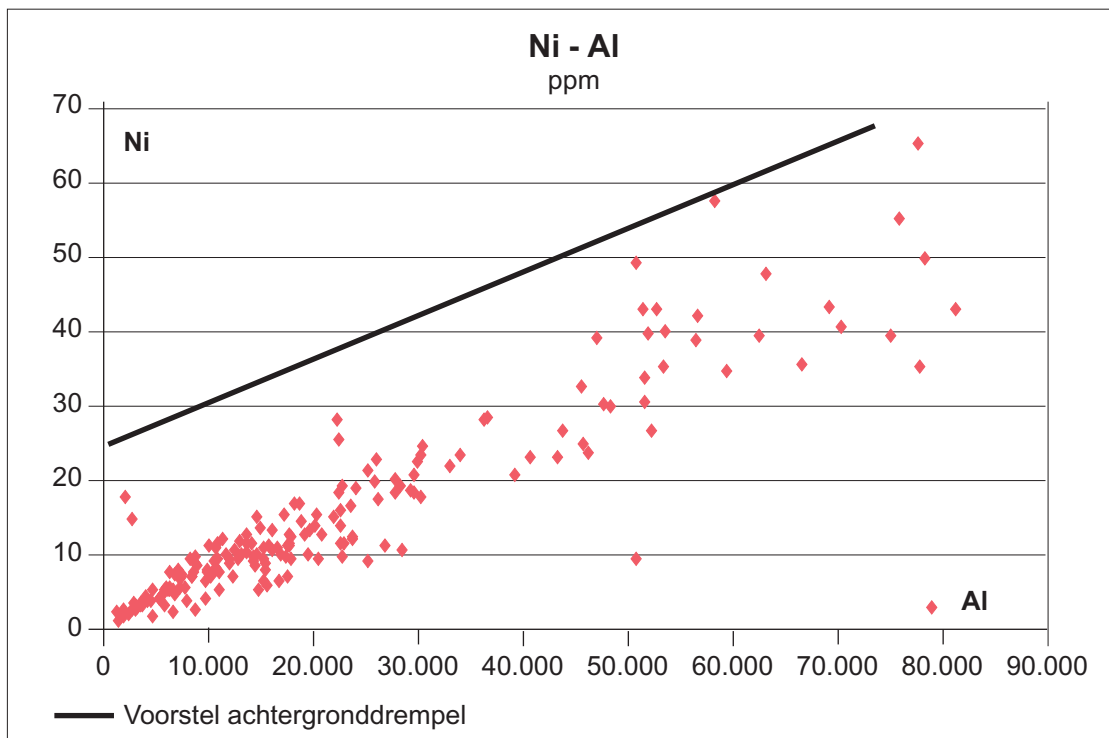
Het lag niet in de bedoeling van ANRE hiervoor verklaringen te formuleren. Die zijn ook niet vereist om een

algemeen overzicht te krijgen van de natuurlijke gehalten aan sporenelementen. Meer fundamenteel onderzoek kan in de onderliggende problematiek eventueel een beter inzicht verschaffen.



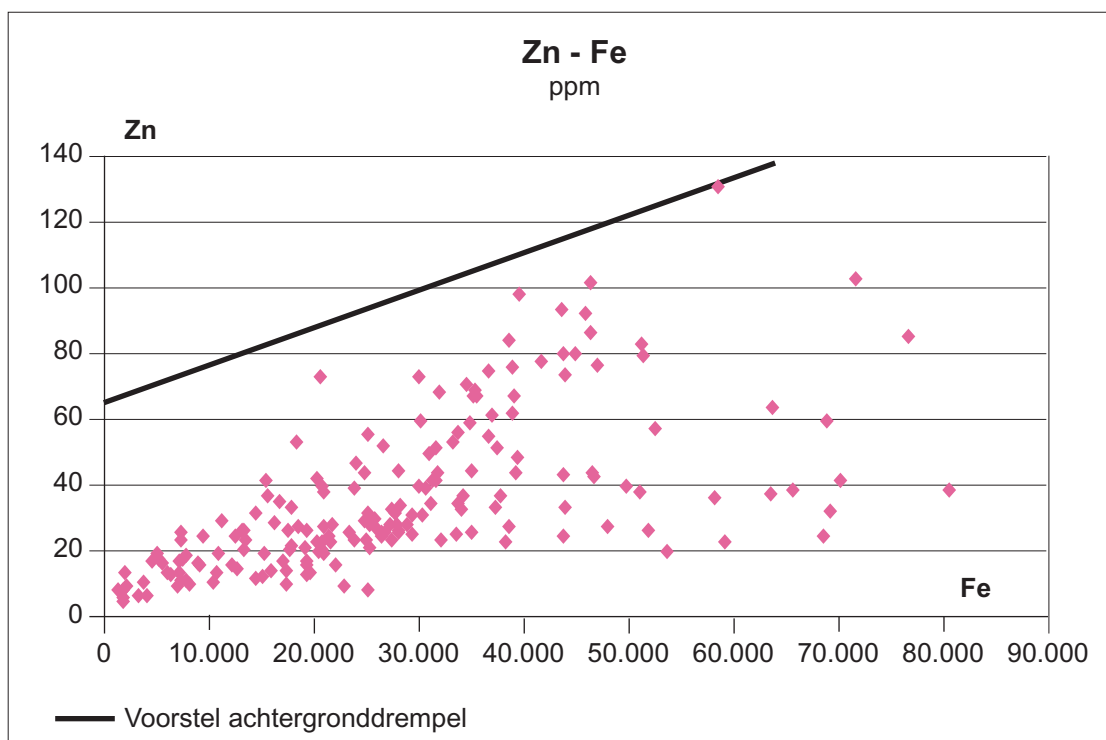
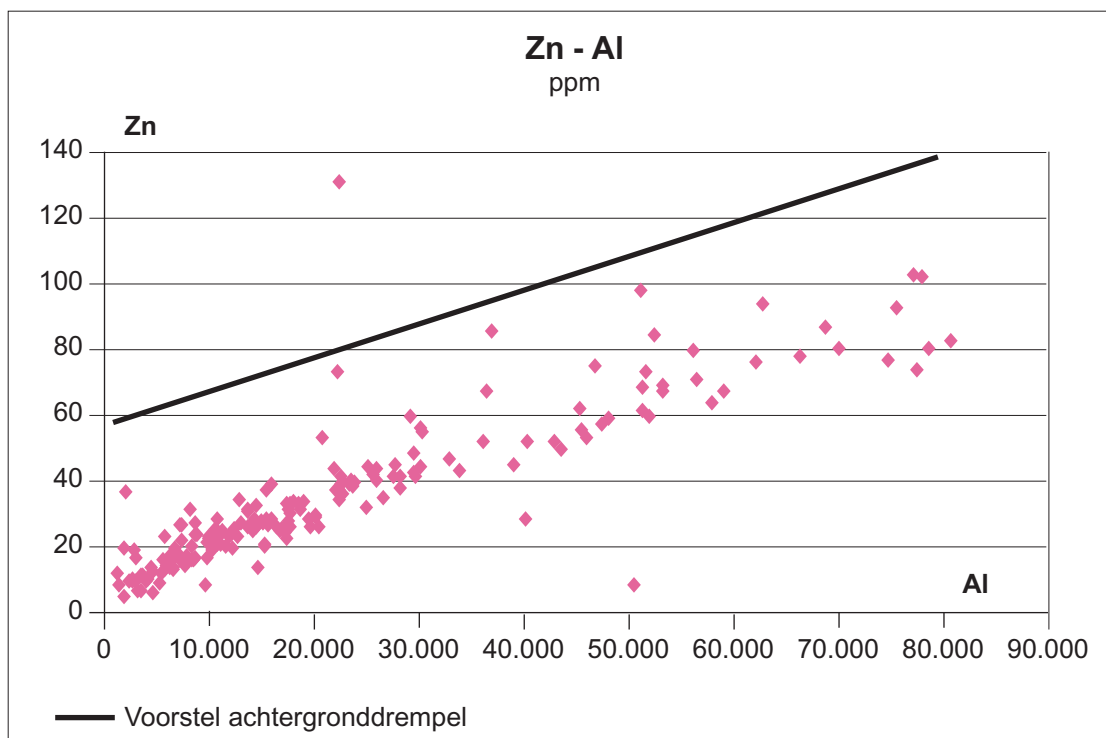
Afb. 6.3: Diagrammen sporen- versus hoofdelementen





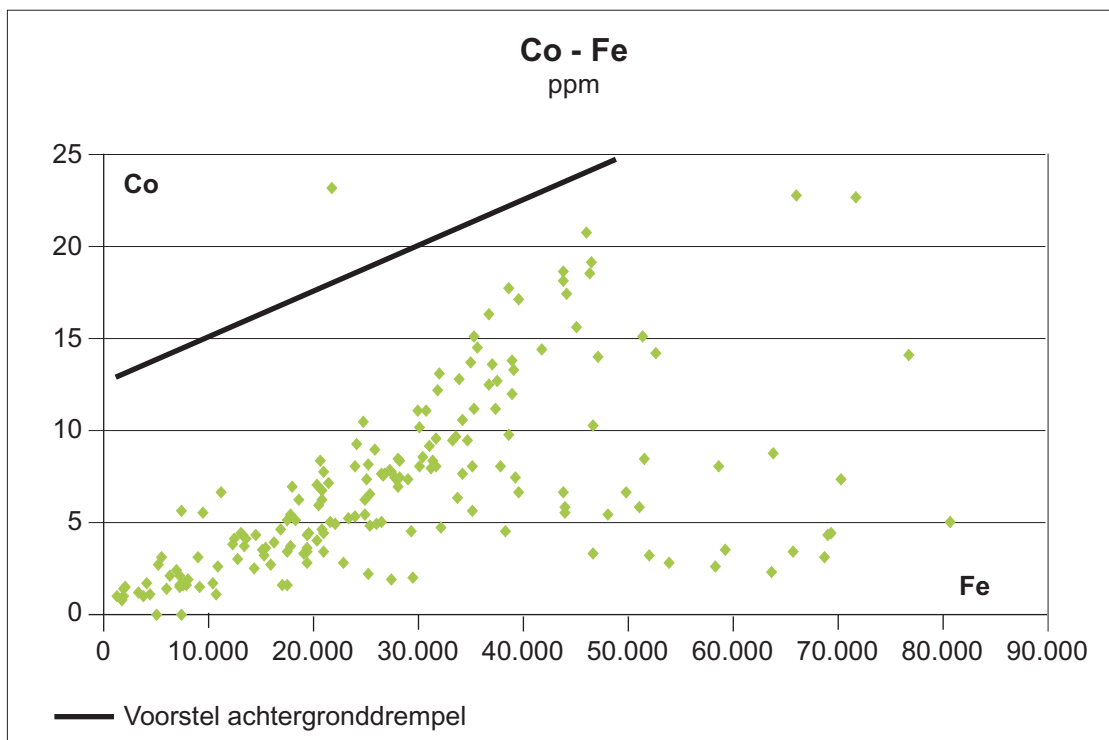
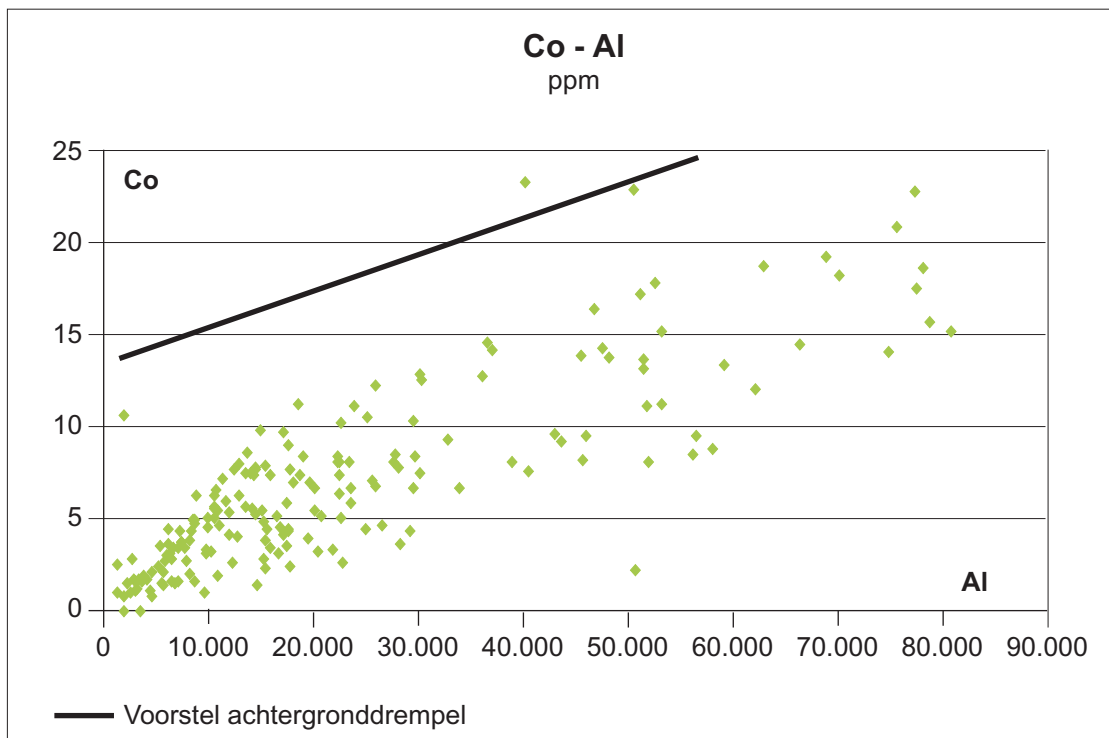
Afb. 6.3: (vervolg)





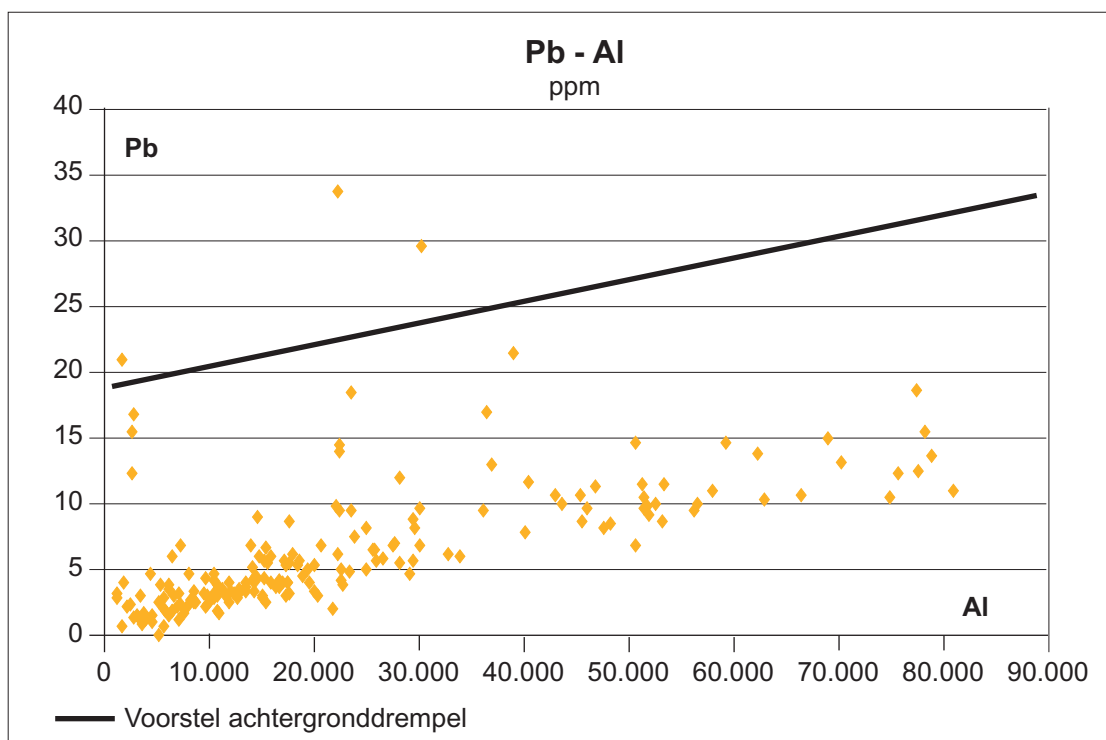
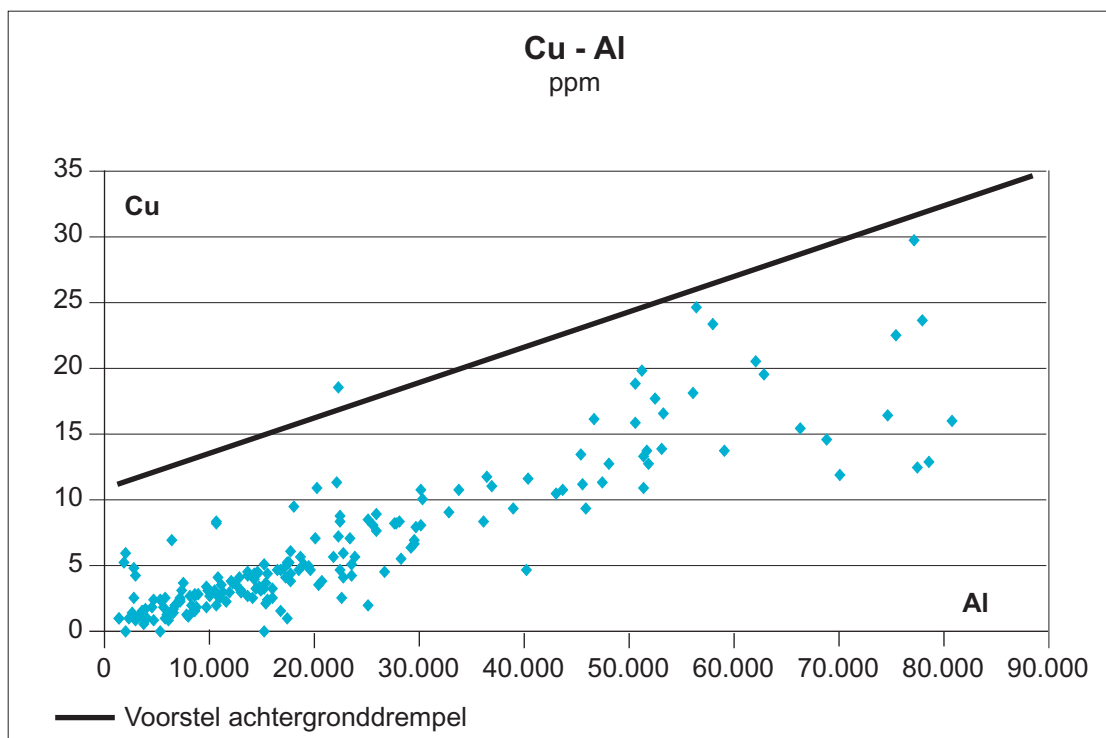
Afb. 6.3: (vervolg)





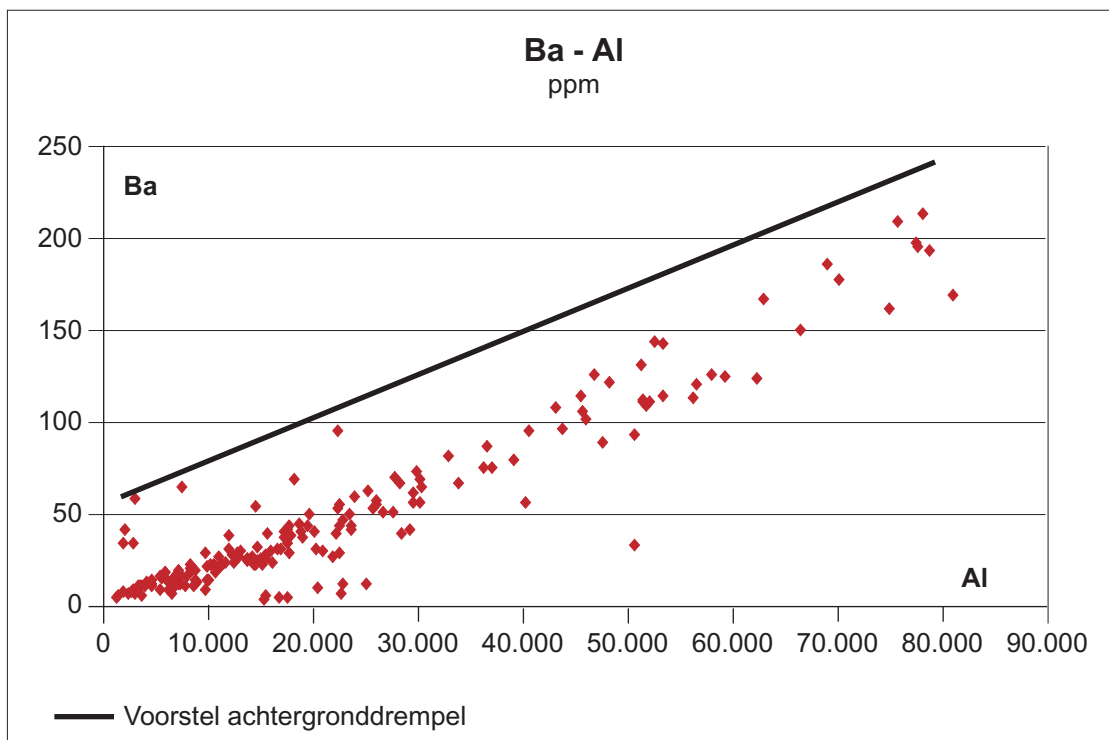
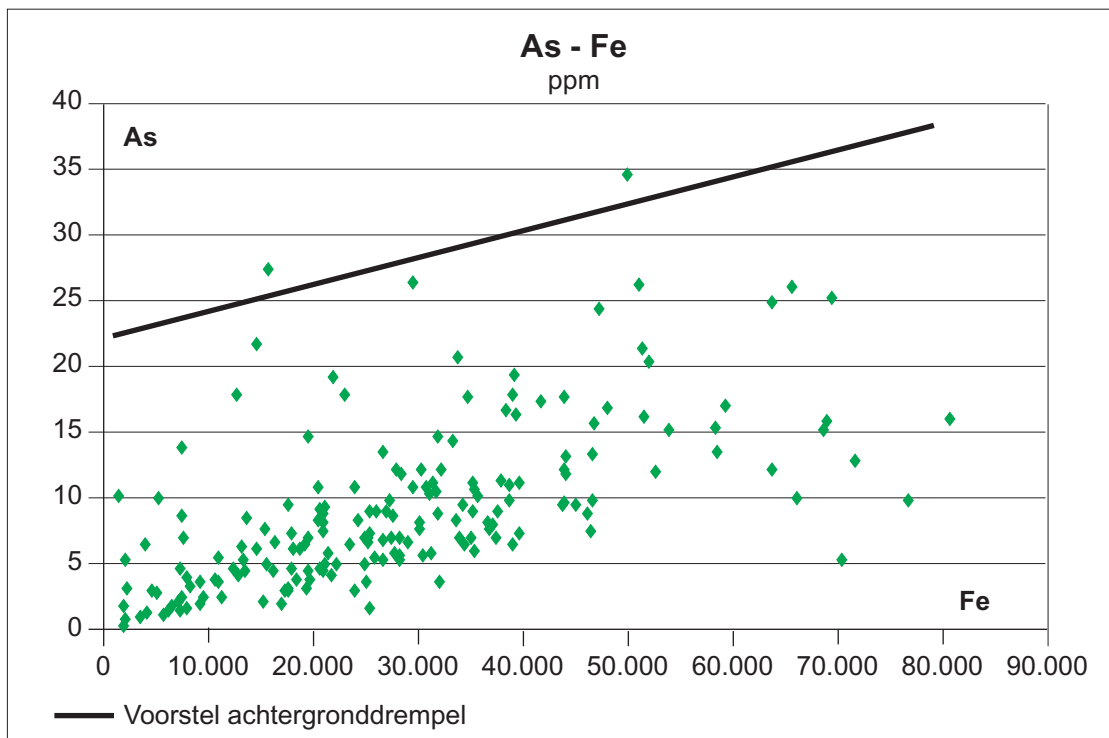
Afb. 6.3: (vervolg)





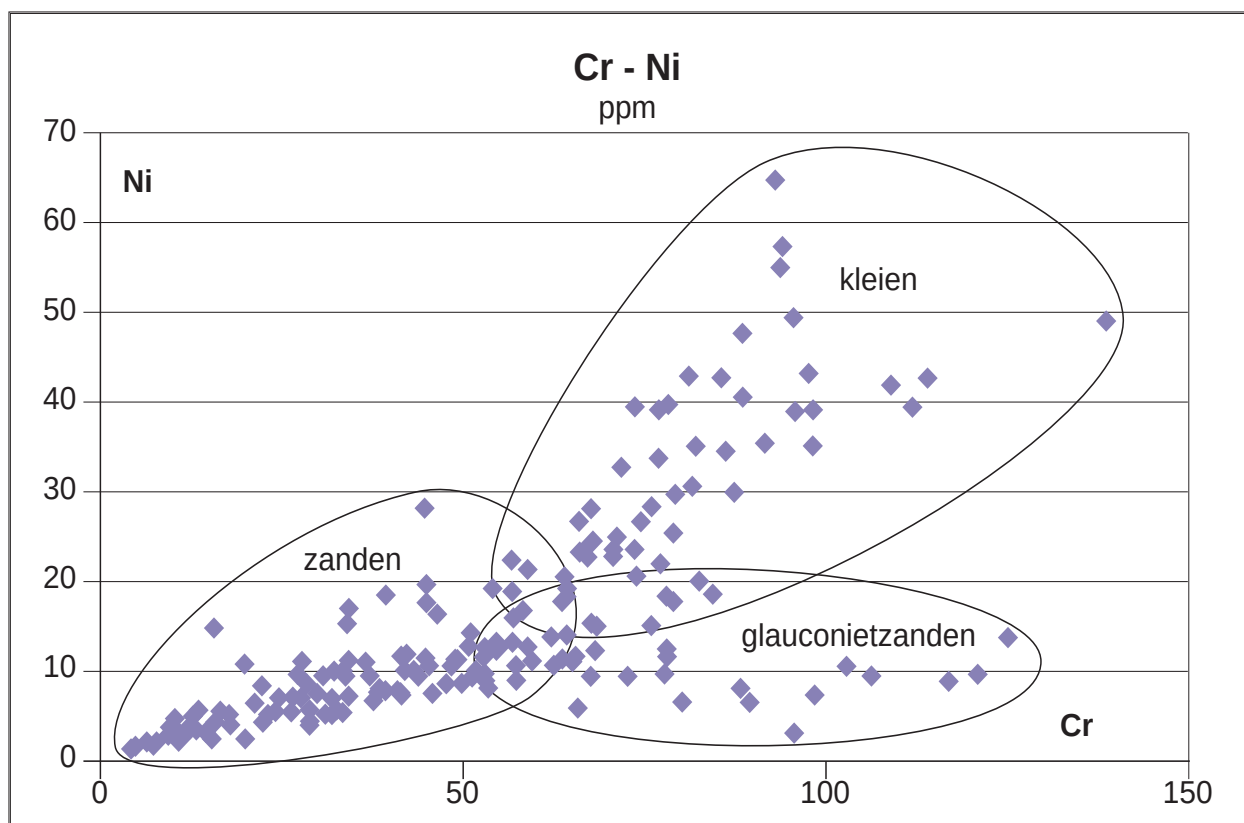
Afb. 6.3: (vervolg)





Afb. 6.3: (vervolg)





Afb. 6.4: Delstotypes in de gegevensverzameling

6.6 POPULATIES EN VERDELINGEN

De verzameling monsters waaruit de analytische resultaten afkomstig zijn vormt geen homogene populatie. Een homogene verzameling gegevens verkrijgt men bijvoorbeeld door het veelvuldig analyseren van een materiaal met een in principe constante samenstelling, waarrond evenwel enige variabiliteit mogelijk is. Een voorbeeld: de analyse van een uit een bepaalde vindplaats afkomstige graniet, of een baksteen van een specifiek type uit een welbepaalde steenbakkerij. Dat is hier duidelijk niet het geval, want die graniet en die baksteen worden hier samen in één verzameling bijeengegoid. De verzameling bevat in dit geval zanden, kleien, glauconietrijke zanden enzovoort, allemaal met sterk uiteenlopende samenstellingen. Afbeelding 6.4 illustreert hoe men in de puntenwolken van sommige diagrammen van afbeelding 6.3 minstens drie van die subgroepen kan onderscheiden.

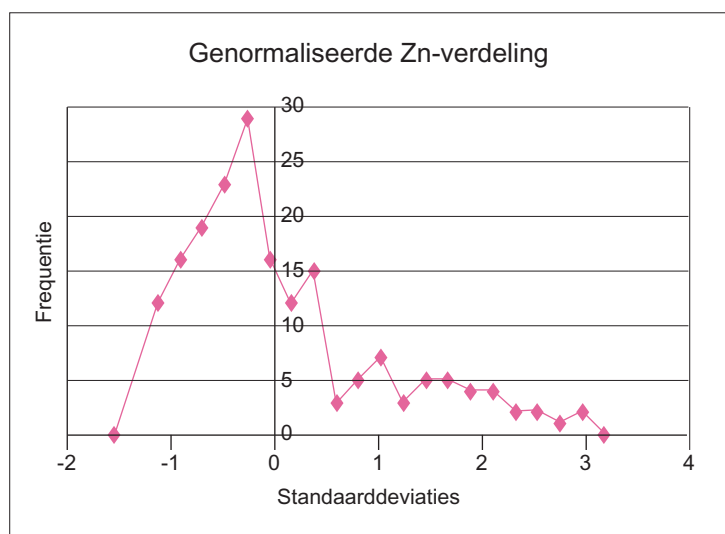
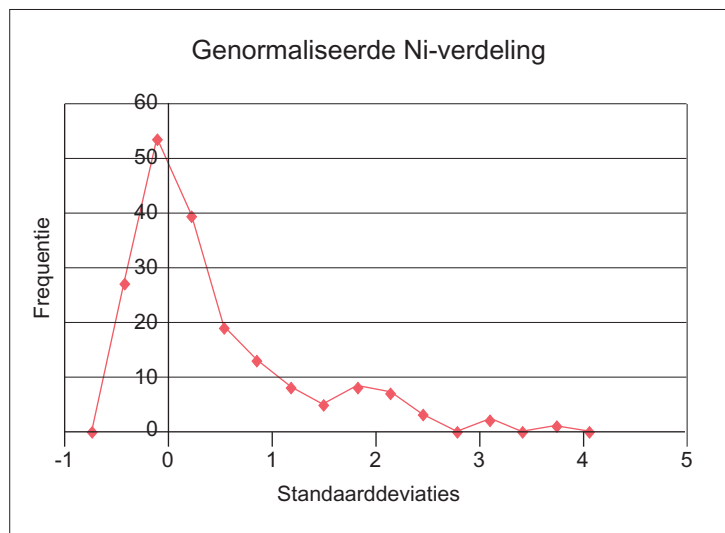
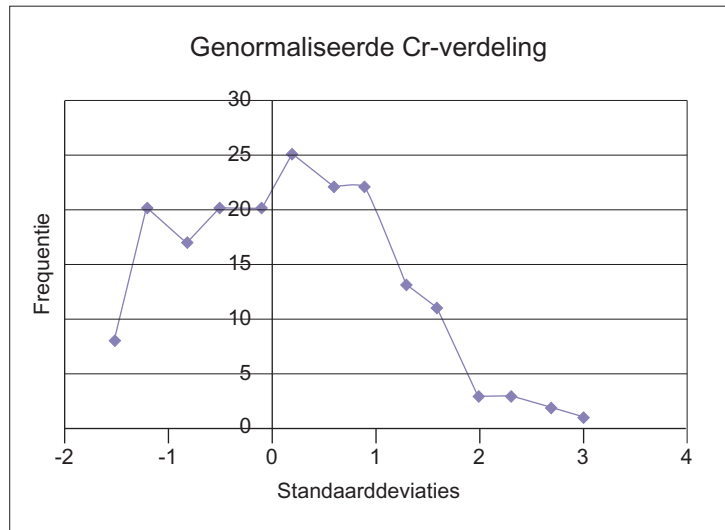
Vanuit dat oogpunt wordt het zelfs duidelijk dat deze verzameling uit de som van een zeer groot aantal, op zichzelf wel homogene, deelverzamelingetjes is opgebouwd. Statistisch gesproken kan hier helemaal geen sprake zijn van gegevens met een normaalverdeling.

Dat de gehalten aan sporenelementen in deze verzameling geen normaalverdelingen vormen wordt in afbeelding 6.5 overeenkomstig de statistische procedures voor Ni, Cr en Zn geïllustreerd. Daarin werden de gehalten

door de berekende standaarddeviatie gedeeld en het gemiddelde aan nul gelijkgesteld. In een dergelijk gestandaardiseerd diagram kan men de verdeling gemakkelijk visueel vergelijken met de ideale normaalverdeling van Gauss. Uit de posities van de subgroepen in het diagram van afbeelding 6.4 kan men dan afleiden dat de rechterhelften van de krommen in afbeelding 6.5 kleimonsters voorstellen en de linkerhelften zandige monsters. Het zal de lezer eveneens duidelijk zijn dat de geometrische vorm van de verkregen krommen sterk afhankelijk is van bijvoorbeeld de proporties van het aantal bemonsterde zanden en het aantal bemonsterde kleien.

De proporties van aantallen analyses van respectievelijk kleien, zanden en andere sedimenten, zoals die er in dit werk bij liggen, zijn het resultaat van de inhoud van de bemonsterde boorkernen. Men zou heel andere proporties kunnen krijgen door andere locaties voor de boringen te selecteren, of een ander aantal boringen in de lijst op te nemen, of kortweg, door veel meer kleimonsters te nemen dan zandmonsters, of omgekeerd. Het is daarom zelfs onmogelijk om van een zogenaamde “gemiddelde samenstelling” van de Vlaamse ondergrond te spreken.





Afb. 6.5: Genormaliseerde gegevensverdelingen

6.7 GEHALTEN IN DELFSTOFTYPES

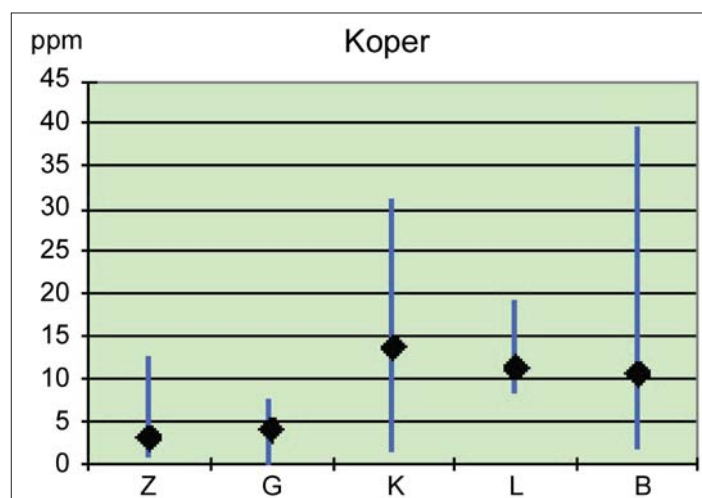
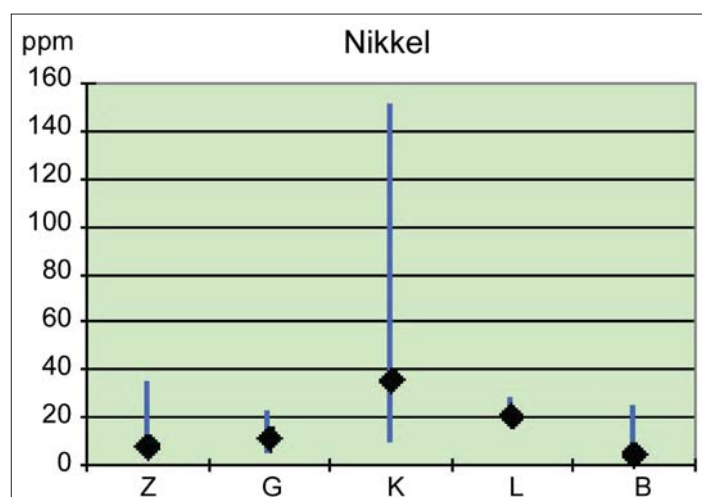
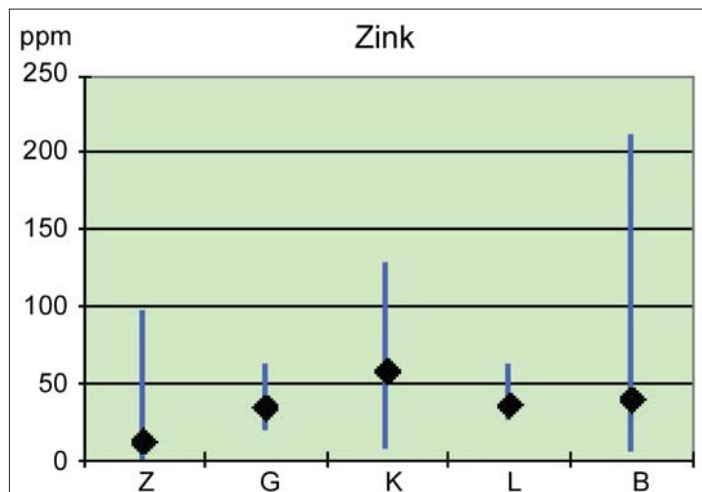
Zonet werd vastgesteld dat de geanalyseerde monsters in een aantal subgroepen kunnen opgesplitst worden. Die komen overeen met enkele delfstofstypes, namelijk de zanden, de kleien, glauconietrijke zanden en leem. Onderlinge verschillen in gehalten aan een aantal sporenelementen tussen deze subgroepen worden in afbeelding 6.6 geïllustreerd. Daarbij werden voor klei, zand en leem cijfers gebruikt uit het onderzoek van de monsters uit delfstofwinningen. Op deze wijze worden de termen zand, klei en leem toegepast op materialen die onder die benaming gecommmercialiseerd worden en die het publiek ook als dusdanig herkent. Het probleem van de naamgeving voor monsters met een samenstelling die bijvoorbeeld ergens tussen zand en klei ligt, wordt aldus ontweken. In deze figuren werden 65 zandmonsters betrokken, 16 leemmonsters en 26 kleimonsters.

Monsters van glauconietrijke zanden daarentegen zijn voorhanden in het onderzoek op de boorkernen. Die worden momenteel immers niet in zandgroeven gewonnen. Aan de monsters uit winningen werden evenwel een viertal in ontsluitingen genomen monsters van glauconietrijke zanden toegevoegd. Die werden bij de opmaak van de figuur wel betrokken. In totaal werden er 23 monsters van glauconietrijke zanden in deze figuren verwerkt.

De gegevens over bodems komen uit de publicatie van Tack F. et al. (1997). Het betreft hier uitsluitend bodemmonsters, meer dan 450 in aantal (meer dan 150 voor As en Cr), die door genoemde auteurs als “onverdacht” werden behouden.

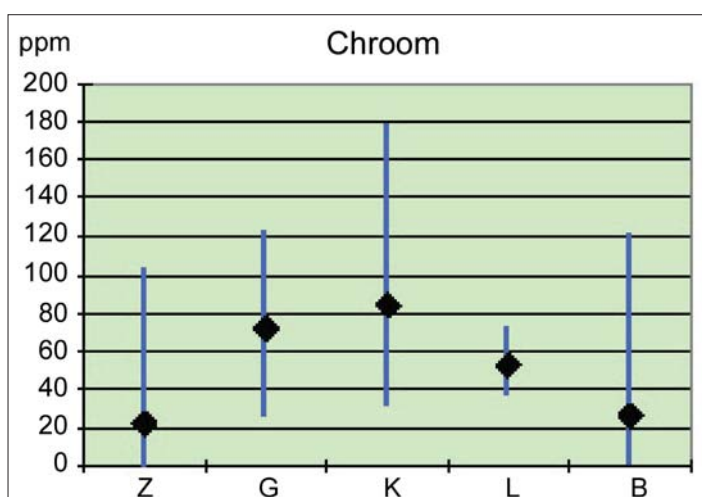
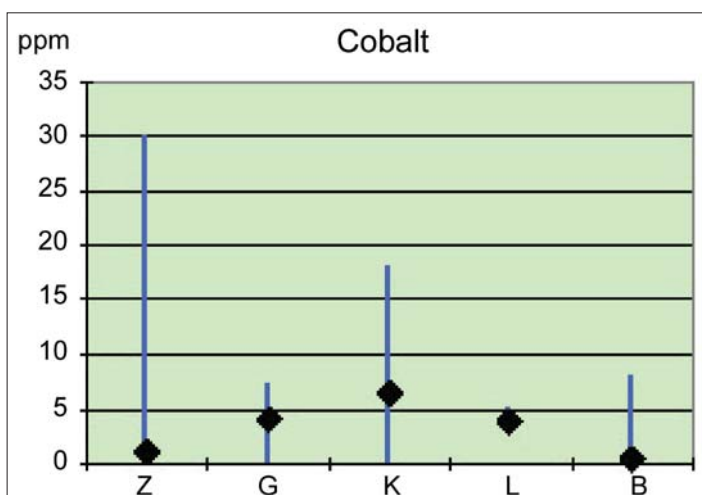
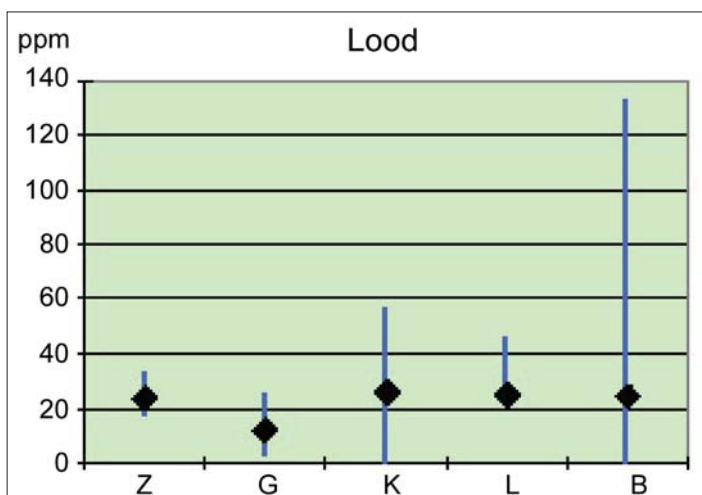
Uit de gegevens blijkt meteen dat kleien merkbaar hogere gehalten aan chroom, nikkel en kobalt bevatten dan bodemmonsters. Hogere gehalten aan voornamelijk chroom en nikkel kunnen vermoedens doen rijzen inzake contaminatie van de monsters door roestvrij staal van een bemonsteringswerktuig. Die mogelijkheid wordt evenwel uitgesloten door het feit dat die vermeende contaminatie niet waargenomen wordt in zandmonsters. Zand bestaat hoofdzakelijk uit kwartskorrels, een zeer hard mineraal, en zou in nog grotere mate stalen voorwerpen afslijten. Zand zou dan nog meer chroom en nikkel bevatten dan klei. De correcte verklaring moet in de mineralogische structuur van de kleimineralen gezocht worden (zie vorige hoofdstukken).

Ten aanzien van de andere materialen blijken bodems vrij arm te zijn aan nikkel en kobalt.



Afb. 6.6: Vergelijking van gehalten in zand, glauconietrijke zand, klei, leem en bodems: gemiddelden en spreiding





Afb. 6.6 (vervolg)

6.8 VERGELIJKING ONTSLUITINGS-METHODEN

En vijftal monsters werden, bij wijze van steekproef, met drie verschillende ontsluitingsmethoden voor analyse in oplossing gebracht. Daarvoor werden drie mengsels van zuren gebruikt:

- $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
- $\text{HCl} + \text{HNO}_3 + \text{HF}$
- $\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HF}$

Het eerste mengsel, beter bekend als koningswater, werd standaard gebruikt bij alle door ANRE bestelde analyses. Dit zuurmengsel werd tevens gebruikt in de studies die aan de basis van de VLAREBO-normen liggen.

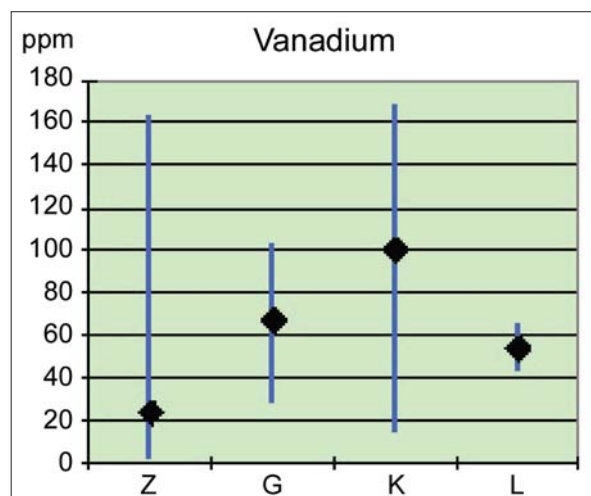
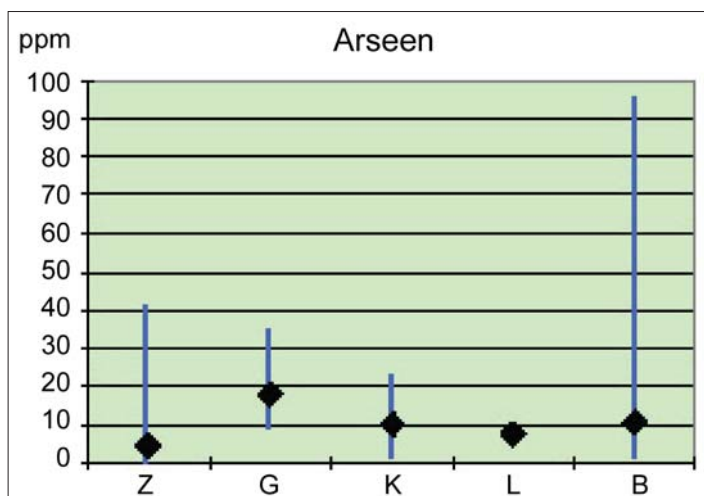
Koningswater heeft de reputatie dat het de silicaatmineralen niet volledig zou afbreken en dus lagere analysecijfers zou produceren. Waterstoffluoride is daarentegen een zuur dat in staat is zelfs de sterke bindingen tussen de SiO_2 -atomen in silicaten en kwarts te verbreken. Waterstoffluoride heeft evenwel het nadeel dat het, in aanwezigheid van CaCO_3 , een neerslag van CaF_2 doet ontstaan. Men heeft dus geen controle over hoeveel fluoride nog beschikbaar blijft voor de destructie van silicaten. Bovendien kunnen tijdens het neerslagen ook andere elementen mee neergeslagen worden. Aangezien sedimenten frequent ook kalk bevatten, biedt die optie daarom geen echt betrouwbaar alternatief.

Het vijftal monsters heeft de volgende samenstelling. Drie ervan, met prefix BRA, bestaan uit glauconietrijke zanden van de Formatie van Diest. De twee andere, met prefix ANT, zijn kleien uit ontginningen van de Formatie van Boom.

Het monster met nummer BRA 82 bestaat uit groen, onverweerd glauconietzand. De monsters met nummer BRA84 en BRA85 bestaan uit roodbruingekleurd verweerd glauconietzand.

De resultaten van de vergelijking zijn in afbeelding 6.7 en tabel 6.5 samengevat.

Bij de kleimonsters vallen enkele merkkelijke verschillen tussen de ontsluitingsmethoden op. De afwijkingen zijn echter niet consequent. Bij de glauconietzanden zijn de verschillen meestal



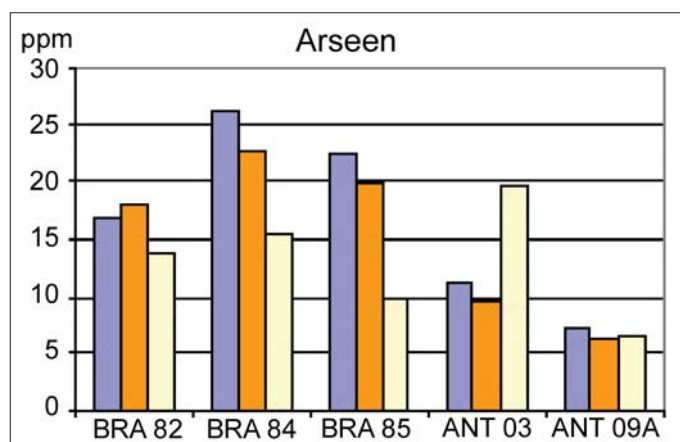
Afb. 6.6 (vervolg)

kleiner, behalve voor arseen. Een adequate verklaring ligt niet meteen voor de hand. Deze zeer beperkte steekproef geeft geen eenduidige aanwijzingen dat het gebruik van een HF-bevattend zurenmengsel hogere gehalten zou opleveren, zelfs niet binnen de analyses van één specifiek element.

De doctoraalscriptie van Huisman D.J.(1998) vermeldt de gehalten aan sporenelementen in een veertiental boringen in het gebied dat grenst aan de Antwerpse Noorderkempens, tussen Roosendaal en Tilburg. De ouderdom van de daarin bemonsterde sedimenten varieert van Mioceen tot Holoceen. Met dezelfde afzettingsmilieus is zijn studiemateriaal sterk vergelijkbaar met de hierboven vermelde monsters uit boringen in Vlaanderen. De Nederlandse monsters werden evenwel met het zurenmengsel $\text{HClO}_4 + \text{HNO}_3 + \text{HF}$ ontsloten.

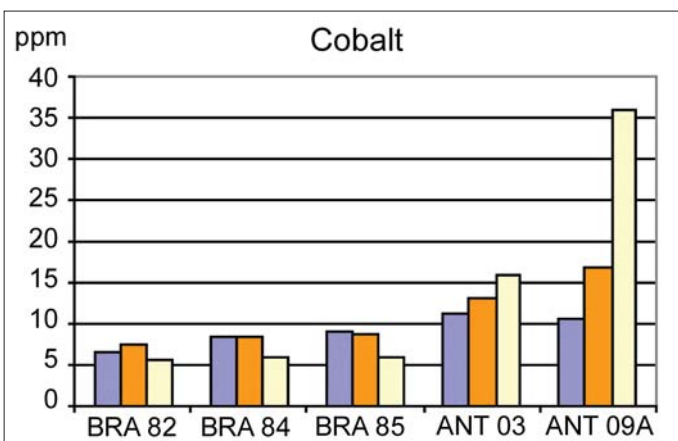
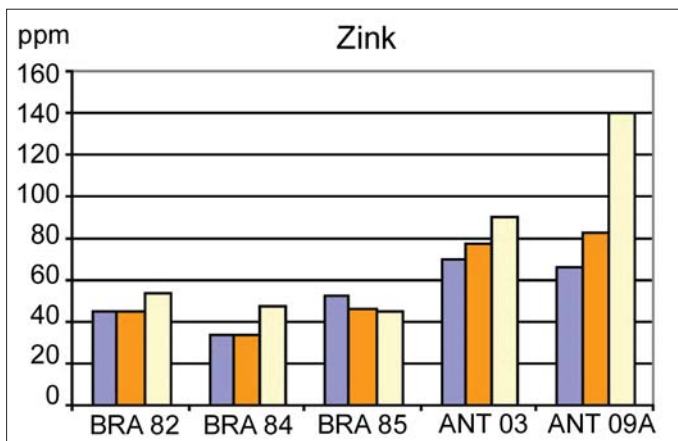
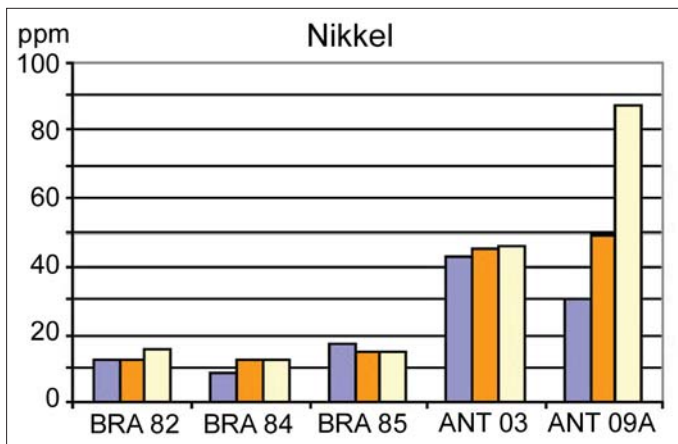
In de Nederlandse studie werden de gehalten aan zware metalen tegen aluminium uitgezet. Voorafgaandelijk werden de gegevens betreffende monsters van bodems, glauconietzanden en diagenetische aanrijkingen daaruit verwijderd. Afhankelijk van het element in kwestie, werden 500 tot 800 gegevensparen behouden (slechts 265 voor Pb). De aldus verkregen puntenwolken voor Co, Cr, Cu, Ni, Pb en Zn vallen volkomen samen met de puntenwolken van afbeelding 6.3. De twee onderscheiden ontsluitingsmethoden leveren blijkbaar geen significant verschillende resultaten op.

Gezien de vermelde vaststellingen en gezien de lagere kostprijs van analyses met koningswater, verdient het aanbeveling toekomstige monsters consequent verder met deze laatste methode te laten ontsluiten.



Afb. 6.7: Vergelijking ontsluitingsmethoden
 $\text{HCl} + \text{HNO}_3$
 $\text{HCl} + \text{HF} + \text{HNO}_3$
 $\text{HClO}_4 + \text{HF} + \text{HNO}_3$

6.9 GLAUCONIET



Afb. 6.7: (vervolg)

In afbeelding 6.6 kan men aflezen dat glauconietrijke zanden meer arseen bevatten dan de andere delfstoftypes, bodems niet meegerekend, maar niet in die mate dat men ze als arseenhoudend zou kunnen bestempelen. In het As-Fe-diagram van afbeelding 6.3 vallen de meeste met glauconietrijke zanden overeenkomende punten binnen de dichtere zones van de puntenwolk. Ze overlappen met de punten die kleimonsters voorstellen. Al de punten met meer dan 20.000 ppm Fe en meer dan 25 ppm As stellen glauconietrijke zanden voor.

Via mondelinge communicatie werd al vernomen dat grondwater in glauconietrijke zandlagen soms hogere arseengehalten bevat dan andere grondwatermassa's. Dat is dus niet te wijten aan anomaal hoge arseengehalten in glauconiet. Mogelijk spelen specifieke verweringsprocessen daarbij een rol.

In contrast met het voorgaande toont afbeelding 6.6 bovendien dat glauconietrijke zanden beduidend minder Zn, Ni, Cu, Pb, Co en V bevatten dan kleien. Voor enkele elementen is dat effect duidelijk te herkennen in de diagrammen van afbeelding 6.3 waarin de zware metalen tegen Fe werden uitgezet. Glauconiet is immers een Fe-rijk mineraal. De reden voor dit erg verrassende resultaat is waarschijnlijk te zoeken in het feit dat glauconiet een mineraal is dat op en in de bodem van de zee gevormd wordt. Afbeelding 2.6 illustreert immers dat zeewater zeer arm is aan de meeste zware metalen. Nieuwe mineralen kunnen dan weinig metalen uit het zeewater opnemen. De meeste kleimineralen ontstaan op het continent, tijdens de verweringsprocessen. Dezelfde figuur toont, met de hoge gehalten in rivierwater, dat op de continenten veel grotere hoeveelheden van die sporenelementen te vinden zijn, afkomstig uit stollingsgesteenten.

De licht verhoogde aanwezigheid van arseen in glauconietrijke zanden, in tegenstelling tot de licht verlaagde aanwezigheid van zware metalen, vindt mogelijk haar oorsprong in het reducerende milieu waarin glauconiet gevormd wordt. In zeewater is zwavel namelijk een van de belangrijkste elementen in oplossing. Tijdens de diagenese van het sediment kan dit door reductie tot sulfide-ionen omgezet worden. Door verbinding met ijzer ontstaan dan mineralen zoals marcassiet en pyriet. De wetenschappelijke literatuur vermeldt dat glauconiet vaak samen met pyriet aangetroffen wordt. Het is eveneens bekend dat sedimentair gevormd pyriet vaak arseenhoudend is. Het ar-

HClO ₄ -HNO ₃ -HF													
Nummer	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Al	Fe	K	S
BRA 82	13,8	94,9	5,5	95,4	1,4	15,9	16,5	80,3	54,0	33435	58290	37439	1187
BRA 84	15,5	68,1	6,1	82,8	1,5	12,4	11,3	90,6	47,5	19634	43932	22022	127
BRA 85	9,9	74,9	5,7	97,6	1,2	15,2	12,2	105,7	45,8	23315	48867	21104	141
ANT 03	19,6	286,5	15,8	143,3	30,1	46,2	17,6	139,9	89,4	74203	29406	23633	13663
ANT 09 A	6,7	363,5	35,7	116,4	20,3	87,0	19,2	140,6	139,4	82578	26809	27899	7072

HCl-HNO ₃ -HF													
Nummer	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Al	Fe	K	S
BRA 82	17,9	52,8	7,5	81,9	1,4	12,5	14,5	65,9	45,1	23900	55100	29000	5230
BRA 84	22,7	47,7	8,5	86,2	1,0	12,2	11,1	85,5	33,7	22300	48400	10200	57
BRA 85	19,9	36,1	8,9	98,1	1,2	15,4	13,5	110,0	46,2	22400	48700	21600	1720
ANT 03	9,6	81,2	13,3	130,0	24,3	45,6	22,8	125,7	77,2	48000	37400	11500	12900
ANT 09 A	6,5	90,8	17,0	110,0	16,4	48,8	21,7	118,2	82,5	50900	27500	11400	8880

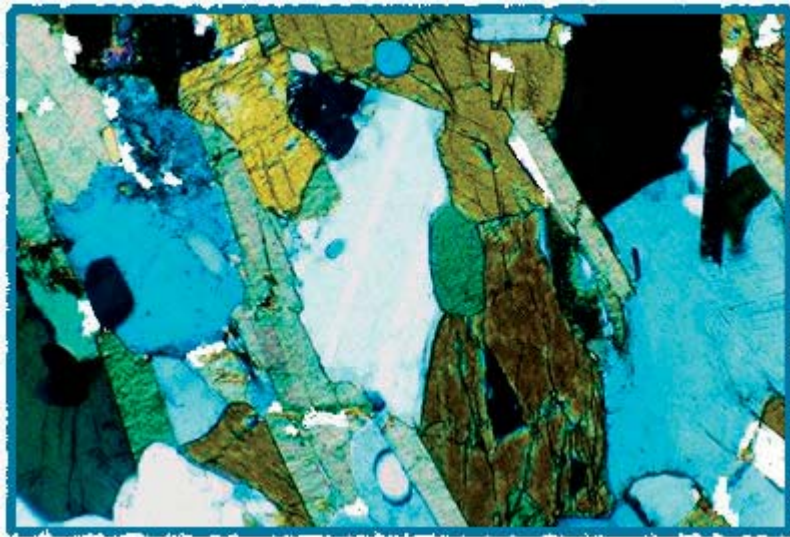
HCl-HNO ₃													
Nummer	As	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Al	Fe	K	S
BRA 82	16,9	12,9	6,5	76,2	0,9	12,6	11,4	62,3	44,6	23200	51400	28800	300
BRA 84	26,1	6,6	8,7	81,9	< 0,5	8,7	6,1	81,7	33,0	16700	44100	10300	38
BRA 85	22,6	24,2	9,0	110,0	1,0	17,4	12,7	110,0	52,7	22400	51100	21500	94
ANT 03	11,3	90,5	11,4	109,9	24,1	42,9	12,7	100,2	69,7	45100	36900	11200	15200
ANT 09A	7,4	93,5	10,6	81,1	15,6	31,0	15,6	94,1	66,3	50500	24800	11300	8780

Tabel 6.5: Vergelijking van ontsluitingsmethoden (ppm)

seen komt daarin hoofdzakelijk voor als submicroscopisch kleine insluitels van het mineraal arsenopyriet, met samenstelling FeAsS. Een vermeende en verhoogde aanwezigheid van zwavel in glauconietrijke zanden wordt echter door de analysegegevens voor S in tabel 6.2 niet bevestigd. Diepgaander wetenschappelijk onderzoek op dit vraagstuk is nodig.



HOOFDSTUK 7: Sporenelementen en regelgeving



SPORENELEMENTEN EN REGELGEVING

Voor in dichtbevolkte industrielanden hebben de bekommernissen om de kwaliteit van het leefmilieu ertoe geleid nieuwe wetten op te stellen om door mens en industrie vervuilde sites op te sporen en indien mogelijk de natuur weer in haar oorspronkelijke staat te herstellen. Wat Vlaanderen betreft werd in die geest door de Vlaamse regering in februari 1995 het Bodemsaneringsdecreet goedgekeurd. Daaraan werd in maart 1996 als uitvoeringsbesluit het Vlaams Reglement op de Bodemsanering, kortweg VLAREBO, toegevoegd. In mei 1998 werd deze wetgeving nog eens uitgebreid met het oog op uitgegraven en elders te deponeren materialen.

7.1 BEVOEGDHEIDSDOMEINEN

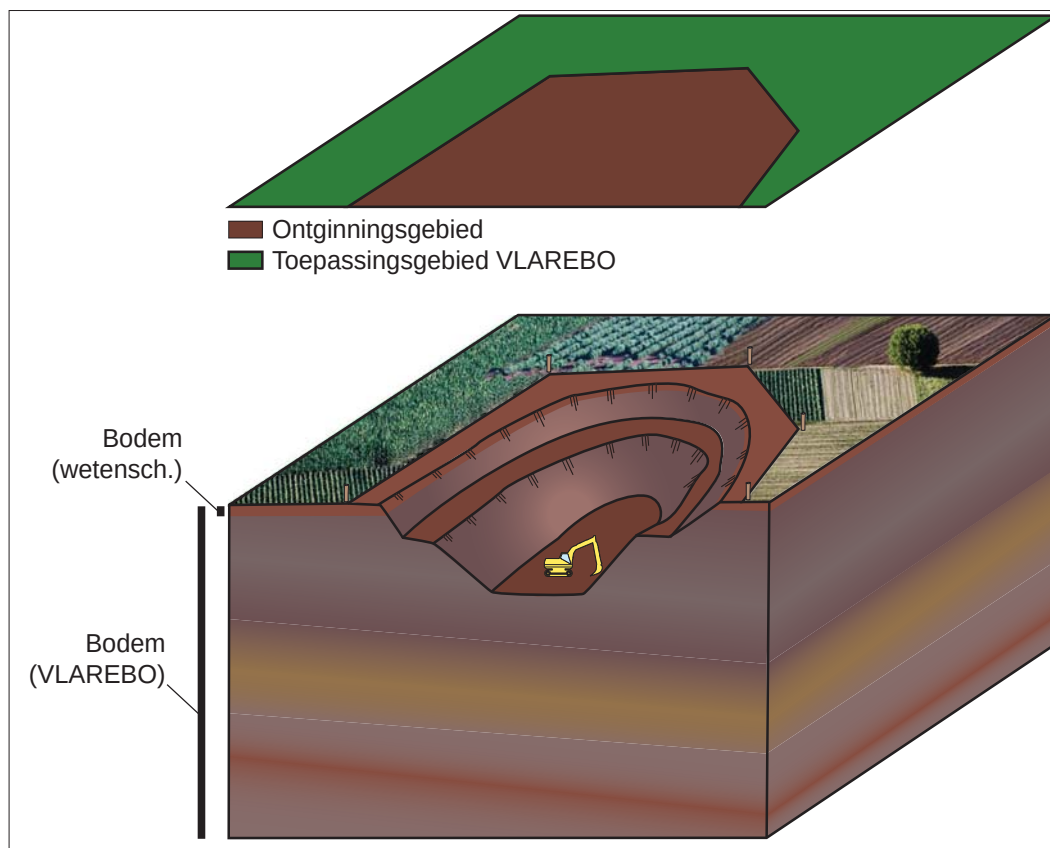
Het decreet op de bodemsanering is van toepassing op wat daarin als “bodem” bestempeld wordt. De in dit decreet gehanteerde definitie van de bodem luidt als volgt:

Bodem is het vaste deel van de aarde met inbegrip van het grondwater, en de andere bestanddelen en organismen die er zich in bevinden.

Door het Bodemsaneringsdecreet wordt, met andere woorden, de hele aardbol als bodem aanzien, alle oppervlaktewaters uitgezonderd. In Nederland geldt een identieke definitie.

Alle geologische materialen die als gevolg van graafactiviteiten uit de aarde vrijkomen worden dan ook consequent als *uitgegraven bodem* betiteld. Dergelijke activiteiten kunnen bijvoorbeeld plaatsvinden naar aanleiding van de aanleg van kelders, dokken, tunnels, ondergrondse parkeerplaatsen of spoorwegaanleg. Het begrip “uitgegraven bodem” is hier een voor juridische doeleinden ontworpen term, en is klaarblijkelijk niet op wetenschappelijke terminologie gebaseerd. Geologen, landbouwkundigen, geografen, bodemkundigen en andere aardwetenschappers splitsen het bovenste deel van de aardkorst in twee onderdelen op:

- “**Bodem**” betekent voor hen het oppervlakkige deel ervan, in gematigde klimaten maximaal 1 meter diep. Het is het materiaal dat door plantenwortels en fauna omgewoeld en beïnvloed wordt. Het staat ook in contact met de atmosfeer en is onderhevig aan diverse types van verwerking, verandering in samenstelling en consistentie, en beroering door landbouwkundige activiteiten.
- Al wat zich onder deze “bodem” (sensu stricto) bevindt wordt dan “**ondergrond**” genoemd.



Afb. 7.1: Bevoegdheidsdomeinen en ‘bodem’

Zoals in een vorig hoofdstuk al uitvoerig beschreven werd, zijn bodem (s.s.) en ondergrond evenwel geologisch, mineralogisch, chemisch en fysisch twee totaal verschillende zaken. VLAREBO en het Bodemsane-

aanleiding van de bemonsteringscampagnes van ANRE, zowel op de ondergrond binnen ontginningsgebieden als erbuiten toepasselijk zijn.

Onze arme rijke taal

De oorspronkelijke betekenis van het woord bodem verwijst naar de onderste begrenzing van iets (Van Dale), het scheidingsvlak tussen wat zich erboven en eronder bevindt. Dat is de betekenis die nu nog in het Engels aan het verwante woord bottom gegeven wordt.

De betekenis, bovenste oppervlak van de aardkorst waarin landbouw bedreven wordt, is van meer recente datum. Engelstaligen gebruiken voor deze betekenis een woord van een heel andere stam, soil, afkomstig van het Franse sol dat op zijn beurt van het Latijnse solum afgeleid is. Dat was wat de Romeinse boeren hun teelaarde noemden, alsook het grondvlak of de onderkant van iets, en een vloer.

Deze woorden lieten blijkbaar een ondubbelzinnige aanduiding van ruimtelijk onderscheid toe. Zo gebruiken de Angelsaksen het woordenkoppel soil en subsoil, en de Fransen sol en sous-sol.

In het Nederlands bestaat het analoge koppel grond en ondergrond. Daar had grond eveneens een aantal andere betekenissen meegekregen. Zo bedoelt men er eender welk los sediment mee, zandig kleiig of lemig, dat als materiaal voor zowel teelaarde als constructiedoeleinden kon gebruikt worden. In het Frans de la terre. Grond betekent ook een perceel terrein.

Om een of andere reden is men dan voor de betekenis van teelaarde een beroep gaan doen op een heel ander woord: bodem. Het probleem met de oorspronkelijke betekenis van bodem was echter dat nergens beschreven stond hoe dik men zich die onderste begrenzing moest voorstellen. Voer voor discussie dus.

ringsdecreet maken dat onderscheid niet. Daar geldt: Bodem (sensu lato) = bodem (sensu stricto) + ondergrond

Voor een visuele voorstelling van die verschillen, zie afbeelding 7.1.

De afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie van de administratie Economie is bevoegd voor het beheer van de delfstoffen, zowel delfstoffen uit de diepere ondergrond als oppervlakedelfstoffen. Oppervlakedelfstoffen worden daarbij juridisch gedefinieerd als geologische materialen, afkomstig uit de aardkorst, binnen de wettelijk voorziene, aan het oppervlak afgebakende ontginningsgebieden.

Hier moet wel opgemerkt worden dat bodem (s.s.) en ondergrond zowel binnen als buiten de ontginningsgebieden voorkomen. Meer nog: in dezelfde geografische locatie zijn de fysische, mineralogische en chemische samenstellingen ervan, daarbinnen en daarbuiten, volkomen identiek. Oppervlakedelfstoffen, zoals klei, leem, zand en andere, en *uitgegraven bodem*, met abstractie van bodem (s.s.), zijn uit dezelfde minerale materie opgebouwd. Geologische lagen, structuren en samenstellingen houden immers niet op aan juridische grenzen zoals die van ontginningsgebieden. Ze lopen gewoon door.

Dat betekent meteen dat de analytische gegevens en de andere daaruit afgeleide grootheden, verkregen naar

7.2 ACHTERGRONDGEHALTE

Het kernprobleem waarop dergelijke maatregelen een antwoord pogen te bieden is de kwestie van het onderscheid tussen wat verontreinigd is en wat zich nog in de natuurlijke staat bevindt. Daartoe werd in VLAREBO een toetsingskader opgenomen. Daarin staat per sporenelement een getal vermeld dat de scheidingslijn vormt om dat onderscheid te kunnen maken. Om vast te stellen of de chemische samenstelling beantwoordt aan een natuurlijke samenstelling toetst men het gehalte aan een specifiek sporenelement aan de desbetreffende toetsingswaarde. Het ligt voor de hand dat het antwoord op deze problematiek in de kennis van de natuurlijke samenstelling van gesteenten ligt. Specifiek voor Vlaanderen gaat het hier over losse gesteenten. Men kan een groot aantal geologische sites, waarvan men vrijwel zeker is dat ze gevrijwaard gebleven zijn van elke menselijke beïnvloeding, bemonsteren en op elk monster chemische analyses uitvoeren. Dergelijke in de natuur voorkomende gehalten aan sporenelementen geven een beeld van de geochemische achtergrond en worden daarom achtergrondgehalten genoemd.

DEFINITIE: achtergrondgehalten zijn de gehalten aan sporenelementen die men in diverse gesteenten in natuurlijke staat, vrij van menselijke beïnvloeding, aantreft.

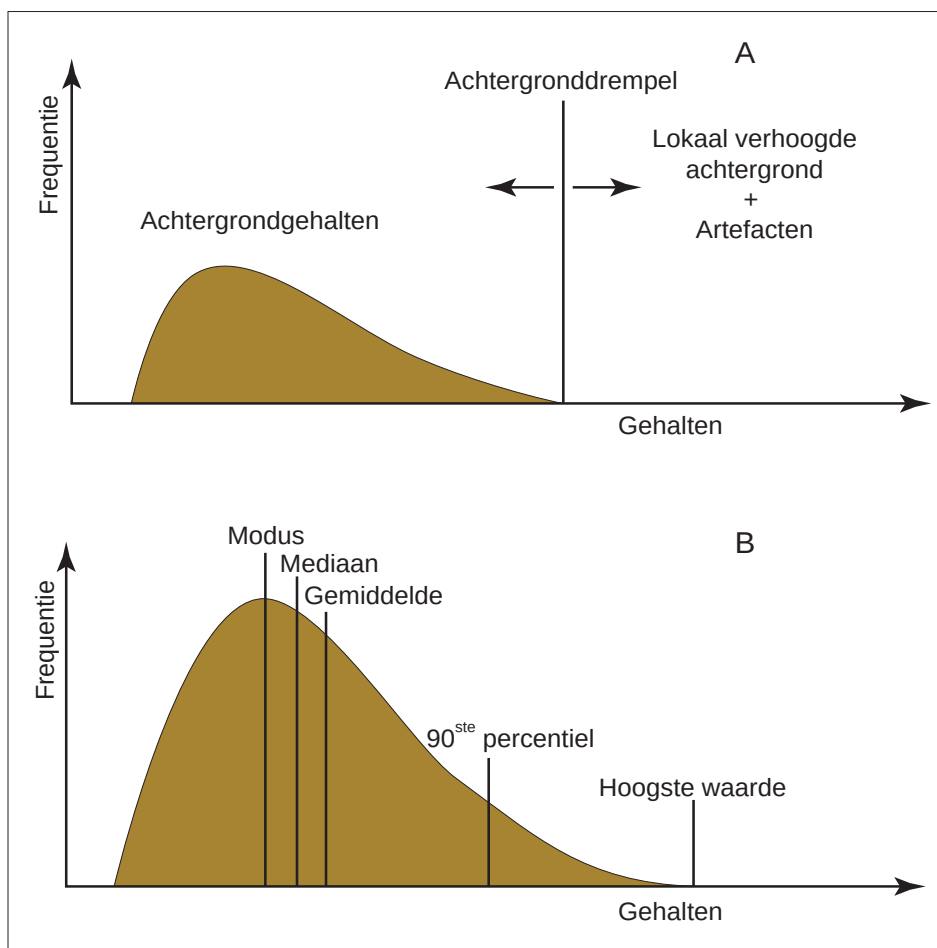


Waar ligt dan de grens tussen achtergrondgehalten en “artefactgehalten”? Artefacten zijn door de mens veroorzaakte wijzigingen aan de natuurlijke toestand. Wanneer men achtergrondgehalten in een frequentiediagram uitzet, verkrijgt men een curve die met wat inbeelding aan een misvormde klok doet denken (zie afbeelding 7.2, A). Elk punt van die curve stelt het aantal keren voor dat een bepaald gehalte aan een specifiek sporenelement waargenomen werd. Naar de hogere gehalten toe eindigt de klok in een min of meer langgerekte staart. Dat betekent gewoon dat de hogere gehalten minder en minder voorkomen, dat ze zelfs beduidend hoger kunnen zijn dan de grote meerderheid van de waarnemingen maar toch nog een continue groep vormen met de andere waarden, en daarom wel degelijk nog tot de achtergrond behoren. Er is dan geen enkele objectieve reden om te veronderstellen dat een van de waarden binnen die staart geen deel van de achtergrond zou uitmaken. Zelfs vanuit een statistisch

7.3 ACHTERGRONDDREMPEL

Deze grens zou men het best kunnen benoemen met een term als *achtergronddrempel* of *achtergrondniveau*, beide naar analogie van de zeer gebruikelijke Engelse benamingen *background-threshold* en *background-level*. De achtergronddrempel is de bovenste begrenzing van de achtergrond (-gehalten).

De benamingen *achtergrondgehalten* en *achtergronddrempel* worden hier omstandig beschreven, omdat uit de lezing van de tekst duidelijk blijkt dat de nomenclatuur zoals die in VLAREBO, en ook bij onze noorderburen, gehanteerd wordt, tot begripsverwarringen kan leiden. Het woord *gehalte* is in deze context logischerwijze synoniem van waarde, of zelfs getal. In een op dit ogenblik reeds in het kader van VLAREBO vrij goed ingeburgerd woordgebruik wordt het woord *achtergrondwaarde* als



Afb. 7.2: Verdelingskrommen en grenzen

oogpunt kan men zich aan het bestaan van een dergelijke staart verwachten. Hieruit volgt dat het hogere uiteinde van de curve als de grens aanzien moet worden. Alle waarden beneden de grens behoren tot de achtergrond.

synoniem van achtergronddrempel gebruikt. Twee in wezen verschillende begrippen, een waarneming en een criterium, worden aldus op een enigszins ongelukkige manier met elkaar verward. Zo werd bijvoorbeeld in een Nederlands gespecialiseerd tijdschrift de achtergronddrempel letterlijk gedefinieerd als “achtergrondwaarde of achtergrondgehalte” (cit.).



Omwillen van de eenvoud van definitie en doorzichtigheid van het begrip zullen wij de grenswaarde hierna als *achtergronddrempel* bestempelen.

DEFINITIE: *achtergronddrempels zijn de hoogste gehalten aan sporenelementen die nog tot de natuurlijke achtergrond behoren.*

Alle gehalten boven deze grens behoren dan tot het domein van de *mogelijke artefacten*. In de natuur kunnen immers ook gehalten voorkomen die hoger zijn dan de achtergronddrempel. Zo werd in hoofdstuk 5 al vermeld dat geologische lagen die veel organisch materiaal bevatten, soms gepaard gaan met diagenetische aanrijkingen aan een aantal zware metalen. Deze metalen werden door de werking van organische zuren wel eens opgelost en in naburige niveaus opnieuw neergeslagen. Op die wijze kunnen gehalten aan sporenelementen ontstaan die boven de achtergronddrempel liggen maar toch niets met verontreinigingen te maken hebben.

Hetzelfde geldt voor soms commercieel interessante concentraties aan metaalvoerende mineralen, beter bekend als ertsafzettingen. Op dit ogenblik zijn er in Vlaanderen geen geologische lagen van tertiaire of quaire ouderdom die aan die benaming beantwoorden. Het valt echter niet uit te sluiten dat in sommige formaties dunne lagen of laagjes voorkomen die merkelijk hogere gehalten aan bepaalde elementen bevatten. Een voorbeeld: fosfaathoudende laagjes kunnen ook lage gehalten aan uranium bevatten.

Geologisch onderzoek heeft echter al aangetoond dat deze mogelijkheid wel actueel is indien men in Vlaanderen ook de vaste gesteenten van het Brabantmassief, de sokkel waarop alle tertiaire lagen afgezet werden, in de problematiek mee zou betrekken.

Tevens moet erop gewezen worden dat voor dit onderzoek naar sporenelementen een bemonsteringscampagne werd uitgevoerd. Het beperkte aantal geraadpleegde boringen stelt niet veel meer voor dan een uitgebreide steekproef. Het is dus best mogelijk dat niet alle specifieke lagen en laagjes onderzocht werden, en dat hogere natuurlijke gehalten dan de hier verzamelde waarden in de Vlaamse ondergrond voorkomen. De witte vlekken op de kaarten van afbeelding 6.2 bevestigen deze veronderstelling.

De conclusie is dat gehalten die hoger liggen dan de achtergronddrempel, niet meteen als verontreinigingen bestempeld mogen worden. Dergelijke natuurlijke hogere gehalten noemen wij hier een *lokaal verhoogde achtergrond*. Het aantonen van een artefact vraagt nog enig verder onderzoek.

Uit het voorgaande blijkt dat de achtergrond uit een verzameling gemeten gehalten bestaat, met een zekere spreiding in grootte. In de praktijk wil men zo'n achtergrond vaak met één getal omschrijven. Een achtergrond definiëren door de volledige spreiding te vermelden is immers weinig praktisch, temeer omdat de lagere waarden weinig of niet relevant zijn. Zo heeft men de keuze tussen meerdere parameters (zie ook afbeelding 7.2, B):

- de hoogste waarde van de achtergrond;
- de gemiddelde waarde;
- de mediane waarde. Dat is de waarde waarbij 50 % van de waarden kleiner zijn en de andere 50 % groter;
- de modale waarde. Dat is de waarde die het grootste aantal keren waargenomen werd;
- het 90^{ste} percentiel. Dat is de waarde waarbij 90 % van de waarden kleiner zijn en de overige 10 % groter.

In Nederland is het gebruikelijk de achtergrond te definiëren als het 90^{ste} percentiel van de populatie aan gehalten en dat tevens als achtergronddrempel te gebruiken.

Het gebruik van het 90^{ste} percentiel kan verklaard worden door het feit dat men zich in Nederland in hoofdzaak over bodems (s.s.) uitspreekt. Wat de gehalten in deze bodems betreft tonen de vergelijkende diagrammen van afbeelding 6.6 een vrij brede spreiding bij sommige elementen, met soms relatief hoge waarden. Die kunnen voor een deel te wijten zijn aan oppervlakkige verontreinigingen, hoewel dat onderscheid niet altijd makkelijk aan te tonen zal zijn. Bij deze bodems is nog een sterke mate van onzekerheid daaromtrent aanwezig. In dat geval kan het veiliger zijn de 10 % hoogste waarden er niet bij te betrekken. Om dezelfde reden werd ook in het toetsingskader van VLAREBO het 90^{ste} percentiel als drempel gebruikt.

Bij monsters uit de ondergrond, waar invloed van de mens zo goed als uitgesloten is, bestaat die onzekerheid niet. In dat geval kan men beter de hoogste waarde van de achtergrond als achtergronddrempel aanwenden, en die meteen als definitie van de achtergrond in kwestie laten gelden.

7.4 TOETSINGSWAARDEN

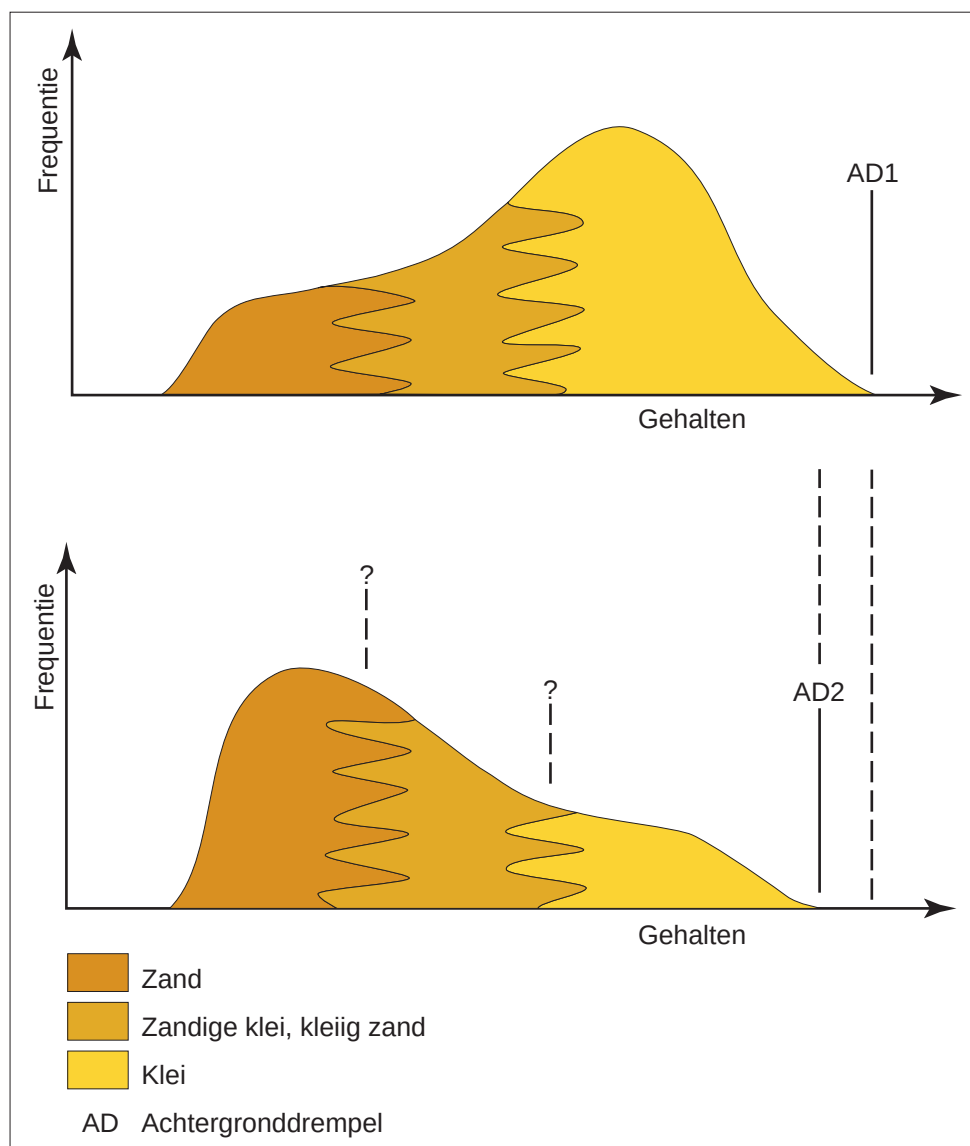
Het onderscheid tussen een natuurlijke samenstelling en een mogelijk artefact wordt door middel van een toetsingswaarde gemaakt. Voor elk sporenelement is er een toetsingswaarde die met de samenstelling van het monster varieert. In de praktijk gebruikt men als toetsingswaarde de uit chemische gegevens afgeleide *achtergronddrempel*. Toetsingswaarde en achtergronddrempel zijn dus synoniemen, op één subtiel onderscheid na: achtergronddrempels worden op basis van een populatie berekend, terwijl een toetsingswaarde op basis van een individueel monster berekend wordt.



De berekening van toetsingswaarden kan op verschillende manieren gebeuren.

a) Bij de bepaling van een toetsingswaarde voor een specifiek element neemt men aan dat een dergelijk getal zo dicht mogelijk bij de hoogste natuurlijke gehalten moet aansluiten. Dat veronderstelt dat, als het algemene niveau van gehalten aan sporenelementen niet bij alle soorten oppervlakedelfstoffen hetzelfde is, de toetsingswaarde eveneens verschillende waarden moet kunnen aannemen. Denk maar aan de subgroepen

mogelijk. Er bestaan kleiige zanden, zandige kleien, glauconiethoudende kleien in diverse onderlinge verhoudingen. Het is daarom volkomen onmogelijk een objectieve scheiding tussen de drie af te bakenen. Dat wel doen zou tot uitzichtloze betwistingen leiden. Afbeelding 7.3 toont hoe achtergrondrempels sterk beïnvloed worden door veel meer kleien dan zanden te bemonsteren, of omgekeerd. De figuur toont eveneens hoe arbitrair het zou zijn ergens tussen de diverse subgroepen van de verzameling een scheidingslijn te trekken.



Afb. 7.3: Effecten van heterogene populaties

pen klei, zand, leem, glauconietrijk zand. Zo werd er reeds op gewezen dat kleirijke monsters over het algemeen meer sporenelementen bevatten dan zuivere zanden. Het zou dan voor de hand liggen om voor elk van die subgroepen een toetsingswaarde vast te stellen. Dat is echter niet zinvol omdat de puntenwolken van die subgroepen zonder onderbreking in elkaar overgaan. Alle overgangen ertussen zijn

b) Men zou de verzameling gegevens ook volgens geologische formaties kunnen opsplitsen. Daarbij wordt aan elke formatie een set toetsingswaarden toegeschreven. Die optie is om de volgende redenen niet wenselijk:

- Bij de identificatie van de formatie kan betwisting ontstaan, niet alleen afhankelijk van de geraadpleegde specialisten of vakliteratuur terzake, maar



ook bij de interpretatie van het gesteentemateriaal. Bovendien is elke geologische kaart een interpretatie van ruimtelijke gegevens op een vooraf vastgelegde schaal, waarbij met een zekere foutenmarge rekening moet worden gehouden.

- De gemeten achtergrondgehalten van een formatie hebben meestal betrekking op de representatieve samenstelling ervan, met veronachtzaming van eventuele minder karakteristieke laagjes. Die laatste kunnen evenwel afwijkende achtergrondgehalten vertonen, bijvoorbeeld een dunne kleilaag in een overigens zandige formatie.
- Bij referentie naar geologische formaties doet men een beroep op abstracte begrippen. Voor de mensen op het terrein is het veel praktischer om naar de visueel herkenbare granulometrische en mineralogische aard van de ondergrond te verwijzen.

c) Men zou de toetsingswaarde kunnen gelijkstellen aan de achtergronddrempel die hoort bij de delfstofsubgroep met de hoogste achtergrondgehalten, bijvoorbeeld klei. Die optie heeft het nadeel dat alle informatie over delfstoffen met lagere achtergrondgehalten ongebruikt gelaten wordt. De afstand tussen de achtergronddrempel van zandmonsters en de door kleien bepaalde toetsingswaarde wordt dan, althans voor een aantal van de waarnemers, onaanvaardbaar groot.

Groot nadeel van methoden a) en b) is dat op die wijze een onhandig en ongewenst groot aantal sets van toetsingswaarden in het leven geroepen worden.

7.4.1 REGRESSIELIJNEN

Uit het voorgaande blijkt dat de meest verkieslijke oplossing voor dit probleem het tekenen van een lijn is die de gegevenspuntenwolk in een hoofdelement-sporenelementdiagram, langs de bovenzijde begrenst. Die begrenzing kan aan de hand van een reeds eerder berekende regressielijn ingeschat worden.

Klassieke statistische parameters zoals standaarddeviaties, correlatiecoëfficiënten, regressielijnen, t-, F- en χ^2 -testen, en andere, mogen echter strikt genomen uitsluitend uit normaalverdelingen afgeleid worden. Als het de bedoeling is om statistisch verantwoorde betrouwbaarheidsgrenzen of waarschijnlijkheden te berekenen, mogen dergelijke statistische technieken bijgevolg niet op een heterogene verzameling toegepast worden, zoals dat hier het geval is. Het is wel mogelijk een dergelijke regressielijn te berekenen en de bewerking zuiver als een grafisch hulpmiddel te beschouwen.

Vooreerst moeten die relaties tussen hoofd- en sporenelementen geselecteerd worden waarin het best een lineair verband herkend kan worden. Dat kan op een kwantitatieve wijze gebeuren door de correlatiecoëffi-

Correlatie		R Corr.coëff.	Opmerkingen
Ni	Al	0,89	excl. glauconietrijke zanden
	Fe	0,79	
Cr	Al	0,76	
	Fe	0,82	
Co	Al	0,83	excl. glauconietrijke zanden
	Fe	0,79	
Cu	Al	0,88	
Zn	Al	0,87	excl. glauconietrijke zanden
	Fe	0,75	
V	Al	0,86	excl. glauconietrijke zanden
	Fe	0,84	
Ba	Al	0,94	
Pb	Al	0,59	
As	Fe	0,60	

Tabel 7.1: Correlaties hoofdelement-sporenelement

ciënt te berekenen. Tabel 7.1 geeft een samenvatting van de correlatiecoëfficiënten, afgeleid uit de uitboorkernen afkomstige gegevens. De waarde 0 betekent dat geen correlatie waargenomen wordt, de waarde 1 toont een perfecte correlatie tussen twee elementen aan. Alleen de beste correlaties, dicht bij 1, werden geselecteerd. De daarbij horende diagrammen zijn die van afbeelding 6.3. Voor sommige sporenelementen werden de met glauconietrijke zanden overeenkomende punten bij de berekening van de correlatiecoëfficiënt en de regressielijn achterwege gelaten omdat ze de spreiding van de puntenwolk onnodig vergroten. De bedoeling hiervan is de toetsingsfunctie nauwkeuriger bij de puntengroepen met de hoogste gehalten te doen aansluiten.

7.4.2 TOETSINGSFUNCTIES

De toetsingsfunctie is de wiskundige vergelijking van de rechte lijn die de achtergronddrempels voor een specifiek sporenelement bij variërende samenstelling van het onderzochte monster met elkaar verbindt. De toetsingsfunctie wordt verkregen door bij elk punt van de regressielijn een arbitrair maar vooraf vastgesteld getal op te tellen. Ze wordt daarom voorgesteld door een formule van het type

$$y = ax + b$$

Het getal b wordt zodanig gekozen dat de lijn van achtergronddrempels voldoende hoog boven de puntenwolk van het diagram gelegen is. Het aantal punten met een natuurlijk gehalte boven die lijn moet tot een minimum beperkt blijven. Om willekeurig gekozen getallen te vermijden, wordt hiervoor een beroep gedaan op de standaardschattingsfout op de regressie. Die wiskundig

berekende fout mag hier, nogmaals, uitsluitend als een grafisch hulpmiddel beschouwd worden, zonder strikte statistische betekenis. De toetsingsfunctie wordt in dit onderzoek, na enig experimenteren, als volgt gedefinieerd:

Toetsingsfunctie = regressielijn + 4 x de standaard-schattingsfout

Deze definitie levert, bij de bestudeerde populatie van 188 monsters, het volgende aantal overschrijdingen op:

Correlatie	Aantal
Cr - Fe	1
Cr - Al	0
Ni - Al	0
Ni - Fe	0
As - Fe	2
Pb - Al	3
Zn - Fe	0
Zn - Al	1
Cu - Al	1
Co - Fe	1
Co - Al	1
V - Fe	2
V - Al	1

Tabel 7.2: Overschrijdingen bij $r + 4$ standaardfouten

Bij de bepaling van de achtergrondrempels is het de bedoeling om de verzameling gegevens zo breed mogelijk af te bakenen, om zo weinig mogelijk normale resultaten als anomaal te classificeren. Zo niet zouden monsters met een natuurlijke samenstelling ten onrechte als artefacten bestempeld kunnen worden.

De geometrische posities van de respectievelijke toetsingsfuncties werden in de diagrammen van afbeelding 6.3 aangebracht. De wiskundige vergelijkingen ervan zijn in tabel 7.3 samengevat. Deze tabel vormt dus het toetsingskader voor oppervlaktedelfstoffen.

De aangegeven formules moeten als volgt gelezen worden. Vul de waargenomen gehalten aan ijzer of aluminium van een specifiek monster in, in ppm. De uitvoering van de rekenkundige bewerking geeft dan de achtergrondrempel voor een sporenelement bij dat specifieke gehalte aan ijzer of aluminium.

	Achtergrondrempel berekend met Aluminiumgehalte (ppm)	Achtergrondrempel berekend met IJzergehalte (ppm)	Invariabele achtergrondrempel (ppm)
Ni	0,00058 Al + 25,8	0,00074 Fe + 32,0	
Cr	0,00113 Al + 101,0	0,00138 Fe + 80,4	
Co	0,00021 Al + 13,2	0,00026 Fe + 12,5	
Cu	0,00026 Al + 11,1		
Zn	0,00105 Al + 58,0	0,00119 Fe + 66,0	
Pb	0,00015 Al + 19,3		
As		0,00021 Fe + 22,7	
V	0,00167 Al + 100,8	0,00212 Fe + 90,1	
Ba	0,00230 Al + 60,3		
Cd			0,8
Sn			10
Se			10
Mo			15
Sb			1
Hg			2

Tabel 7.3: Ontwerp van toetsingskader

7.4.3 BEPALING VAN DE ACHTERGRONDREMPELS

a) Voor sporenelementen waarvan de gehalten meestal in de buurt van de detectielimiet liggen, of eronder, worden de toetsingswaarden arbitrair op een onveranderlijke waarde vastgelegd, onafhankelijk van de gehalten aan ijzer en aluminium. De bepaling van de achtergrondrempels voor deze elementen steunt op een algemene inspectie van de respectievelijke analytische resultaten, zoals voorgesteld in de gegevenstabel. Dat is het geval voor de elementen kwik, cadmium, tin, selenium, molybdeen en antimon.

b) Voor sporenelementen waarvan de gehalten doorgaans groter zijn dan de detectielimieten, worden de achtergrondrempels aan de hand van de toetsingsfuncties bepaald. Bij de toepassing van het hier voorgestelde toetsingskader moeten de volgende regels in acht genomen worden:

- De mogelijkheid wordt geboden om de gehalten aan twee correlaties te toetsen.



- Als een waargenomen gehalte door middel van een eerste correlatie een overschrijding van de toetsingswaarde tot gevolg heeft, kan nog op de tweede correlatie worden getest.
- Het is voldoende dat een gehalte door een van de twee correlaties verklaard wordt, opdat de samenstelling van het monster als natuurlijk bestempeld wordt.
- Een gehalte kan meestal door de twee correlaties verklaard worden, maar niet noodzakelijkerwijze.

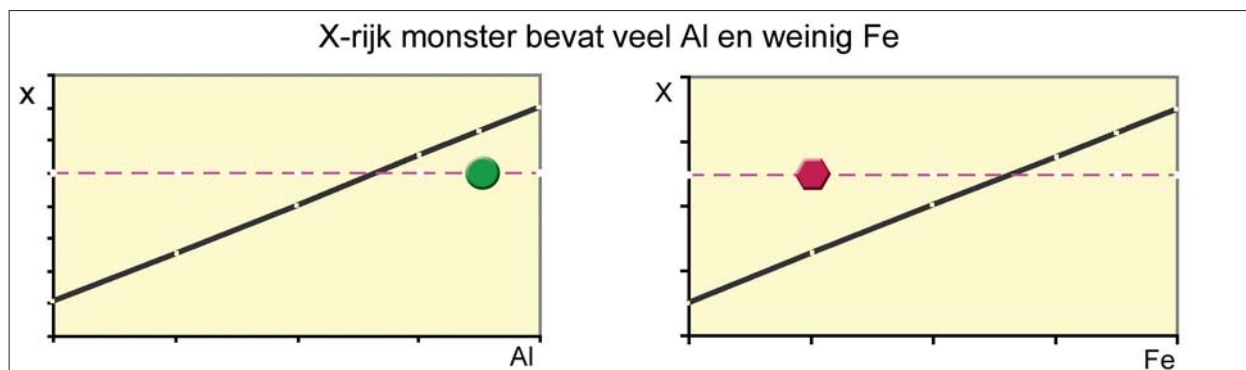
Voor een verklaring moet men van de volgende vaststelling vertrekken: bij lage gehalten aan de hoofdelementen aluminium of ijzer zijn achtergrondrempels steeds aan de lage kant (zie afbeelding 6.3).

- Stel nu dat een monster een hoog gehalte aan sporenelement X bevat, en dat dit monster uit mineralen bestaat die veel aluminium bevatten maar slechts weinig ijzer. Bij toetsing aan de correlatie met Fe zal het punt dat aan de gehalten aan X en Fe beantwoordt, zich ergens in de linkerzijde van het betreffende correlatiediagram bevinden. Het punt zal dan hoogstwaarschijnlijk uitsteken boven de rechte lijn die de toetsingsfunctie voorstelt (zie afbeelding 7.4.a). Er is dan sprake van een overschrijding. Toetst men vervolgens X aan de correlatie met Al, dan zal het punt dat aan de gehalten aan X en Al beantwoordt, zich ergens in de rechterzijde van het betreffende correlatiediagram bevinden. Het

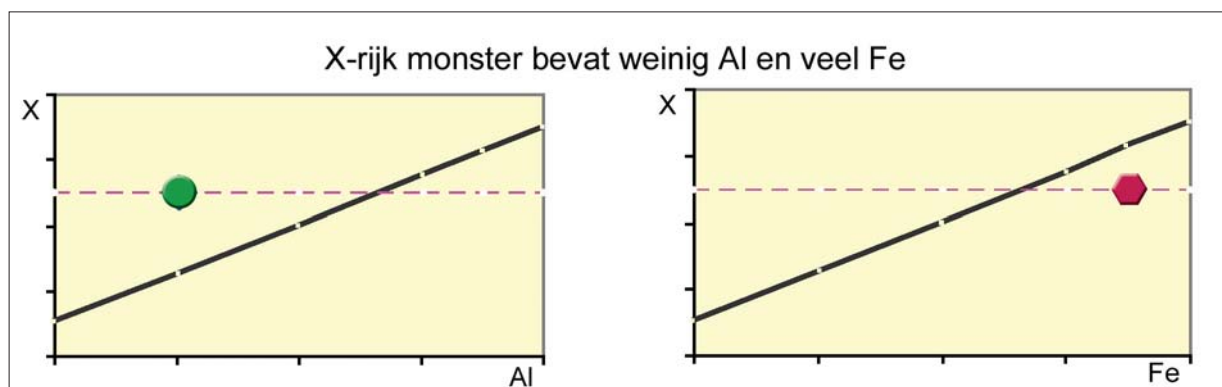
punt zal zich dan hoogstwaarschijnlijk bevinden onder de rechte lijn die de toetsingsfunctie voorstelt. Er is dan geen sprake van een overschrijding. In dit geval kan men het gehalte aan element X niet verklaren door het gehalte aan ijzer maar wel door het gehalte aan aluminium.

- Het omgekeerde doet zich voor als het X-rijke monster uit mineralen bestaat die veel ijzer bevatten maar slechts weinig aluminium. In dergelijk geval zal het punt dat aan de gehalten aan X en Al beantwoordt, bij toetsing aan de correlatie met Al, boven de betreffende achtergrondrempel uitsteken. Bij toetsing aan de correlatie met Fe zal het punt zich lager bevinden dan de betreffende achtergrondrempel (zie afbeelding 7.4.b). Hier kan men het gehalte aan het element X niet verklaren door het gehalte aan aluminium maar wel door het gehalte aan ijzer.

Aangezien men niet op voorhand weet welke mineralen in het monster voorkomen, en in welke proporties, moet men bij elke beoordeling de twee correlaties uittesten, op ijzer en op aluminium, en de correlatie selecteren die de beste verklaring geeft. Het is duidelijk dat de correlatie die het achtergrondgehalte kan verklaren, ook de toetsingswaarde moet leveren. Redenering en figuren tonen aan dat, ook als de twee correlaties simultaan een verklaring opleveren, de hoogste van de twee toetsingswaarden als de meest aangewezen achtergrondrempel moet worden geselecteerd.



Afb. 7.4 .a: Toepassing van het ontwerptoetsingskader.



Afb. 7.4 .b: Toepassing van het ontwerptoetsingskader.

7.5 DE PROEF OP DE SOM

Om de praktische geldigheid van dit ontwerp van toetsingskader te testen, werden de analytische gegevens van de reeks monsters, afkomstig uit ontginningen, overeenkomstig de uiteengezette procedures aan een vergelijkend onderzoek onderworpen. Het gaat hier over een verzameling van 86 monsters, getoetst voor 7 sporenelementen (As, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, zie VLA-REBO, plus Co). In totaal worden hier dus 602 gegevens getoetst.

Na onderzoek bleken 7 monsters gezamenlijk 9 overschrijdingen van de achtergrondrempels te vertonen, voor 3 elementen.

Vervolgens werden uit de resultatenlijst van een derde analytisch laboratorium de gegevens die met dezelfde monsters corresponderen, bij het onderzoek betrokken. Controle daarvan beperkte het aantal overschrijdingen tot 3, afkomstig uit 3 monsters, voor 2 elementen.

De relatieve grootte van de overschrijdingen bedraagt 5 %, 11 % en 39 %. Het betreft hier drie monsters van klei.

Monsters uit ontginningen

	Aantal overschrijdingen	
	labo 2	na vergelijking met labo 3
Cu	4	2
Pb	1	0
Zn	4	1

7.6 BETEKENIS VAN OVERSCHRIJDINGEN

Zoals eerder in de tekst aangetoond, kan een overschrijding zowel op een natuurlijke samenstelling als op een artefact wijzen.

Voor de behandeling van overschrijdingen van achtergrondrempels kan het concept van de *lokaal verhoogde achtergrond*, reeds eerder in dit hoofdstuk vermeld, daarom van groot nut zijn. Dit is een begrip dat in de wereld van de geochemische ertsprospectie geregeld gehanteerd wordt. Vaak komen ertsafzettingen voor in een geologische omgeving waar grote volumes gesteenten in een zwakke mate met interessante elementen aangerijkt zijn. Zo ontstaat een kleiner gebied waarin de gehalten aan bijvoorbeeld zware metalen een licht hogere achtergrond vormen ten opzichte van de achtergrond in het omgevende grotere gebied.

Op analoge wijze kan in het raam van het onderzoek naar de natuurlijke samenstelling van de ondergrond een *lokaal verhoogde achtergrond* gedefinieerd worden.

DEFINITIE: een lokaal verhoogde achtergrond is een verzameling achtergrondgehalten van een specifieke geologische laag met een weinig frequent voorkomende chemische samenstelling. Die gehalten zijn groter dan de berekende achtergrondrempels en zijn door hun eerder uitzonderlijk karakter niet bij de berekening daarvan betrokken geweest.

Het nu gestelde probleem van overschrijding komt neer op het maken van onderscheid tussen een *lokaal verhoogde achtergrond* en een artefact of verontreiniging. Om hierover uitsluitsel te krijgen is verder onderzoek wenselijk.

Uit de bespreking van de resultaten is gebleken dat de analytische gegevens behoorlijk kunnen variëren. Die gegevens mogen daarom beslist niet als absolute en onherroepelijke waarden bekeken worden. Logischerwijze vloeit hieruit voort dat een eerste stap in het voortgezet onderzoek erin bestaat de analytische resultaten te herbekijken. Het is daarbij belangrijk extra kosten voor het onderzoek zo veel mogelijk te beperken. In een eerste fase kunnen volgende acties ondernomen worden:

- de ter beschikking zijnde monsters voor een heranalyse aanbieden bij hetzelfde laboratorium en, indien nodig, bij een tweede laboratorium;
- de ruimtelijke verspreiding van de overschrijdingen nagaan. Bij artefacten worden die verwacht een in omvang beperkt aaneensluitend ruimtelijk geheel te bestrijken;
- een visuele inspectie van het terrein met het oog op eventuele aanwezigheid van, onder andere, kleinschalige stortactiviteiten zoals schroot, wrakken en autobatterijen, en bodemverhardingen zoals metaalslakken en as;
- navraag doen naar vroegere plaatselijke industriële activiteiten.

Voor verdere beoordelingen kan niet voldoende onderstreept worden dat de natuurlijke samenstelling van de ondergrond over de gehele aardbol de normale toestand is. Dat is een bewering die eigenlijk een open deur intrapt. Hieruit volgt dat elke verontreiniging een afwijkende toestand is. Daaruit vloeien enkele essentiële consequenties voort op het vlak van de logica. Als men van een fenomeen wil aantonen dat het afwijkt van de normale toestand, moet men een vergelijking maken met de normale toestand. De normale toestand doet dus dienst als referentie. Het is echter onmogelijk om van de natuurlijke toestand aan te tonen dat hij natuurlijk is omdat er geen andere referentie bestaat. Van de twee toestanden, natuurlijk en afwijkend, is de afwijking dus de enige die aangetoond kan worden.



Het komt er dan op aan criteria te vinden om de afwijkende aard van een toestand aan te tonen. Die afwijkende aard kan uitsluitend uit de kennis van de natuurlijke toestand afgeleid worden. Stratigrafie, sedimentologie, mineralogie, geochemie en structurele geologie zijn wetenschappelijke disciplines die over de hele wereld ontzaglijke hoeveelheden waarnemingen aangaande de ondergrond hebben verzameld. Daaruit werden tal van wetmatigheden afgeleid die allerhande geologische processen beschrijven. Door de mens veroorzaakte processen beantwoorden geenszins aan die wetmatigheden. Een verontreiniging wordt dus aangetoond als de ermee gepaard gaande waarnemingen niet door een van die natuurlijke wetmatigheden verklaard kunnen worden.

Aangezien men vertrekt van de veronderstelling dat er geen verontreiniging in het spel is, komt deze handelwijze overeen met wat wetenschappers de nulhypothese uit de statistiek noemen.

In een tweede fase moeten daaruit voortvloeiend op het terrein eventueel nieuwe waarnemingen verricht worden. Die nieuwe acties kunnen behoorlijk kostenintensief zijn:

- een nieuwe bemonstering uitvoeren en nieuwe chemische analyses, met bijzondere aandacht voor tactische aspecten, op basis van geologische informatie;
- verticale en horizontale geochemische continuïteit in de ondergrond aantonen of ontkrachten;
- een geochemische relatie aantonen of ontkrachten tussen bodem en ondergrond.

7.7 NABESCHOUWINGEN

De opzet van het toetsen van de geochemische inhoud van een gesteente aan wat men de natuurlijke samenstelling noemt, was het ontwikkelen van regels waarmee een onderscheid gemaakt zou kunnen worden tussen een gesteente dat zich nog in de oorspronkelijke natuurlijke staat bevindt en een gesteente dat door menselijke activiteiten een gewijzigde artificiële samenstelling verkregen heeft.

De aanleiding voor het ondernemen van die poging was de bezorgdheid van zowel overheid als publiek voor de volksgezondheid in het licht van de nadelige neveneffecten van de moderne industriële maatschappij. Bezorgdheid die tijdens de twee laatste decennia van de twintigste eeuw ten top gedreven werd toen enkele lokale incidenten aan het daglicht kwamen, waarbij de gezondheid van de mens aantoonbaar in het gedrang was gebracht.

De overheid nam dan initiatieven om enerzijds andere in het Vlaamse land verborgen zwarte punten op te sporen, en anderzijds regels vast te leggen om dat soort situaties in de toekomst te vermijden. Met een toetsingskader zoals hier uiteengezet kan dan wel vastgesteld worden

dat een gesteente eventueel een artificiële samenstelling verkregen heeft, maar het is op zichzelf niet in staat om aan te geven in welke mate die nieuwe samenstelling naar risicovolle toestanden geëvolueerd is. Er is daarbuiten ook kennis vereist over het verband tussen risico's, zoals toxiciteit, en de aanwezigheid van zware metalen en niet-metalen. Meer concreet: vanaf welk gehalte is een sporenelement in een gesteente als toxisch voor de mens te beschouwen? Het zoeken naar normen in dat verband heeft geleid tot het invoeren van *saneringsnormen*: gehalten aan sporenelementen waarbij een correctief optreden nodig geacht wordt.

Om de volle betekenis van dergelijke gevarendrempels te vatten, moet men echter weten onder welke omstandigheden het toxisch karakter van een specifiek chemisch element wel degelijk tot uiting komt. Laat ons hier vertrekken van het geval waarbij dergelijke elementen in de menselijke voeding terechtkomen, doordat planten die uit de bodem opnemen.

Een plant neemt geen vaste stoffen in zijn organen op, wel vloeistoffen die de nuttige elementen in oplossing bevatten. De plant kan dus van het poriënwater "drinken", het water dat zich tussen de mineraalkorrels bevindt. Daarbovenop produceren de toppen van plantenwortels minuscule hoeveelheden zuren die hen in staat stellen reeds verwerde mineralen gedeeltelijk te ontbinden. Of een plant minerale voedingsstoffen uit de grond kan halen hangt daarom af van het feit of die elementen makkelijk in oplossing gebracht kunnen worden. Die eigenschap noemt men de *(bio)beschikbaarheid* van een element.

Verschillen in beschikbaarheid van een element staan in verband met de wijze waarop die elementen aan de mineralen verbonden zijn. In hoofdstuk 3 werd vermeld dat sporenelementen aan het oppervlak van een mineraalkorrel geadsorbeerd kunnen zijn, ofwel dat ze in de kristallijne structuur van de mineralen opgesloten zitten. Geadsorbeerde elementen kunnen veel makkelijker losgemaakt worden en in de oplossing terechtkomen. Om diezelfde elementen uit een mineraal vrij te maken moet de hele structuur van dat mineraal opgebroken worden. De oplosbaarheid van veel mineralen is in natuurlijke omstandigheden en op korte termijn erg verwaarloosbaar. De zuurtegraad van de bodem speelt daarin een rol. Op lange termijn, meerdere jaren, moet daarmee wel rekening gehouden worden. De meeste gewassen staan echter niet langer dan een half jaar in de grond. Het totale gehalte aan een sporenelement in een gesteente zegt dus niets over de beschikbaarheid ervan. Kortlevende planten komen dan ook slechts met een kleine fractie van de totale inhoud aan sporenelementen in contact. Er zijn nog een aantal andere fysicochemische factoren die de opname door planten beïnvloeden, maar in deze context volstaat deze vereenvoudigde uitleg. Op het terrein werd echter al wetenschappelijk aangetoond dat de gehalten



aan sporenelementen in gewassen en in de grond geen correlatie vertonen (Lexmond T., del Castilho P.). Niemand hoeft dus te schrikken bij het vernemen van de aanwezigheid van zware metalen in gesteenten. In eerste instantie zitten die hoofdzakelijk vast gebetonneerd in diverse mineralen. Men kan rustig per ongeluk een brokje klei opeten, maar van de chroom- en nikkelatomen die in de klei vervat zitten, zullen er vrijwel geen in het lichaam achterblijven. Met het bovenstaande rekening houdend kan worden ingezien dat de gehalten aan zware metalen en niet-metalen in gesteenten geen rechtstreekse maat zijn voor hun risicogehalte ten aanzien van de gezondheid.

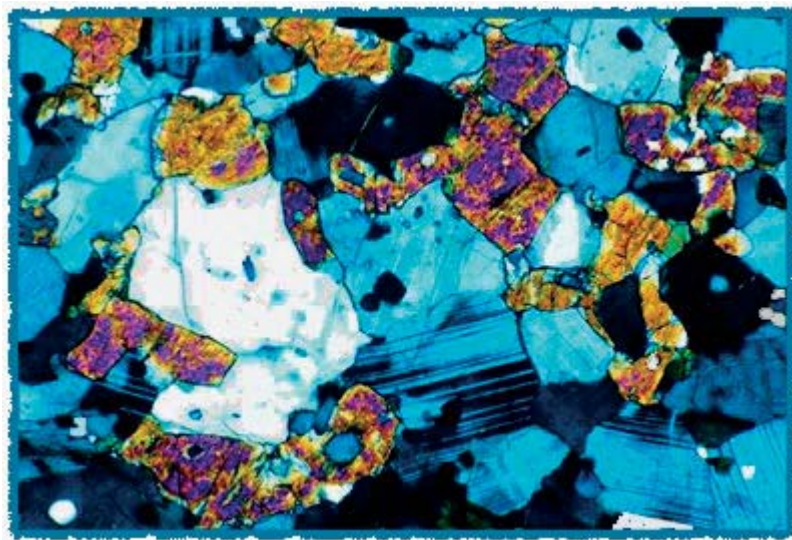
Gebrek aan inzicht in deze fenomenen kan tot foutieve beweringen leiden. Zo wordt klei wel eens vermeld als een delfstof die risicovol is voor de gezondheid vanwege de zwavel die daarin aanwezig is. In de natuurlijke toestand zit die zwavel evenwel stevig in mineralen zoals marcassiet ingebouwd. Bij de uitgraving van klei en de aanwending ervan elders als afdek-, aanvul- of ophoogspecie, blijft die zwavel nog evengoed opgesloten, en komt die niet vrij in de omgeving. Er is dus niets aan de hand. Wanneer de klei echter voor de productie van bakstenen gebruikt wordt, ondergaat hij een erg drastische thermische behandeling. De toegediende energie volstaat om de structuren van de meeste aanwezige mineralen grondig af te breken. Baksteen is dan ook geen klei meer. Dat is de reden waarom uit de kleimineralen fluor vrijkomt. Om dezelfde reden worden alle sulfiden afgebroken en wordt zwavel als zwaveldioxide in de lucht uitgestoten, dat zich op zijn beurt met de luchtvochtigheid tot bijtend zwaveligzuur verbindt.

Strikt onderscheid moet daarom gemaakt worden tussen de delfstof en de industriële bewerking.

Het is dus van het allergrootste belang dat allen die met de problematiek van de natuurlijke samenstelling van delfstoffen in aanraking komen, goed begrijpen wat sporenelementen precies zijn, waar en hoe ze in de natuur voorkomen en welke rol ze daarin spelen. Het moet bovendien ten zeerste vermeden worden dat verkeerde uitspraken over dit onderwerp bij de bevolking ten onrechte gevoelens van onveiligheid zouden doen ontstaan.



BIJLAGE



LITHOSTRATIGRAFISCHE CODES TERTIAIRKAART*

LITHOSTRATIGRAFISCHE CODES TERTIAIRKAART*	
FORMATIE	LID
Li Lillo	
Ml Mol	
Kd Kattendijk	
Kl Kasterlee	
Di Diest	De Dessel
Bc Berchem	An Antwerpen
Bb Bolderberg	Ge Genk Ho Houthalen
Bm Boom	Pu Putte Te Terhagen Bw Belsele-Waas
Bi Bilzen	Ke Kerniel Be Berg
Bo Borgloon	Kr Kerkom
Zz Zelzate	Ru Ruisbroek Ba Bassevelde
Sh Sint-Huibrechts-Hern	
Ma Maldegem	Od Onderdijke Bu Buisputten Zo Zomergem On Onderdale Ur Ursel As Asse We Wemmel
Ld Lede	
Br Brussel	
Aa Aalter	Oe Oedelem
Ge Gent	Vl Vlierzele Pi Pittem Me Merelbeke
Tt Tielt	Eg Egem Ko Kortemark
Ko Kortrijk	Aa Aalbeke Mo Moen
Ti Tienen	Lo Loksbergen
Hn Hannut	Li Lincent
Hs Heers	Ge Gelinden

* Uitsluitend deze die in de monsterlijsten vermeld worden





GERAADPLEEGDE WERKEN

- BROOTHAERS L., 2000, Zandboek Vlaanderen, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie
- DEN HARTOG C., HAUTVAST J.G.A.J., DEN HARTOG A.P., 1978, Nieuwe voedingsleer, Aula nr 616, Spectrum
- DAEMS W., 1999, Brood tegen kanker, in EOS-magazine, maart 1999
- GULLENTOPS F., WOUTERS L., 1996, Delfstoffen in Vlaanderen, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, afdeling Natuurlijke Rijkdommen en Energie
- HAWKES H.E., WEBB J.S., 1962, Geochemistry in mineral exploration, Harper&Row, New York
- HUISMAN D.J., 1998, Geochemical characterisation of subsurface sediments in the Netherlands, Doctoraatsverhandeling, Landbouwniversiteit Wageningen
- KLEIN C., HURLBUT S., 1993, Manual of mineralogy, after J.D.Dana, 21st ed. John Wiley & Sons
- LARSEN G., CHILINGAR G.V., ed., 1967, Diagenesis in sediments, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York
- LEENAERS H., VAN DER GAAST N., ZEGWAARD J., 1998, Werkdocument. Achtergrondgehalten. Bodem, pp 26-28, februari
- LEXMOND T., DEL CASTILHO P., 1998, De “beschikbaarheid” van zware metalen voor planten, Bodem, pp14-16, februari
- MASON B., 1966, Principles of Geochemistry, John Wiley & Sons
- MILLOT G., 1964, Géologie des argiles, Masson, Paris
- PEIJNENBURG W., DE ROOIJ N., 1998, Beoordeling bodemkwaliteit kan beter, Bodem, pp 12-13, februari
- POSTHUMA L., SMIT E., 1999, Voldoet de ecotoxicologische onderbouwing van generieke bodemnormen ?, Bodem, pp 142-144, oktober
- PRESS F., SIEVER R., 1998, Understanding Earth, Freeman & Co, New York
- TACK F.M.G., VERLOO M.G., VANMECHELEN L., VAN RANST E., 1997, Baseline concentration levels of trace elements as a function of clay and organic carbon contents in soils in Flanders, The Science of the Total Environment 201 (1997) pp. 113-123. Elsevier
- VANDENBERGHE N., LAGA P., 1991, De aarde als fundament, Acco, Leuven
- VAN DER SLUYS J., BRUSSELMANS A., DE VOS W., SWENNEN R., 1997, Regional geochemical mapping of overbank and stream sediments in Belgium and Luxemburg, Belgische Geologische Dienst, Professional Paper 1997/1- nr 283



AFBEELDINGEN

Afb. 2.1: Sporenelementen in het menselijk lichaam	19
Afb. 2.2: Opname van sporenelementen door mens en dier	20
Afb. 2.3: Sporenelementen in de as van planten (in ppm.)	22
Afb. 2.4: Gemiddelde gehalten aan sporenelementen in de aardkorst.....	23
Afb. 2.5: Stroomgebieden.....	24
Afb. 2.6: Sporenelementen in oppervlaktewater	25
Afb. 2.7: Gemiddelde gehalten aan sporenelementen in zeewater.....	26
Afb. 2.8: Invoer van chemische elementen in de oceaan	27
Afb. 3.1: Atomen en coördinatiegetallen	34
Afb. 3.2: Kristalrooster van keukenzout (NaCl)	35
Afb. 3.3: Kristalstructuren van silicaatmineralen	36
Afb. 3.4: Atomaire vervanging	39
Afb. 3.5: Adsorptie	41
Afb. 4.1: Geochemische kringloop.....	45
Afb. 4.2: Graniet	47
Afb. 4.3: Basalt	47
Afb. 4.4: Gefractioneerde kristallisatie	48
Afb. 4.5: Gehalte aan enkele elementen in stollingsgesteenten.....	49
Afb. 4.6: Bladstructuur van muscoviet	51
Afb. 4.7: Verwering van veldspaten	57
Afb. 4.8: Structuur van kleimineralen.....	58
Afb. 4.9: Verwering van ijzerhoudende silicaten	59
Afb. 4.10: Schematische voorstelling van een bodem in een vochtig gematigd klimaat	61
Afb. 4.11: Variatie van het gehalte aan enkele elementen in tropische bodems.....	62
Afb. 4.12: Afzetting van sedimentgesteenten	63
Afb. 4.13: Diagenetische processen.....	66
Afb. 5.1: Schematische voorstelling van het Quartair en het Tertiair in Vlaanderen	71
Afb. 5.2: Geologie zonder quartaire dekzanden en lemen.....	72
Afb. 5.3: Lithostratigrafie van het Tertiair in Vlaanderen.....	74
Afb. 5.4: Ligging bemonsterde boorputten	76
Afb. 5.5: Overzicht van het lithostratigrafisch bereik van de bemonsterde boorkernen	77
Afb. 5.6: Geografische ligging van de bemonsterde delfstofwinningen.....	84
Afb. 6.1: Vergelijking van analyseresultaten uit drie laboratoria	90
Afb. 6.2: Chroom in het tertiair	101
Afb. 6.2: Nikkel in het tertiair	102
Afb. 6.2: Zink in het tertiair	103
Afb. 6.2: Kobalt in het tertiair	104
Afb. 6.2: Koper in het tertiair	105



<i>Afb. 6.2: Lood in het tertiair</i>	<i>106</i>
<i>Afb. 6.2: Arseen in het tertiair</i>	<i>107</i>
<i>Afb. 6.3: Diagrammen sporen- versus hoofdelementen.....</i>	<i>109</i>
<i>Afb. 6.4: Delstotypes in de gegevensverzameling.....</i>	<i>115</i>
<i>Afb. 6.5: Genormaliseerde gegevensverdelingen</i>	<i>116</i>
<i>Afb. 6.6: Vergelijking van gehalten in zand, glauconietrijk zand, klei, leem en bodems</i>	<i>117</i>
<i>Afb. 6.7: Vergelijking ontsluitingsmethoden</i>	<i>119</i>
<i>Afb. 7.1: Bevoegdheidsdomeinen en ‘bodem’</i>	<i>125</i>
<i>Afb. 7.2: Verdelingskrommen en grenzen.....</i>	<i>127</i>
<i>Afb. 7.3: Effecten van heterogene populaties</i>	<i>129</i>
<i>Afb. 7.4: Toepassing van het ontwerptoetsingskader.....</i>	<i>132</i>



TABELLEN

Tabel 3.1: Relaties tussen ionenstralen en coördinatiegetallen	35
Tabel 3.2: Periodieke tabel van Mendelejev	38
Tabel 4.1: Vaak voorkomende mineralen in stollingsgesteenten	50
Tabel 4.2: Sporenelementen in enkele mineralen (in ppm).....	53
Tabel 4.3: Sporenelementen in stollingsgesteenten (in ppm).....	54
Tabel 4.4: Weerstand van mineralen tegen verwerking.....	56
Tabel 4.5: Mobiliteit van elementen aan het oppervlak van de aardkorst.....	59
Tabel 4.6: De meest voorkomende accessorische mineralen.....	65
Tabel 5.1: Monsters uit boorkernen	78
Tabel 5.2: Monsters uit ontginningen	85
Tabel 6.1: Statistische fouten	90
Tabel 6.2: Gegevens uit boorkernen (ppm).....	92
Tabel 6.3: Gegevens uit ontginningsgebieden (ppm).....	99
Tabel 6.4: Analytische resultaten van sporenelementen met gehalten in de buurt van de detectielimiet	108
Tabel 6.5: Vergelijking van ontsluitingsmethoden (ppm).....	121
Tabel 7.1: Correlaties hoofdelement-sporenelement	130
Tabel 7.2: Overschrijdingen bij $r + 4$ standaardfouten	131
Tabel 7.3: Ontwerp van toetsingskader	131

