

Grondstoffen uit de oceaan

Stijn Dewaele

Mineralogy & Petrology, Department of Geology, UGent

1. Mineralisatie - ertsafzettingen

* Aardkorst: 99% uit 9 elementen: Al, Si, Ca, Mg, Na, K, Ti, O & Fe



Elementen zijn gegroepeerd in mineralen: oxyden, sulfieden, ...

* Belang mineralen: Noodzakelijke component dagdagelijks leven

e.g. Bouwmaterialen (beton-dakpannen-asfalt-...)
 Voedingsindustrie (zout-kaoliniet-...)
 Transport (staal-aardolie-...)
 Energie (Uranium-steenkool-...)
 High-technologie (coltan – silicium - ...)
 etc.

* Natuurlijke rijkdommen = minerale rijkdommen + energiebronnen



oceanen: mineralen, olie, gas, gashydraten, ...

- relatief beperkte kennis voorkomen
- exploratie en exploitatie: technische uitdaging
- belangrijke economische bron
- politieke implicaties



technische uitdagingen ↔ milieuoverwegingen

* Mineralisatie: concentratie van bepaalde elementen
gevormd door geologische processen



* Ertsafzetting: gesteente met een abnormale concentratie aan een
of meerdere elementen die economisch uitbaatbaar zijn

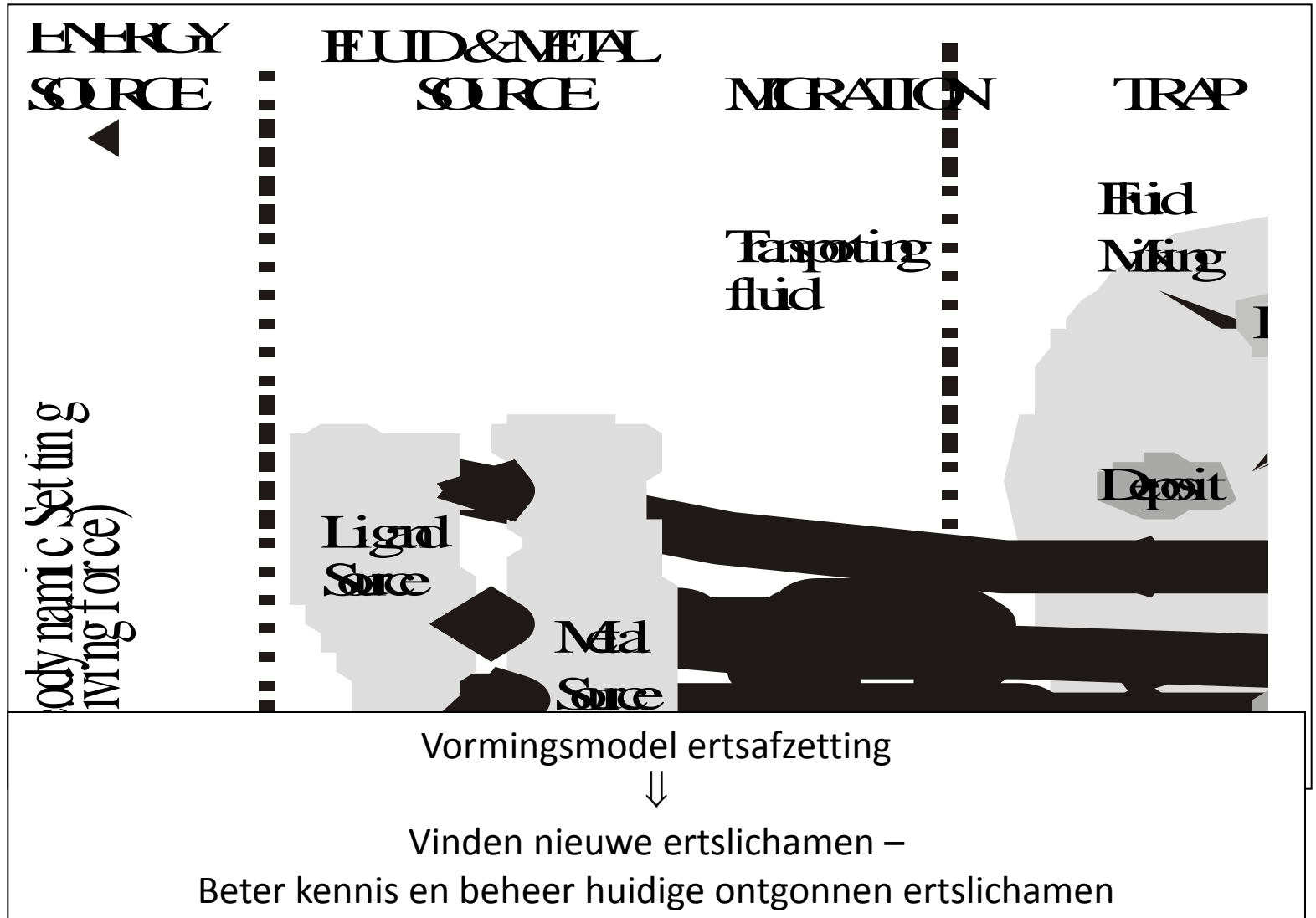
	Gemiddelde samenstelling aardkorst		Economische exploitatie		Concentratiefactor
Al	8,2%	8,2	30%	30	* 4
Fe	5,6%	5,6	50%	50	* 9
Cu	55 ppm	0,000 055	1%	1	* 180
Ni	75 ppm	0,000 075	1%	1	* 130
Zn	70 ppm	0,000 007	5%	5	* 700
Sn	2 ppm	0,000 002	0,50%	0,50	* 2500
Au	4 ppb	0, 000 000 004	5 ppm	0,000 005	* 1250
Pt	5 ppb	0,000 000 005	5 ppm	0,000 005	* 1000

Vb. 5 ppm Au.
1 m³ gesteente : 12 - 15 gram goud (~ cm³)

* Studie van ertslichamen



Bestuderen van de concentratieprocessen van metalen

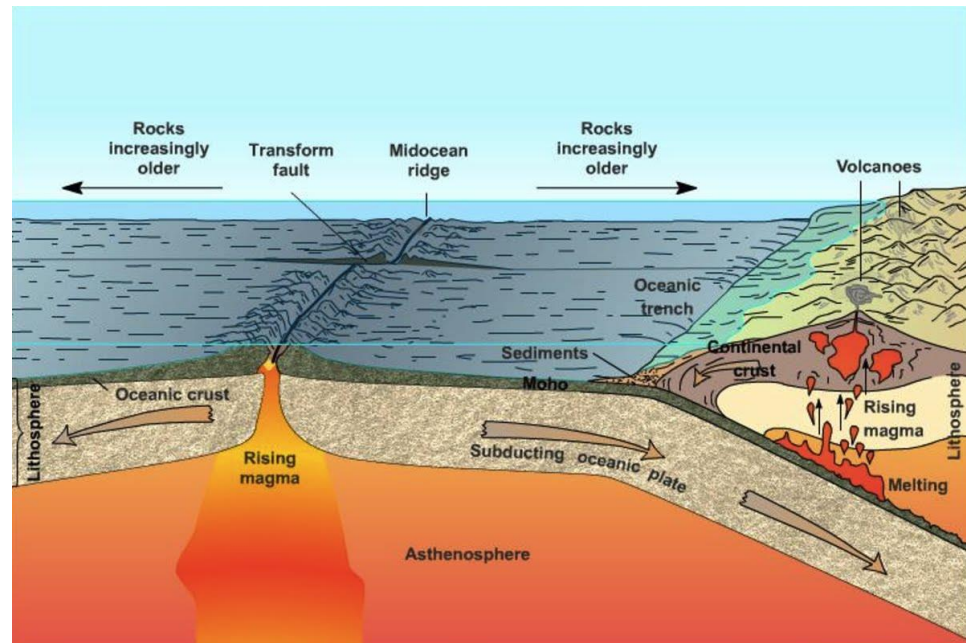
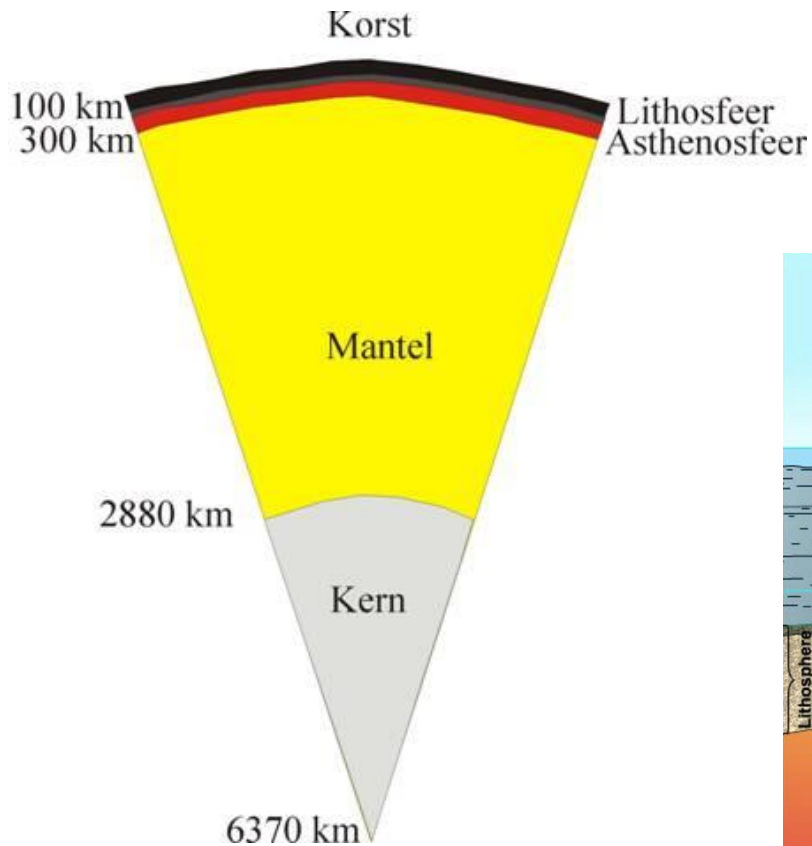


* Principe vorming van mineralisatie :

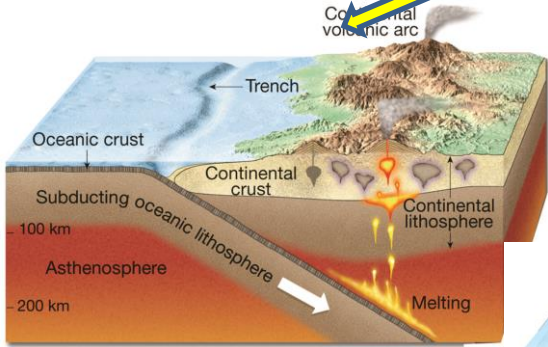
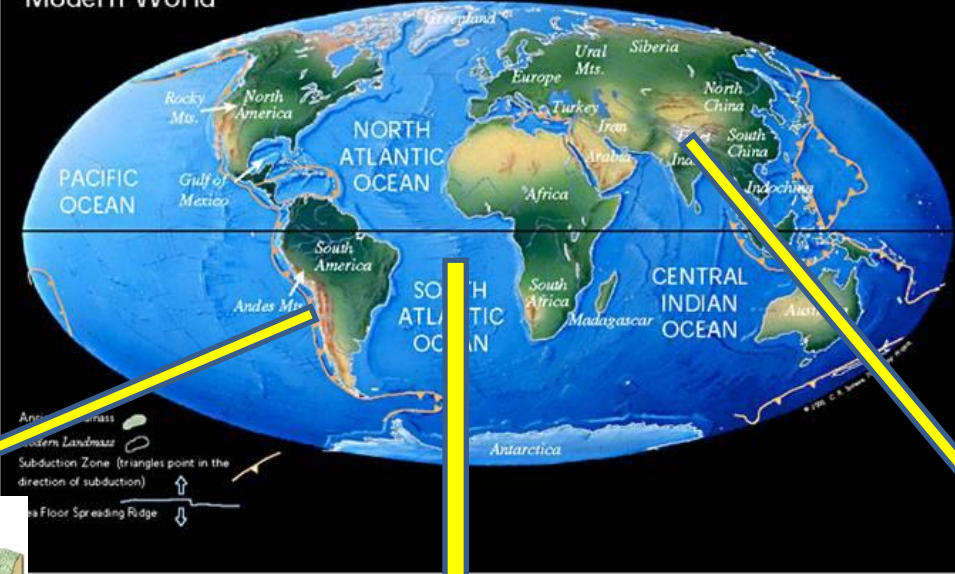
“Verspreide metalen worden geconcentreerd op een bepaalde locatie”



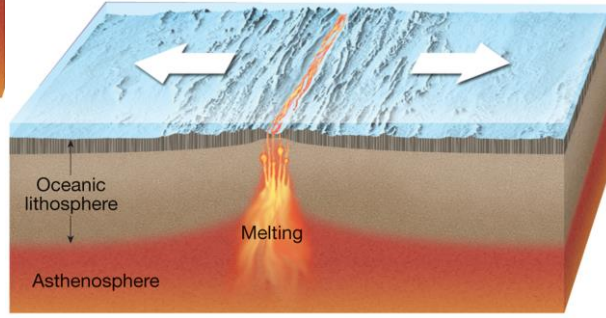
Drijvende kracht/motor: platen tektoniek



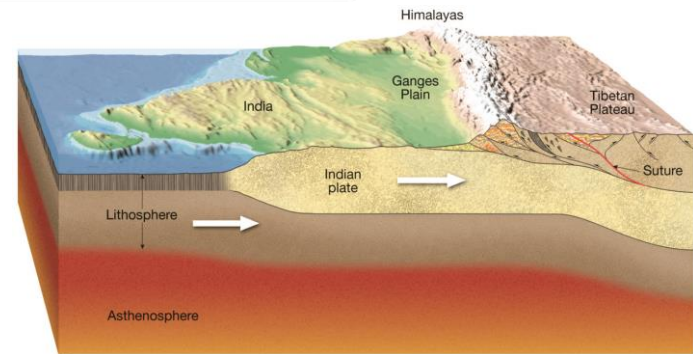
Modern World



A. © 2011 Pearson Education, Inc.



A. Divergent boundary © 2011 Pearson Education, Inc.



C. © 2011 Pearson Education, Inc.

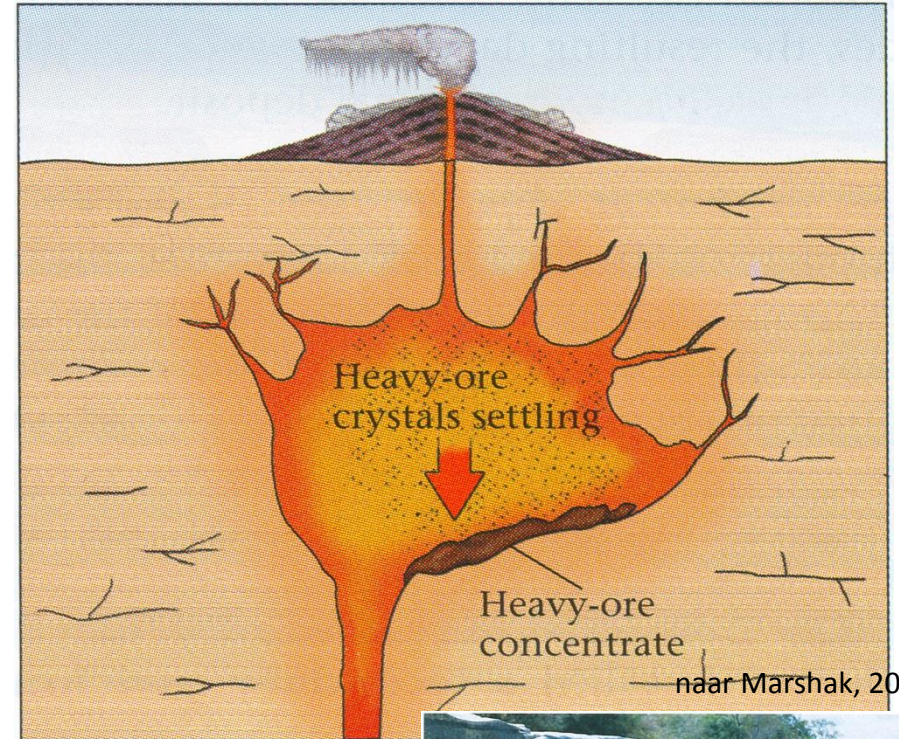


* Iedere setting gekarakteriseerd door typische mineralisaties

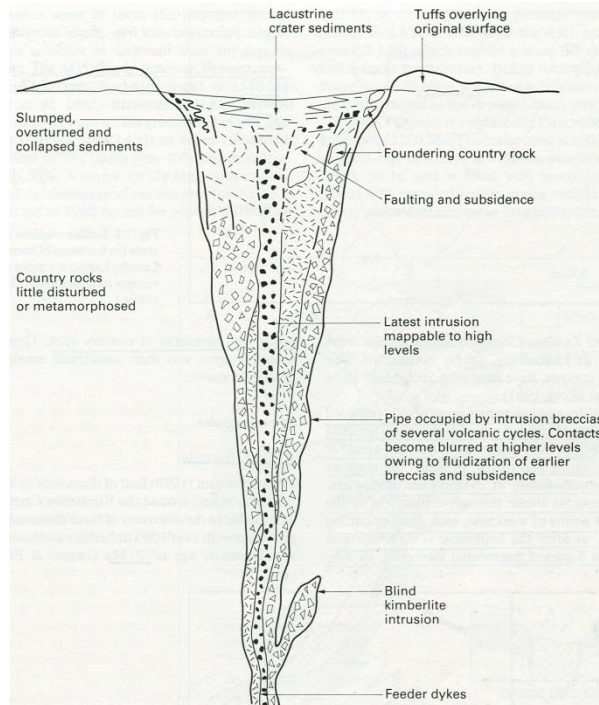
2. Ertsvormende processen

a. Vroeg-magmatische processen

- * Gefractioneerde kristallisatie
- * Niet-mengbaarheid van smelten
- * “Speciale” magma’s (eg. kimberliet)

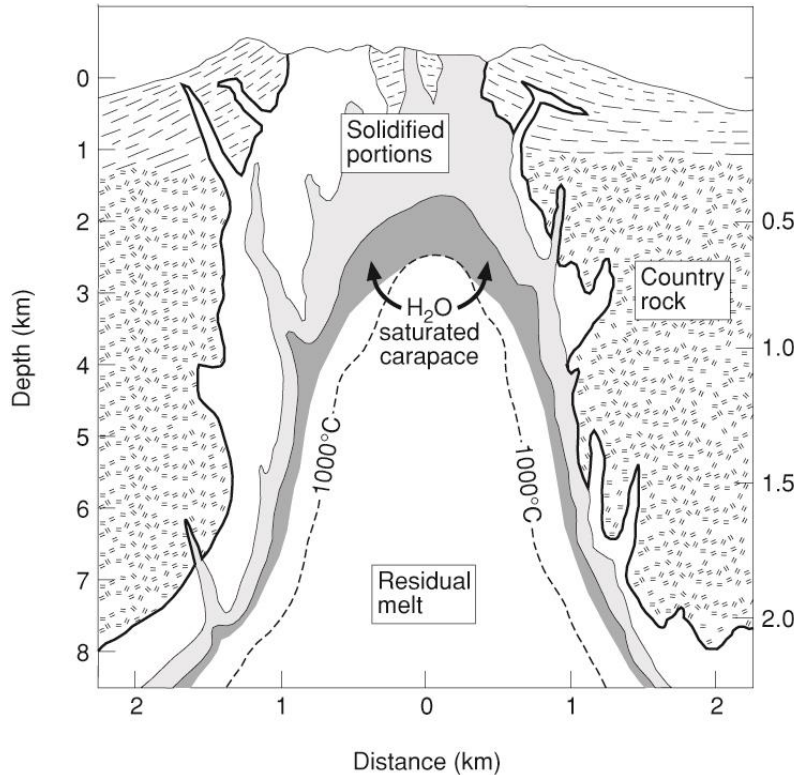


naar Marshak, 2001

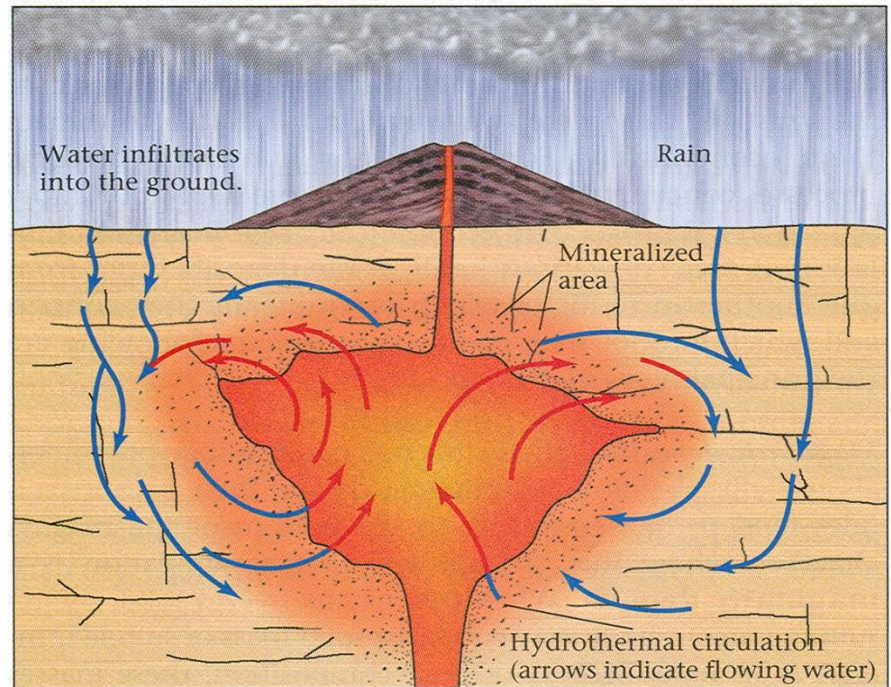


b. Magmatisch-hydrothermale processen

- * Porphyry Cu, W, Mo afzettingen
- * Skarn afzettingen (W, Sn, Mo, Cu, Fe, Zn, Pb, Au ...)
- * Pegmatietische afzettingen (Sn, W, Ta, Nb, U, Li, Be ...)
- * Epithermale Au, Ag afzettingen



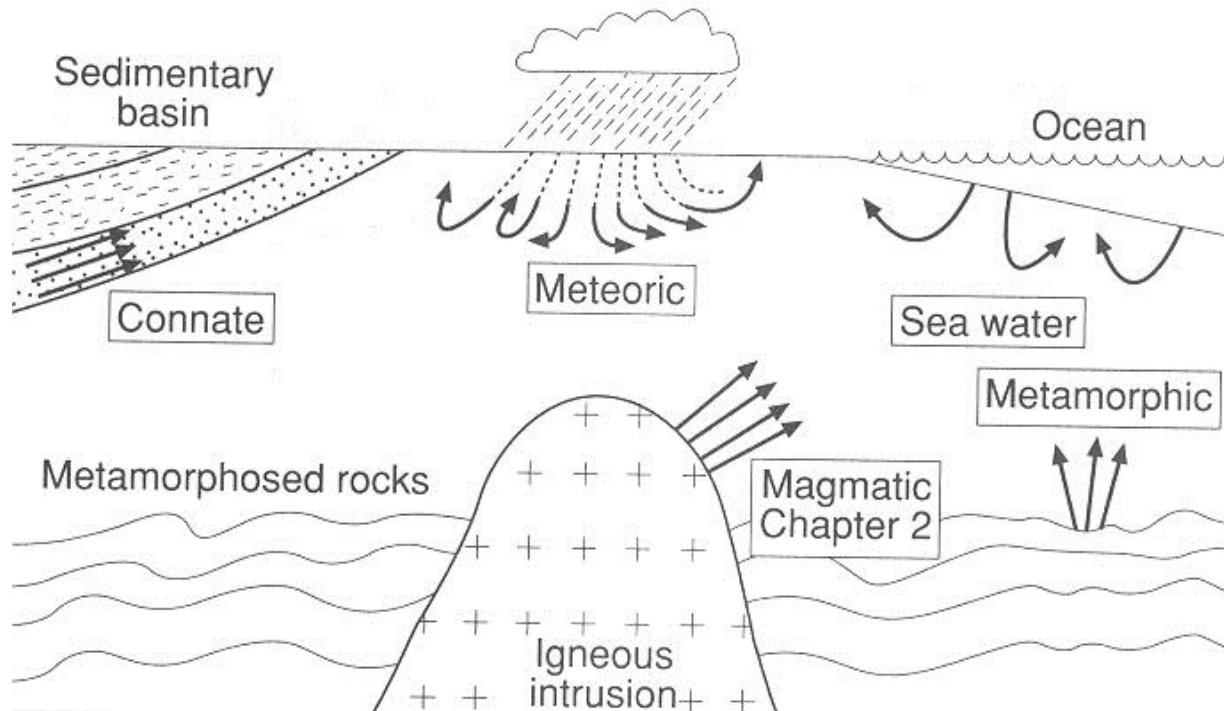
naar Robb, 2005



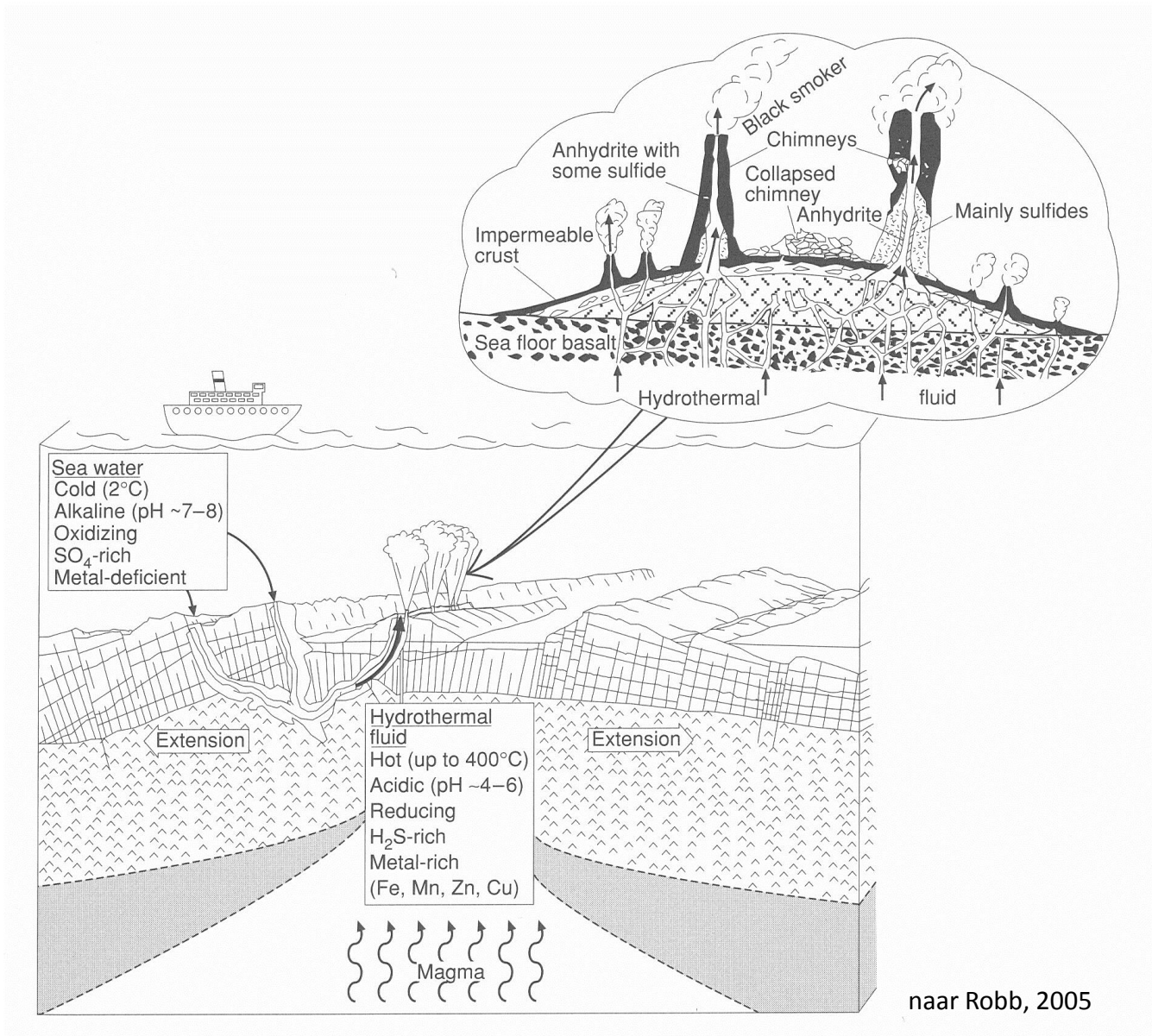
naar Marshak, 2001

c. Hydrothermale processen

- * Zeewater (Cu, Zn, Pb, Ag ...)
- * Metamorfe fluïda (Au ...)
- * Meteorische fluïda (U ...)
- * Hoog-saliene fluïda (connate fluida) (Cu, Zn, Pb ...)



* vb. Zeewater circulatie (VMS-Sedex)

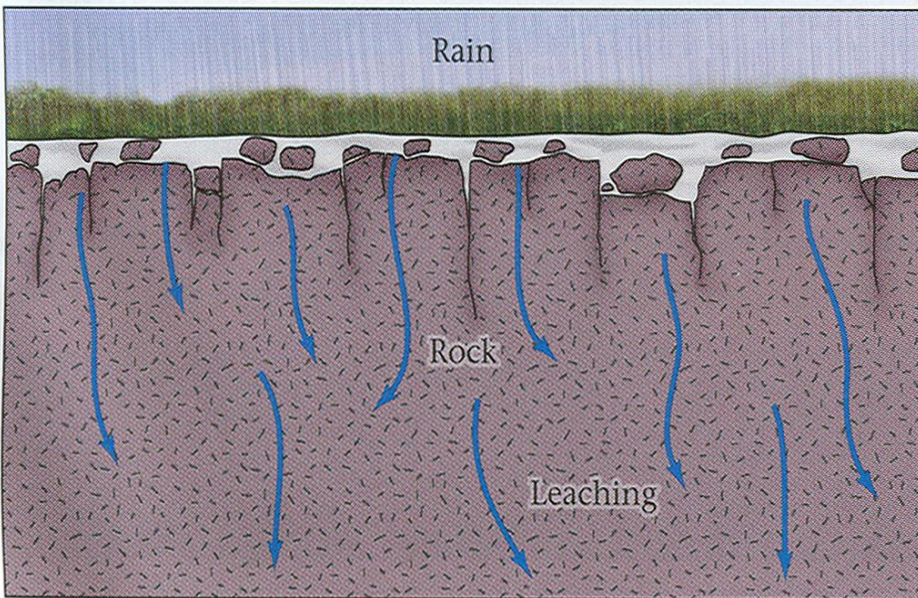


naar Robb, 2005

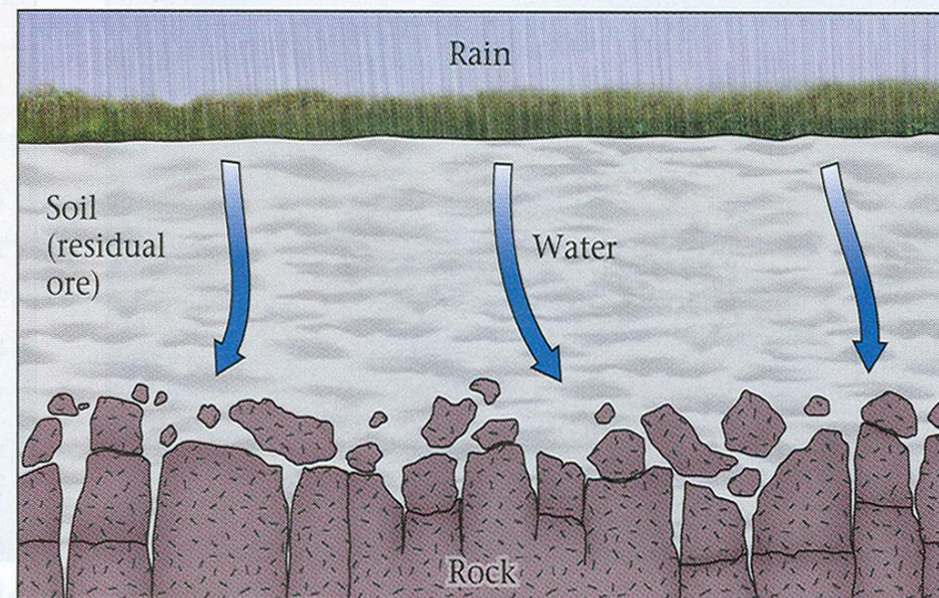
d. Residuele afzettingen en supergene processen

* Verwering (Ni, bauxiet, kaoliniet)

* Uitloging en aanrijking (oxidatie van Cu-afzettingen)

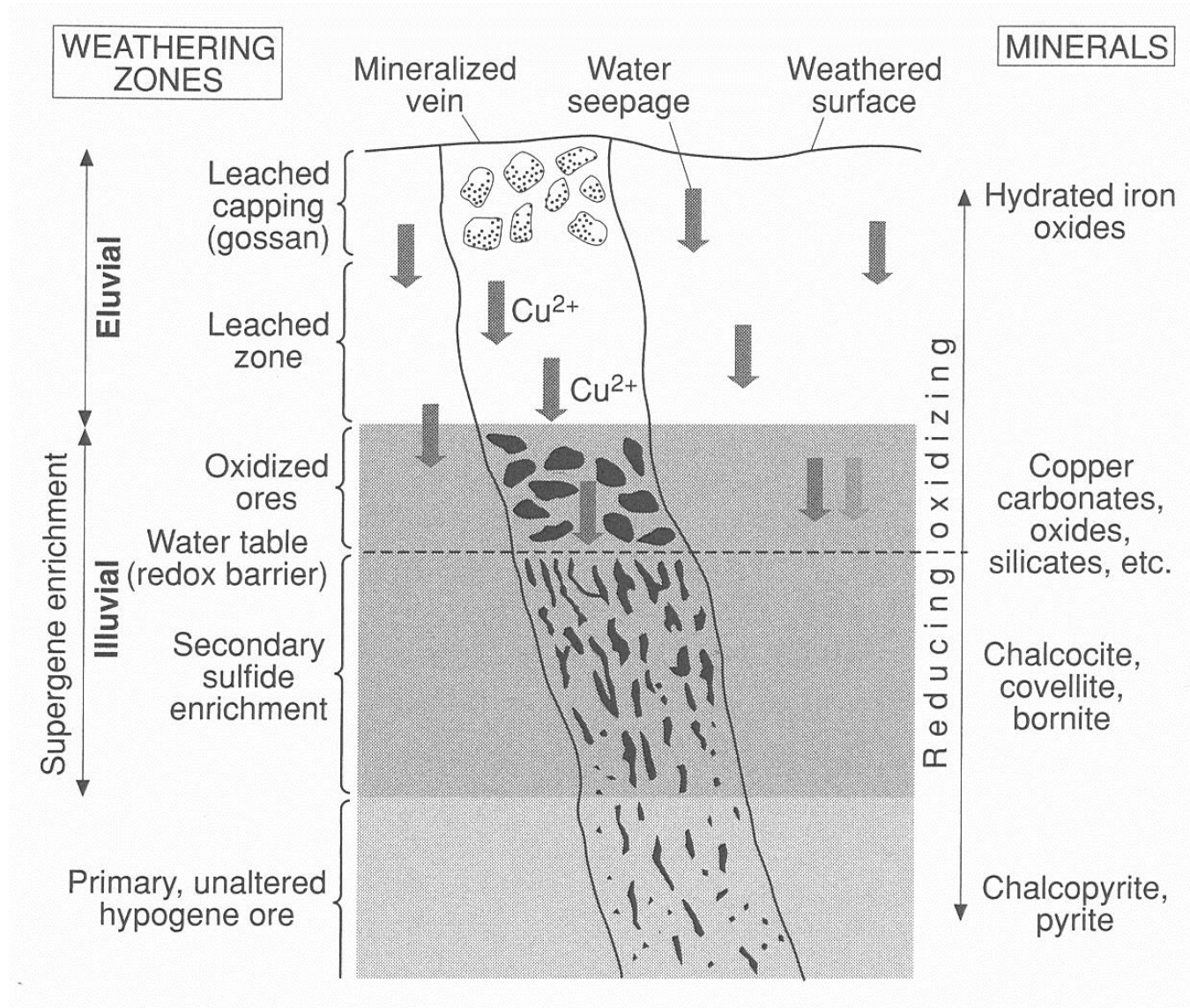


(a)



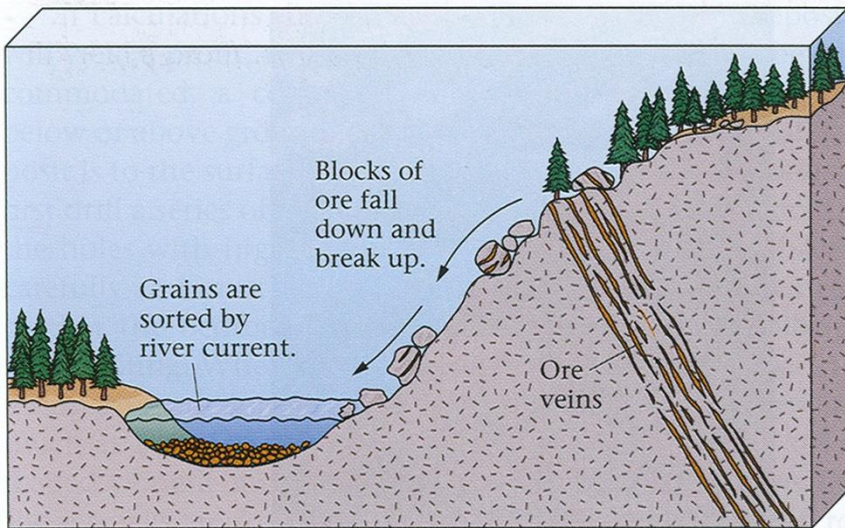
(b)

* Vb supergene afzettingen

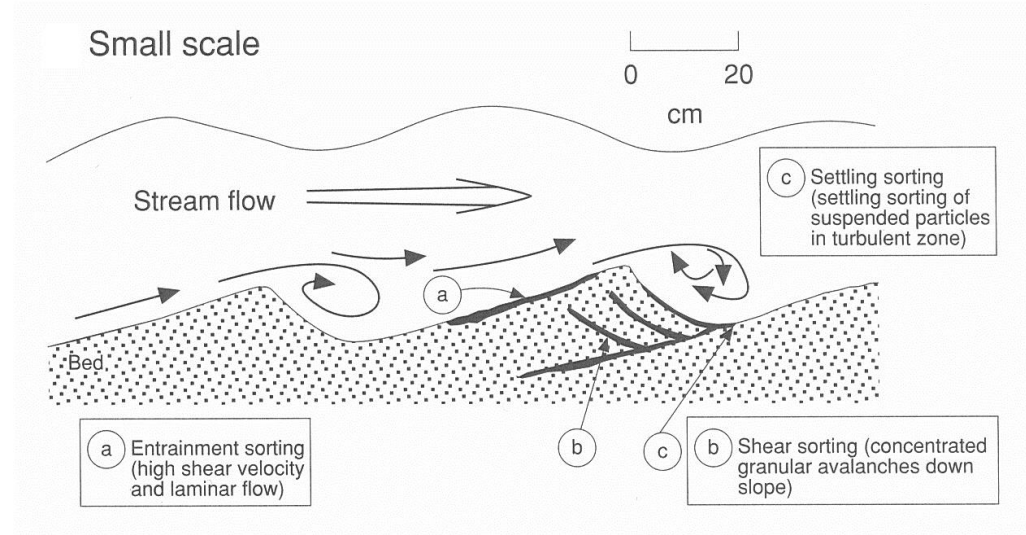


e. Sedimentair ertsvormende processen

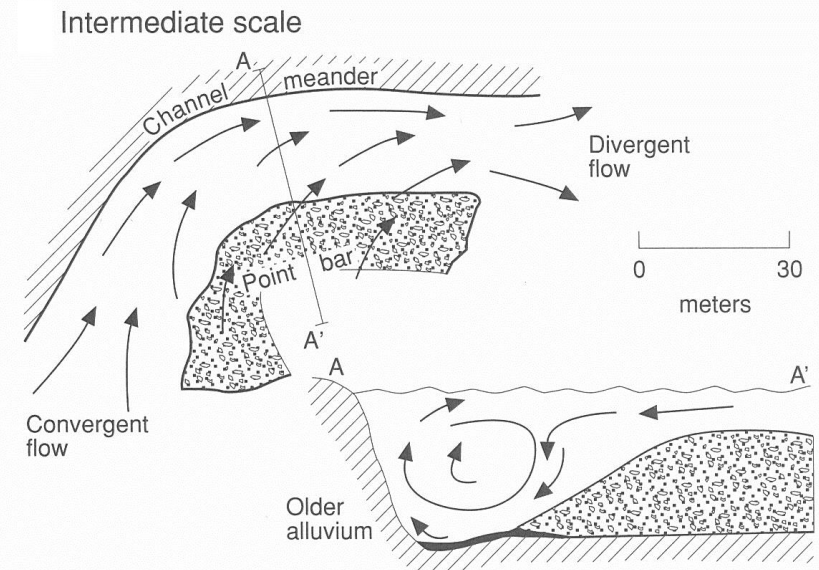
- * Klastische sedimentatie
- * Chemische sedimentatie
- * Fossiele brandstoffen



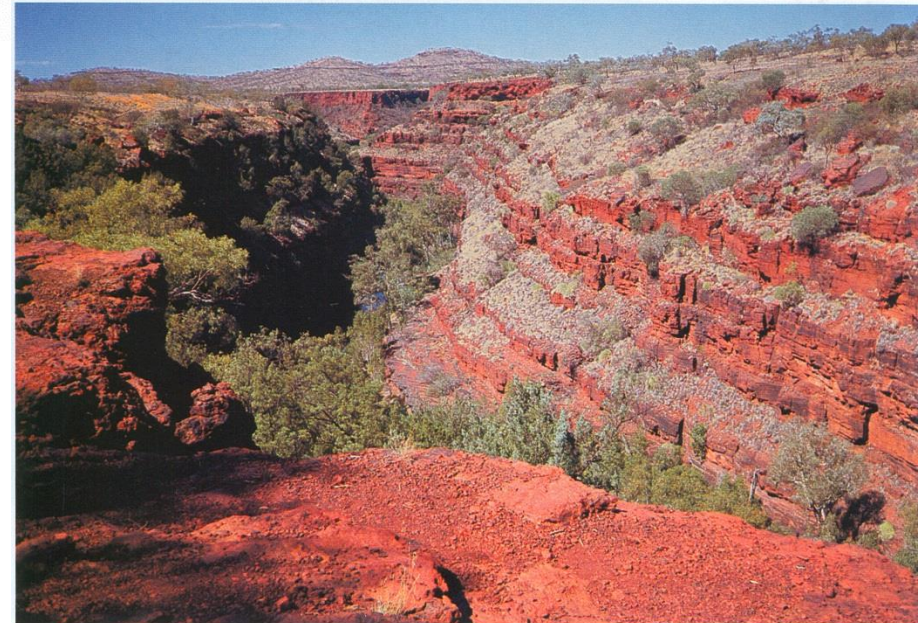
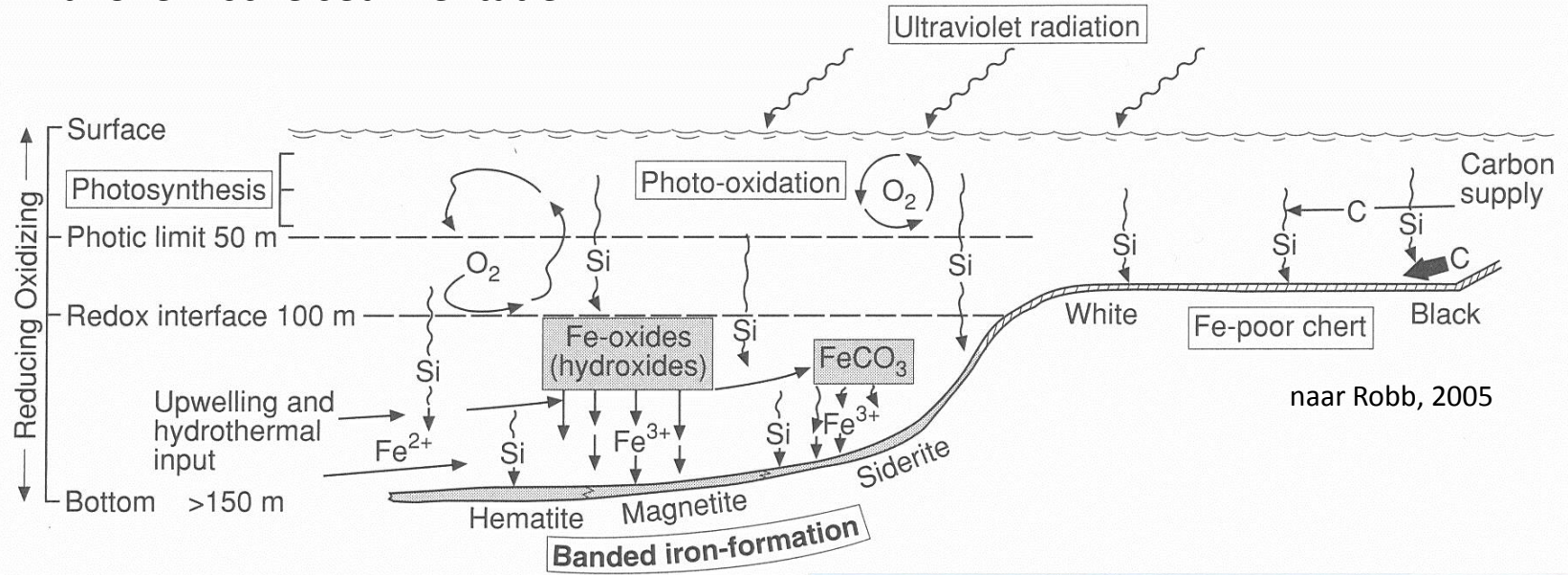
naar Marshak 2001



naar Robb, 2005



* vb. Chemische sedimentatie



Hamersley, Australië; naar Press et al., 2003

3. Kritische en strategische grondstoffen

a. Inleiding

* Meeste metalen en industriële mineralen : onshore ontginning



ondergrondse mijnen en dagbouw mijnen



zand en gravel : onshore en op ondiepe mariene gebieden



* Extractie zand & gravel (baggeren): beton, kustprotectie, backfill in havens, ...



Europa grootste producent gebaggerd zand en gravel

eg. 2012: $93.5 * 10^6 \text{ m}^3$ zand (Nederland : $63 * 10^6 \text{ m}^3$ zand)



mariene extractie indien er geen “onshore” alternatief is: prijs

* Extractie van mariene placers: eg. diamant, cassiteriet, fosfaat, zware mineralen, ...

* Duurzame economische ontwikkeling industrie en maatschappij
 +
 succesvolle produktie van hoog-technologische toepassingen
 ↓↓
 gegarandeerde aanvoer van grondstoffen is noodzakelijk

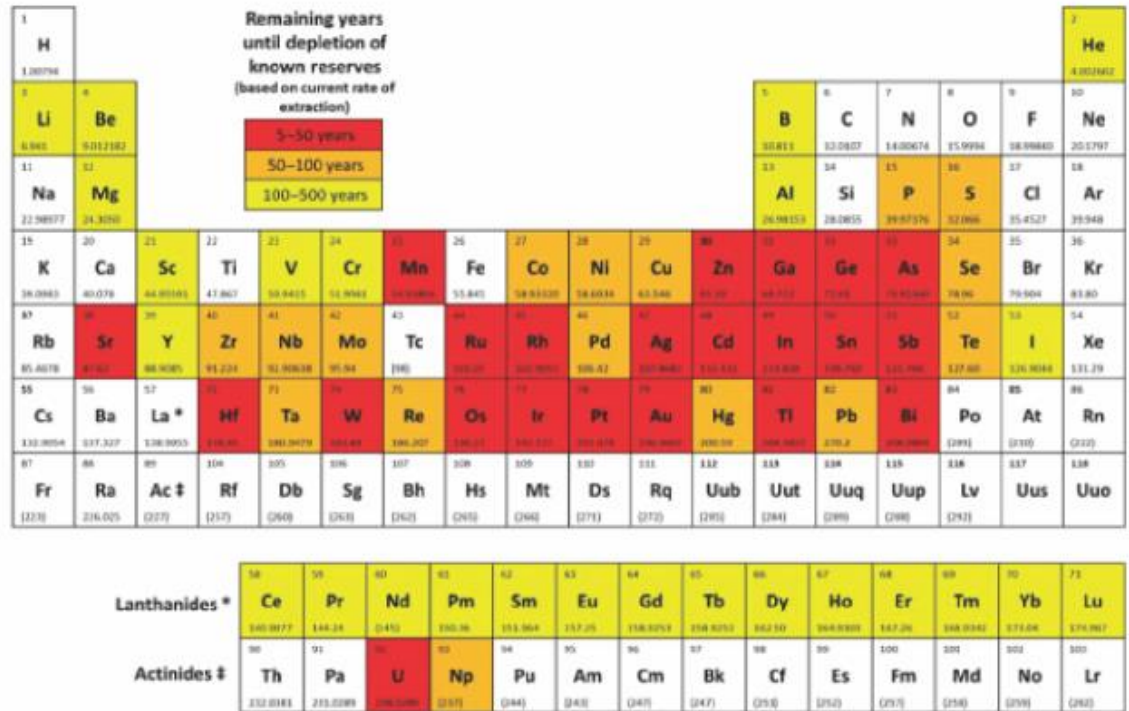


Figure 1.1 Number of years remaining of rare and precious metal reserves if consumption continues at present rate (original data adapted from Salazar,¹⁰ Brown *et al.*¹¹ and Rhodes¹²).

* Extractieve industrie is hoog-technologische sector, met grote nood aan kapitaal



Succes mijnbouwprojecten afhankelijk van ≠ risico's:

- Politieke en institutionele
- Infrastructurele
- Economische
- Technische
- Maatschappelijke
- ...



Beschikbaarheid van mineralen is afhankelijk van wereldmarkt: volatiliteit



Productie volumes & prijs

* Klimaatsverandering + piekolie : groene duurzame energie, brandstoffen en chemicaliën



koolstofneutraal + lagere afhankelijkheid van fossiele brandstoffen



“Low carbon”- technologieën:

- wind turbines
- elektrische auto's
- brandstoffencellen
- katalysatoren
- catalytische convertoren
- energievriendelijke lampen
- led-verlichting
-



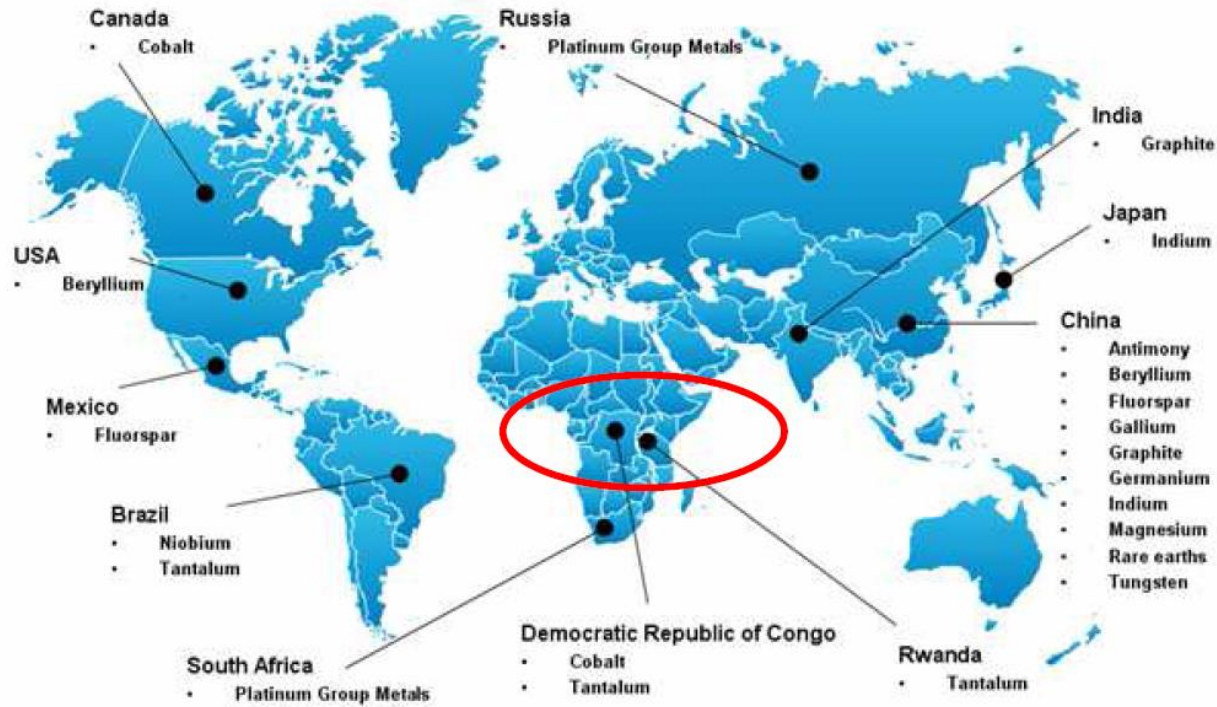
Nood aan zeldzame en kostbare metalen
(REE, Nb, Ta, Li, Ga, Ge,)

* Verdeling van grondstoffen is gecontroleerd door geologische processen



non-homogene geografische verdeling

Production concentration of critical raw mineral materials



source: RMI

* Niet-homogene geografische verdeling



geopolitieke risico's

+

snelle economische groei BRIC landen



zwaartepunt kapitaal mineraalindustrie verschoven

20^{ste} eeuw : Anglosaksische bedrijven



21^{ste} eeuw : Chinese (eg. Boasteel, Jiangxi Copper)

Indische (eg. Arcelor Mittal, Tata Steel)

Braziliaanse (eg. Vale)

Mexicaanse (eg. Grupo Mexico, Penoles)



- Bevoorradingssituatie grondstoffen = grondig gewijzigd

+

- Industrie ontwikkelde landen in zwakkere positie: hfdzk importeerders

* EU afhankelijkheid voor minerale grondstoffen (2009)

Antimoon	100 %
Beryllium	100 %
Boor	100 %
Cobalt	100 %
Molybdeen	100 %
Niobium	100 %
PGM	100 %
REE	100 %
Tantaal	100 %
Titanium	100 %
Germanium	100 %
Vanadium	100 %

Phosphates	92 %
Rhenium	90 %
Nickel	86 %
Ijzer	83 %
Aluminium	80 %
Zink	80 %
Wolfraam	76 %
Lood	76 %
Koper	74 %
Chroom	53 %

* Op basis van gekende beschikbaarheid en huidige economische nood



Sommige elements worden problematisch



- Afhankelijk van type van industrie

Strategische elementen: vitaal voor defensie

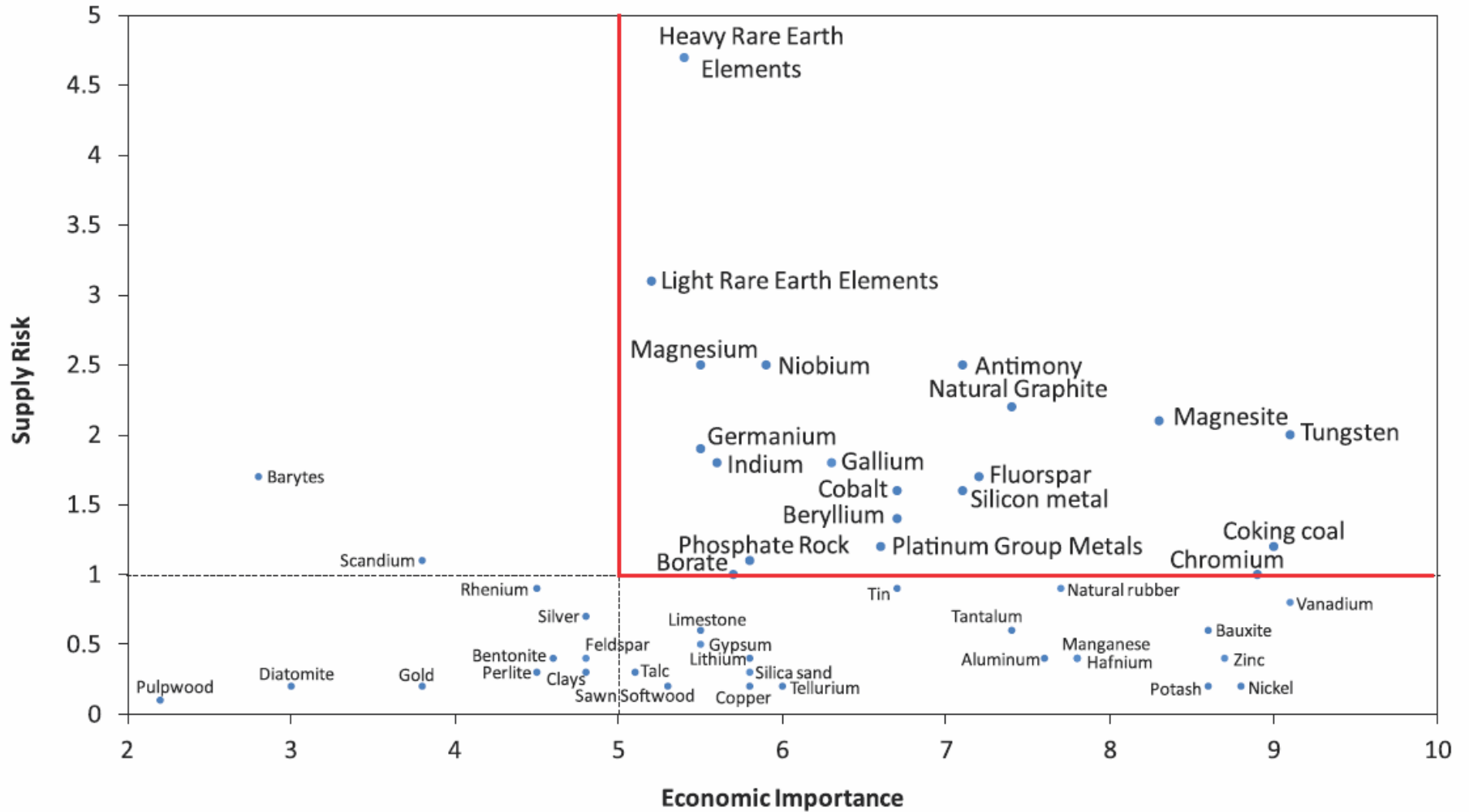


Kritische elementens: noodzakelijk voor economie van land

- Verschillend afhankelijk van regio/land



≠ lijsten: EU
VSA
Duitsland
Verenigd Koninkrijk
Japan
Verenigde Naties



Europese Commissie (2014)

b. Mijnbouw op zeebodem

* Om toekomstige bevoorrading te garanderen



mijnbouw van zeebodem: economisch en geopolitiek



- geen conflict over landgebruik

- landen zonder grondstoffen minder afhankelijk van exporterende landen



mijnbouw in territoriale water & diepe zee



individuele landen



ISA (international Seabed Authority)



exploratielicenties

* Kritische en zeldzame metalen

⇒ Mijnbouw op de zeebodem:

- Mangaannodules :

- * Concreties van mineralen: grootte van aardappel tot sla
- * op zeebodem Pacifische en Indische oceaan,
- * < 3500m
- * Mn, Fe, Cu, Ni, Co, Mo, Zn, Li

- Kobaltkorsten

- * mineraalkorsten op zijkanten onderzeese gebergtekets en topografische hoogs
- * op diepte tussen 1000 en 3000m
- * Mn, Fe, Co, Ni, PGM, REE

- Massieve sulfiden

- * accumulaties aan openingen warme fluida op de oceaانبodem
- * Cu, Zn, Pb, Au, Ag, In, Ga, Ge, Te, Se

* Kritische elementen op wereldschaal

REE	PGM	Ga	In
Ta	Nb	Co	Sb
Be	Li	Te	Ge
V	W	Mo	Se

* Kritische elementen op multinationalaal niveau

Hf	Ni
Bi	Sr
Ba	Mg
Mn	Ti

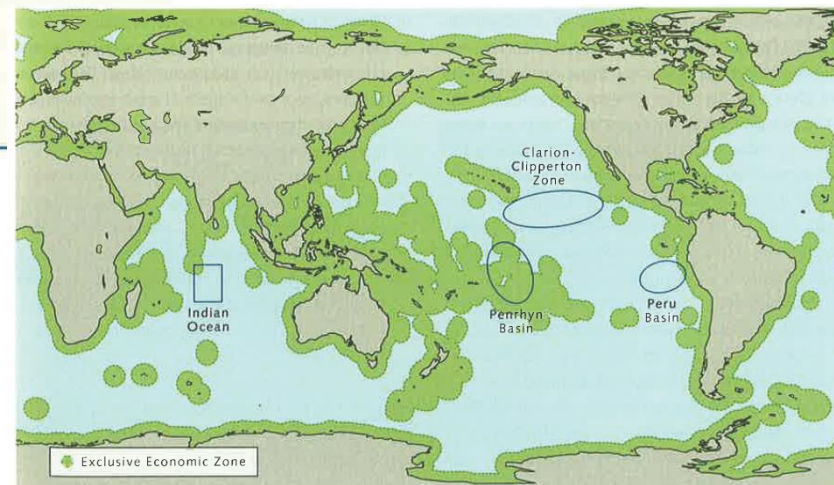
* Kritische elementen op nationaal niveau

Cu	Sn	Y	Cs
Cd	Hg	As	Zr
Ag	Th	Rb	Cr
Re	B	Tl	

+ grafiet, fluoriet, silicon, fosfaat, cokes, ...

* Belangrijke voorkomens van grondstoffen op zeebodembodem

Metal content of manganese nodule occurrences in millions of tonnes			
Elements	Clarion-Clipperton Zone (CCZ)	Global reserves and resources on land (both economically recoverable and sub-economic reserves)	Global reserves on land (economically recoverable reserves today)
Manganese (Mn)	5992	5200	630
Copper (Cu)	226	1000+	690
Titanium (Ti)	67	899	414
Rare earth oxides	15	150	110
Nickel (Ni)	274	150	80
Vanadium (V)	9.4	38	14
Molybdenum (Mo)	12	19	10
Lithium (Li)	2.8	14	13
Cobalt (Co)	44	13	7.5
Tungsten (W)	1.3	6.3	3.1
Niobium (Nb)	0.46	3	3
Arsenic (As)	1.4	1.6	1
Thorium (Th)	0.32	1.2	1.2
Bismuth (Bi)	0.18	0.7	0.3
Yttrium (Y)	2	0.5	0.5
Platinum group metals	0.003	0.08	0.07
Tellurium (Te)	0.08	0.05	0.02
Thallium (Tl)	4.2	0.0007	0.0004



c. Mangaannodules

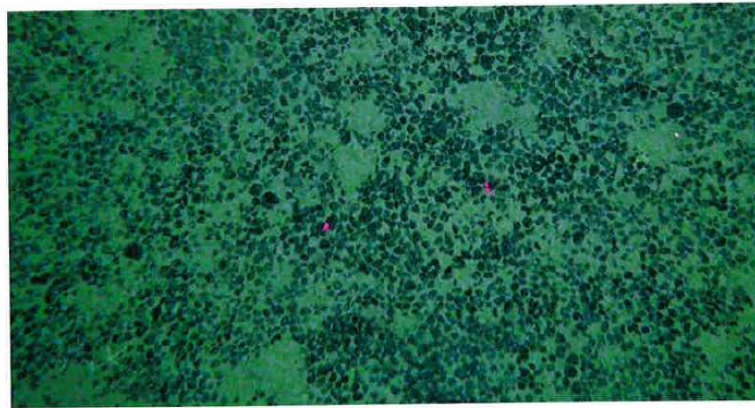
* Bevatten Mn, Ni, Co, Fe, Ti en Cu



hoger gehalte dan in economisch ontgonnen afzettingen op land



Intensief onderzocht



* Landen: China, Duitsland, Frankrijk, India, Rusland, Japan, Zuid-Korea, Interoceanmetal Joint Organisation

+

Privébedrijven : UK seabed resources Ltd, G-TEC Sea Mineral resources)

+

Ontwikkelingslanden: Nauru, Kiribati, Tonga)

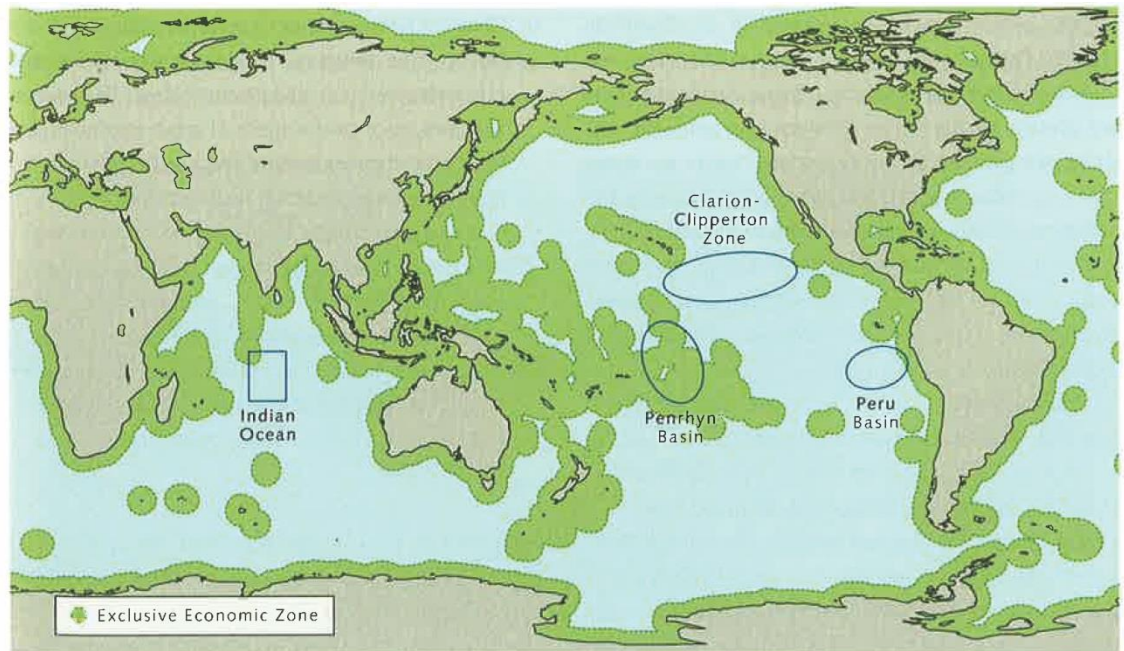
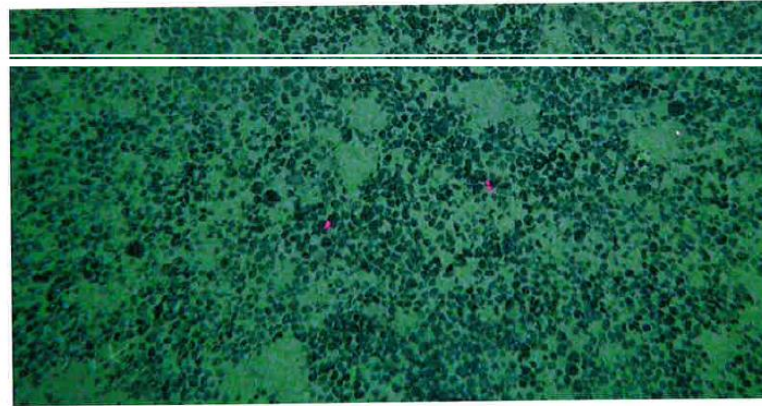
* 4 interessante zones

- Clarion-Clipperton zone
- $9 * 10^6 \text{ km}^2$
- 15 kg nodules/m²

- Peru Basin
~ $4.5 * 10^6 \text{ km}^2$
10 kg nodules/m²

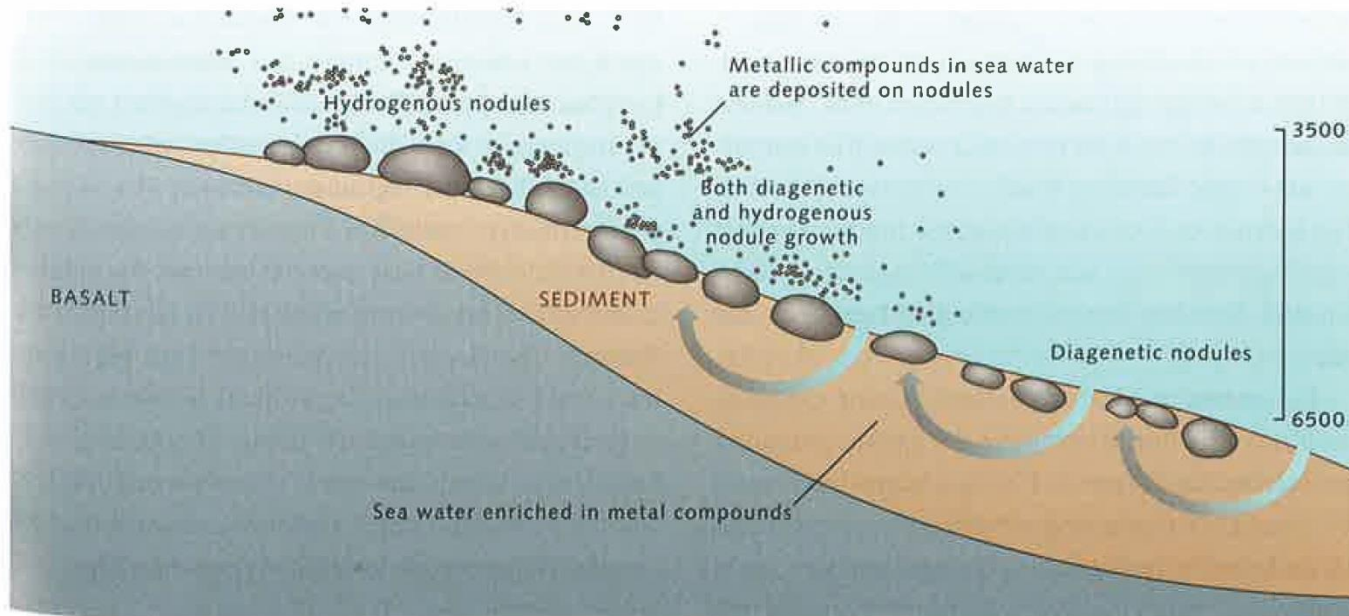
- Penrhyn Basin
750.000 km²
25 kg nodules/m²

- Indian Ocean
5 kg nodules/m²



* Hoe nodules groeien

1. Opgeloste metaaldeeltjes slaan neer rond nucleus
2. Verdere groei:
 - a. Hydrogeen proces: metaaldeeltjes zinken in water en slaan neer
 - b. diagenetische groei: in sedimenten, uit poriënwater



- * Zeer traag proces: hydrogene nodules: 10 mm/miljoen jaar
diagenetische nodules: 10 tot 100 mm/miljoen jaar

* Nodules kunnen enkel groeien in omgeving waar de milieuparameters constant zijn voor langere tijd

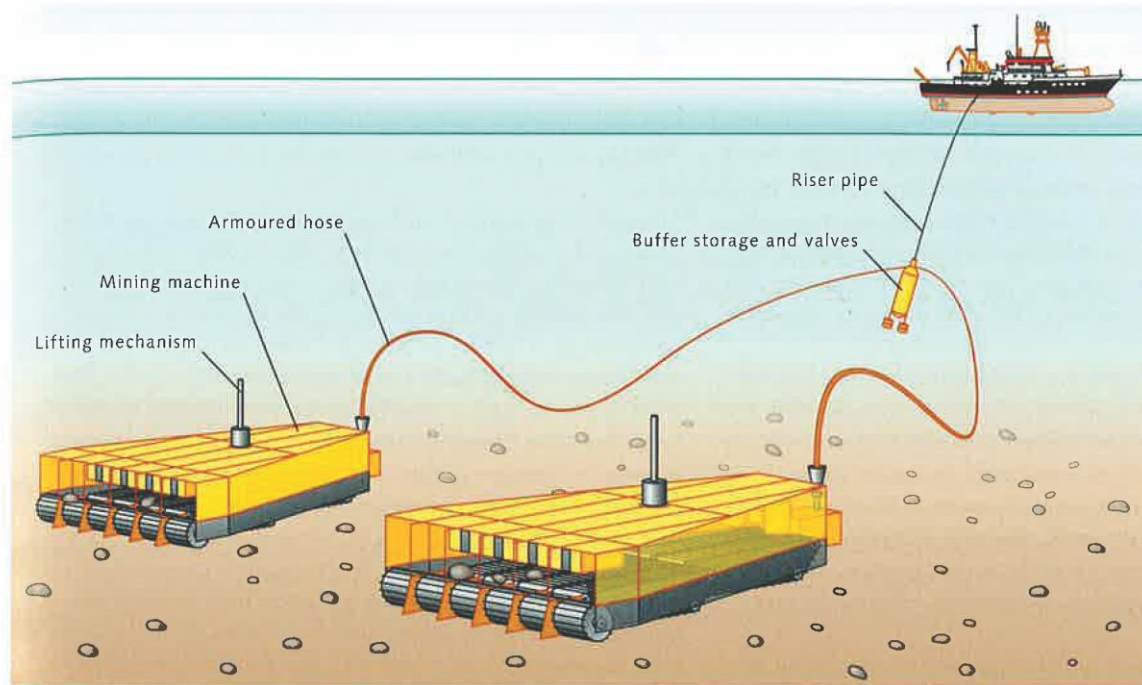
- lage sedimentatiesnelheid
- constante stroming van de Antarctische grondstromen
- Goede zuurstoftoevoer
- sediment moet voldoende poriënwater kunnen bevatten
- grazende organismen?
- ...

* Verschillende gebieden hebben verschillende samenstelling nodules

Chemical components of manganese nodules from different marine regions				
Elements	Manganese nodules of the CCZ	Manganese nodules of the Peru Basin	Manganese nodules of the Indian Ocean	Manganese nodules of the Cook Islands area
Manganese (Mn) **	28.4	34.2	24.4	16.1
Iron (Fe) **	6.16	6.12	7.14	16.1
Copper (Cu) *	10,714	5988	10,406	2268
Nickel (Ni) *	13,002	13,008	11,010	3827
Cobalt (Co) *	2098	475	1111	4124
Titanium (Ti) **	0,32	0.16	0.42	1.15
Tellurium (Te) *	3.6	1.7	40	23
Thallium (Tl) *	199	129	347	138
Rare earth elements and yttrium *	813	403	1039	1707
Zirconium (Zr) *	307	325	752	588

* Grams per tonne ** Percentage by weight

* Mijnbouw?



* Impact op diepzee ecosysteem & habitats

- Duits project : Disturbance and Recolonization (DISCOL)



- na 7 jaar: dichtheid bodemleven hersteld

- maar sommige species verdwenen



d. Metaalrijke korsten

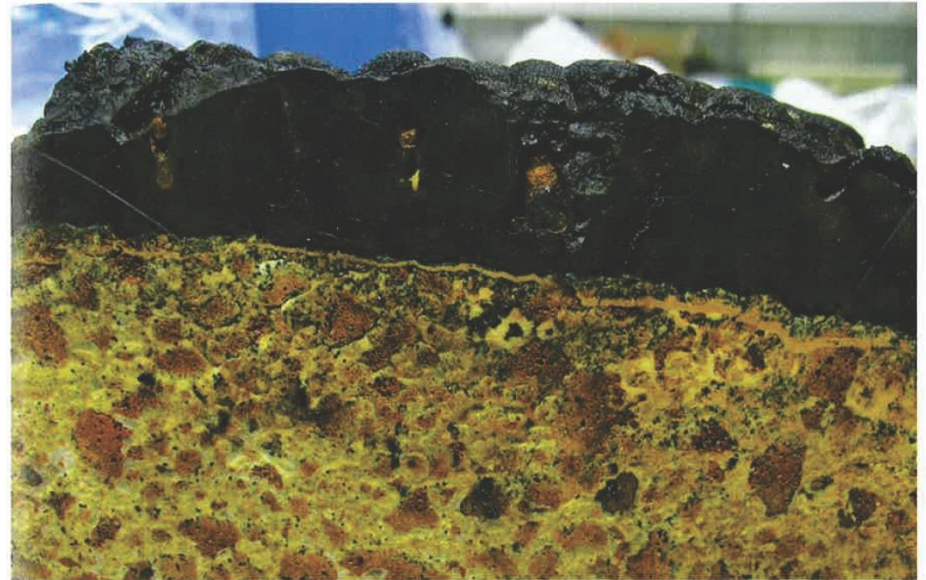
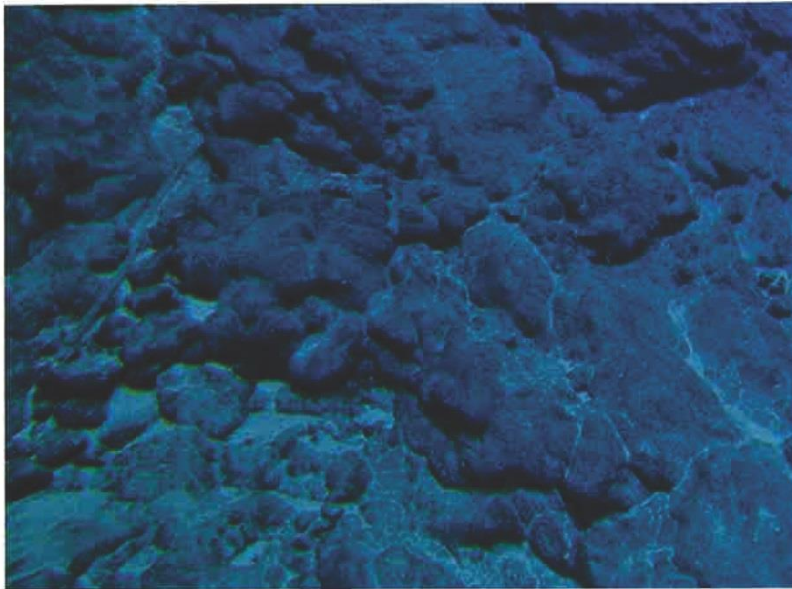
* Metallische korst op flanken submariene vulkanen, topografische hoogs op zeebodem

* Gevormd gedurende miljoenen jaren als resultaat neerslag metalen



1 tot 5 mm/miljoen jaar

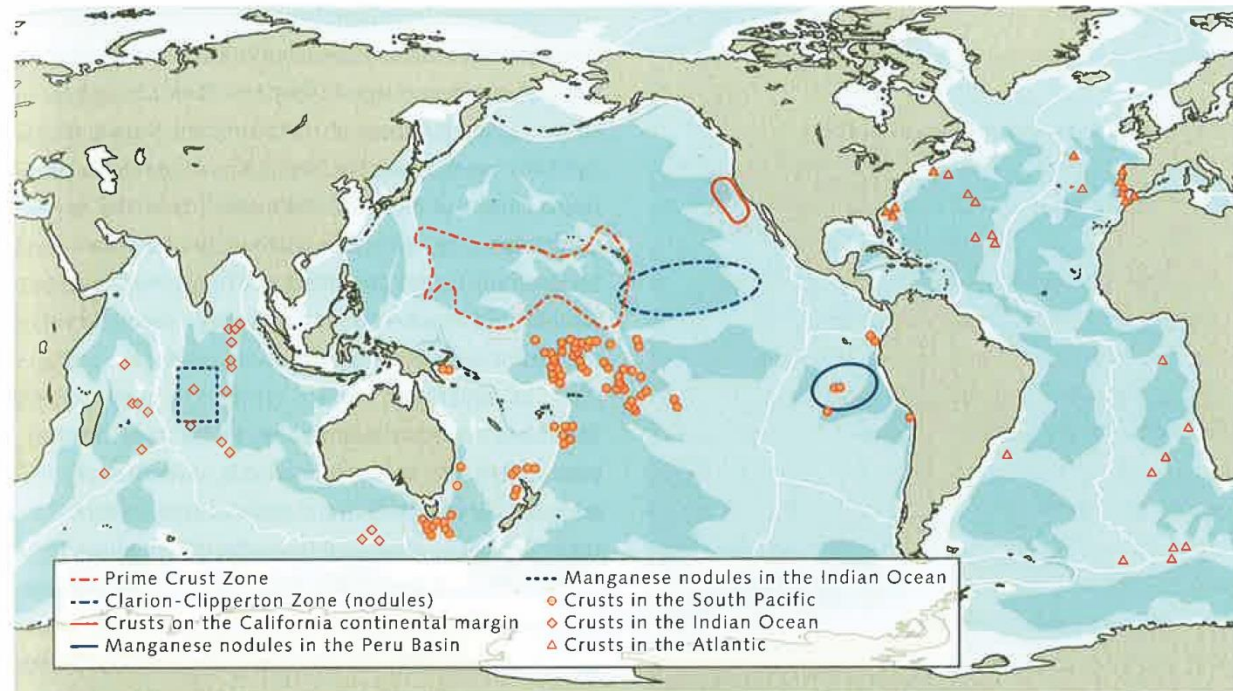
* Dikte varieert, van 2 cm tot 26 cm dik



* 33.000 submariene vulkanen wereldwijd, 57% in Pacifische Oceaan



PCZ: “prime crust zone”
($7.5 \cdot 10^9$ ton korst)



* Onderzeese topografische hoogs veroorzaken wervelingen (“eddie’s)

* Neerddwarrelend materiaal of materiaal aangebracht door stromingen

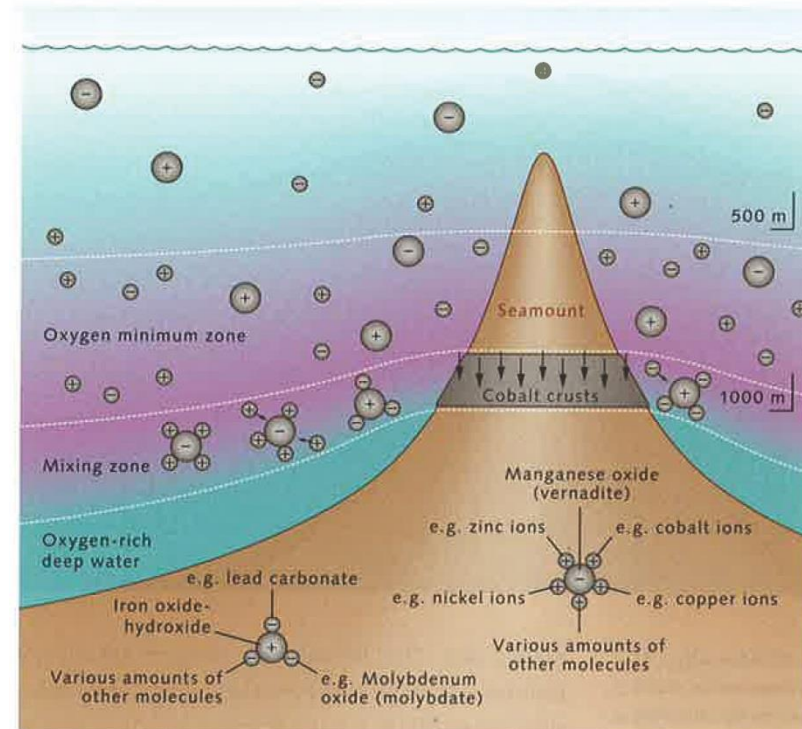


neerslag op deze seamounts

* Kobaltkorsten worden op een waterdiepte van 600 tot 7000m gevonden, meest rijke tussen 800 en 2200m.

* Vnl goethiet ($\text{FeO}(\text{OH})$) en vernadiet (MnO_2)

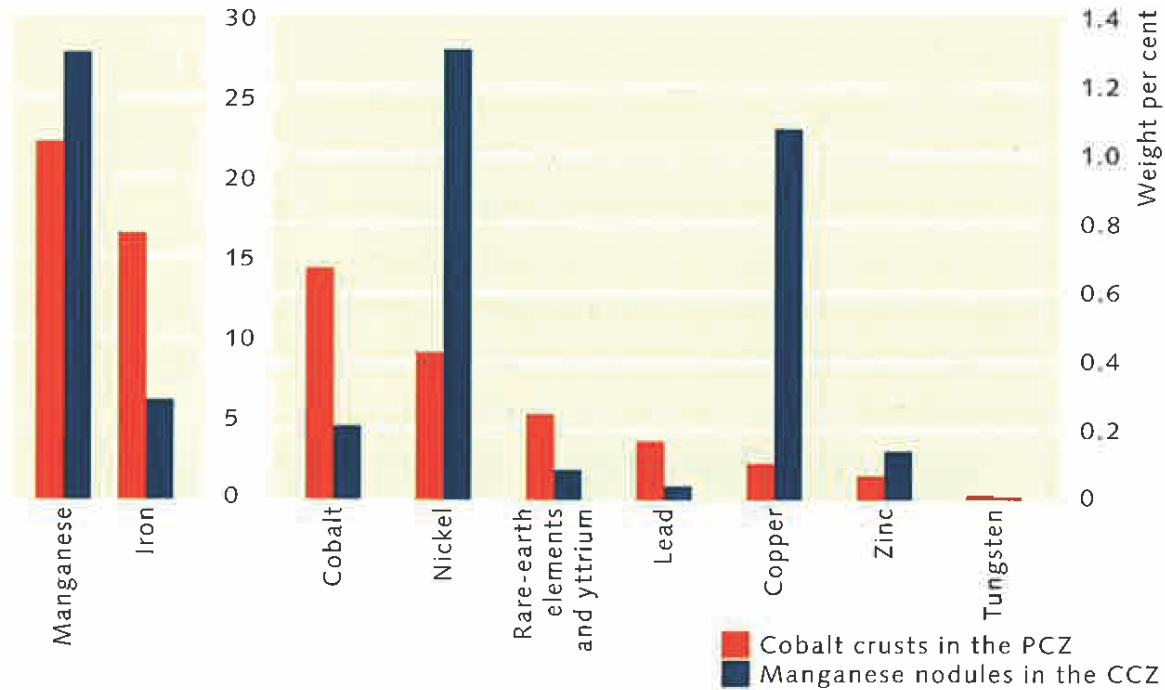
* Kobaltkorsten als sponzen voor andere Metalen (Mo, Cu, Ni, Co)



* Grote hoeveelheden Co, Ni, Mn en andere metalen zoals Te

Metal contents in millions of tonnes				
Elements	Cobalt crusts in the Prime Crust Zone (PCZ)	Global reserves on land (economically minable deposits today)	Global reserves and resources on land (economically minable as well as sub-economic deposits)	Manganese nodules in the Clarion-Cliperton Zone
Manganese (Mn)	1714	630	5200	5992
Copper (Cu)	7.4	690	1000+	226
Titanium (Ti)	88	414	899	67
Rare earth oxides	16	110	150	15
Nickel (Ni)	32	80	150	274
Vanadium (V)	4.8	14	38	9.4
Molybdenum (Mo)	3.5	10	19	12
Lithium (Li)	0.02	13	14	2.8
Cobalt (Co)	50	7.5	13	44
Tungsten (W)	0.67	3.1	6.3	1.3
Niobium (Nb)	0.4	3	3	0.46
Arsenic (As)	2.9	1	1.6	1.4
Thorium (Th)	0.09	1.2	1.2	0.32
Bismuth (Bi)	0.32	0.3	0.7	0.18
Yttrium (Y)	1.7	0.5	0.5	2
Platinum group	0.004	0.07	0.08	0.003
Tellurium (Te)	0.45	0.02	0.05	0.08
Thallium (Tl)	1.2	0.0004	0.0007	4.2

* ≠ Mn nodules vs Co-korsten



* Enkel conceptuele studies over mogelijke ontginning: afschrapen “seamounts” (minimum een laag van 5 cm, 1 miljoen ton)

* GOODS report (Global Open Oceans and Deep Sea-habitats), Unesco 2009
SOPAC (Secretariat of the Pacific Community Applied Geoscience and technology Division) +
Japan, 1987-1999



14 biozones tussen 800 en 2500m diepte



organismen: zeer trage groei + voortplanting



Meer studie nodig om impact in te schatten



e. Massieve sulfiden

* Sulfiden die massieve afzettingen vormen op de zeebodem

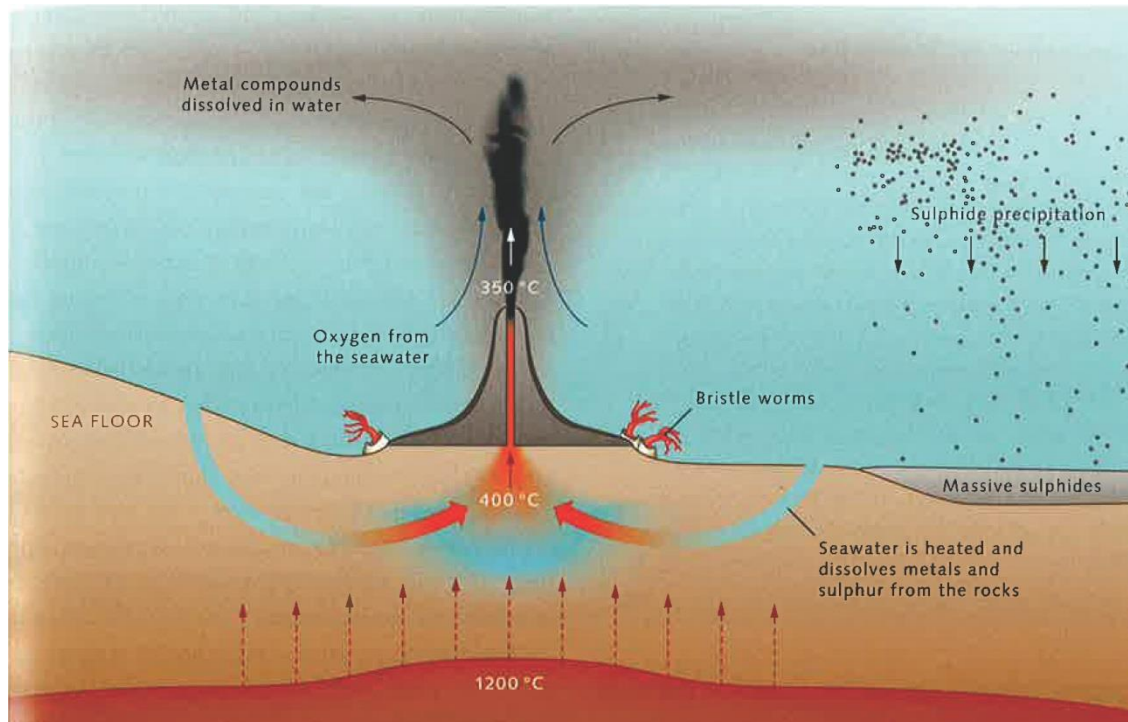


uitvloeien warme zwavelhoudende vloeistoffen op de zeebodem

* “hydrothermal vents”: plaatgrenzen en nabij onderzeese vulkanen



uitwisseling elementen en warmte tussen aardkorst en oceanen

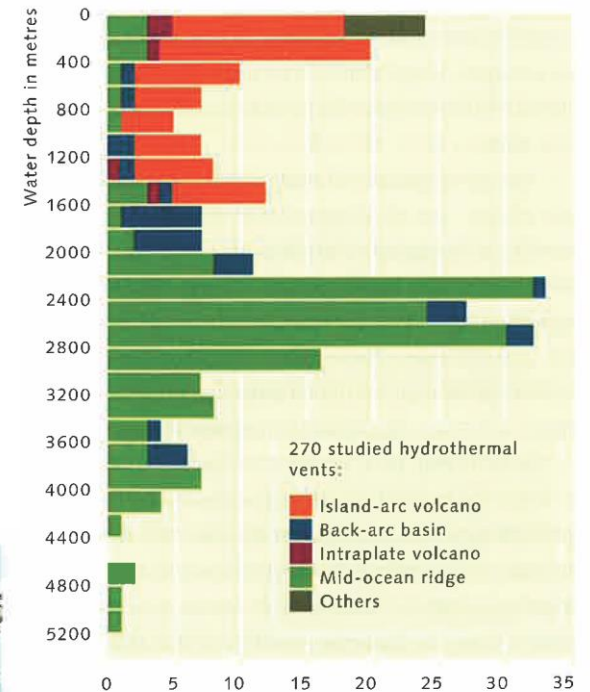
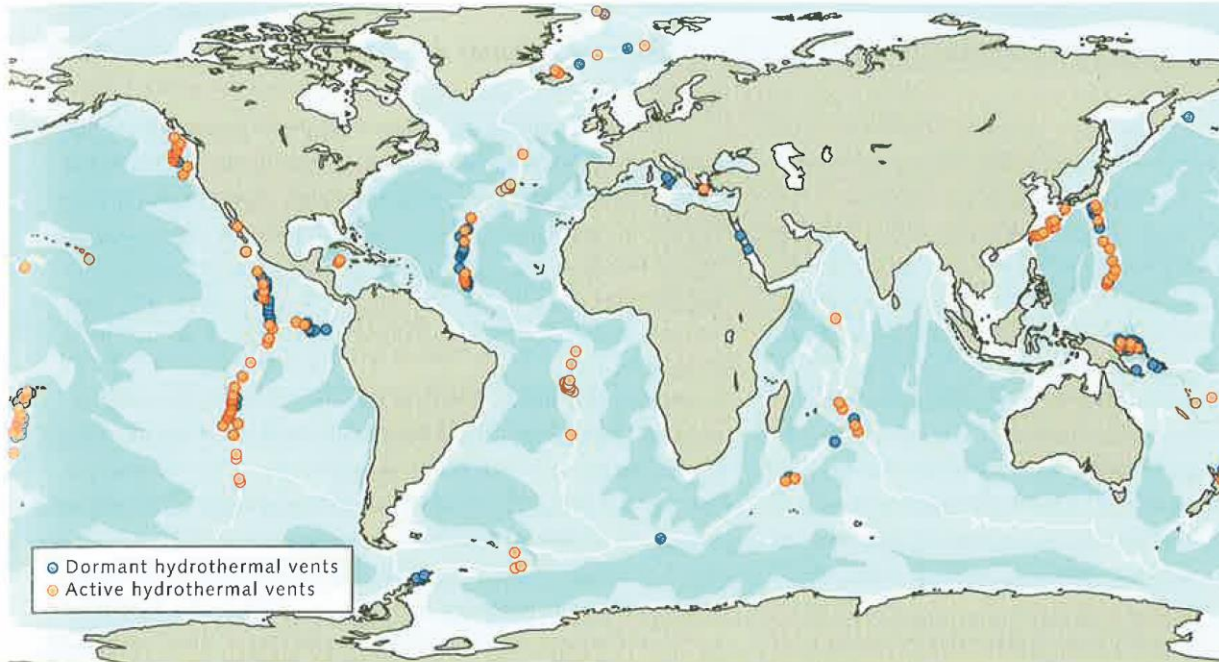


* “hydrothermal vents”: schoorsteenachtige structuren

Black smokers

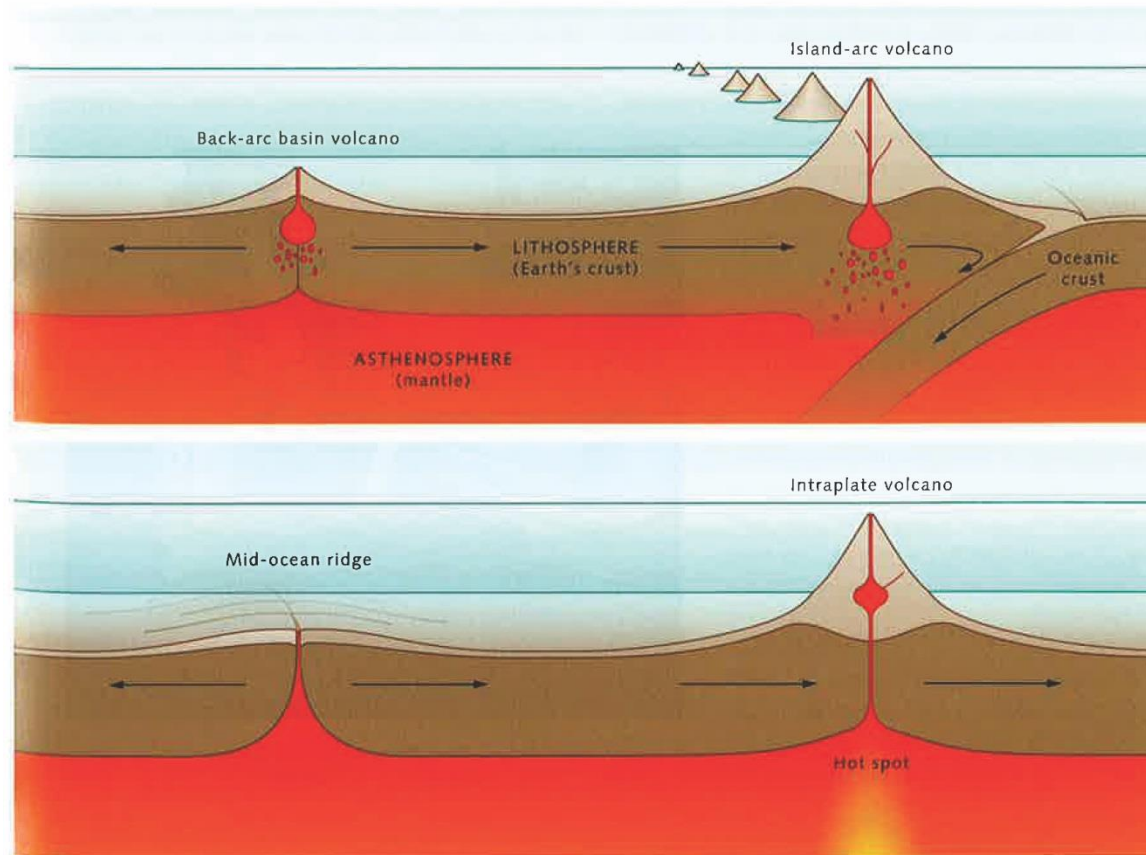
* Komen voor tussen waterdiepte van 1000 en 4000m

* Op verschillende plaatsen: 300 lokaties wereldwijd
(potentiaal voor 90.000)



* Op verschillende plaatsen:

- Mid-Oceanische ruggen
- Eilandboogvulkanen
- In bekken achter deze eilandbogen (“back-arc”)
- Intraplaat vulkanen



* Totale hoeveelheid kleiner dan Mn-nodules & Co-korsten

* Niet allemaal bevatten ze interessante metalen (eg Mid-Atlantische rift, Fe-sulfiden)

* Bismarck Sea, Papua new Guinea: Cu, Zn en Au-Ag

Region	Gold (Au) In grams per tonne	Silver (Ag) In grams per tonne
Manganese nodules in the Clarion-Clipperton Zone (CCZ)	0.0045	0.17
Cobalt crusts in the Prime Crust Zone (PCZ)	0.013	4
Massive sulphides in Solwara 03 (central Manus Basin)	15.2	642
Massive sulphides in Solwara 09 (eastern Manus Basin)	19.9	296
Massive sulphides in Solwara 18 (western Manus Basin)	0.2	110

* + Mn, Bi, Cd, Ga, Ge, Sb, Te, Th, In,

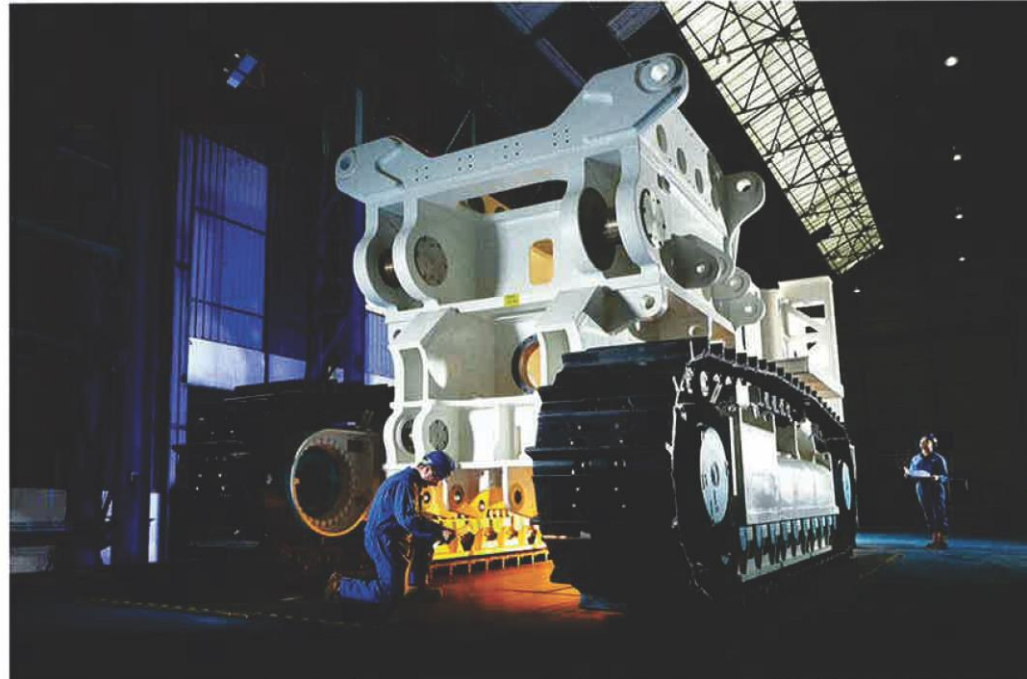


afhankelijk van gesteente onder hydrothermaal systeem + temperatuur systeem

* Mijnbouw: geavanceerd project in Bismarck Sea, Papua new Guinea



“exclusieve economische zone”



* Weinig ontwikkeling in internationale wateren
(China, Zuid-Korea, Duitsland: Indische Oceaan)
(Frankrijk en Rusland: Atlantische Oceaan)

* Hydrothermale schoorstenen = biologische hotspots, met gespecialiseerde organismen



hoge T, toxische metalen,
zure omstandigheden



milieustudies noodzakelijk



4. Enkele conclusies

* Extractie grondstoffen van zeebodem is wijdverspreid en gebeurt sedert decennia

* Intensere hernieuwde interesse:

- Mn nodules
- Co-korsten
- massieve sulfiden



rijk aan strategische en kritische elementen, anders geproduceerd in beperkt aantal landen



al lang gekend, maar (nog) niet economisch ontginbaar

* Maar: impact mijnbouw op habitats en ecosystemen



ISA : International Seabed Authority (Jamaica, 1994)

= Internationale veiligheid en milieustandaarden voor ontginning



maar territoriale wateren?

VRAGEN?