

Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid

W 78

**Duurzaamheid materiaalgebruik
en de exploitatie van mineralen**

D. Scheele

Den Haag, december 1994

Exemplaren van deze uitgave zijn te bestellen bij het Distributiecentrum Overheidspublikaties, Postbus 20014, 2500 EA 's-Gravenhage, door overmaking van f 15,-- op giro 751 dan wel schriftelijk of telefonisch (071-352500) onder vermelding van titel en ISBN-nummer en het aantal gewenste exemplaren.

ISBN 90 346 3118 4

Publikatie van de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid (WRR),
Postbus 20004, 2500 EA 's-Gravenhage (tel. 070-3564600).

INHOUDSOPGAVE

	VOORWOORD	5
1.	INLEIDING	7
2.	VOORRADEN EN GEBRUIK VAN GEOCHEMISCH SCHAAR- SE METALEN	11
2.1	Een evaluatie van de voorraden	11
2.2	Milieueffecten van de winning van metalen	18
2.3	Toepassingen en substituties van schaarse metalen	20
2.4	Vooruitzichten voor het verbruik van schaarse metalen	22
2.5	Geografische spreiding van koperreserves	29
3.	CONCEPTIES VAN DUURZAAMHEID EN GRONDSTOFFEN- SCHAARSTE	31
3.1	De dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid	34
3.2	De schaarste-risico mijdende en milieu-risico accepterende concep- tie van duurzaamheid	38
3.3	De schaarste-risico accepterende milieu-risico mijdende conceptie van duurzaamheid	41
3.4	De dubbel risico-mijdende conceptie van duurzaamheid	42
4.	KWANTITATIEVE VERKENNING	43
4.1	De materiaalintensiteit in het licht van de Noord-Zuid verhouding	43
4.1.1	Het belang van de Noord-Zuid dimensie	43
4.1.2	Economisch ontwikkelingsstadium en koperverbruik in Noord en Zuid	45
4.2	Scenario's van duurzaam kopergebruik	51
4.2.1	Uitgangspunten voor de scenario's	51
4.2.1.1	<i>De ontwikkeling van de kopervraag</i>	52

4.2.1.2	<i>De wereldkopervoorraad</i>	55
4.2.2	Het schaarste-risico vanuit een milieu-risico acceptierend perspectief	56
4.2.2.1	<i>Een schaarste-risico mijndend scenario; sparen</i>	57
4.2.2.2	<i>Een schaarste-risico acceptierend scenario; benutten</i>	60
4.2.3	Het schaarste-risico vanuit een milieu-risico mijndend perspectief	70
4.2.3.1	<i>Nogmaals een schaarste-risico mijndend scenario; behoeden</i>	71
4.2.3.2	<i>Nogmaals een schaarste-risico acceptierend scenario, beheren</i>	72
4.2.3.3	<i>Nabeschouwing</i>	74
5.	BESLUIT	77
5.1	Mogelijkheden voor beleid	77
5.2	Implicaties van onzekerheid	79
5.3	De zin van de onderscheiden handelingsperspectieven	80
A.1	<i>EEN MODELLERING VAN DE WINNINGSKOSTEN</i>	81

VOORWOORD

In zijn rapport 'Duurzame risico's: een blijvend gegeven' heeft de WRR het begrip duurzame ontwikkeling voor het beleid hanteerbaar gemaakt. Uitgaande van de onzekerheid die bestaat zowel over de milieugevolgen van maatschappelijke activiteiten als over de beoordeling van die milieugevolgen komt de raad tot een aantal alternatieve sporen van duurzame ontwikkeling, de zogenaamde handelingsperspectieven.

In dit rapport wordt op een specifiek milieuthema een uitwerking gegeven aan deze perspectieven. Dit thema behelst de uitputting van eindige grondstoffen, in het bijzonder de schaarse metalen. Veelvuldig wordt in het rapport toegespitst op een belangrijke representant van de schaarse metalen, namelijk het element koper. Dit metaal vervult een belangrijke rol in de economische ontwikkeling, een rol die in toenemende mate samenhangt met de goede elektrische geleiding. In tegenstelling tot metalen als ijzer en aluminium is koper een betrekkelijk schaars element in de aardkorst.

Duurzame ontwikkeling wordt in dit rapport behandeld vanuit een mondiaal perspectief. De grote geografische verschillen in economische ontwikkeling geven grond aan de verwachting dat de grondstoffenvraag in de toekomst sterk zal toenemen. Een duurzame exploitatie van schaarse metalen wordt tegen deze achtergrond geplaatst.

De WRR heeft in haar rapport kanttekeningen geplaatst bij het hanteren van de 'milieugebruiksruimte' als beleidsondersteunend begrip.

In dit rapport wordt de onbepaaldheid van de milieugebruiksruimte met betrekking tot de eindige grondstoffen onderstreept. Vanwege de bestaande onzekerheid zijn de marges tussen de handelingsperspectieven groot en verschillen de maatschappelijke consequenties van deze perspectieven. De WRR verbindt hier de beleidsverantwoordelijkheid tot het maken van expliciete keuzen aan.

Het commentaar van een aantal referenten op eerdere manuscripten heeft zeer bijgedragen aan de tot stand koming van dit rapport. Woorden van dank gaan daarom uit naar dr. H.C. Moll IVEM/RUG, dr. R.J. Murriss, dhr. H. Venner Vereniging Milieudefensie en dr. B. de Vries RIVM. In enkele gevallen zijn waardevolle suggesties blijven liggen. Met name met betrekking tot de lange termijn ontwikkeling van de kopervraag bestaan vele onduidelijkheden die ook met het verschijnen van dit rapport blijven voortbestaan.

-Prof. R. Rabbinge

1. INLEIDING

Onze samenleving maakt voor het genereren van haar welvaart op grote schaal gebruik van natuurlijke hulpbronnen. Een belangrijk deel van de functies waaraan de huidige consument zijn welvaart ontleent is in enigerlei vorm afhankelijk van de exploitatie van fossiele energie, minerale grondstoffen of biotisch materiaal. Of het nu gaat om de voedselvoorziening, de huisvesting, het bestieren van het huishouden of de mobiliteit, voor al deze functies wordt een beroep gedaan op de exploitatie van de natuurlijke rijkdom van de aarde. Hetzelfde geldt voor veel van de activiteiten die gericht zijn op het produceren of het garanderen van de verschillende welvaartsfuncties, zoals bijvoorbeeld de industriële activiteiten, de handel en de defensie.

Het is de vraag of de aarde wel voldoende rijkdommen bezit om de welvarende samenleving zoals we die nu kennen tot in lengte van dagen te ondersteunen. Het is nog veel sterker de vraag of die rijkdommen wel toereikend zijn om de huidige welvaart nog verder uit te bouwen. Deze vragen zijn klemmend in het licht van het bestaan van een geweldige hang naar een uitbreiding van de huidige welvaart. De wens om tot een verhoging van het welvaartsniveau te komen bestaat niet alleen in het reeds ruimschoots bedeelde 'westen', die wens bestaat met name ook in al die gebieden waar de economische ontwikkeling niet het westers peil heeft bereikt, maar waar de bekendheid met de westerse samenleving wel groot is en waar in toenemende mate ook moderne westerse waarden worden overgenomen. Juist in deze gebieden is de toename van de bevolkingsomvang nog groot. Daarom mag vanuit deze gebieden een omvangrijke claim op de natuurlijke hulpbronnen van de aarde verwacht worden. Mogelijkerwijs zal deze claim die van het westen in omvang gaan overtreffen.

Met het verschijnen van het Brundtlandrapport¹ is de problematiek van de duurzame ontwikkeling in de actualiteit gebracht. Het rapport omschrijft duurzame ontwikkeling als:

'Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs'.

Als er een duurzaam gebruik van de natuurlijke hulpbronnen gemaakt zou worden, zouden volgende generaties althans niet door de schaarste van die hulpbronnen belemmerd worden in hun streven naar welvaart. Men kan zich afvragen of er in de nabije toekomst zonder ingrijpende correcties sprake kan zijn van een duurzame ontwikkeling. Een sluitend antwoord op die vraag is niet te geven.

Er bestaat een grote mate van onzekerheid over de oplossingsgerichte mogelijkheden van toekomstige generaties. Bovendien is het verre van duidelijk wat moet worden verstaan onder de behoeften van toekomstige generaties. Het is een wijdverbreide opinie dat de huidige generatie beter af is dan de voorgaande generaties. Met een verwijzing naar de grote schade die het milieu heeft opgelopen kan deze opvatting in twijfel worden getrokken, ook als het gaat om de *essentiële* behoeften van de armen. De vraag wat onder duurzame ontwikkeling in de zin van het Brundtlandrapport moet worden verstaan is afhankelijk van de houding die tegenover het bestaan van onzekerheden wordt gesteld. Zij is bovendien afhankelijk van de waardering van de verschillende behoeftes van een volgende generatie.

¹ World Commission on Environment and Development, *Our common future*, Oxford, Oxford University Press, 1987.

Er bestaat onzekerheid over de mate waarin toekomstige generaties in staat zullen zijn het hoofd te bieden aan de schaarste van natuurlijke hulpbronnen. Ten aanzien van de op de tijdschaal van de uitputting vernieuwbare bronnen bestaat soms meer en soms minder onzekerheid over de omvang van een duurzame exploitatie. In deze bijdrage wordt echter niet de uitputting van vernieuwbare hulpbronnen maar die van de niet vernieuwbare grondstoffen aan de orde gesteld. Een duurzaam gebruik van een eindige grondstoffenvoorraad vereist dat het niveau van de exploitatie in de loop der tijd afneemt. Het is niet zonder meer duidelijk hoe dit te rijmen valt met een bevredigend welvaartsniveau voor toekomstige generaties. Het Brundtlandrapport vat de opgave voor een duurzame ontwikkeling als volgt samen:

'In essence, sustainable development is a process in which the exploitation of resources, the direction of investments, the orientation of technical development, and institutional change are all in harmony and enhance both current and future potential to meet human needs and aspirations'.

In deze passage is een voorwaarde voor duurzame ontwikkeling vervat: Het vruchtgebruik van de voorraden van de uitputbare grondstoffen moet worden gebruikt voor investeringen en technologische ontwikkeling die het toekomstige gebruik van die voorraden overbodig maken². Men zou geneigd zijn te denken dat hiermee een aangrijpingspunt voor een duurzame ontwikkeling is gegeven. Maar het is nu juist over de mogelijkheid van de substitutie van reproduceerbaar kapitaal voor natuurlijke hulpbronnen dat de nodige onzekerheid bestaat.

De substitueerbaarheid van reproduceerbaar kapitaal voor niet vernieuwbare grondstoffen en de gevolgtrekkingen daaruit voor duurzame ontwikkeling vormen het centrale thema van dit rapport. De substitueerbaarheid zal worden uitgewerkt aan de hand van het voorbeeld van de in geochemisch opzicht schaarse metalen. Binnen deze groep van metalen zal speciale aandacht geschonken worden aan het metaal koper, een metaal dat een lage reserve productie ratio heeft en dat essentiële functies vervult voor de generatie van de huidige welvaart.

Er zullen vier verschillende concepties van duurzaamheid uitgewerkt worden die elk gevoed worden door de mate waarin men bereid is risico's te nemen, risico's ten aanzien van de uitputtingsproblematiek en risico's ten aanzien van de andere milieuaspecten. Ten aanzien van de onzekerheden die in de duurzaamheidsdiscussie spelen is het onvermijdelijk een houding in termen van risicogeneidheid te bepalen. Het is te simpel om te stellen dat de draagkracht van het milieu objectief vast te stellen zou zijn en dat hieruit logischerwijs een gedragslijn voor een duurzame ontwikkeling zou volgen. Neemt men de wens om tot een duurzame ontwikkeling te komen serieus dan zal er vroeg of laat een houding bepaald moeten worden in termen van risicogeneidheid. Die houdingen zullen in het navolgende betiteld worden als 'concepties van duurzaamheid'³. Afhankelijk van welke conceptie men heeft bestaat er aanleiding om voor het milieu in het geweer te komen.

In het volgende hoofdstuk van dit rapport zal ingegaan worden op de voorkomens van de geochemisch schaarse metalen. De classificatie van de reserves komt aan de orde. De reserves van koper en enkele andere schaarse metalen worden belicht. Daarbij komen enkele geostatistische benaderingen van de metaalreserves in de aardkorst aan de orde. Er wordt ingegaan op

² J.M. Hartwick, "Intergenerational equity and the investing of rents from exhaustible resources"; *American Economic Review*, (66) 1977, pp. 972-974.

³ WRR, *Duurzame risico's: een blijvend gegeven*, Rapporten aan de regering 44, Den Haag, Sdu uitgeverij, 1994.

enkele milieuaspecten van de delfstofwinning en de produktie van primaire metalen. Vervolgens wordt de verbruikssituatie behandeld. Daarbij wordt een referentiescenario voor het metaal koper gepresenteerd. De casus van koper fungeert in deze studie als voorbeeld voor de overige geochemisch schaarse metalen. In hoofdstuk drie worden de vier concepties van duurzame ontwikkeling uitgewerkt met betrekking tot de exploitatie van de schaarse metalen. De concepties zijn geconstrueerd als risicohoudingen zowel ten aanzien van schaarste als ten aanzien van de milieueffecten van de winning. In hoofdstuk vier zijn vanuit deze concepties van duurzaamheid scenario's voor het verbruik van koper ontwikkeld. Allereerst wordt het referentiescenario verder uitgediept en wordt stilgestaan bij de Noord-Zuid dimensie van de exploitatie van mineralen. Ten slotte worden in het laatste hoofdstuk de beleidsimplicaties van de scenario's besproken.

2. VOORRADEN EN GEBRUIK VAN GEOCHEMISCH SCHAARSE METALEN

2.1 Een evaluatie van de voorraden

De massa van de continentale aardkorst is voor het overgrote deel opgebouwd uit een beperkt aantal elementen. Slechts negen elementen maken 99 procent van de totale massa van de aardkorst uit. Zuurstof en silicium zijn de meest voorkomende elementen in de aardkorst.

In de aardkorst worden 88 verschillende elementen gevonden. Veel van de elementen die behoren tot de groep van 79 elementen, die slechts 1 procent van de massa van de aardkorst uitmaken, vervullen een belangrijke rol in de hedendaagse technologie. De massa van de aardkorst is dermate groot dat, ook al vormen deze elementen er slechts een zeer klein deel van, hun totale voorkomen in de aardkorst de jaarlijkse onttrekking aan de aardkorst met vele orden van groottes overtreft.

Het overgrote deel van de voorkomens van de groep van 79 schaarsere elementen is echter dermate verspreid in de aardkorst dat winning niet aan de orde is. Door de bank genomen is de concentratie van deze elementen bijzonder gering. Gelukkig is de verspreiding van deze elementen in de aardkorst niet volledig homogeen. Een gedeelte van de voorkomens is in concentraties ver boven de gemiddelde concentratie in de aardkorst. De mijnbouw van schaarse grondstoffen is gericht op het exploreren en het exploiteren van dit soort voorkomens.

Uiteraard wordt ook bij de winning van de minder schaarse elementen zoals ijzer en aluminium gemikt op voorkomens in hogere concentraties.

Het begrip reserve duidt aan welke voorraden van een mineraal zich in de aardbodem bevinden. In verband met de winbaarheid van die voorraden kan onderscheid gemaakt worden tussen technische en economische condities. In het kort worden hier de verschillende reservebegrippen besproken.

Tabel 2.1 Overzicht van reservebegrippen

Technische haalbaarheid winning	Economische haalbaarheid winning	Reservebegrip
bij huidige technologie	bij huidige prijzen	economische reserve
bij huidige technologie	bij toekomstige prijzen	reservebasis
bij toekomstige technologie	bij toekomstige prijzen	reservepotentiëel
bij toekomstige technologie	geen beperking	technische reserve
geen beperking	geen beperking	geologische reserve

Bron: WRR

Wanneer de concentratie van een delfstof op een niveau ligt dat de economisch haalbare winning in potentie aanwezig is wordt gesproken van een *reservepotentiëel*. Het gaat bij de definitie van het reservepotentiëel om meer dan de zuiver *technische reserve*. Er moet weliswaar zicht zijn op een technisch realiseerbare exploitatie, ofwel met bestaande techniek ofwel met technieken die in ontwikkeling zijn. Maar bovendien moet de toekomstige economische haalbaarheid van de winning ook plausibel zijn. Het reservepotentiëel is het voor de uitputtingsproblematiek meest relevante reservebegrip.

De omvang van het reservepotentiëel is dus afhankelijk van ontwikkelingen in de technologie van de mijnbouw en de ertsverwerking en van mogelijke ontwikkelingen in het prijsniveau. Indicaties over de omvang van het reservepotentiëel zijn daarom met onzekerheden omgeven. Door ontwikkelingen in de technologie kunnen zowel de winningskosten gedrukt worden als de fysiek winbare hoeveelheden uitgebreid worden.

Minerale voorkomens waarvan de exploitatie voorheen technisch niet tot de mogelijkheden behoorde kunnen door technologische ontwikkelingen binnen bereik komen. Tot op zekere hoogte zijn dergelijke ontwikkelingen te voorzien.

De technische reserve kan geclassificeerd worden naar de moeilijkheidsgraad van winning en verwerking. Voorkomens die tot de technische reserve gerekend worden kunnen al dan niet gesitueerd zijn in moeilijk toegankelijke gebieden of op grote diepte. Het ertsgehalte kan variëren en de omvang van de voorkomens op een bepaalde vindplaats kan uiteenlopen. Al deze factoren spelen mee in de kosten die aan de delfstofwinning uit een voorkomen zijn verbonden. Het gedeelte van de technische reserve, waarvan de winning beneden een onder de marktomstandigheden gangbaar kostenniveau plaats kan vinden en waarboven de mijnbouw economisch marginaal wordt, staat bekend als de *economische reserve*. De omvang van deze reserve is dus geheel afhankelijk van de marktomstandigheden.

Een elastische vraag kan aanleiding geven tot een geheel andere prijsontwikkeling dan een inelastische vraag, zodat datgene wat een economisch haalbare winning is, ook afhankelijk is van het karakter van de vraag. Bij de inschatting van het reservepotentiëel is het karakter van de vraag van belang om de economische plausibiliteit van de winning te kunnen beoordelen.

Het is voorstelbaar dat de vraag naar een grondstof boven een zeker prijsniveau sterk terugvalt. Dit kan gebeuren omdat de behoeftestructuur boven een bepaald kostenniveau wordt bijgesteld. Het kan ook zijn dat de technologie zich zodanig ontwikkelt dat voorziening in een functie met een alternatief voor de grondstof vervuld kan worden. De winning van voorkomens zal dan boven een bepaald kostenniveau nimmer gerealiseerd worden.

Om inzicht te krijgen in het reservepotentiëel op langere termijn is het noodzakelijk de substitutie mogelijkheden in zowel de consumptieve als de produktieve sfeer mede in reactie op de ontwikkeling van de technologie te beoordelen.

Naast het reservepotentiëel en de economische reserve wordt ook de *reservebasis* onderscheiden. Hieronder wordt verstaan de hoeveelheid mineralen waarvan de winning bij de huidige stand van de techniek en het huidige prijsniveau economisch, marginaal of subeconomisch is. Zowel de economische reserve als de reservebasis zijn niet de juiste grootheden om de lange termijn uitputting van mineralen aan op te hangen. Het reservepotentiëel is hiervoor de aangewezen grootheid, omdat deze niet alleen rekening houdt met variaties in het prijsniveau, maar ook de ontwikkeling in de technologie van de winning, de verwerking en de toepassing incorporeert. Dit laat onverlet dat de concrete invulling van de grootheid problematisch is omdat deze voorwaardelijk op de inschatting van de technologische ontwikkeling in het gehele traject van winning tot toepassing moet plaatsvinden.

Het totale voorkomen van een element in de aardkorst wordt wel de *geologische reserve* genoemd. In de onderstaande tabel is voor een aantal metallische elementen weergegeven wat hun massa aandeel in de continentale aardkorst is, wat naar inschatting de verschillende reserves zijn en hoe groot de jaarlijkse extractie is. Ook is aangegeven wat de typische ertsgehalten bij extractie zijn.

De massa van de continentale aardkorst bedraagt 0,29 procent van de totale aardmassa die op 6×10^{21} metrische ton wordt geschat. De gemiddelde dikte van de continentale aardkorst is 30

kilometer. De massa aandelen staan in directe relatie tot de geologische reserves. Deze moeten vergeleken worden met de omvang van de reservepotentiëlen, die ergens tussen de technische reserve en de reservebasis in liggen. Het massa aandeel van de diverse metalen moet worden vergeleken met de voor de gangbare winning typische ertsgehalten. Deze vergelijking leert welk niveau van natuurlijke verrijking momenteel voor een economische winning vereist is.

Tabel 2.2 Voorkomen, reserves en extractie van metalen (elementaire massa)

	Massa aandeel in de aardkorst [%]	Geologische reserve [10^{12} ton]	Technische reserve [10^6 ton]	Reservebasis [10^6 ton]	Jaarlijkse extractie [10^6 ton]	Typisch ertsgehalte [%]
ijzer	5,4	1.392.000	2.035.000	89.000	510	55
aluminium	8,1	1.990.000	3.519.000	7.750	18	30
mangaan	0,1	31.200	42.000	3.550	8,5	30
koper	0,005	1.510	2.120	570	8,2	2,0
zink	0,007	2.250	3.400	300	6,6	4
chroom	0,01	2.600	3.260	2.100	4,4	30
lood	0,001	290	550	140	3,4	5
nikkel	0,008	2.130	2.590	110	0,8	1
tin	0,0003	40	68	4,3	0,18	0,3

Bron: The Council on Environmental Quality and the Department of State, The Global 2000 Report to the President; Washington D.C., 1980.

Bureau of Mines, Minerals Yearbook, Volume I, Metals and minerals; Pittsburgh, US Department of the Interior, 1989.

A. Brobst and W.P. Pratt (eds.), United States Mineral Resources; Geological Survey Professional Paper 820, Washington D.C., 1973.

De omvang van de grondstoffenvoorraden is bijzonder onzeker. Het is zeer de vraag welk gedeelte van de geologische reserve tot de technische reserve en het reservepotentiëel gerekend moet worden. De cijfers die in de bovenstaande tabel voor de technische reserve en de reservebasis vermeld staan zijn niet meer dan grove indicaties op basis van de huidige kennis. De onzekerheid komt onder meer voort uit het feit dat de aardkorst onvolledig geëxploreerd is op het voorkomen van winbare voorraden. Een dergelijke volledigheid zou ook bijzonder kostbaar zijn. De inschatting van de reserves, zoals die in de bovenstaande tabel zijn weergegeven, is gebaseerd op een beperkte gegevensverzameling.

Naar afnemende graad van zekerheid kunnen reserves onderscheiden worden in vastgestelde reserves en veronderstelde reserves. Binnen de groep van vastgestelde reserves kan onderscheid gemaakt worden naar middels succesvolle exploraties aangetoonde reserves en de reserves waarvan het bestaan op grond van een veronderstelde continuïteit aannemelijk is gemaakt. De omvang van de veronderstelde reserves wordt op grond van geologische inzichten ingeschat. Naar gelang die inzichten minder grond geven om de aanwezigheid van minerale voorraden te veronderstellen wordt gesproken van hypothetische en speculatieve reserves.

Vanwege het overvloedige voorkomen van de elementen zuurstof en silicium in de aardkorst zijn veel mineralen silicaatverbindingen. Metalen die in silicaatverbindingen voorkomen zijn

minder geschikt als grondstof vanwege de grote hoeveelheid energie die nodig is om ze te smelten. Daarom worden voor produktie van metalen als ijzer en aluminium bij voorkeur oxides en hydroxides gebruikt. Helaas zijn deze mineralen veel zeldzamer dan de silicaten. Voor ijzer zijn de voorraden van geschikte ertsen nog dermate groot dat er voor eeuwen voldoende is. De voornaamste delfstof voor aluminium, bauxiet, is evenwel al aanzienlijk schaarser. De huidige geschatte reservebasis van 25 mld ton zal ongetwijfeld nog toenemen maar de waarschijnlijkheid van grote vondsten met naar huidige maatstaven acceptabele ertsgehalten is gering, omdat de meeste in aanmerking komende gebieden reeds onderzocht zijn⁴. Alternatieve grondstoffen voor aluminium zijn voorhanden, maar voor zover het om grote voorraden gaat betreft het silicaten. Skinner is van mening dat

'Perhaps the most realistic assessment of aluminum is that it is a commodity with vast potential resources waiting for some innovative technological advances, but that production of aluminum will always be energy-intensive and expensive'.

De metallische elementen worden onderverdeeld in de relatief overvloedig aanwezige metalen en in de geochemisch schaarse metalen. Als criterium voor schaarse metalen geldt dat hun massa aandeel in de continentale aardkorst minder dan een tiende procent is. Tot de groep van geochemisch schaarse metalen worden onder andere koper, zink, lood, chroom, nikkel en tin gerekend.

De schaarse metalen vormen in hun algemeenheid en anders dan de veel voorkomende metalen als ijzer en aluminium geen afzonderlijke mineralen. In plaats daarvan nemen zij in normale rotsvormende mineralen de plaats in waar anders een atoom van een veel voorkomend element in de mineraalstructuur zou hebben gezeten. Naar schatting komt 99,9 - 99,99 procent van de aanwezige schaarse metalen in de aardkorst als substituuat voor reguliere atomen in een mineraal voor. We spreken hier van substitutiemengkristallen.

In de regel is het aantal atomen van het schaarse metaal in een mineraal slechts een fractie van het aantal atomen van het element dat gesubstitueerd is. De winning van schaarse metalen in dergelijke voorkomens is problematisch. Het gehalte van het te winnen metaal in normale mineralen is uiterst laag. Dit betekent dat grote hoeveelheden rots zouden moeten worden verwerkt. Bovendien gaat het veelal om silicaten waaruit de metalen slechts met inzet van veel energie te winnen zijn.

Op sommige plaatsen van de aardkorst zijn de gehalten van een of meerdere schaarse metalen hoger. Soms zijn deze gehalten zelfs zo hoog dat het mineraal verzadigd is en de metalen wel separate mineralen hebben gevormd. Op die plaatsen van de aarde waar dergelijke mineralen in grote hoeveelheden en in een zekere concentratie voorkomen is de winning in principe mogelijk.

Zoals gezegd bestaat er onzekerheid over de omvang van de niet ontdekte en veronderstelde reserves. Er bestaan weliswaar aanknopingspunten om uitspraken te doen over deze reserves, maar de onzekerheid is onvermijdelijk vanwege de noodzaak bepaalde veronderstellingen te maken. In het navolgende wordt ingegaan op enkele geostatistische benaderingen van de reserves van de schaarse metalen.

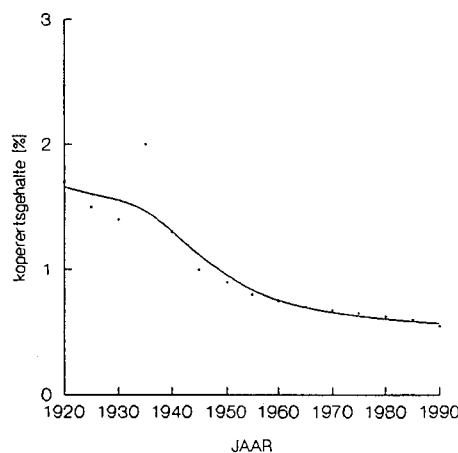
Het gehalte van de ertsen waaruit metalen worden gewonnen varieert binnen zekere grenzen. Langzamerhand zijn de vindplaatsen met de rijkste ertsen uitgeput geraakt. Door de tijd heen

⁴ B.J. Skinner, *Earth resources*; Englewood Cliffs NJ, Prentice-Hall, 1986.

is het gemiddelde ertsgehalte van de gewonnen schaarse metalen aan het afnemen. De productie van de meeste metalen is evenwel alleen maar uitgebreid en aan reserves met lagere ertsgehalten lijkt vooralsnog geen gebrek te komen.

Sprekende voorbeelden in dit verband zijn de afnemende gehalten van ijzererts en kopererts. Door technologische vernieuwing in zowel de concentratie van ijzererts tijdens de winning als in de voorbereidingsfase voor het gebruik in hoogovens, het zogenaamde pelletiseren, heeft de winning van ertsen met lagere gehalten een hoge vlucht genomen. Bij de koperwinning heeft de ontwikkeling van steeds grotere en efficiëntere mijnbouwmachines, die voor de winning van grote voorkomens van lage ertsgehalten in dagmijnbouw ingezet konden worden, een rol gespeeld. In de onderstaande figuur is de ontwikkeling van het gemiddelde gehalte van het gedolven kopererts in de Verenigde Staten door de tijd heen weergegeven.

Figuur 2.1 Gemiddeld gehalte van kopererts in de Verenigde Staten



Bron: US Bureau of Mines.

Er zijn binnen de bandbreedte van de gevonden ertsgehalten verbanden geconstateerd tussen de reserves met tenminste een bepaald ertsgehalte en dat ertsgehalte zelf. Lasky (1950) en later ook Musgrove (1965) en (1971) hebben spraakmakend onderzoek verricht naar deze zogenaamde kwantiteits-kwaliteits relaties. Naarmate het ertsgehalte afneemt nemen de reserves toe. Die toename volgt een geometrisch of exponentieel verloop. Het verband is geconstateerd voor verschillende metaalertsen en is bekend komen te staan als de wet van Lasky⁵. Het belang van de wet van Lasky ligt in de extrapolatie naar de lagere ertsgehalten. Door verschillende auteurs zijn op grond van de wet van Lasky uitspraken gedaan over de omvang van de niet ontdekte reserves.

Als bij de lagere ertsgehalten de minerale voorkomens inderdaad veel omvangrijker zijn dan bij de voor de huidige mijnbouw gangbare ertsgehalten dan impliceert dit dat de technische reserve en mogelijk ook het reservepotentiëel aanmerkelijk veel groter zijn dan de reservebasis en de economische reserve die door de mijnbouwindustrie gerapporteerd worden. De geldigheid van de wet van Lasky maakt het verschil uit tussen de uitputting van veel van de

⁵ D.P. Harris, *Mineral resources appraisal*; Oxford, Clarendon Press, 1984.

schaarse metalen in de komende eeuw of in het komende millennium. Zeker als er een vloeiend verloop van de huidige mijnbare ertsgehalten tot de gehalten in substituiemeng-kristallen in willekeurig gesteente zou bestaan, zijn de voorraden van de schaarse metalen in verhouding tot de jaarlijkse extractie welhaast onbeperkt. De winning van de metalen uit de armere ertsen zal met hogere kosten gepaard gaan en dit zal wellicht een selectiever gebruik van de schaarse metalen bevorderen. Anderzijds is het ook mogelijk dat de kosten als gevolg van de technologische ontwikkeling beheerst blijven.

Een illustratie van de implicaties van de wet van Lasky voor het bestaan van voorraden van arme ertsen wordt gegeven door Harris wanneer hij een studie van Cargill, Root en Bailey (1981) aanhaalt. Op basis van cijfers van jaarlijkse produktie en ertsgehalte over de periode 1926-1976 geven zij een schatting van de initiële technische reserve van koper in de Verenigde Staten. Die reserve schatten zij voor kopererts met een gehalte groter dan 0,2 procent in op 328 mln ton zuiver koper. Als hier de cumulatieve produktie van koper in de Verenigde Staten tot 1976 van 58 mln ton van wordt afgetrokken resteert een reserve van 270 mln ton. Het Bureau of Mines geeft voor 1975 een koperreserve van 82 mln ton op bij een jaarlijkse extractie van 1,3 mln ton. In 1989 worden de economische reserves in de Verenigde Staten op 55 mln ton gerapporteerd en de reservebasis op 90 mln ton. De conclusie zou kunnen luiden dat de Verenigde Staten nog enkele eeuwen voortkunnen met hun kopervoorraden.

Cargill, Root en Bailey geven hun schatting voor de kopervoorraden met een ertsgehalte groter dan 0,2 procent koper. Als zij in plaats daarvan hadden gekeken naar de voorraden met een ertsgehalte groter dan 0,4 procent koper was hun schatting lager uitgekomen dan 328 mln ton, namelijk op 109 mln ton, meer in de richting van de reserves die door het Bureau of Mines worden aangegeven. Op basis van de door hen geschatte relatie kunnen ook voorraden met lagere ertsgehalten becijferd worden. De voorraden met een ertsgehalte groter dan 0,15 procent koper zouden 518 mln ton bedragen en de voorraden met een ertsgehalte groter dan 0,1 procent koper 988 mln ton. Met een dergelijke voorraad zouden de Verenigde Staten niet enkele eeuwen, maar bijna een millennium voortkunnen.

Nu wordt de toepasbaarheid van de wet van Lasky vaak in twijfel getrokken. Schaarse metalen kunnen uit verschillende typen van geologische voorkomens gewonnen worden. Geologen kennen aan dergelijke typen voorkomens afzonderlijke ontstaansgeschiedenissen toe. Bij elk van die geologische voorkomens is een bepaalde bandbreedte van ertsgehalten gebruikelijk. Deze constatering leidt tot de stelling dat bij elk type voorkomen een ondergrens aan de ertsgehalten bestaat. Dergelijke ondergrenzen zouden verklaard kunnen worden vanuit de ontstaansgeschiedenis van de voorkomens.

Zonder dat de ondergrenzen aan de ertsgehalten van diverse typen voorkomens nu exact bepaald zijn, wordt gespeculeerd op discontinuïteiten in de verdeling van de voorraden van metalen over de gehalten waar ze in voorkomen. De voorraden van een schaars metaal in de aardkorst zouden uit verschillende deelpopulaties bestaan, die elk aansluiten bij een type voorkomen. De ondergrens van de ertsgehalten in de populatie met de laagste ertsgehaltewaarden zou tevens een ondergrens vormen voor alle minerale voorkomens van een schaars metaal.

Een ondergrens aan de ertsgehalten zou de toepasbaarheid van de wet van Lasky inperken. Het bestaan van verschillende deelpopulaties van voorkomens, elk behorend bij een geologische klasse van voorkomens, zou ook de kwantitatieve relatie, die de wet van Lasky impliceert, ondergraven. Elke deelpopulatie heeft zijn eigen verdeling van metaalvoorraden over de typerende bandbreedte van ertsgehalten. Het is in dit licht niet aannemelijk dat de samenge-

stelde verdeling van de totale voorkomens van een metaal door het geometrische verloop van de wet van Lasky gekenmerkt wordt.

Een zelfde lijn van kritiek is mogelijk op andere benaderingen die ten doel hebben de omvang van de niet ontdekte voorraden te schatten. Harris gaat in op het werk van Brinck (1967), die vanuit een geconstateerde verdeling van concentraties van een metaal in de aardkorst de kans op het bestaan van een voorkomen van een bepaalde omvang en een bepaald gehalte probeert te schatten. De cruciale veronderstelling in Brinck's analyse is dat het voorkomen van een metaal op sommige plaatsen in de aardkorst in hoge concentraties een grote omvang van de metaalvoorkomens in de totale aardkorst impliceert.

Harris komt op basis van de benadering van Brinck uit op een wereldkopervoorraad van 2200 mln ton in ertsgehalten van tenminste 1,7 procent. Hij merkt op dat dit ongeveer twee maal zoveel is als de som van vastgestelde, hypothetische en speculatieve voorraden zoals die door Cox en anderen⁶ is vastgesteld. Bij een ertsgehalte van tenminste 0,6 procent is de wereldkopervoorraad zelfs 100 mld ton groot. In hoofdstuk 4 wordt verder ingegaan op het Crustal Abundance Geostatistical (CAG) model van Brinck.

In 1975 heeft de US Geological Survey een eerste omvattende analyse verricht van het vaak veronderstelde verband tussen de omvang van voorkomens op een bepaalde vindplaats en het ertsgehalte. De analyse onderscheidt verschillende typen geologische voorkomens van koper en concludeert dat er binnen een type voorkomen geen significante statistische verbanden zijn waar te nemen. Wel wordt, aldus Harris, een zwak statistisch verband gevonden over de typen van geologische voorkomens heen. Bepaalde typen voorkomens hebben gemiddeld genomen een grote omvang en laag ertsgehalte, terwijl andere typen voorkomens minder groot zijn maar een hoger ertsgehalte hebben.

Terwijl het onderzoek van de US Geological Survey de veronderstelling van grotere koper-voorraden bij lagere ertsgehalten weliswaar relativeert maar ook niet geheel verwerpt, moet men zich realiseren dat de analogie naar andere metalen dan koper niet vanzelfsprekend is. De trend naar het exploiteren van steeds lagere ertsgehalten is niet bij alle schaarse metalen zichtbaar. Mogelijkerwijs zijn hier de voorkomens minder geschikt voor de massale mijnbouw zoals die bij koper plaatsvindt.

Beneden bepaalde gehalten is het bedrijven van mijnbouw niet rendabel. De exploratie is gericht op voorkomens met economisch winbare gehalten. Het speuren naar subeconomische reserves dient geen economisch doel. Dit beperkt ook de informatie die beschikbaar is over de voorkomens van armere ertsen. De reserves die door de mijnbouwindustrie gerapporteerd worden, hebben eerder betrekking op de economische reserves dan op de geologische reserves. Harris acht het denkbaar dat de gegevens over omvang en gehalte van voorkomens hierdoor vertekend zijn. Hij spreekt van een afknotting van de informatie door de rendabiliteitscurve.

De rendabiliteitscurve geeft weer welke omvang en welk gehalte een voorkomen minimaal moet hebben om rendabel geëxploiteerd te kunnen worden. Vanwege schaafeffecten is enige afruil mogelijk tussen omvang en gehalte. Een lager gehalte kan gecompenseerd worden door een grotere omvang van het voorkomen. De combinaties van gehalte en omvang die boven de rendabiliteitscurve liggen zijn economisch winbaar.

⁶ D.P. Cox, R.G. Schmidt, J.D. Vine, H. Kirkemo, E.B. Tourtelot, and M. Fleischer, "Copper"; in: *United States mineral resources*; D.A. Brobst and W.P. Pratt (eds), US Geological Survey, Professional Paper 820, Washington D.C., 1973, pp. 163-90.

Veel van de informatie beneden de rendabiliteitscurve zal nooit beschikbaar komen. Een analyse van de relatie tussen omvang en gehalte van voorkomens zou onbedoeld een analyse van het verloop van de rendabiliteitscurve kunnen zijn.

Hoe groot zijn de nu de reserves van de metalen in voorkomens met lage en zeer lage ertsgehalten. Aan de ene kant hebben we de gegevens over de vastgestelde reserves. Daarbij gaat het om voorraden die voor de meeste schaarse metalen bij de huidige extractieniveaus minder dan een eeuw toereikend zijn. Aan de andere kant zijn er de schattingen van de hypothetische en speculatieve voorraden, deels gebaseerd op kennis van geologische structuren en deels ook meer geostatistisch georiënteerd. Vast staat dat er nog weinig bekend is over het voorkomen van de zeer arme ertsen in de aardkorst.

Men kan zich afvragen of bij de inschatting van de voorraadsituatie louter afgegaan moet worden op datgene wat bekend is. Het is immers goed mogelijk dat typen van voorkomens tot op heden simpelweg niet onderkend zijn. De indruk bestaat dat de geostatistische modellen de aanwezige voorraden overschatten. Die indruk wordt gevoed door een interpretatie van de modelresultaten vanuit de bekende reserves of op zijn best vanuit de kennis over de spreiding in hoeveelheid en gehalte van de bekende voorkomens. Andere objectieve maatstaven voor toetsing bestaan ook niet. De enige grond voor de veronderstelling dat de voorraden groter zijn dan we weten is het besef dat onze toetssteen onvolmaakt is.

2.2 Milieueffecten van de winning van metalen

Het is gebruikelijk om de eindige grondstoffenvoorraden onder het milieubegrip te vatten. De uitputting van deze voorraden is derhalve een milieueffect. De evaluatie van de voorraden is in de vorige paragraaf aan de orde geweest. De eventuele uitputting die uit een confrontatie van de voorraden met het toekomstige verbruik volgt is het onderwerp van de volgende paragraaf.

De milieueffecten die hier aangestipt worden betreffen de invloed van de winning van metalen op de omgeving.

De winning van metalen voltrekt zich in drie fasen.

Om te beginnen worden de ertsen uit de aardkorst gedolven. Dit kan in dagbouw of ondergronds gebeuren. Bij dagbouw is de grondverplaatsing groter dan bij ondergrondse mijnbouw, omdat deklagen in hun geheel verwijderd worden. Een voordeel van dagbouw is dat een groter gedeelte van de aanwezige mineralen gewonnen kan worden. Waar de keuze tussen dagbouw en ondergrondse mijnbouw bestaat valt de dagbouw over het algemeen goedkoper uit. Onvermijdelijk bij dagbouw is een forse aantasting van het landschap.

De volgende fase in het mijnbouwproces is de concentratie van de mineralen uit de gedolven ertsen. Hiervoor zijn in de loop der tijd verschillende processen ontwikkeld. Het principe is dat waardevol materiaal, de mineralen die de metalen bevatten, gescheiden wordt van het omgevingsmateriaal, het mijnafval. Het mijnafval bestaat in de regel voor een groot gedeelte uit verbrijzeld gesteente, vaak bestaand uit silicaatverbindingen. Het mijnafval bevat in de regel ook tal van schadelijke elementen, zoals zware metalen. De verspreiding van dergelijke elementen in de naaste omgeving is vaak een punt van zorg. Hoe lager het ertsgehalte, hoe meer mijnafval er gegenereerd wordt.

Voor de scheiding van mijnafval en mineralen wordt gebruik gemaakt van onderscheidende fysische en chemische eigenschappen. Bij de scheidingsprocessen wordt vaak gebruik gemaakt van een medium. De toepassing van water is in dit verband zeer gebruikelijk.

De derde fase van de metaalwinning betreft het smelten van de metalen uit hun mineralen. Deze activiteit vindt niet noodzakelijkerwijs plaats op de plek waar de ertsen gedolven worden. De beschikbaarheid van goedkope energie is vaak een reden voor de vestiging van een smelter. De vervuiling door de basismetaleindustrie waaronder de smeltactiviteiten gecategoriseerd worden is een hoofdstuk apart.

Vermeldenswaardig is dat alle drie de fasen in de winning van metalen veel energie vergen.

De grondverplaatsing, het waterverbruik en het energieverbruik nemen sterk toe wanneer gebruik gemaakt wordt van armere ertsen. Gordon en anderen⁷ laten voor koper zien dat bij het gebruik van 'backstop' voorraden deze toename van het gebruik van water, energie en grond zelfs prohibitief zou kunnen werken.

De concentratie waarbij koper in het geologisch proces uit zijn gastgesteente mineraliseert wordt geschat op 0,1 procent. Beneden deze concentratie komt koper in grote hoeveelheden in substituiemengkristallen voor. In bepaalde gesteenten zijn koperconcentraties van 0,05 procent aangetroffen. Gordon c.s. veronderstellen dat in een gebied als de Verenigde Staten in dergelijke gesteenten 350 mld ton winbaar koper voorkomt, een voorraad die tot in de lengte van dagen zou kunnen strekken. Een ruwe schatting is dat de kosten om koper uit dergelijk gesteente te winnen vijf maal zo hoog liggen als de kosten om koper uit gangbare ertsen van een vergelijkbaar gehalte, zo deze al bestaan, te winnen.

Bij een produktie van 15 mln ton koper uit dergelijke 'backstop' voorraden zou 110 mln ton gesteente per dag naar boven gehaald moeten worden. Naar de huidige normen is een mijn die 0,5 mln ton gesteente per dag naar boven haalt al bijzonder groot. Per ton gesteente is ongeveer 2000 liter water nodig. Dagelijks zou dan 220 mld liter water voor de verwerking van het gedolven materiaal nodig zijn. Dit komt overeen met de hoeveelheid water die per dag door de Rijn stroomt. De energie die benodigd is om het koper uit dergelijke 'backstop' voorraden te winnen wordt een factor 100 tot 1000 hoger geschat dan de energie die benodigd is om koper uit de thans gangbare ertsen te winnen. De hoeveelheid energie die voor de winning van koper benodigd is hangt onder andere af van de ertsgehalten en de diepte waarop de ertsen gewonnen worden. De winning van koper uit de 'backstop' voorraden zal meer energie vergen doordat grotere hoeveelheden gesteente vervoerd, gebroken en vergruisd moeten worden. Ook de hogere bindingsenergie van de silicaatverbindingen zal een hogere energie inzet noodzakelijk maken. Met name de energie efficiëntie van de breek- en vergruizeloperaties is laag, 80 - 90 procent van de energie gaat als warmte verloren. Gordon c.s. schatten de benodigde energie voor winning van koper uit de 'backstop' voorraden op 10 GJ per kilogram koper. Voor de produktie van 15 mln ton koper zou dus 150 EJ energie benodigd zijn. Ter vergelijking, de wereld consumptie van primaire energie in 1985 wordt door de World Energy Conference op 325 EJ geschat⁸.

De grootschalige exploitatie van 'backstop' voorraden zou een ongekend ingrijpen in het wereldmilieu met zich meebrengen. Dit geldt evenzeer indien verregaande verbeteringen in de efficiëntie bereikt zouden kunnen worden. Daar komt bij dat koper slechts één van de vele schaarse grondstoffen is, die het huidige economische proces op gang houden.

⁷ R.B. Gordon, T.C. Koopmans, W.D. Nordhaus, and B.J. Skinner, *Toward a new iron age*; Cambridge MA, Harvard University Press, 1987.

⁸ J-R. Frisch, *World energy horizons 2000-2020*; Paris, Editions Technip, 1989.

2.3 Toepassingen en substituties van schaarse metalen

De geochemisch schaarse metalen, die in bulk geproduceerd worden, zoals koper, zink, lood, chroom, nikkel en tin, vinden gevarieerde toepassingen. Dit loopt uiteen van constructieve toepassingen, anti-corrosie toepassingen, toepassing voor de geleiding van warmte of elektriciteit tot toepassing in chemicaliën.

Voor de meeste toepassingen van de schaarse metalen zijn substituten beschikbaar, ofwel binnen de groep van metalen, ofwel daarbuiten. In aanmerking komen dan kunststoffen, keramische materialen en glas. Voor bepaalde toepassingen van sommige schaarse metalen zijn echter geen directe substituten aanwezig. Voorbeelden zijn het gebruik van chroom in roestvrij staal en het gebruik van koper in elektrotechnische toepassingen.

Chroom is als bestanddeel van roestvrij staal onvervangbaar. Roestvrij staal zelf vindt op grote schaal toepassing. Het is de vraag in hoeverre er bevredigende substituten voor roestvrij staal in die toepassingen bestaan.

Koper vindt diverse toepassingen die vaak betrekking hebben op de geleiding van elektriciteit. Aluminium komt als substituut voor koper in elektrotechnische toepassingen in aanmerking. De voorraden van aluminium zijn aanmerkelijk groter dan die van koper. Het bezwaar van het gebruik van aluminium is evenwel de slechte verwerkbaarheid en het feit dat zowel de elektrische geleiding als de warmtegeleiding van aluminium minder zijn dan die van koper.

Het gebruik van koper concentreert zich in toenemende mate op de geleiding van elektriciteit. De toepassing van elektriciteit in tal van functies levert een belangrijke bijdrage aan de verhoging van de welvaart. Elektriciteit is als energiedrager in opmars⁹. Elektriciteit is een efficiënte, flexibele en schoon toe te passen energiedrager, waarvan de groei samenhangt met technische ontwikkelingen zoals automatisering en robotisering welke niet alleen in de produktieve sfeer plaats vinden, maar ook in de huishoudelijke sfeer. De perspectieven voor elektriciteit als energiedrager zijn ook op lange termijn aanwezig. Als duurzame energie een belangrijker rol gaat spelen in de energievoorziening is het aannemelijk dat elektriciteit daarbij een intermediaire rol zal spelen. De toepassingsmogelijkheden van elektriciteit als finale energiedrager spreken dusdanig tot de verbeelding dat sommigen een 'all-electric society' voor ogen staat.

De vlucht in het aantal elektrische toepassingen kan besparend werken voor de factor arbeid en voor bepaalde grondstoffen. Het brengt evenwel de vraag naar een geleidend medium voor elektriciteit met zich mee. Het metaal koper leent zich hier bij uitstek voor. Koper is een grondstof waarvan het gebruik niet snel is weg te denken in de hedendaagse economieën. In zoverre bestaat een parallel tussen het verbruik van koper en het verbruik van energie.

In de Verenigde Staten is het aandeel van het kopergebruik voor elektrische toepassingen gestegen van 52 procent in 1960 tot 72 procent in 1990. Het totale koperverbruik in de Verenigde Staten steeg in die periode van 1,6 mln ton tot 2,2 mln ton. Het koperverbruik in de categorie elektrische toepassingen nam toe ondanks de substitutie van aluminium in hoogspanningskabels, ondanks koperbesparende ontwerpen voor elektromotoren en generatoren en ondanks de toepassing van nieuwe technologieën in de telecommunicatie.

⁹ B.A. Hamel et al., *Wereld energie scenario's*, Den Haag, Centraal Planbureau, Onderzoeksmemorandum no. 101, 1993, p.13 e.v.

Tabel 2.3 Geleiding van warmte en elektriciteit door enkele metalen

	soortelijke weerstand [$10^9 \Omega\text{m}$]	warmtegeleidings- coëfficiënt [W/mK]
zilver	16	458
koper	17	393
aluminium	27	221
ijzer	100	67

Bron: Hodgman, C.D. (ed.), *Handbook of chemistry and physics*; Cleveland, Chemical Rubber Publishing Co., 1950.

De geleiding van elektriciteit en warmte door koper steekt gunstig af bij de geleidende eigenschappen van andere metalen. Aluminium is op deze punten een naaste substituut voor koper. Zilver komt nauwelijks in aanmerking vanwege de geringe reserves. Koperen warmte-wisselaars kunnen in veel gevallen door aluminium warmte-wisselaars vervangen worden. Een bekend voorbeeld is de aluminium autoradiator. In elektrische toepassingen is substitutie door aluminium niet altijd zonder problemen. Substitutie van de koperen hoogspanningskabel is een reële optie gebleken. Maar de toepassing van aluminium in roterende spoelen van elektromotoren en generatoren is in verband met de warmteontwikkeling problematisch. Doordat aluminium lastiger te bewerken is dan koper leent het zich ook minder voor elektrische of elektronische bedrading.

In de toekomst zijn omvangrijke toepassingen van koper binnen de categorie elektriciteit te verwachten voor elektrische en elektronische bedrading en voor transformatoren, generatoren en elektromotoren. Het gaat dus om toepassing in kapitaalgoederen en duurzame consumptiegoederen. Het is niet verwonderlijk dat hoge correlaties gevonden worden tussen de koperconsumptie en de bruto investeringen in elektrische toepassingen¹⁰. Dit betekent dat economieën die een hoge groei doormaken een hoge koperconsumptie hebben. Een hoge koperconsumptie wordt momenteel aangetroffen in de dynamische economieën van Zuidoost Azië.

De technologische vernieuwing op het gebied van materialen en zeker ook op het gebied van de metaallegeringen is groot. Veel combinaties van materiaaleigenschappen, die voorheen buiten het bereik van het mogelijke lagen, zijn realiseerbaar gebleken. Door de technologische vernieuwing neemt ook het aantal alternatieven voor een bepaalde toepassing toe. De substitueerbaarheid van de schaarse metalen voor elkaar is toegenomen. Als er van uitputting van schaarse metalen sprake is geldt dit minder voor een metaal afzonderlijk dan voor de gehele groep van geochemisch schaarse metalen.

De toename van de substitutiemogelijkheden geldt evenwel niet voor alle materiaaleigenschappen. De geleiding van elektriciteit is in dit opzicht een conservatieve eigenschap. Legeringen geleiden in zijn algemeenheid slechter dan de zuivere metalen. De ontwikkeling van materialen die even goed als koper geleiden en in ruimere mate voorradig zijn is dus minder waarschijnlijk.

Om deze reden is het beter mogelijk een inschatting te maken van de uitputting van koper dan van enig ander schaars metaal.

¹⁰ Bureau of Mines, *Minerals Yearbook, Volume I, Metals and minerals*; Pittsburgh, US Department of the Interior, 1989.

Als over substitutie wordt gesproken, die de uitputting van schaarse metalen zou kunnen voorkomen, betreft dit de substitutie van een schaars metaal door een relatief overvloedig aanwezig metaal, zoals ijzer of aluminium. Substitutie tussen schaarse metalen lost het uitputtingsproblemen van de schaarse metalen als groep niet op.

Helaas is er evenzeer sprake van complementariteitsrelaties tussen de geochemisch schaarse metalen aan de ene kant en ijzer en aluminium aan de andere kant, als van substitutierelaties. Men denke aan de vele legeringen waarin de schaarse metalen een bestanddeel vormen. De richting van de technologische ontwikkeling in dit veld zou daarom de uitputtingsproblematiek wel eens kunnen versterken in plaats van er een oplossing voor te leveren.

Drie vormen van technologische vernieuwing zijn van invloed op het gebruik van materialen. In de eerste plaats vindt er directe substitutie plaats van het ene materiaal door het andere. In de automobiellndustrie is het gebruik van koper voor de radiator plaats aan het maken voor het gebruik van aluminium. In de vliegtuigindustrie wordt aluminium vervangen door composietkunststoffen. In de conservenindustrie wordt het gebruik van vertind blik allengs vervangen door het gebruik van geplastificeerd blik.

In de tweede plaats wordt door verbeteringen in produktontwerp en procesvoering met minder materiaal hetzelfde bereikt als voorheen. Beschermende lagen anti-corrosie materiaal, zoals tin of zink, kunnen dunner worden aangebracht. Door verbeteringen in het ontwerp van elektromagnetische spoelen is minder koper in elektromotoren benodigd.

Ten derde is door een efficiënter gebruik van constructiemateriaal het materiaalgebruik per toepassing teruggedrongen. Er is sprake van een trend naar miniaturisering. Voorwerpen worden minder zwaar uitgevoerd. In de automobiellndustrie is lange tijd het voertuiggewicht afgenomen. Materialen worden sterker en kunnen daardoor in lichtere uitvoeringen toegepast worden.

Door deze ontwikkelingen is het relatieve belang van veel materialen en met name van de metalen aan het afnemen. Het aandeel van materialen in de economische waarde van goederen is aan het afnemen. Hierop wordt in de volgende paragraaf verder ingegaan.

2.4 Vooruitzichten voor het verbruik van schaarse metalen

De grootschalige produktie van schaarse metalen is aan het begin van de vorige eeuw ingezet. Het Verenigd Koninkrijk was tot over de helft van de vorige eeuw de grootste producent in de wereld. De mijnbouw in Cornwall en Devon leverde grote hoeveelheden koper, lood, zink en tin. In de tweede helft van de vorige eeuw werd de leidende positie van het Verenigd Koninkrijk overgenomen door andere producenten, zoals de Verenigde Staten voor koper en lood, Australië en Spanje voor lood en Maleisië voor tin. In de loop van de twintigste eeuw zijn tal van nieuwe producenten op de markt gekomen, die op hun beurt de leidende positie van de Verenigde Staten op het gebied van de winning van diverse grondstoffen overgenomen hebben. Bekend is de positie van Chili en Zambia als koperproducenten.

Het verbruik van de schaarse metalen heeft een geweldige vlucht genomen. Op wereldschaal overtrof de groei in het verbruik van schaarse metalen de groei van de economie. Dit betekent dat de economische produktie steeds zwaarder is gaan leunen op het gebruik van grondstoffen als de schaarse metalen. Per eenheid van geaggregeerde produktie werden steeds meer schaarse metalen ingezet.

Deze ontwikkeling hangt samen met de groei van de industriële sector. Grondstoffen als de schaarse metalen vinden hier hun toepassing. Als de industriële produktie sneller groeit dan de overige sectoren van de economie is het niet meer dan logisch dat ook de groei in het verbruik van de schaarse metalen hoger ligt dan de groei van de economie als geheel.

De ontwikkeling in het werkgelegenheidsaandeel van de economische sectoren geeft een indicatie van de differentiële groeitempo's van de sectoren. De ontwikkeling van de economie van het Verenigd Koninkrijk kan model staan voor de ontwikkeling van de economie van de wereld als geheel. Het Verenigd Koninkrijk loopt daarbij voorop in de ontwikkeling. Ontwikkelingslanden zoals China en India hebben een economische structuur die vergelijkbaar is met de economische structuur van het Verenigd Koninkrijk in de achttiende eeuw. De ontwikkeling van een werkgelegenheidsaandeel van meer dan 60 procent in de landbouw en van 15 procent in de industrie naar een werkgelegenheidsaandeel van minder dan 20 procent in de landbouw en bijna 50 procent in de industrie voltrok zich in het Verenigd Koninkrijk in de achttiende en negentiende eeuw en voltrekt zich thans in diverse ontwikkelingslanden.

Tabel 2.4 Werkgelegenheidsstructuur in het Verenigd Koninkrijk, 1700-1980 [%]

	landbouw	industrie	diensten
1700	60	15	25
1820	40	30	30
1890	16	44	40
1950	5	47	48
1980	3	37	60

Bron: A. Maddison, *Ontwikkelingsfasen van het kapitalisme*; Utrecht, Het Spectrum, 1982.

In het Verenigd Koninkrijk en ook in andere ontwikkelde landen vindt in de tweede helft van deze eeuw een omslag plaats. Het aandeel van de industrie in de werkgelegenheid bereikt een top en begint vervolgens te dalen. Terwijl de afkalving van de werkgelegenheid in de landbouw onverminderd voortgaat, is het werkgelegenheidsaandeel van de dienstensector het aandeel van de andere sectoren aan het overvleugelen. De groei van de economie van de ontwikkelde landen wordt in de tweede helft van deze eeuw overwegend bepaald door de groei van de dienstensector.

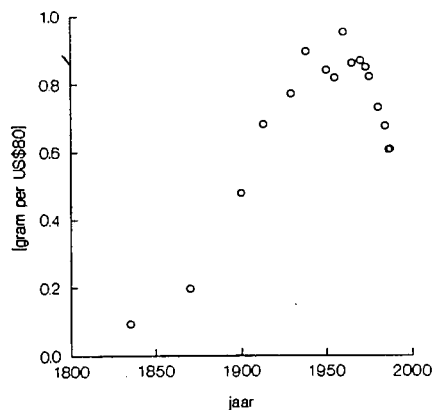
De groei van het werkgelegenheidsaandeel van de dienstensector in het Verenigd Koninkrijk is weliswaar al vanaf 1700 waar te nemen, maar is gedurende twee en een halve eeuw geringer geweest dan de groei van de werkgelegenheid in de industrie. Nu de groei van de industrie haar momentum verliest, neemt de dienstensector in belang toe. Het spreekt voor zich dat dit gevolgen heeft voor de inzet van grondstoffen in de economie.

De produktie van schaarse metalen is op wereldschaal, afgezien van voorraadvorming, gelijk aan de inzet van schaarse metalen. De inzet van schaarse metalen kan gerelateerd worden aan de economische produktie. De grootte, die de mate van inzet van een grondstof of een materiaal in de economie weergeeft, staat, in het geval van metalen, bekend als de metaalintensiteit van de economie. Als de inzet van een materiaal per eenheid van geaggregeerde output van de economie afneemt, wordt wel gesproken over de dematerialisatie van de economie.

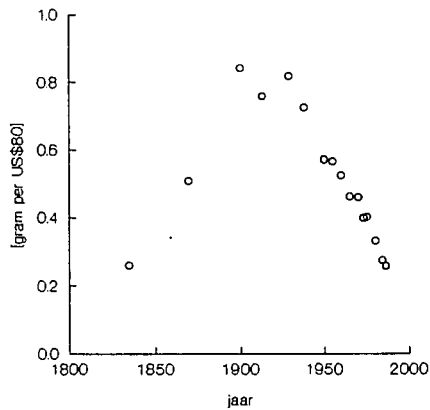
In de onderstaande figuren is de ontwikkeling van de metaalintensiteit van de wereldeconomie voor een aantal schaarse metalen weergegeven. De omvang van de produktie van de wereldeconomie is met name in de vorige eeuw en in het begin van deze eeuw niet nauwkeurig vast te stellen. Als benadering voor een wereld BNP is de som van de produktie van 38 verschillende landen genomen. In deze groep van 38 valt zowel een land als Japan met een bijzonder hoge per capita groei als een land als Bangladesh met een bijzonder lage per capita

groei. De groep van 38 landen omvat grofweg vier vijfden van zowel de wereldbevolking als de output (BNP) van de wereldeconomie¹¹.

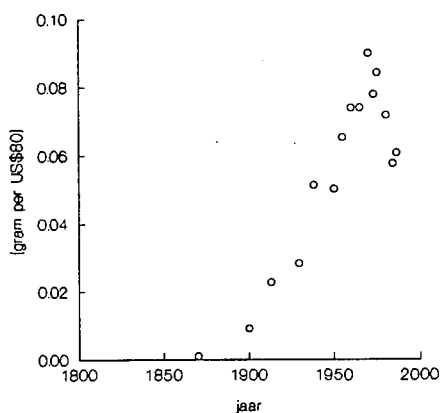
Figuur 2.2 Koperintensiteit



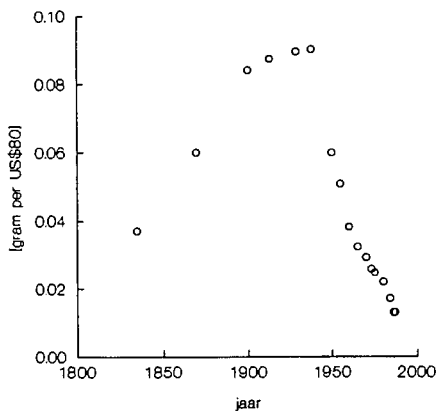
Figuur 2.3 Loodintensiteit



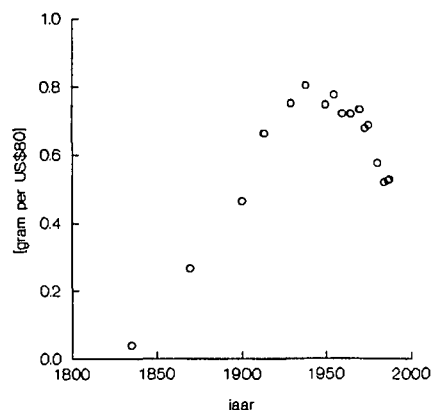
Figuur 2.4 Nikkelintensiteit



Figuur 2.5 Tinintensiteit



¹¹ A. Maddison, *The world economy in the 20th century*, Paris, OECD, 1989.

Figuur 2.6 Zinkintensiteit

Bron: WRR op basis van

A. Maddison, *The world economy in the 20th century*; Paris, OECD, 1989.

"Metals output and prices - A historical perspective"; *Mining Annual Review*, London, 1985.

De metaalintensiteit van zowel koper, lood, zink, nikkel en tin is aan het dalen. Het feit dat de daling niet voor alle metalen op hetzelfde moment heeft ingezet is het gevolg van verschillende verbruikskarakteristieken.

De daling van de metaalintensiteit is te verklaren uit de wijzigende sectorstructuur. Er bestaat ook een andere complementaire verklaring. Deze sluit aan bij de metaalintensiteit van de industrie zelf.

Substituties van de schaarse metalen door andere materialen, een grotere gebruiksefficiëntie van de schaarse metalen en een spaarzamer gebruik van constructiematerialen waarin ook schaarse metalen verwerkt zitten leiden tot een lagere inzet van de schaarse metalen per eenheid produkt van de industrie. De mogelijkheden en de noodzaak voor veranderingen in de techniek verschillen per metaal. Het gebruik van lood voor waterleidingen is vanwege de hoge toxiciteit afgebouwd. Het gebruik van de andere metalen wordt geleidelijker teruggedrongen.

De daling van de metaalintensiteit van de economie als geheel is dus een gecombineerd gevolg van een daling van de metaalintensiteit in de industriële sector en van de toenemende dominantie van de dienstensector in grote delen van de wereldeconomie.

Het is de vraag hoever de metaalintensiteit teruggedrongen zal worden. De trend in de materiaalintensiteit is omlaag. Twee overwegingen zijn hierbij van belang.

Ten eerste worden de schaarse metalen geleidelijk teruggedrongen in de meest optimale toepassingen. Daarbij wordt steeds meer een beroep gedaan op specifieke eigenschappen die voordelen bieden die niet of moeilijk door andere materialen geboden kunnen worden. De kosten van substitutie en van verbetering in de efficiëntie van de toepassing zouden daardoor een stijgende trend kunnen gaan vertonen. De marginale kosten van substitutie en efficiëntieverbetering nemen toe. Hierdoor zal de daling van de metaalintensiteit minder snel gaan verlopen.

Ten tweede lijkt het aandeel van de industrie in de wereldeconomie verder te gaan afnemen ten gunste van het aandeel van de dienstensector. Industriële activiteiten zullen evenwel altijd blijven bestaan. Zolang de industriële sector en de dienstensector van vergelijkbare grootte zijn betekent elke afkalving van het aandeel van de industriële sector een flinke neergang in de metaalintensiteit. Maar naarmate de dienstensector de economie verder gaat overheersen wordt

de invloed hiervan op de materiaalintensiteit van de economie geringer. Er is dus redenerend vanuit de wijziging van de sectorstructuur eveneens reden om aan te nemen dat de daling van de materiaalintensiteit in de loop der tijd minder snel zal gaan verlopen.

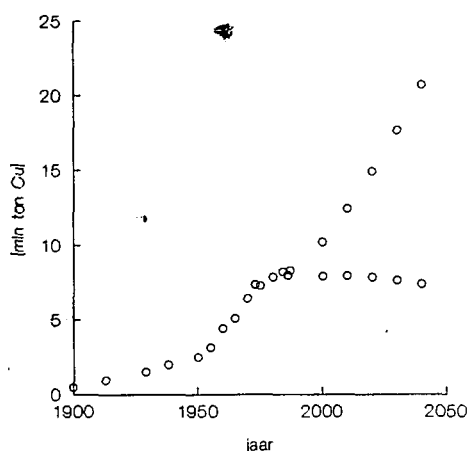
Het doel van de uiteenzetting over het verloop van de materiaalintensiteit is om te komen tot een verkenning van plausibele verbruiksentwickelingen. Een dergelijke verkenning wordt beperkt tot de casus van koper. De geschetste verbruiksentwickelingen zullen dienen om in het volgende hoofdstuk vanuit verschillende concepties van duurzaamheid de uitputtingsproblematiek te kunnen beoordelen. De ontwikkelingen moeten dus gezien worden als een referentiescenario.

De combinatie van een tijdspad van de koperintensiteit met een groeipad voor de economische productie resulteert in een verbruiksentwickeling van koper. Daarbij is aangehouden dat de ontwikkeling in de koperintensiteit onafhankelijk is van de economische groei.

In het referentiescenario worden in geen enkel opzicht trendbreuken verondersteld. Waar over verbruik wordt gesproken, wordt het verbruik van primair koper bedoeld. Het totale koperverbruik ligt hoger omdat een gedeelte van het koperverbruik afkomstig is van hergebruikt of secundair koper.

Voor de ontwikkeling van de wereldeconomie zijn groeipercentages van 2 procent en 4 procent gehanteerd.

Figuur 2.7 Groeipaden van koperextractie bij een BNP groei van 2% en 4%



Bron: WRR

Het Bureau of Mines¹² geeft voorspellingen voor het koperverbruik in het jaar 2000. De primaire produktie zou in dat jaar 10 mln ton koper bedragen. De consumptie van primair en secundair koper is in dat jaar geschat op 14,7 mln ton.

Het verbruik in het referentiescenario ligt in het jaar 2000 bij een groei van de economie met 2 procent onder de 10 mln ton koper en bij een groei van de economie met 4 procent boven de 10 mln ton koper.

¹² Bureau of Mines, op.cit.

Bij een gelijke ontwikkeling van de koperintensiteit voor verschillende tempo's van economische groei worden de verschillen in koperproductie bepaald door de groeicijfers van de economie. Na een periode van 50 jaar is het verschil in het verbruik van primair koper opgelopen tot een factor drie. Het verbruik bij een economische groei van 2 procent stabiliseert zich. Dit is uiteraard een gevolg van de wijze waarop de koperintensiteit in dit referentiescenario geëxtrapoleerd is. Daarbij zijn vrijheidsgraden aanwezig. Stabilisatie of zelfs een teruggang in het verbruik van primair koper is slechts mogelijk indien de procentuele afname van de koperintensiteit groter of gelijk aan de groei van de economie is.

Een relativerende opmerking ten aanzien van het uiteenlopen van de twee groeipaden is hier op zijn plaats. Er zijn argumenten voor de stelling dat de koperintensiteit bij een hoge economische groei sneller zal dalen dan bij een lage economische groei. Ten eerste ligt het voor de hand dat het tempo van de technologische vernieuwing samenhangt met de economische groei. Een hoge groei kan de substitutie van koper door andere materialen bespoedigen. Nieuwe technologieën, bijvoorbeeld resulterend in de efficiëntere benutting van koper, zouden ook sneller een toepassing kunnen vinden. Ten tweede zou de sectorstructuur van de economie bij een hoger groeitempo ook sneller kunnen veranderen.

De groei van de wereldeconomie heeft de afgelopen 100 jaar tussen 2 procent en 4 procent in gelegen. Extrapolatie van de gevonden trend in de koperintensiteit is binnen deze bandbreedte verantwoord. Daar kan bij worden aangetekend dat het koperverbruik bij een economische groei van 4 procent wellicht minder toeneemt dan aangegeven. Bij een economische groei van 2 procent kan het koperverbruik juist meer toenemen.

De uitputting van de kopervoorraden wordt beoordeeld aan de hand van de cumulatieve productie. In het referentiescenario is de cumulatieve productie van koper bij een economische groei van 2 procent en 4 procent na 50 jaar 415 mln ton respectievelijk 725 mln ton en na 100 jaar 790 mln ton respectievelijk 2530 mln ton. In tabel 2.1 worden technische reserves van koper van 2120 mln ton vermeld.

De wereld koper consumptie bedroeg in 1989 10,9 mln ton. Tot deze consumptie wordt zowel de consumptie van primair als secundair koper gerekend. De primaire koperproductie heeft betrekking op koper dat uit ertsen gewonnen wordt en de secundaire productie heeft betrekking op koper dat gerecycled is. In 1989 bedroeg de primaire wereldproductie van koper 8,9 mln ton. In de resterende kopervraag van 2,0 mln ton werd door hergebruik van oud koper-schroot¹³ voorzien.

¹³ Het begrip oud schroot wordt gebruikt in tegenstelling tot de nieuw schroot of omloopschroot dat bij de verwerking van koper ontstaat. Nieuw schroot wordt hergebruikt maar vormt geen toevoeging aan de kopervoorziening.

Tabel 2.5 Hergebruik van koper

[%]	1964-66	1974-76	1983-85
Verenigde Staten	23	21	23
Canada	8	13	15
Japan	26	17	17
Duitsland	33	27	31
Verenigd Koninkrijk	23	23	26

Bron: The World Resources Institute, World resources 1990-1991; New York, Oxford University Press, 1990.

Het World Resources Institute geeft voor een aantal industriële landen aan welke percentages van de koperconsumptie uit gerecycled koper bestaan. Het zou daarbij om zowel oud schroot als nieuw schroot gaan. Het hergebruik van oud schroot, dat als een toevoeging aan de kopervoorraad wordt gezien, zou dan een fractie van deze percentages bedragen. Het Bureau of Mines stelt dat in de Verenigde Staten sinds de tweede wereldoorlog in 19 procent - 33 procent van de koperconsumptie voorzien werd door oud schroot. Op wereldschaal zou gemiddeld in 18 procent van de kopervraag door oud schroot voorzien worden. Het aandeel van het oud schroot in het totale schroothergebruik neemt in de loop der jaren af. Als reden hiervoor wordt de lange levensduur van koper in de steeds veelvuldiger elektrische toepassingen gegeven.

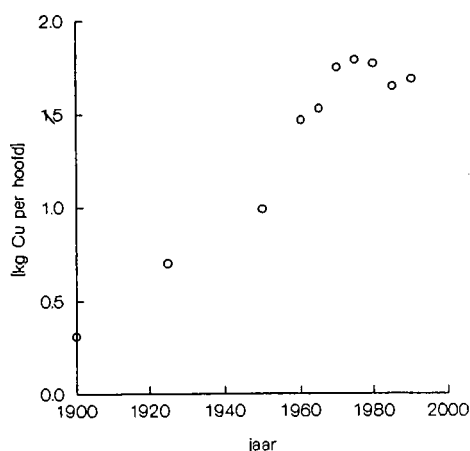
In de loop der tijd is een enorm reservoir van koper ontstaan, dat vervat is in afgedankte produkten of in produkten die nog steeds in gebruik zijn. Het Bureau of Mines schat dit reservoir op wereldschaal op meer dan 173 mln ton Cu. Een belangrijk gedeelte van dit reservoir van oud schroot en potentieel oud schroot ligt in de Verenigde Staten (38 procent) en de Europese Gemeenschap. Het is gebleken dat in tijden van tijdelijke schaarste of hoge prijzen de benutting van dit reservoir toenam. Het is voor de duurzaamheidsdiscussie van belang om indicaties te verkrijgen tot welk niveau het hergebruikspercentage zou kunnen toenemen. Technologische ontwikkelingen en ook de kwaliteit van het schroot kunnen hier een rol spelen.

In het voorgaande is de ontwikkeling van het koperverbruik gerelateerd aan de economische ontwikkeling. De ontwikkeling in het koperverbruik kan ook gerelateerd worden aan de groei van de wereldbevolking. Zo resulteert het koperverbruik per hoofd. De grootheden koperintensiteit en koperverbruik per hoofd kunnen met elkaar in verband gebracht worden.

$$\frac{C_{Cu}}{POP} = \frac{BNP}{POP} \times \frac{C_{Cu}}{BNP}$$

Zolang de koperintensiteit niet sneller daalt dan het inkomen per hoofd stijgt zal het koperverbruik per hoofd blijven toenemen. Uit figuur 2.8 blijkt dat vanaf medio jaren zeventig een stabilisatie in het koperverbruik per hoofd is opgetreden. Het gegeven van de stabilisatie van de koperconsumptie per hoofd zal in hoofdstuk 4 benut worden voor de constructie van verschillende scenario's van duurzame ontwikkeling. In het volgende hoofdstuk worden de concepties die achter deze scenario's liggen besproken.

Figuur 2.8 Mondiaal verbruik per hoofd van primair koper



Bron: WRR op basis van:
 "Metals output and prices - A historical perspective"; Mining Annual Review, London, 1985.
 UN Demographic Yearbook 1990; New York, United Nations, 1992.

2.5 Geografische spreiding van koperreserves

Om geo-strategische redenen is het interessant stil te staan bij de geografische verdeling van de koperreserves. Een sterke concentratie van grondstoffenvoorraden kan aanleiding tot problemen geven. Een bekend voorbeeld is de reservepositie van het Midden-Oosten voor aardolie. De oliecrisis van 1973 is een gering incident geweest in vergelijking met wat de wereld op het gebied van de olievoorziening aan spanningen te wachten kan staan. De druk is van de ketel genomen doordat de wereld sneller inteert op de voorraden buiten het Midden-Oosten, dan op de voorraden in dit gebied zelf. De geografische reserveverdeling wordt daardoor steeds schever.

Bij de kopervoorziening speelt deze situatie in veel mindere mate. Zoals uit onderstaande tabel blijkt zijn de reserves over alle werelddelen gespreid. Opmerkelijk is het aandeel van Chili en van de Verenigde Staten in de totale reservebasis.

Tabel 2.6 Geografische spreiding van de reservebasis van koper
[mln ton]

Noord en Centraal Amerika	149	Afrika	68
Canada	24	Zaire	30
Mexico	20	Zambia	34
Verenigde Staten	90	Overig	4
Overig	15	Azië	49
Zuid Amerika	172	Indonesië	5
Chili	120	Philippijnen	16
Peru	31	Overig	28
Overig	21	Oceanië	54
Europa	82	Australië	41
Polen	15	Papua Nieuw Guïnea	13
CIS	54		
Overig	13	Wereld	574

Bron: Bureau of Mines (1989), op.cit.

3. CONCEPTIES VAN DUURZAAMHEID EN GRONDSTOFFEN-SCHAARSTE

De feiten over de schaarste aan grondstoffen zijn algemeen bekend. De perceptie van de feiten loopt echter uiteen. Daardoor kunnen verschillende conclusies getrokken worden over de ernst van de schaarste. Verschillende percepties ontstaan vanuit onzekerheid. Onzekerheid over hoeveel grondstoffen we nog aan de aarde kunnen onttrekken, onzekerheid over hoeveel grondstoffen we nodig zullen hebben en onzekerheid over het aanpassingsvermogen van de samenleving.

Het probleem van de grondstoffenschaarste wordt gecompliceerd doordat het menselijk ingrijpen op aarde op verschillende wijzen beoordeeld kan worden. Het ecologisch systeem ondergaat veranderingen doordat grondstoffen gedolven en in circulatie gebracht worden. Die veranderingen kunnen verschillend gewaardeerd worden. Van veel van deze veranderingen zijn de gevolgen en de waarschijnlijkheid waarmee ze optreden onbekend.

De concepties van duurzaamheid, die hier onderscheiden worden, zijn geconstrueerd als combinaties van posities langs twee risicodimensies. In een assenstelsel representeert de horizontale as de mate waarin het optreden van schaarste voor komende generaties wordt geaccepteerd of vermeden, de verticale as representeert de mate waarin het ecologisch risico wordt geaccepteerd of vermeden.

Op het schaarstebegrip kan genuanceerd worden. Het is voor de economische ontwikkeling niet zozeer van belang welke hoeveelheid van grondstoffen er op een gegeven moment nog in winbare vorm in de aardkorst aanwezig is. Het gaat bovenal om de functies die deze grondstoffen nog in het economische systeem kunnen vervullen. Bij verschillende percepties van schaarste horen verschillende niveaus waarop een hoeveelheid beschikbare grondstoffen op duurzame wijze een functie in het economisch systeem kan vervullen en het functioneren van dit systeem mogelijk kan maken. De grondstoffenschaarste wordt dus uitgedrukt in de mate waarin deze functies duurzaam vervuld kunnen worden.

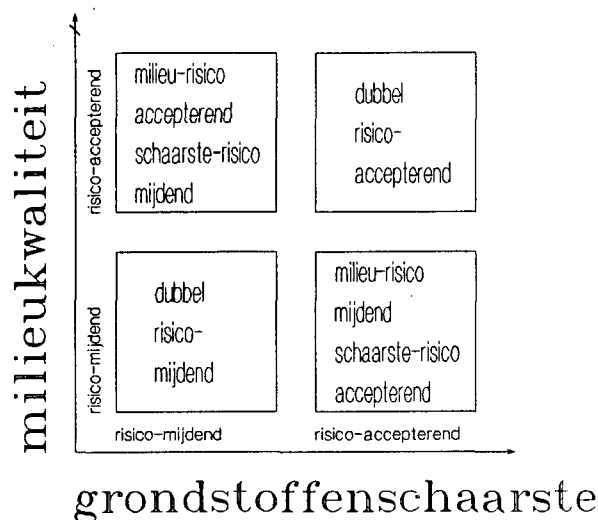
Op de horizontale schaarste-as worden twee posities onderscheiden, een linker positie en een rechter positie. De linker positie representeert een risico-mijdende opstelling ten aanzien van de schaarste en de rechter positie een risico-accepterende opstelling.

Over de ernst van ecologische verstoringen door grondstoffenwinning bestaan verschillende opvattingen. Die verschillen komen niet alleen voort uit de onzekerheid die bestaat over de veerkracht die het milieu heeft met betrekking tot verstoringen vanuit de delfstofwinning. Die verschillen hebben ook te maken met opvattingen over de relatie waarin de mens tot zijn milieu dient te staan. De houding ten opzichte van de milieuaspecten van delfstofwinning wordt bepaald door (mensbeeld geïnspireerde) voorkeuren en door onzekerheid.

Om ook met betrekking tot de milieuaspecten invulling te geven aan de concepties van duurzaamheid worden twee posities onderscheiden op een verticale milieu-as, een onderste positie en een bovenste positie. De onderste positie representeert een risico-mijdende opstelling ten aanzien van milieurisico's en de bovenste positie een risico-accepterende opstelling. Inherent aan het onderscheid tussen de onderste en bovenste positie is dat in de onderste positie meer waarde aan het milieu en minder waarde aan het gebruik van grondstoffen (materiële welvaart) wordt toegekend dan in de bovenste positie. Daarbij speelt het besef dat een

uitruil tussen milieu en welvaart onvermijdelijk is. Bij de behandeling van de desbetreffende concepties van duurzaamheid worden deze houdingen nader toegelicht.

Figuur 3.1 Concepties van duurzaamheid



Bron: WRR

Uit de concepties van duurzaamheid volgt al dan niet de noodzaak tot handelen. Dit laat zich vertalen in het formuleren van doelstellingen. De concepties geven indicaties over aangrijpingspunten voor het handelen. De ingrediënten van de concepties genereren het probleembesef, maar dragen ook de sleutel voor een oplossing aan.

Los van bestaande opvattingen over wat een duurzame ontwikkeling zou kunnen inhouden worden hier vier verschillende concepties van duurzaamheid ten tonele gevoerd. Dat vraagt om een verklaring.

Om te beginnen noopt onzekerheid over mogelijke relevante ontwikkelingen, zoals gezegd, tot onderscheiden opstellingen ten aanzien van duurzaamheid. Veel omschrijvingen en definities van duurzame ontwikkeling gaan aan die onzekerheid voorbij.

Verder laten veel definities van duurzame ontwikkeling zich moeilijk operationaliseren. Duurzame ontwikkeling is een betrekkelijk ongrijpbaar begrip. Veel definities zijn vatbaar voor meerderlei uitleg.

Een duurzaam gebruik van hulpbronnen met eindige voorraden, zoals de schaarse metalen en fossiele energie, is een problematisch concept. Turner¹⁴ stelt dat het onzin is om te spreken over een duurzaam gebruik van niet-duurzame hulpbronnen, zelfs al zou er sprake zijn van substantieel hergebruik. Om het even wat het tempo van de onttrekking is, uiteindelijk zal

¹⁴ R.K. Turner, "Sustainability, resource conservation and pollution control: an overview"; in: *Sustainable environmental management: Principles and practice*; R.K. Turner (ed.), London, Belhaven Press, 1988.

exploitatie leiden tot de uitputting van een eindige voorraad. Het is dan ook niet verwonderlijk dat in veel definities van duurzame ontwikkeling het concept van substitutie besloten ligt. Dat kan betrekking hebben op de substitutie van niet-duurzame hulpbronnen door duurzame hulpbronnen, een richting waar voor de wereldenergievoorziening aan gedacht wordt, maar het kan ook betrekking hebben op de substitutie van niet-duurzame hulpbronnen door kapitaal, hetzij fysiek kapitaal, hetzij kenniskapitaal. Solow¹⁵ heeft het in dit verband over een in ruime zin gedefinieerde kapitaalgoederenvoorraad, waartoe ook de aanvankelijk aanwezige natuurlijke hulpbronnen gerekend worden. Deze kapitaalgoederenvoorraad moet niet wat betreft samenstelling, maar wel wat betreft omvang op peil gehouden worden. Alleen dan zou, zo volgt uit het gehanteerde model, de stroom consumptiegoederen, voor de productie waarvan de natuurlijke hulpbronnen een essentiële input vormen, door de tijd heen niet hoeven dalen.

Duurzame ontwikkeling wordt vaak gezien als een ontwikkelingspad dat ten dienste staat van de welvaart in het heden, zonder dat daarbij de welvaart in de toekomst in de waagschaal gesteld wordt. Extreem gesteld valt een dusdanig gebruik van niet-duurzame natuurlijke hulpbronnen, dat de huidige consumptie maximaal is, zonder dat daarbij de vooruitzichten voor toekomstige consumptie verminderd worden binnen de definitie van duurzaamheid. Voor niet-duurzame natuurlijke hulpbronnen met eindige voorraden ontstaat hier een afwegingsprobleem tussen huidige en toekomstige consumptie.

Een vanzelfsprekende eis aan duurzame ontwikkeling zou zijn dat een duurzame ontwikkeling van welvaart over de generaties efficiënt is. Dat wil zeggen dat geen enkele generatie een hoger welvaartspeil kan bereiken zonder dat een andere generatie er slechter van wordt. Dit voorkomt dat niet-duurzame natuurlijke hulpbronnen op een manier gebruikt worden dat zonder noodzaak aan toekomstige generaties een eenvoudige toegang tot de hulpbronnen wordt ontzegd. Pure verspilling is onduurzaam.

Het is minder vanzelfsprekend wat een afweging tussen huidige en toekomstige welvaart zou zijn, die tegemoet komt aan de behoeften van de huidige generatie zonder dat daarbij de mogelijkheden tot welvaartsgeneratie in de toekomst geschaad worden. In dit verband is wel voorgesteld een ontwikkelingspad van de welvaart duurzaam te noemen als de ontwikkeling er op gericht is de voorwaarden voor de generatie die het slechtst af is te verbeteren. Een dergelijke ontwikkeling is bij uitstek risico-mijdend, dat wil zeggen risico-mijdend ten aanzien van de genoten welvaart over de generaties heen. Andere meer risico-accepterende intergenerationele welvaartsverdelingen kunnen met evenveel recht duurzaam genoemd worden.

Welvaart is geen homogeen begrip. Verschillende consumptieve elementen dragen bij aan de genoten welvaart en niet al die elementen zijn even grondstofintensief. Verschuivingen in de richting van een minder grondstofintensief consumptiepakket behoeven geen afbreuk te doen aan de genoten welvaart. Er zijn substituties in de consumptieve sfeer denkbaar. In het verband van duurzame ontwikkeling kan onderscheid gemaakt worden tussen economische groei en economische ontwikkeling of ook wel selectieve groei. Daarbij kan de intensiteit van het gebruik van niet-duurzame natuurlijke hulpbronnen afnemen.

¹⁵ R.M. Solow, "On the intergenerational allocation of natural resources", *Scandinavian Journal of Economics*, 1988 (1), pp. 141-149.

In meerdere opvattingen houdt duurzame ontwikkeling rekening met mogelijke substituties in de consumptieve sfeer. In het verband van de uitputting van niet-duurzame natuurlijke hulpbronnen wordt dan de nadruk gelegd op het blijvend vervullen van de meer elementaire menselijke behoeften zonder dat verder de toekomstige mogelijkheden om de kwaliteit van het leven te verbeteren beperkt worden. De Brundtlanddefinitie van duurzame ontwikkeling gebruikt de term behoeften en spitst dat toe op de elementaire behoeften van de armen in de wereld.

Men kan zich afvragen wat onder elementaire behoeften verstaan moet worden. Menigeen zal er mee eens zijn dat het gebruik van elektriciteit tot de elementaire menselijke behoeften behoort. Voorzover voor de geleiding van elektriciteit koper noodzakelijk is, behoort ook koper tot de elementaire behoeften. Maar welk niveau van elektriciteitsgebruik behoort tot de elementaire behoeften? Houdt dit op bij een kaal peertje aan het plafond of gaat het verder, bijvoorbeeld omdat de kwaliteit van het leven nauwelijks verbeterd kan worden zonder het verbruik van meer elektriciteit.

De operationalisatie van het begrip duurzame ontwikkeling moet plaats vinden in een terrein vol onduidelijkheden en onzekerheden, terwijl onvermijdelijk tal van subjectieve elementen binnensluipen.

De concepties van duurzaamheid die in het navolgende geïntroduceerd worden zijn bedoeld om in het schimmige veld waarin duurzame ontwikkeling tot een werkbaar begrip gemaakt moet worden een aantal zaken expliciet te maken. Er is voor gekozen om de problematiek te structureren binnen het kader van de eerder genoemde risico-dimensies. Een dergelijke inkadering maakt het mogelijk een aantal zaken geordend te bespreken. De inkadering is bovendien analytisch van aard en daardoor vatbaar voor discussie.

3.1 De dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid

Door het risico van uitputting niet uit de weg te gaan wordt de samenleving gedwongen om te zoeken naar oplossingen voor de fysieke uitputting van grondstoffen. De conceptie wordt gekenmerkt door een vertrouwen in het bestaan van dergelijke oplossingen. De exploitatiegerichtheid die uit deze conceptie spreekt wordt gerechtvaardigd door de empirie. Barnett en Morse¹⁶ constateren dat door de tijd heen een afnemende schaarste van mineralen is waar te nemen. Daarbij gaan zij af op de arbeidskosten per eenheid mineraal produkt.

De verkenning van de problematiek van de grondstoffenschaarste stuit op onvolledige kennis over de omvang van de winbare voorraden. Een voor deze conceptie karakteristieke visie op de reserves van schaarse metalen is de volgende. Met betrekking tot de schaarse metalen is het de vraag welk gedeelte van de metaalinhoud van de continentale aardkorst in de vorm van ertsen gevonden kan worden en welk gedeelte besloten ligt in substitutiemengkristallen. De winning uit substitutiemengkristallen is immers problematisch. Naar de mening van Skinner¹⁷ is de fractie metalen in ertsvoorkomens redelijkerwijs niet nauwkeuriger dan in een orde van grootte te schatten en ligt deze voor de meeste schaarse metalen tussen de 0,01 procent en 0,1

¹⁶ H.J. Barnett and C. Morse, *Scarcity and growth: The economics of natural resource availability*; Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1963.

¹⁷ B.J. Skinner, "Supplies of geochemically scarce metals"; in: *Resources and world development*; D.J. McLaren and B.J. Skinner (eds.), Chichester, John Wiley & Sons, 1987, pp. 305-325.

procent van de metaalinhoud van de continentale aardkorst. Voor een aantal schaarse metalen zijn de geschatte minerale voorkomens tot op een diepte van 4,6 kilometer (de geschatte maximale diepte waarop mijnbouw haalbaar is) weergegeven. Daarbij is uitgegaan van een fractie van 0,01 procent ertsvoorkomens.

Tabel 3.1 Produktie reserve verhouding volgens Skinner

	minerale reserve [mln ton]	produktie 1984 [mln ton]	ratio [jaren]
koper	9600	8,2	1170
lood	2500	3,4	750
nikkel	11600	0,7	1660
tin	300	0,2	1440
zink	15400	6,4	2430

Bron: B.J. Skinner, op.cit.

De minerale reserve moet in relatie gebracht worden met de jaarlijkse produktie. De ratio van reserve tot jaarlijkse produktie geeft aan hoeveel jaren het duurt voordat de berekende voorraden bij een continuering van het huidige produktieniveau uitgeput zijn. Voor de meest gebruikte schaarse metalen ligt deze uitputtingsratio rond een millennium. Dit cijfer houdt echter geen rekening met de dynamiek van het verbruik. In het referentiescenario wordt de cumulatieve produktie van koper in de komende 100 jaar geschat tussen 1500 mln ton en 5700 mln ton, in beide gevallen minder dan de 9600 mln ton die in tabel 3.1 genoemd wordt. Dat zou betekenen dat er de eerst komende eeuwen nog voldoende koperreserves in de aardkorst zitten.

De dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid wordt gekenmerkt door een vertrouwen in de regulerende werking van de vrije markt¹⁸. In zoverre sluit de conceptie aan bij het gedachtegoed van de neo-klassieken. De neo-klassieke theorie met betrekking tot uitputbare grondstoffen is door Dasgupta en Heal¹⁹ uitgewerkt. Kenmerkend is de nadruk die gelegd wordt op de mate waarin kapitaalgoederen kunnen substitueren voor uitputbare grondstoffen. Zelfs bij afwezigheid van technologische vooruitgang vormt de uitputting van grondstoffen geen fundamenteel probleem als de functie van grondstoffen in het economisch proces maar overgenomen kan worden door de kapitaalgoederenvoorraad uit te bouwen. Verder wordt de rol van de technologische vooruitgang benadrukt. In sommige beschouwingen wordt gewezen op de mogelijke ontwikkeling van 'back-stop' technologieën. Een dergelijke technologie lost de grondstoffenschaarste voorgoed op tegen voor huidige begrippen hoge maar wel constante kosten. Zonne-energie en kernfusie worden soms als 'back-stop'

¹⁸ R.L. Gordon, "Using markets to solve natural resource problems"; in: *Resources and world development*; D.J. McLaren and B.J. Skinner (eds.), Chichester, John Wiley & Sons, 1987, pp. 453-472.

¹⁹ P. Dasgupta and D. Heal, *Economic theory and exhaustible resources*; London, Cambridge University Press, 1979.

technologie genoemd. Gordon, Koopmans, Nordhaus en Skinner²⁰ noemen in een studie naar de uitputting van koper de winning van koper uit graniet als 'back-stop' technologie. In hoofdstuk 2.2 is aangegeven dat, voordat winning uit deze 'back-stop' voorraden mogelijk zou zijn, een oplossing gevonden moet worden voor enorme milieuproblemen. In deze zelfde studie worden ook de mogelijkheden van recycling verkend. Recycling zou onder zekere voorwaarden ook als een 'back-stop' technologie gezien kunnen worden.

In de dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid past meer aandacht voor technologische ontwikkeling dan gerechtvaardigd wordt enkel door de prijsverhoudingen welke resulteren uit de werking van de vrije markt. Victor²¹ wijst in een kritiek op de neoklassieke benadering van de grondstoffschaarste op een contra-intuïtief verband tussen de verwachtingen omtrent technologische vooruitgang en de realisatie daarvan. Als de verwachting bestaat dat een dreigende schaarste bijtijds zal worden voorkomen door technologische oplossingen is er weinig reden om zuinig met een grondstof om te springen. De exploitatie kan daarom zonder beperkingen ter hand worden genomen. Bij een ruime beschikbaarheid van de grondstof past een laag prijsniveau. Dit lage prijsniveau neemt gegeven de onvolledige geïnformeerdeheid van de economische actoren de prikkel weg om de technologie voor de toekomst te ontwikkelen. Vandaar dat gesteld kan worden dat binnen de risico-zoekende conceptie, die nadrukkelijk als duurzaam gepresenteerd is, de technologische ontwikkeling in onvoldoende mate door de markt alleen gegenereerd wordt.

De gevolgen van de technologische ontwikkeling voor het gebruik van grondstoffen komen tot uiting in het verloop van de materiaalintensiteit van de economie. Deze wordt zoals gezegd uitgedrukt als het fysieke verbruik van een grondstof of materiaal in relatie tot het nationaal inkomen. Ross, Larson en Williams²² laten zien dat de materiaalintensiteit van de meestgebruikte materialen in een aantal ontwikkelde economieën na een periode van vaak onstuimige groei een zeker verzadigingspunt heeft bereikt en voor sommige materialen na verloop van tijd zelfs weer is gaan dalen. Zij verklaren dit verschijnsel met het concept van de levenscyclus van een materiaal in de economie.

In het begin van de levenscyclus is het gebruik van het materiaal beperkt. Voortgang in de winnings- en verwerkingstechnologie maken het materiaal goedkoper en het verbruik stijgt. Het tempo van deze stijging ligt meestal hoger dan het tempo van de economische groei. De toegenomen beschikbaarheid van het materiaal genereert nieuwe toepassingsmogelijkheden waardoor het verbruik nog verder toeneemt. In een volgende fase van de cyclus wordt het materiaal toegepast in ingewikkelder produkten met een hogere toegevoegde waarde. Vooruitgang in de produktietechnologie maakt het mogelijk het materiaal efficiënter te gebruiken. De materiaalintensiteit bereikt nu een piek en kan gaan dalen zelfs indien het verbruik per hoofd van het materiaal nog toeneemt. In de laatste fase van de levenscyclus raken de markten voor bulk toepassingen verzadigd en bereikt het verbruik per hoofd een

²⁰ R.B. Gordon, T.C. Koopmans, W.D. Nordhaus and B.J. Skinner, *Toward a new iron age?; Quantitative modelling of resource exhaustion*; Cambridge Mass., Harvard University Press, 1987.

²¹ P.A. Victor, "Indicators of sustainable development: some lessons from capital theory"; *Ecological Economics*, 4 (1991), pp. 191-213.

²² M. Ross, E.D. Larson and R.H. Williams, "Energy demand and materials flows in the economy"; *Energy*, vol 12 (10/11), 1987, pp. 953-967.

plafond of gaat zelfs dalen. Nieuwe markten betreffen met name 'specialties' die weinig effect hebben op het totale materiaalverbruik. In de laatste fase zet de reeds eerder ingezette daling van de materiaalintensiteit uiteraard door.

Het perspectief van een vrijwel wetmatige teruggang in het grondstofverbruik is bepalend voor de toekomstvisie in de dubbel risico-accepterende conceptie. Dit perspectief wordt nog kracht bijgezet door de observatie dat de sectorale opbouw in de ontwikkeling van een economie verschuift van een door de landbouw gedomineerde economie naar een opkomst van de industriële sector en vervolgens naar een dominantie van de dienstensector. Zoals reeds vermeld is ligt het geruststellende van deze observatie er in besloten dat de dienstensector een lagere materiaalintensiteit kent dan de industriële sectoren.

Tot het gedachtengoed van de conceptie behoort ook de visie dat, voorzover als gevolg van groter wordende schaarste de prijsverhoudingen zullen wijzigen, het behoeft patroon van toekomstige generaties zich hiernaar zal voegen. Het geheel van consumentenvoorkeuren is dermate flexibel en biedt zoveel mogelijkheden tot satisfactie dat innovaties op dit terrein de potentie hebben om het welbevinden van toekomstige generaties op een minstens even hoog niveau als het huidige te brengen bij een aanmerkelijk lagere materiële consumptie die bovendien in vergelijking met de huidige stand van de techniek veel functioneler kan zijn. In de dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid past derhalve het beeld dat, als de schaarste van de metalen maar manifest wordt, de koperintensiteit van de economie zich vanzelf in neerwaartse richting aanpast.

In de dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid wordt het belang onderkend van een evenwichtige intergenerationele verdeling van de beschikbare grondstoffenvoorraden. In deze conceptie ontstaan echter geen problemen zolang de werking van de vrije markt maar gegarandeerd is en voldoende aandacht wordt geschonken aan de ontwikkeling van nieuwe technologie. Ook al zullen volgende generaties het moeten doen met geslonken grondstoffenvoorraden, daarmee hoeven zij niet slechter af te zijn gezien de mogelijkheden die er liggen om schaarse grondstoffen te substitueren door andere minder schaarse grondstoffen en door de mogelijkheden die de technologie kan bieden om de schaarste op te heffen. De voorwaarde voor een duurzame ontwikkeling is dat gewerkt wordt aan een kapitaalgoederenvoorraad die het gebruik van schaarse metalen deels overbodig maakt en dat bovendien passende technologieën worden ontwikkeld. Daarnaast kan het consumptiepakket onder invloed van de veranderende prijsverhoudingen zich in een minder materiaalintensieve richting ontwikkelen.

Het is niet uit te sluiten dat op termijn het beslag dat de mijnbouw legt op de beschikbare productiefactoren in de economie per eenheid mijnbouwprodukt zal stijgen. Dat betekent dat in weerwil van de gevolgtrekkingen van Barnett en Morse de lange termijn marginale kosten van de mijnbouw kunnen gaan stijgen. De exploitatie van steeds armere erts en de toevlucht tot steeds grotere diepten kunnen hier toe leiden. Hierdoor kan ook de input van andere natuurlijke hulpbronnen, zoals energie en water, toenemen. Ondanks de toenemende economische schaarste van de schaarse metalen hoeft een duurzame ontwikkeling niet in het gedrang te komen.

De aantastings- en vervuilingaspecten van mijnbouw worden in de dubbel risico-accepterende conceptie onderkend maar er bestaat een vertrouwen in de mogelijkheid van technische oplossingen. Zo kan bijvoorbeeld op de benodigdheid van water voor mijnbouwactiviteiten bespaard worden door het hergebruik te intensiveren. Er wordt onderkend dat de druk die de mijnbouw op het milieu legt gezien moet worden als een inbreuk op een collectief natuurlijk

erfgoed en dat de bescherming hiervan niet aan de krachten van de vrije markt kan worden overgelaten. Aan de andere kant wordt gesteld dat die inbreuk op het natuurlijk erfgoed ook niet overdreven moet worden gezien het geringe landbeslag van de mijnbouw en de betrekkelijkheid van de waarde die aan bepaalde vormen van natuur wordt toegekend. Een veranderde natuurlijke omgeving kan ook waarden representeren. In sommige gevallen moet de inbreuk op het natuurlijk erfgoed ook als gerechtvaardigd beschouwd worden gezien het grote belang van de exploitatie van de minerale rijkdommen van de aarde voor een duurzame economische ontwikkeling.

3.2 De schaarste-risico mijnde en milieu-risico accepterende conceptie van duurzaamheid

De noodzaak van een voortgaande exploratie van grondstoffen voor een duurzame economische ontwikkeling is evident. De conceptie accepteert het milieu-risico in de zin dat het belang van een duurzame economische ontwikkeling prevaleert boven het belang van het onaangestast laten van het natuurlijk erfgoed. De aanslag die de mijnbouw doet op het ecologisch systeem is weliswaar zorgwekkend en moet waar mogelijk gemitigeerd worden, maar tegelijkertijd wordt gewezen op de onvermijdelijkheid van een conflict tussen economische ontwikkeling en de instandhouding van natuurlijke waarden. In dit conflict wordt gekozen ten voordele van de economische ontwikkeling. In zoverre is er een overeenkomst met de dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid.

De conceptie staat echter lijnrecht tegenover de dubbel risico-accepterende conceptie in het vertrouwen in oplossingen voor het probleem van de grondstoffenschaarste.

Men kan het gegeven van Barnett en Morse accepteren dat de arbeidskosten per eenheid geproduceerd mineraal aan een dalende trend onderhevig zijn. Ook kan men de interpretatie accepteren dat mineralen althans in economisch opzicht niet schaarser zijn geworden. Dit hoeft nog niet te betekenen dat deze trend in de toekomst voortgezet zal worden. Er zijn een aantal argumenten aan te voeren die aannemelijk maken dat deze trend in de toekomst niet zal doorzetten. Het merendeel van de reserves van de schaarse metalen is geconcentreerd in een beperkt aantal voorkomens. Deze voorkomens raken langzamerhand uitgeput. Weliswaar kunnen de reserves door nieuwe vondsten nog steeds aangevuld worden, maar er verstrijkt steeds meer tijd tussen de aanvang van de exploratie en de start van de produktie²³. Belangrijke vondsten mogen nog verwacht worden in ontoegankelijke gebieden en op grote dieptes maar daartoe moeten de exploratieinspanningen opgevoerd worden. De gemeten economische schaarste is daarom een vertraagde indicator van de zich feitelijk aandienende schaarste.

Het is niet realistisch om van de technologische vooruitgang op het gebied van grondstoffen-exploratie de oplossing van het schaarsteprobleem te verwachten. De redenatie dat bij een geleidelijk groter wordende schaarste de daaruit voortvloeiende hogere grondstofprijzen wel steeds tot nieuwe vondsten zullen leiden gaat niet op.

Op een gegeven moment zijn de praktisch winbare reserves, ook de moeilijk toegankelijke, geheel uitgeput. De redenties van Brinck en van Lasky zijn op drijfzand gebaseerd. Er is weinig reden om te veronderstellen dat er nog grote onontdekte voorraden van armere ertsen

²³ D.P. Harris, "Mineral exploration and production costs and technologies - Past, present and future"; in: *Resources and world development*; D.J. McLaren and B.J. Skinner (eds.), Chichester, John Wiley & Sons, 1987, pp. 423-442.

in de aardkorst aanwezig zijn. De veronderstelling dat de voorraden van de armere ertsen een veelvoud van de voorraden van de rijkere ertsen zijn is nimmer objectief bevestigd. Door de technologische vooruitgang zijn in het verleden veel obstakels overwonnen, maar bepaalde problemen zijn nu eenmaal onoplosbaar. Als de praktisch winbare voorraden ertsen uitgeput raken, helpt geen technologie om de productie op peil te houden. De problemen die de winning van 'back-stop' voorraden met zich meebrengt kunnen in veel gevallen als onoverkomelijk bestempeld worden.

Het US Bureau of Mines (1987)²⁴ en (1989)²⁵ geven voor een aantal schaarse metalen de reservebasis. Hier worden, zoals gezegd, onder verstaan die voorkomens die aangetoond zijn en die momenteel rendabel, marginaal rendabel of in enkele gevallen subrendabel te exploiteren zijn. Voor koper is de voorraadbasis 570 mln ton, voor nikkel 110 mln ton, voor tin 4,3 mln ton en voor zink 300 mln ton. Deze cijfers liggen beduidend lager dan de in tabel 3.1 berekende cijfers over de minerale reserves.

De reservebasis kalft af door de mijnbouwproductie maar wordt aangevuld door nieuwe vondsten. Door de jaren heen is de ratio van de voorraadbasis tot de productie ruwweg gelijk gebleven. De exploratieactiviteit is in zekere mate op deze ratio afgestemd. Er zijn voorbeelden van een geïntensiveerde exploratie in tijden dat de ontwikkeling van nieuwe reserves achterbleef bij de productie. Het is de vraag of hier in de toekomst geen fricties dreigen met name indien de grondstofschaarste toeneemt of het verbruik een hoge vlucht neemt. Een continuering van de historische vraagontwikkeling zou op termijn grote spanningen met zich mee kunnen brengen²⁶.

Tabel 3.2 Reserve productie ratio

[jaren]	1950	1970	1984
koper	51	50	63
nikkel	224	99	145
tin	38	20	48
zink	29	21	46

Bron: J.E. Tilton and B.J. Skinner, "The meaning of resources", in: *Resources and world development*; D.J. McLaren and B.J. Skinner (eds.), Chichester, John Wiley & Sons, 1987; pp. 13-27.

In deze conceptie van duurzaamheid is het vertrouwen in onbeperkte substitutiemogelijkheden afwezig. Het in stand houden van een voorraad natuurlijk kapitaal is een voorwaarde voor een duurzame economische ontwikkeling. Deze positie wordt onder meer verwoord door Pearce en

²⁴ US Department of the Interior, Bureau of Mines, *Mineral Commodities 1987*; Pittsburgh, 1987.

²⁵ US Department of the Interior, Bureau of Mines, *Minerals Yearbook*, Pittsburgh, 1989.

²⁶ D.H. Meadows, D.L. Meadows and J. Randers, *De grenzen voorbij; Een wereldwijde catastrofe of een duurzame wereld*; Utrecht, Spectrum, 1992.

Turner²⁷. De opbouw van een kapitaalgoederenvoorraad wordt ondersteund door een voorraad natuurlijk kapitaal. Substitutie van natuurlijk kapitaal door de produktieve kapitaalgoederenvoorraad is in veel gevallen onmogelijk.

Voor veel grondstoffen bestaan weliswaar substituten, maar dit zijn vaak evengoed aan schaarste onderhevige grondstoffen en geen substituten in de sfeer van een technologisch verbeterde kapitaalgoederenvoorraad. Van de soms geopperde mogelijkheid om de functies van schaarse grondstoffen te laten overnemen door overvloedig voorkomende grondstoffen moet niet teveel verwacht worden. De meeste schaarse grondstoffen worden juist gebruikt vanwege hun betrekkelijk unieke eigenschappen.

De ontwikkeling van de technologie zal in veel gevallen een efficiënter gebruik van materialen voor bepaalde toepassingen mogelijk maken. Maar door de bank genomen kan niet gezegd worden dat de technologische ontwikkeling gaat in de richting van een geringer gebruik van grondstoffen. Hooguit kan gezegd worden dat door de ontwikkeling van de technologie de verschillende gebruiksmogelijkheden van grondstoffen beter onderkend worden en dat in die zin een zekere optimalisatie van het grondstofgebruik plaatsvindt.

Er bestaan weliswaar mogelijkheden voor substitutie tussen de schaarse metalen onderling, maar voor de schaarse metalen als groep moet rekening gehouden worden met de complementariteit van het natuurlijk kapitaal, dat de voorraden schaarse metalen representeren, met de produktieve kapitaalgoederenvoorraad. Zonder een voorraad schaarse metalen is het aanhouden van de kapitaalgoederenvoorraad niet mogelijk.

Substitutie van de schaarse metalen door de relatief overvloedig voorkomende metalen is slechts voor een beperkt aantal functies, die zij vervullen, mogelijk. Eerder is er sprake van een zekere complementariteit tussen schaarse metalen en bijvoorbeeld ijzer of aluminium - schaarse metalen worden vaak gebruikt in legeringen met ijzer of aluminium. Ook de mate van hergebruik van schaarse metalen blijft vanwege de aard van de toepassingen noodzakelijkerwijs beperkt - het terugwinnen van schaarse metalen uit chemicaliën, waar ze onder andere in toegepast worden, is over het algemeen problematisch.

Het feit dat energie zo een prominente rol speelt bij de produktie van schaarse metalen betekent dat de geschetste schaarsteproblematiek verweven is met die van energie. Dit klemt des te meer omdat lager wordende ertsgehalten een steeds hoger energieverbruik bij bepaalde stadia van de produktie vereisen.

Vroeg of laat zullen als gevolg van grondstoffenschaarste bottle-necks voor de economische ontwikkeling ontstaan. Dit is een probleem van evenwichtige intergenerationele verdeling. Bij een duurzame ontwikkeling vanuit het perspectief van deze conceptie behoort een coördinatie van de intergenerationele grondstofverdeling. Het kan betwijfeld worden of de vrije markt zonder meer de beoogde coördinerende werking heeft.

De welhaast onstuitbare hang naar materiële welvaart schept een probleem. De materiaalintensiteit zal in een zeker stadium van de levenscyclus van een materiaal gaan dalen, maar de empirie leert dat het verbruik per hoofd zich hooguit stabiliseert. Gegeven de onstuitbare

²⁷ D. Pearce and R. Turner, *Economics of natural resources and the environment*, New York, Harvester Wheatsheaf, 1990.

toename van de wereldbevolking zal het verbruik in absolute zin dus alleen maar toenemen. De plooibaarheid van de consumentenvoorkeur is daarom zeer gewenst en kan wellicht een opening bieden naar een oplossing van de schaarste. Een samenleving waarin een conceptie van duurzaamheid heeft postgevat, die het risico van een door grondstoffenschaarste verstoorde economische ontwikkeling wil vermijden, zou ook consequenties aan die opvatting moeten kunnen verbinden.

Terwijl in deze conceptie voor de huidige generatie een ombuiging van het consumptiepatroon in transmateriële zin kan worden voorgestaan, is in de dubbel risico-accepterende conceptie een dergelijke ombuiging van het consumptiepatroon voor toekomstige generaties als uitweg om de welvaart op peil te houden voorgeschoteld.

3.3 De schaarste-risico accepterende milieu-risico mijdende conceptie van duurzaamheid

Deze conceptie sluit voor wat betreft het schaarste-risico aan bij de dubbel risico-accepterende conceptie van duurzaamheid. Duidelijke zorg bestaat er echter over de aantasting van de omgeving. Het besef bestaat dat de mens in een aantal opzichten op zijn natuurlijke omgeving is aangewezen. De winning van grondstoffen kan een bedreiging vormen voor de volksgezondheid, de landbouw en de natuur.

In deze conceptie van duurzaamheid is sprake van een andere opvatting over de relatie mens-milieu dan in de twee voorgaande concepties. Hier staat niet de bruikbaarheid en de exploitatie van de natuurlijke omgeving voorop. Het milieu wordt in al zijn facetten op waarde geschat. De inzet is eerder de bescherming van milieu en natuur.

Zowel de cultureelrijke als de natuurlijke omgeving kunnen door de winning van grondstoffen en de circulatie van materialen worden aangetast. Dit kan niet straffeloos tot in het oneindige voortgezet worden. In een lege wereld is de afwenteling van de economische activiteit op het milieu niet overal zichtbaar. Maar nu de wereld zowel geoordeeld naar de schaal van de economische activiteit als naar de omvang van de bevolking steeds voller wordt gaat het probleem knellen.

Mijnbouw is een bijzonder vervuilende activiteit. Naarmate de ertsgehalten lager worden is er meer grondverplaatsing en wordt de inbreuk op de natuurlijke omgeving alleen maar ernstiger. Het mijnbouwafval dat met de delfstof mee naar boven komt moet ergens gedeponeerd worden. Het bevat milieubelastende stoffen zoals zware metalen. Bij de concentratie van het erts worden grote hoeveelheden water gebruikt. Ook de winning van het primaire metaal is een vervuilende aangelegenheid. Dan kan het metaal zelf nog toxisch zijn in elementaire vorm of in zijn toepassingen. Op allerlei plaatsen in de keten van winning tot productie van het metaal kunnen voor de mens belangrijke milieufuncties aangetast worden.

De noodzaak wordt benadrukt om de waarde en de functies van het menselijk milieu te onderkennen en hier een plaats in het economisch afwegingsproces voor in te ruimen. De kosten van de afwenteling op het milieu moeten zichtbaar worden en een rol spelen in economische beslissingen. De afwentelingskosten zijn gerelateerd aan de functionaliteit van het milieu met betrekking tot het menselijk welzijn. Die functionaliteit wordt in deze conceptie hoog ingeschat.

De conceptie stelt scepsis tegenover de beweringen van mijnbouwdeskundigen dat de milieuproblemen in de mijnbouw beheersbaar zijn geworden²⁸. In vroeger eeuwen was de vervuiling per ton gewonnen metaal weliswaar veel ernstiger dan tegenwoordig, maar in verband met de veel grotere schaal van de produktie is de vervuiling van de tegenwoordige mijnbouw veel ernstiger dan de mijnbouw van vroeger. Een terughoudendheid bij het exploiteren van nieuwe vindplaatsen is de logische consequentie aan deze conceptie.

In deze conceptie van duurzaamheid bestaat een behoorlijk vertrouwen dat, ondanks dat de delfstofwinning aan tal van milieurestricties is onderworpen, in voldoende mate aan de behoeften aan grondstoffen in toekomstige generaties tegemoet gekomen kan worden. Dit impliceert een vertrouwen in de aanpassing van de materiaalintensiteit en een soepele ombuiging van toekomstige consumentenvoorkeuren in de richting van transmateriële consumptiepatronen.

3.4 De dubbel risico-mijdende conceptie van duurzaamheid

In deze conceptie van duurzaamheid komt het conflict tussen delfstofwinning en milieukwaliteit scherp naar voren. Duurzaamheid impliceert het inperken van mijnbouwactiviteit met het oog op de milieukwaliteit. Dat kan bijvoorbeeld inhouden dat ecologisch kwetsbare gebieden zoals Antarctica van mijnbouwactiviteiten verschoond blijven. Verder heeft de winning van mangaanknollen op de oceaانبodem onbekende gevolgen voor het ecologisch systeem en zou daarom achterwege dienen te blijven. Degelijke restricties zetten een rem op de ontwikkeling van de reserves.

Tegelijkertijd bestaat er weinig vertrouwen in de mogelijkheden voor toekomstige generaties om een uitweg te vinden uit de deels zelfverkozen schaarste van grondstoffen. De mogelijkheden voor substitutie en besparing zijn beperkt. De aanwezigheid van natuurlijk kapitaal is een voorwaarde voor de instandhouding van het niveau van materiële welvaart en van de technologische ontwikkeling moeten geen wonderen verwacht worden. Toch zou in deze conceptie van duurzaamheid geen risico genomen moeten worden dat de welvaartsontwikkeling in de toekomst door grondstoffenschaarste geblokkeerd wordt. Een voortzetting van de huidige trends in de materialenconsumptie is om ecologische en om economische redenen niet duurzaam vol te houden. Gezien de mate van milieubesef kan in deze conceptie een draagvlak bestaan voor een matiging van de materiële welvaart.

²⁸ V. Stein, "Terrestrial effects arising from the extraction and processing of solid fuels and non-fuel minerals"; in: *Resources and world development*; D.J. McLaren and B.J. Skinner (eds.), Chichester, John Wiley & Sons, 1987, pp. 399-413.

4. KWANTITATIEVE VERKENNING

4.1 De materiaalintensiteit in het licht van de Noord-Zuid verhouding

Een recente studie van het Centraal Planbureau²⁹ concludeert dat er voor grondstoffen uit niet vernieuwbare bronnen bij een groei van de economie van 4 procent per jaar de eerst komende 30 jaar geen ernstige tekorten te verwachten zijn. De vraag die hier aan de orde gesteld wordt is of er in het licht van de concepties een gelijklopende conclusie getrokken kan worden. Daarbij wordt de horizon verlegd naar 50 jaar en verder. Bovendien wordt onderzocht of de conclusie staande te houden is bij een serieuze convergentie van Noord en Zuid³⁰.

4.1.1 Het belang van de Noord-Zuid dimensie

In de Verklaring van Rio³¹ is vastgelegd dat het recht op ontwikkeling zodanig dient te worden gebruikt dat op evenredige wijze voorzien wordt in de behoeften op het gebied van milieu en ontwikkeling van zowel huidige als toekomstige generaties. Daarmee wordt het concept van duurzame ontwikkeling op de gebruikelijke wijze als een intergenerationeel verdelingsprobleem gepresenteerd. Daarnaast wordt echter ook de scheve mondiale verdeling aan de kaak gesteld. In een adem wordt de noodzaak, met name voor de geïndustrialiseerde landen, om niet-duurzame produktiewijzen en consumptiepatronen terug te brengen en uit te bannen genoemd naast het belang, voor de ontwikkelingslanden, om een passend demografisch beleid te voeren.

Door het vraagstuk van de intergenerationele verdeling te combineren met de mondiale verdeling van de natuurlijke hulpbronnen wordt het begrip duurzame ontwikkeling een kader waarbinnen milieubeleid en ontwikkelingsbeleid geïntegreerd worden.

De combinatie van een mondiaal grondstoffenbeleid met het ontwikkelingsbeleid is niet zonder reden.

Voor het bereiken van een duurzame ontwikkeling, opgevat als een wenselijke intergenerationele verdeling, is de samenwerking van Noord en Zuid noodzakelijk. Gezien de huidige scheve mondiale verdeling van het grondstoffenverbruik is de participatie van Zuid in een dergelijk samenwerkingsverband waarschijnlijker als naast de intergenerationele verdeling ook de mondiale verdeling in discussie is.

De uitputting van grondstoffen heeft een dergelijke vlucht genomen dat in de komende-eeuw, wanneer Zuid door een toename van de welvaart en de bevolking een groter beroep op de wereldgrondstoffenvoorraden zal doen, de mogelijkheid van conflicten om de resterende voorraden niet denkbeeldig is. Het is waarschijnlijk dat Zuid een steeds belangrijker rol op het wereldtoneel zal gaan spelen en dat de positie van Noord daardoor zal verzwakken. Aangezien

²⁹ H.J.B.M. Mannaerts, *Eindige Grondstoffen; Historie en globaal perspectief tot het jaar 2015*; 's-Gravenhage, Onderzoeksmemorandum no. 72, Centraal Planbureau, 1990.

³⁰ Onder Noord wordt verstaan de OECD-lidstaten en de voormalige Europese planeco-nomiën, Zuid omvat de rest van de wereld.

³¹ United Nations Conference on Environment and Development, juni 1992.

nu reeds te voorzien is dat grondstoffen in toenemende mate schaars zullen worden, is het wijs om daar binnen de mogelijkheden op te anticiperen.

De participatie van Zuid in een streven naar duurzame ontwikkeling vereist dus dat de mondiale welvaartsverschillen verminderd worden. Naarmate Zuid een groter beslag legt op de mondiale grondstoffenvoorraden is die participatie ook essentiëler voor het bereiken van een duurzame ontwikkeling.

De convergentie van de welvaart in Noord en Zuid is niet alleen een voorwaarde voor het bereiken van duurzame ontwikkeling, ze vormt ook een wezenlijk element van die duurzame ontwikkeling. Het Brundtlandrapport³² ziet een gelijkere verdeling van de welvaart als een voorwaarde voor een ecologisch duurzame ontwikkeling. In duurzame ontwikkeling ligt, aldus het rapport, besloten dat een nieuwe periode van economische groei noodzakelijk is waarin de ontwikkelingslanden een groot deel van de welvaart toekomt. Daarbij is een voortgaande economische ontwikkeling van Noord bepaald niet uitgesloten.

Het is de vraag in hoeverre het ontwikkelingsbeleid met succes kan bijdragen aan het bewerkstelligen van de economische convergentie tussen Noord en Zuid. De economische ontwikkeling van dergelijke geografische entiteiten kent een grote mate van autonomie. Wel zijn de voorwaarden voor een dergelijke ontwikkeling te beïnvloeden. In dit verband worden vaak het opheffen van handelsbelemmeringen voor de ontwikkelingslanden en de overdracht van technologie genoemd.

Een economische convergentie tussen Noord en Zuid over een langere periode zou een trendbreuk impliceren. Als de convergentie afgemeten wordt aan de ontwikkeling van het inkomen per hoofd, dan moet geconstateerd worden dat er eerder sprake is van divergentie dan van convergentie. Het verschil in per capita inkomen tussen de OECD-landen en ook de voormalige Sovjet Unie aan de ene kant en Latijns Amerika en Azië aan de andere kant is in de loop van deze eeuw alleen maar toegenomen³³. Daar staat tegenover dat de bevolkingsgroei in de OECD-landen bij de bevolkingsgroei in de rest van de wereld achterblijft.

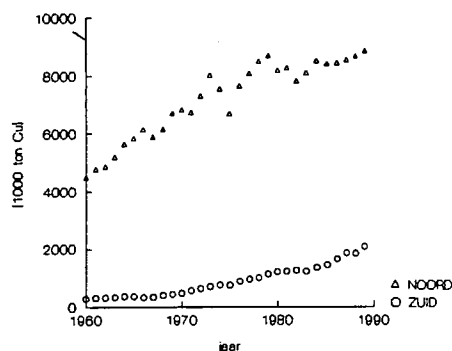
Het uitgangspunt van een niet trendmatige voortzetting van de economische ontwikkeling in Noord en Zuid maakt het noodzakelijk om bij de analyse van de kopervraag de Noord-Zuid tweedeling in de wereldeconomie te hanteren. Een versnelde economische ontwikkeling van Zuid zal niet zonder gevolgen zijn voor de mondiale koperintensiteit.

³² World Commission on Environment and Development, *Our common future*, Oxford, Oxford University Press, 1987.

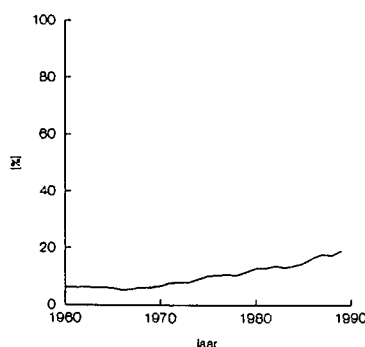
³³ A. Maddison, *The world economy in the 20th century*, Paris, OECD, 1989.

4.1.2 Economisch ontwikkelingsstadium en koperverbruik in Noord en Zuid

Figuur 4.1 Consumptie van geraffineerd koper



Figuur 4.2 Het aandeel van Zuid in de mondiale consumptie van geraffineerd koper



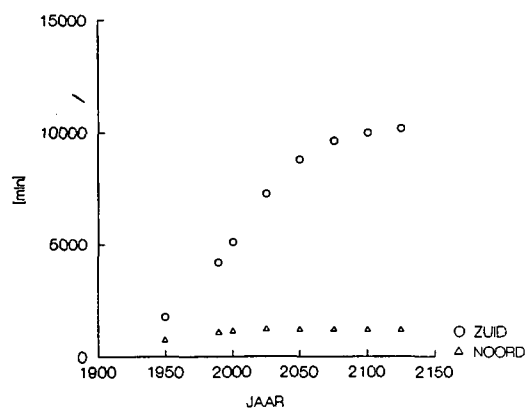
Bron: UNCTAD, Yearbook of international commodity statistics 1984; New York, United Nations, 1984.
UNCTAD, Commodity yearbook 1991; New York, United Nations, 1991.

Uit figuur 4.1 en 4.2 blijkt dat het aandeel van Noord in het wereldkoperverbruik dat van Zuid ruimschoots overtreft. Het is niet ondenkbaar dat in de toekomst deze verhoudingen geheel omgekeerd zullen worden en dat Zuid Noord gaat domineren in het beslag op de wereldgrondstoffenreserves. De oorzaak voor een dergelijke ommekeer van de verhoudingen zou gelegen kunnen zijn in de globale demografische ontwikkelingen en in de ontwikkelingsgang van de economieën in Zuid en Noord.

De omvang van de bevolking in Zuid is een veelvoud van de bevolking in Noord. Het ligt niet in de lijn van de verwachting dat hier in de toekomst verandering in komt. De bevolkingsontwikkeling in Zuid is nog altijd zeer dynamisch. Terwijl Noord de demografische transitie grotendeels achter de rug heeft, neemt in Zuid de afstand tussen de scherp gedaalde sterftecijfers en de geboortecijfers slechts geleidelijk af. De Verenigde Naties³⁴ projecteren in hun middenprojectie een toename van de bevolking in Zuid van 4,2 mrd in 1990 naar 8,8 mrd in 2050. In Noord neemt de bevolking in deze projectie veel minder onstuimig toe van 1,1 mrd in 1990 tot 1,2 mrd in 2050. Zelfs al zou het koperverbruik per hoofd in Zuid niet stijgen, dan nog resulteert bij een dergelijke aanwas van de bevolking een aanzienlijke toename van het koperverbruik.

³⁴ United Nations, *Long-range world population projections; Two centuries of population growth 1950-2150*; United Nations, New York, 1992.

Figuur 4.3 Bevolkingsprojectie *midden* van de Verenigde Naties



Bron: United Nations, op.cit.

Het verbruik van koper per hoofd is niet constant. Figuur 2.8. gaf de indruk dat het koperverbruik per hoofd op wereldschaal naar een stabiel niveau tendeert. Een nauwkeuriger beschouwing van het verbruik per hoofd geeft aanleiding tot bijstelling van dit beeld. In tabel 4.1 is het hoofdelijk verbruik op wereldschaal uitgesplitst naar het hoofdelijk verbruik van Noord en Zuid. Zowel in Noord als Zuid is het verbruik in ontwikkeling. In Noord lijkt zich langzamerhand een stabilisatie van het hoofdelijk verbruik af te tekenen. In Zuid is eerder sprake van een versnelde toename van het hoofdelijk verbruik. Het hoofdelijk verbruik in Noord ligt vele malen hoger dan dat in Zuid. Deze dominantie leidt licht tot de indruk dat ook het hoofdelijk verbruik op wereldschaal stabiliseert.

Een ander gevolg van deze dominantie is dat de mondiale demografische ontwikkeling weliswaar kan leiden tot een aanzienlijke toename van het absolute koperverbruik in Zuid, maar dat het aandeel van Zuid in het mondiale koperverbruik er logischerwijs niet noemenswaardig door hoeft te stijgen. Immers, een geringe toename van de bevolking in Noord gepaard aan een hoog koperverbruik per hoofd leidt tot een vergelijkbare absolute toename van het koperverbruik als een omvangrijke toename van de bevolking in Zuid gepaard aan een laag koperverbruik per hoofd.

Tabel 4.1 Verbruik van geraffineerd koper per hoofd

kg per hoofd	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990
Wereld	1,58	1,86	1,97	1,82	2,12	2,05	2,08
Noord	4,76	5,83	6,49	6,13	7,19	7,21	7,32
Zuid	0,14	0,16	0,18	0,25	0,37	0,40	0,51

Bron: WRR op basis van:
 UN Demographic Yearbook 1990; New York, United Nations, 1992.
 UNCTAD, Yearbook of international commodity statistics 1984; New York, United Nations, 1984.
 UNCTAD, Commodity Yearbook 1991; New York, United Nations, 1991.

In tabel 4.1 is een versnelde groei van het hoofdelijk koperverbruik in Zuid en een stabilisatie van het verbruik per hoofd in Noord waar te nemen. Het is aannemelijk te maken dat de groei van het hoofdelijk verbruik in Zuid zal doorzetten tot uiteindelijk op een niveau vergelijkbaar met dat in Noord een stabilisatie optreedt. Daarbij wordt uitgegaan van een bepaalde economische ontwikkelingsgang.

Als de groei van het hoofdelijk verbruik in Zuid inderdaad doorzet, zal dit niet zonder gevolgen blijven voor het aandeel van Zuid in het mondiale koperverbruik. Niet de mondiale demografische ontwikkeling, maar de toename van de materiële welvaart in Zuid zal er de voornaamste oorzaak van zijn dat in de toekomst niet Noord, maar Zuid de partij is, die het grootste beslag legt op de mondiale grondstoffenvoorraden.

De ontwikkeling van het hoofdelijk koperverbruik is gerelateerd aan de ontwikkeling van de koperintensiteit.

In hoofdstuk 2.4 is duidelijk gemaakt dat de materiaalintensiteit van de mondiale economie aan verandering onderhevig is. De intensiteit van geochemisch schaarse metalen, zoals koper, zink, lood, nikkel en tin is in de vorige eeuw sterk gestegen, terwijl die intensiteit in de loop van deze eeuw weer een daling heeft ingezet. Als oorzaken van deze daling zijn genoemd de technische vooruitgang, die substitutie en een efficiënter gebruik mogelijk heeft gemaakt, en de veranderende structuur van de economie. Het aandeel van de industriële sectoren in de economische productie is mondiaal aan het dalen.

De dominantie van Noord in het wereldkoperverbruik verhult dat in de economieën van Noord en Zuid sprake is van tegengestelde ontwikkelingen in de koperintensiteit. Uit tabel 4.2 blijkt dat in 1960 de koperintensiteit in Zuid nog lager was dan de koperintensiteit in Noord. Anno 1990 is de koperintensiteit in Zuid beduidend hoger dan de koperintensiteit in Noord. In de periode 1960 - 1990 is de koperintensiteit in Noord gedaald en in Zuid gestegen. Omdat Noord de wereldeconomie domineert is per saldo de mondiale koperintensiteit gedaald.

Tabel 4.2. Ontwikkeling van de koperintensiteit in Noord en Zuid
[gram per USD90]

	1960	1970	1980	1990
Wereld	0,63	0,59	0,55	0,49
Noord	0,64	0,61	0,54	0,46
Zuid	0,48	0,42	0,59	0,66

Bron: WRR op basis van:
The World Bank, World development report 1992, Development and the environment; Oxford, Oxford University Press, 1992.
UNCTAD, Yearbook of international commodity statistics 1984; New York, United Nations, 1984.
UNCTAD, Commodity yearbook 1991; New York, United Nations, 1991.

De koperintensiteiten in tabel 4.2 hebben betrekking op de consumptie van geraffineerd koper. Import en export van in produkten verwerkt koper komt niet in de consumptiecijfers tot uitdrukking. Voor zover Noord een positief exportsaldo van verwerkt koper naar Zuid heeft zijn de verschillen in de koperintensiteit tussen Noord en Zuid scherper dan in de tabel naar voren komt.

De hiervoor aangehaalde verklaring van de dalende materiaalintensiteit is van toepassing op de materiaalintensiteit in Noord. In Zuid ligt de situatie volstrekt anders. In hoofdstuk 2.4 is opgemerkt dat ontwikkelingslanden als China en India een economische structuur hebben die vergelijkbaar is met de economische structuur van het Verenigd Koninkrijk in de achttiende eeuw. De overgang van een agrarische naar een industriële samenleving is in Zuid nog verre van voltooid. De stijging van de materiaalintensiteit in Zuid is een gevolg van het feit dat het materiaalverbruik in de industriële sectoren intensiever is dan in andere sectoren en van het feit dat de industriële sectoren aan gewicht toenemen. Totdat de industriële sectoren hun maximale gewicht in de economie hebben bereikt, mag verwacht worden dat de stijging van de materiaalintensiteit in Zuid zal doorzetten.

Het is aannemelijk dat de relatieve omvang van de industriële sectoren in Zuid nog verder zal toenemen.

Maddison³⁵ laat zien dat het werkgelegenheidsaandeel van de industrie in een selectie van vijftien Aziatische en Latijns-Amerikaanse economieën tussen 1950 en 1980 steeg van 14 procent naar 21 procent. In dezelfde periode daalde het aandeel van de landbouw van 63 procent naar 45 procent en steeg het aandeel van de dienstensector van 23 procent naar 34 procent. Het aandeel van de industrie in het BNP in Zuid is in de periode 1960 - 1990 gestegen van 26 procent naar 36 procent, terwijl het aandeel van de landbouw daalde van 32 procent naar 18 procent. Het aandeel van de dienstensector steeg in deze periode van 42 procent naar 46 procent.

In de OECD-lidstaten is het aandeel van de industrie in het BNP gemiddeld niet verder gestegen dan 45 procent. Gedurende de jaren zestig was het aandeel van de industrie in het BNP groter dan 40 procent. Nadien is dit aandeel afgenomen tot circa 35 procent in 1990. Het aandeel van de landbouwsector daalde van 6,5 procent in 1960 tot 2,5 procent in 1990. Het aandeel van de dienstensector steeg van 52,5 procent in 1960 tot 62,5 procent in 1990.

Zolang het gewicht van de industriële sectoren in Zuid blijft stijgen, kan de koperintensiteit blijven toenemen. Overigens is het geen wetmatigheid dat dit gewicht eenzelfde hoogtepunt als in Noord bereikt. Als het inkomen per hoofd in Zuid toeneemt of althans niet sneller daalt dan de koperintensiteit stijgt, dan moet logischerwijs ook het hoofdelijk verbruik van koper toenemen. Dit is de situatie in Zuid. Zowel het gewicht van de relatief materiaalintensieve industriële sectoren als het inkomen per hoofd stijgen er. Zolang de economie van Zuid zich in deze ontwikkelingsfase bevindt, zal het hoofdelijk verbruik van koper er stijgen. Het hoofdelijk verbruik in Zuid vertoont over de periode 1960-1990 een jaarlijkse toename met 4,4 procent. De toename is de resultante van een groei in het inkomen per hoofd van circa 2,5 procent en de geconstateerde toename van de koperintensiteit.

In aanvulling op het bovenstaande is de voortgezette groei van het hoofdelijk koperverbruik in Zuid ook met het volgende argument aannemelijk te maken.

De wet van Engel stelt dat naarmate het inkomen stijgt een geringer gedeelte van het inkomen voor voedsel bestemd wordt. Voedsel behoort tot de elementaire behoeften van de mens. De wet van Engel kan dus zo geïnterpreteerd worden dat naarmate in de meer elementaire behoeften voorzien is een groter gedeelte van het inkomen besteed wordt aan zaken die voor het blote bestaan van de mens niet essentieel zijn. Bij een hoger inkomen ontstaat bestedingsruimte waarover een grotere mate van keuzevrijheid bestaat. Een gedeelte van die vrijere bestedingsruimte wordt gestoken in materiële consumptie. De opkomst van de massaconsump-

³⁵ A. Maddison, op.cit.

tie is ook in Zuid waar te nemen en zal het materiaalverbruik, inclusief dat van koper, aanzienlijk doen toenemen.

Evenals in Noord zal in Zuid op een gegeven moment de groei in het materiaalverbruik afvlakken. Het inkomen, dat na de uitgaven voor elementaire behoeften overblijft, wordt niet alleen aan materiële zaken besteed, maar ook aan andere, meer immateriële, consumptieve behoeften. Naarmate de materiële consumptie uitgebreider is, wordt meer inkomen besteed aan die immateriële consumptie, die een directe aanvulling op de materiële consumptie vormt. De bestedingen verleggen zich van materie naar kwaliteit plus materie.

In zoverre is er sprake van een analoog van de wet van Engel, dat van toepassing is op de uitgaven aan materie. Bij stijging van het inkomen wordt van het inkomen dat niet aan elementaire behoeften besteed wordt een afnemend aandeel aan materie besteed. Voor zowel Noord als Zuid zou dit impliceren dat bij stijgend inkomen per hoofd een verzadiging optreedt in de materiële consumptie.

De ontwikkeling van het hoofdelijk koperverbruik verloopt in fasen. Het is aannemelijk gemaakt dat in Noord het verbruik zich nu na een lange periode van groei in een verzadigingsfase bevindt. In Zuid is de periode van groei ingetreden en zal er geruime tijd overheen gaan voordat de verzadigingsfase bereikt wordt.

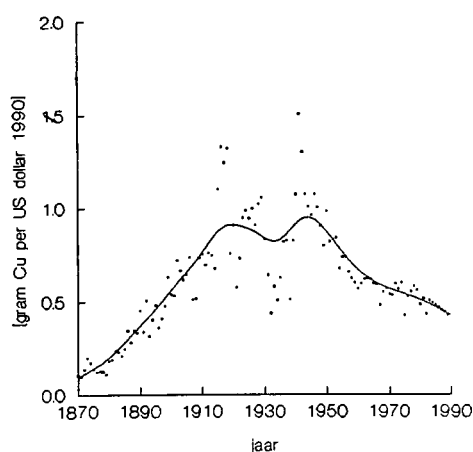
Deze ontwikkeling in het hoofdelijk koperverbruik is het gevolg van met elkaar samenhangende ontwikkelingen in de produktie- en consumptiestructuur. De industrialisatie vergt een opbouw van een infrastructuur en een produktieapparaat. Hierin worden grote hoeveelheden koper verwerkt. Ook de industriële output bevat koper. Met het stijgen van het inkomen ontstaat ruimte om deze output af te zetten. Naarmate het inkomen verder stijgt, verzadigt het hoofdelijk koperverbruik en past de economische structuur zich aan. Het gewicht van de industrie in de economie neemt af.

Het beslag van Zuid op de mondiale grondstoffenvoorraden hoeft naar de intensiteit van het verbruik gemeten niet de proporties aan te nemen die in het verleden in Noord waren waar te nemen. Door de technologische vooruitgang is de efficiëntie van het verbruik van schaarse grondstoffen aanmerkelijk gestegen. In principe zou Zuid deze technologie kunnen benutten. Door de ontwikkelingsachterstand wordt in Zuid echter lang niet altijd de meest geavanceerde technologie toegepast.

Het is de vraag op welk niveau de koperintensiteit in Zuid zijn hoogtepunt zal bereiken. Indicaties over een bovengrens kunnen worden verkregen uit de historische ontwikkeling van de materiaalintensiteit van de economieën in Noord. In figuur 4.3 is aangegeven hoe de koperintensiteit in de Verenigde Staten sinds 1870 is ontwikkeld. Na de crisis van de dertiger jaren bereikte de koperintensiteit een maximum van rond 1,0 gram Cu per US dollar van 1990. De industriële werkgelegenheid bedroeg in die periode een derde van de totale werkgelegenheid en het aandeel van de agrarische werkgelegenheid bedroeg circa 15 procent. Het aandeel van de industrie in het BNP was ruim 40 procent.

Ter vergelijking: De koperintensiteit in het Europa van de twaalf was in 1960 0,89 gram Cu per US dollar van 1990. De trend van de koperintensiteit in het Europa van de twaalf was in 1960 al in neerwaartse richting.

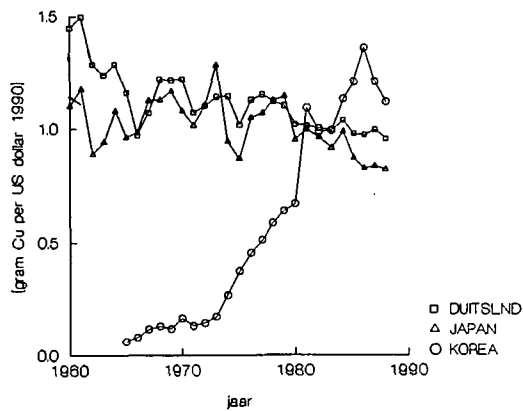
Figuur 4.4 Koperintensiteit in de Verenigde Staten



Bron: WRR op basis van:
 R.S. Manthy, Natural resource commodities - A century of statistics; Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1978.
 UNCTAD, Commodity yearbook 1991; New York, United Nations, 1991.

Een meer recente indicatie tot welk niveau de koperintensiteit kan oplopen geven de dynamische Aziatische economieën. Als illustratie wordt hier getoond hoe de koperintensiteit in Zuid Korea aantrok tot het niveau van de Bondsrepubliek en Japan. In beide laatste landen is de daling van de koperintensiteit aan het begin van de jaren zestig waarneembaar. In het geval van de Bondsrepubliek lag het niveau van de koperintensiteit aan het begin van de jaren zestig rond 1,5 gram koper per US dollar van 1990. Een dergelijke niveau van de koperintensiteit is kenmerkend voor een sterk geïndustrialiseerde economie. De industriële sector in de Bondsrepubliek droeg aan het begin van de zestiger jaren voor meer dan 50 procent bij aan het BNP. Zuid Korea ontwikkelde zich in vrij korte tijd van een door de landbouw gedomineerde economie - in 1950 was 73 procent van de bevolking werkzaam in de landbouw - tot een industriestaat van formaat. Van 1965 tot 1990 nam het aandeel van de industrie in het BNP toe van 25 procent tot 45 procent.

Figuur 4.5 De ontwikkeling van de koperintensiteit in enkele industriestaten



Bron: WRR op basis van:
 "The Penn World Table: An Expanded Set of International Comparisons, 1950-1988"; The Quarterly Journal of Economics, May 1991.
 UNCTAD, Yearbook of international commodity statistics 1984; New York, United Nations, 1984.
 UNCTAD, Commodity yearbook 1991; New York, United Nations, 1991.

4.2 Scenario's van duurzaam kopergebruik

Aansluitend bij de vier gepresenteerde concepties van duurzaamheid zijn scenario's geconstrueerd, die vanuit de conceptie geredeneerd weergeven wat onder een duurzaam koperverbruik verstaan kan worden. De opbouw van de scenario's vindt stapsgewijs plaats. In eerste instantie wordt de vraag gesteld of een duurzaam verbruik van koper te realiseren is door enkel het hergebruik van koper te stimuleren. In tweede instantie wordt bekeken of een wijziging in het koperverbruik per hoofd noodzakelijk is om een duurzame ontwikkeling te bereiken.

De scenario's geven handelingsperspectieven aan in een constellatie van onzekere ontwikkelingen. Onzekerheid bestaat ondermeer over de bevolkingsontwikkeling en de welvaartsontwikkeling in verschillende delen van de wereld. Dergelijke omgevingsfactoren zijn van groot belang voor de ontwikkeling van het wereldkoperverbruik. Meer specifiek bestaat ook onzekerheid over de bruikbare kopervoorraden en over het verzadigingsniveau van het koperverbruik per hoofd.

4.2.1 Uitgangspunten voor de scenario's

In de scenario's worden verbruiksentwickelingen tot ver in de volgende eeuw geconfronteerd met verschillende opvattingen over de wereldkopenvoorraad. De instrumentele variabelen in de scenario's zijn het hergebruik en de wijziging van het consumptiepatroon of de verbetering van de verbruiksefficiëntie met als oogmerk de koperintensiteit van de consumptie te verminderen. Er wordt nu achtereenvolgens ingegaan op ontwikkelingen van het koperverbruik en op verschillende benaderingen van de wereldkopenvoorraad.

4.2.1.1 De ontwikkeling van de kopervraag

In het voorgaande is opgemerkt dat het koperverbruik per hoofd in Zuid in opgaande lijn is en dat het koperverbruik per hoofd in Noord een verzadigingspunt lijkt te bereiken. Dit gegeven wordt als startpunt genomen voor de ontwikkeling van de kopervraagprojecties in de scenario's.

Op de plausibiliteit van een verzadigingsniveau aan het koperverbruik per hoofd is reeds eerder ingegaan. Er is nu eenmaal een limiet aan het aantal auto's, wasmachines, televisieapparaten en overige apparatuur, bestemd om het leven te veraangemen, dat een mens in gebruik kan hebben.

De groei van het koperverbruik per hoofd in Zuid over de periode van 1960 tot 1990 bedraagt 4,4 procent. In Noord ligt de groei van het hoofdelijk koperverbruik over deze periode lager, namelijk op 1,4 procent. In vroeger perioden, toen de wijde toepassing van koper nog in ontwikkeling was, werd het koperverbruik in Noord echter gekenmerkt door vergelijkbare groeipercentages. Zo bedroeg de groei van het koperverbruik per hoofd in Noord in de periode van 1875 tot 1925 4,1 procent. De eerste fase van de penetratie van koper kan gekenschetst worden als een fase van evenredige groei. De toename van het gebruik per jaar is bij benadering evenredig met het verbruik. Mathematisch laat een dergelijke groei zich als volgt uitdrukken:

$$\dot{\sigma} = a \sigma$$

De waarde van het groeipercentage a ligt in het geval van koper op ruim vier procent.

De fase van evenredige groei is in Noord tot een einde gekomen, naarmate het koperverbruik per hoofd toenam. De ontwikkeling van een grootheid, zoals het hoofdelijk koperverbruik, waarbij in eerste instantie sprake is van evenredige groei, maar waarbij de groei gedempt wordt naarmate een grootste waarde of een verzadigingsniveau bereikt wordt, laat zich mathematisch als volgt beschrijven:

$$\dot{\sigma} = \sigma (a - b \sigma)$$

-Naarmate σ de waarde a/b dichter benadert, neemt de groei van σ (aan de linker kant van het gelijkteken) af tot nul. De waarde a/b is daarom het verzadigingsniveau van σ . Het symbool a representeert ook hier weer het percentage van evenredige groei in de aanvangsfase. Het groeipad dat voldoet aan de bovenstaande groei formulering is de zogenaamde logistische curve of S-kromme.

Er van uitgaand dat de bovenstaande formalisering een redelijke beschrijving geeft van de ontwikkeling van het koperverbruik per hoofd in Noord vragen we ons af wat het verzadigingsniveau van dit koperverbruik is. Dit verzadigingsniveau is conditioneel op het percentage van evenredige groei a geschat op basis van cijfers over de periode van 1960 tot 1990. Kleinste kwadraten schattingen welke corresponderen met groeipercentages van 4,0 procent en 5,0 procent ontlopen elkaar niet veel en komen uit op respectievelijk 9,4 en 8,6 kg koper per hoofd.

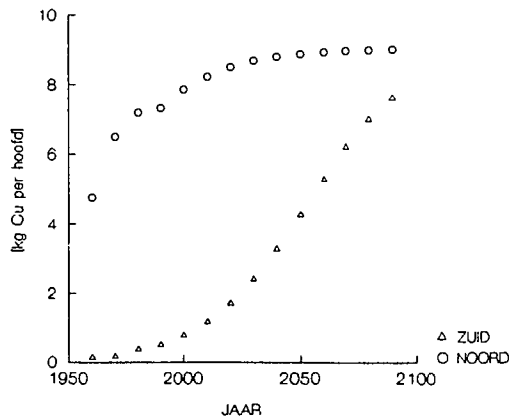
Het is aannemelijk dat ook de ontwikkeling van het koperverbruik per hoofd in Zuid zich volgens een dergelijk patroon zal voltrekken. De periode van evenredige groei kan zich niet

onbeperkt voortzetten en het verbruik per hoofd zal geleidelijk afvlakken naar een verzadigingsniveau. Hoe hoog dit verzadigingsniveau zal liggen is volstrekt ongewis.

Op dit punt van het betoog is het zinvol te bedenken dat het doel van de exercitie niet ligt in het voorspellen van ontwikkelingen, maar in het verkennen van de consequenties van een wenselijke, namelijk een duurzame, ontwikkeling. In het voorgaande is het belang van een convergentie tussen Noord en Zuid aan de orde geweest. In termen van koperverbruik kan convergentie inhouden dat het verzadigingsniveau in Zuid op hetzelfde niveau ligt als het geschatte verzadigingsniveau in Noord. Dit is een arbitraire invulling van convergentie. Convergentie zou evengoed kunnen betekenen dat het verbruik per hoofd in Noord als gevolg van wijzigingen in het consumptiepatroon tot een bepaald niveau daalt en dat dit niveau het verzadigingsniveau van het koperverbruik per hoofd in Zuid wordt.

Het tempo van de convergentie wordt in deze gedachtengang bepaald door het percentage van evenredige groei a en de hoogte van het verzadigingsniveau a/b . Bij een verzadigingsniveau van 9,0 kg koper per hoofd en een evenredig groeipercentage van 4 à 5 procent kan het verbruik per hoofd in Zuid na het midden van de volgende eeuw op 4,0 kg per hoofd liggen, hetgeen vergeleken moet worden met een verbruik van 0,5 kg per hoofd thans.

Figuur 4.6 Referentiepaden van koperverbruik per hoofd in Noord en Zuid; $a=4,5\%$, $a/b=9,0$ kg per hoofd



Bron: WRR

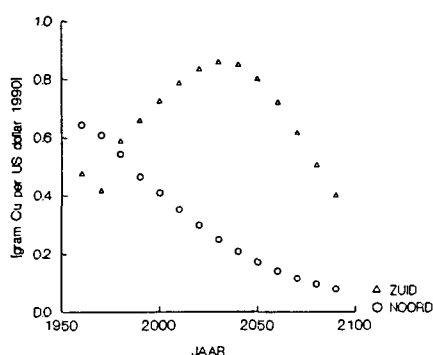
In het voorgaande is gesproken over de stijgende koperintensiteit in Zuid. Sinds de jaren '80 is de koperintensiteit in Zuid op een hoger niveau dan de koperintensiteit in de ontwikkelde economieën beland. Hier is de koperintensiteit al sinds de jaren '60 in neergaande lijn. De vraag is gesteld welk maximum de koperintensiteit zal bereiken alvorens een dalende trend in te zetten. Het is bovendien de vraag hoeveel tijd er over heen zal gaan voordat de huidige stijgende trend in een dalende trend wordt omgezet.

De koperintensiteit is de resultante van het verbruik van koper per hoofd en het inkomen per hoofd. Geredeneerd vanuit een zeker verzadigingsniveau bereikt de koperintensiteit eerder een maximum en bovendien een lager maximum naarmate de groei van verbruik per hoofd, bepaald door het percentage van evenredige groei a , lager is en de groei van het inkomen per hoofd hoger. Het ligt overigens voor de hand dat het groeitempo van het hoofdelijk koperver-

bruik en de groei van het inkomen per hoofd verband met elkaar houden. Dit beperkt de mogelijke variatie in de hoogte van het maximum en het moment waarop dit maximum bereikt wordt.

Bij een evenredig groeipercentage a van het koperverbruik per hoofd van 4,0 procent tot 5,0 procent en een groei van het inkomen per hoofd van 3,0 procent tot 3,5 procent kan de koperintensiteit in Zuid over 30 tot 40 jaar een maximum bereiken dat weinig lager ligt dan het maximum dat de koperintensiteit in de jaren '50 in Noord bereikte.

Figuur 4.7 Referentiepaden van de koperintensiteit in Noord en Zuid; $a=4,5\%$, $a/b=9,0$ kg per hoofd, groei van het inkomen per hoofd in Noord 2,0% en in Zuid 3,25%



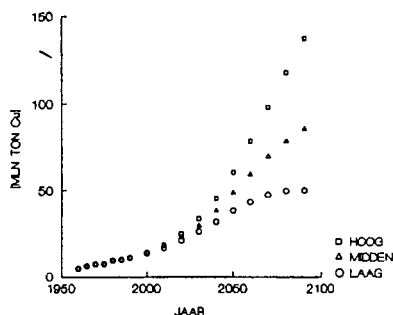
Bron: WRR

De projecties van de wereldvraag naar koper worden ten behoeve van de scenario's afgeleid van projecties van het verbruik van koper per hoofd zoals hiervoor beschreven en de bevolkingsprojecties van de Verenigde Naties³⁶. De variatie in de projecties van de wereldkopersvraag, die veroorzaakt wordt door de grote verschillen in de bevolkingstoename met name in Zuid tussen de projecties laag, midden en hoog, geeft wellicht een wat overtrokken beeld, omdat een snellere toename van de bevolking waarschijnlijk gepaard gaat met een geringere toename van het koperverbruik per hoofd.

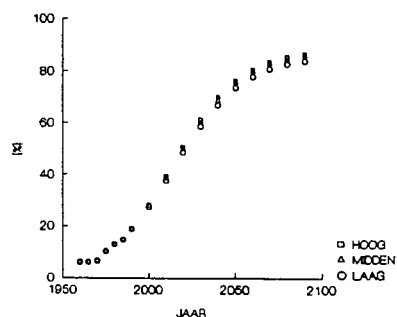
Zeker als het verzadigingsniveau van het koperverbruik per hoofd in Zuid op hetzelfde niveau zou liggen als in Noord is het duidelijk dat in de komende eeuw met een forse toename van het wereldkoperverbruik gerekend moet worden. De kopersvraag kan in 50 jaar tijds toenemen tot het drie- of viervoudige van de huidige kopersvraag. Tegen het einde van de volgende eeuw moet met een verachtvoudiging rekening gehouden worden. Het is goed mogelijk dat Zuid al over dertig jaar de helft van het wereldkoperverbruik voor zijn rekening neemt.

³⁶ United Nations, op.cit.

Figuur 4.8 Referentiescenario's van wereldkoperverbruik volgens verschillende bevolkingsprojecties van de Verenigde Naties



Figuur 4.9 Aandeel van Zuid in het wereldkoperverbruik bij verschillende bevolkingsprojecties van de Verenigde Naties



Bron: WRR

Naarmate de termijn waarover gekeken wordt langer is, neemt de variatie in het wereldkoperverbruik tussen de verschillende projecties toe. De oorzaak hiervan ligt in de onzekerheid over de bevolkingsontwikkeling in Zuid en het verzadigingsniveau van het koperverbruik per hoofd in Zuid.

4.2.1.2 De wereldkoper voorraad

In het voorgaande is duidelijk gemaakt dat er aanzienlijke onzekerheid bestaat over de omvang van het reservepotentieel, dat is de omvang van de in technisch en economisch opzicht uiteindelijk winbare voorraden. Onder andere is de wet van Lasky ten tonele gevoerd, welke stelt dat elke 0,1 procent reductie in het mijnbare ertsgehalte de ertsvoorraden met 18 procent doet toenemen.

Bij de inschatting van het reservepotentieel kunnen twee uiterste posities worden onderscheiden. De ene positie houdt in dat het reservepotentieel in dezelfde orde van grootte ligt als de in de loop van de komende eeuw te realiseren cumulatieve koper vraag. De andere positie houdt in dat het reservepotentieel enkele orden van groottes boven de cumulatieve koper vraag ligt.

In de eerste positie is de opvatting dat er een situatie van absolute ofwel fysieke schaarste dreigt. In dit geval is informatie over de omvang van het reservepotentieel van groot belang om een intergenerationale verdeling, die in de zin van Brundtland als duurzaam betiteld kan worden, te bevorderen.

In de tweede positie is de opvatting dat er slechts sprake is van relatieve of economische schaarste. Niet de informatie over de omvang van het reservepotentieel is dan van belang om zinvol beleid te kunnen voeren, maar veeleer de informatie over de ontwikkeling van de winningskosten, dat wil zeggen informatie over een marginale kostencurve. Duurzame ontwikkeling in de zin van Brundtland betekent in dit geval dat toekomstige generaties niet als gevolg van huidige extractiepraktijken met winningskosten worden opgezadeld, die de bevrediging van hun behoeften in de weg staat.

Het is onzeker welke van beide posities voor het huidige beleid relevant is. Een conceptie van duurzame ontwikkeling, die het risico van grondstoffenschaarste mijdt, handelt eerder vanuit

de eerste positie, een conceptie die het schaarste-risico accepteert sluit eerder aan bij de tweede positie.

In tabel 2.4. is aangegeven dat de reservebasis van koper momenteel op 576 mln. ton wordt geschat. Het is in het licht van de geconstateerde toename van de reserves bij dalende ertsgehalten aannemelijk dat het reservepotentieel beduidend groter is dan de reservebasis. In herinnering wordt ook gebracht dat in het voorgaande aan de orde is gekomen dat informatie over subeconomische voorkomens waarschijnlijk afgeknot is.

Uitgaande van een absolute schaarste van koper is het verhelderend om de analogie te leggen tussen de uitputting van koper en de uitputting van aardolie. Het is niet onmogelijk dat de uitputting van koper zich thans in een zelfde stadium bevindt als de uitputting van aardolie in de jaren vijftig. Veertig jaar na dato zijn de olievoorraden nog toereikend voor een voortgezette consumptie tot zeker halverwege de volgende eeuw. Zoals uit tabel 2.2. blijkt worden de technisch winbare voorraden van koper nu reeds op ruim 2000 mln ton geschat. Het lijkt daarom niet onrealistisch om uit te gaan van een minimale omvang van het reservepotentieel van 1500 tot 3000 mln ton koper.

Een reservepotentieel van deze omvang kan vergeleken worden met het cumulatief verbruik volgens het referentiescenario. Bij het bevolkingsscenario midden van de Verenigde Naties is het cumulatief verbruik in 2040 reeds 1330 mln ton en in 2090 4750 mln ton koper. Een gedeelte van dit cumulatief verbruik kan door hergebruik van koper gedekt worden. Toch is duidelijk dat het referentiescenario uitgaande van een absolute schaarste van koper in de tweede helft van de volgende eeuw onhoudbaar is.

Als slechts rekening gehouden wordt met een relatieve schaarste van koper is het verloop van de winningskosten van belang. Die kosten worden in grote lijn bepaald door het ertsgehalte, de schaal van het voorkomen en de bereikbaarheid van het voorkomen. Om het verband tussen de marginale winningskosten en de cumulatieve winning te kunnen bepalen, dient er een relatie bekend te zijn tussen het ertsgehalte en de schaal van het voorkomen. Deze relatie wordt gelegd door Brinck's logbinomiaal Crustal Abundance Geostatistical (CAG) model. Op basis van deze relatie kunnen marginale winningskosten worden afgeleid conditioneel op een aantal parameters, die de uitdrukking vormen van de kostenafhankelijkheid van gehalte, schaal en bereikbaarheid. Over de waarde die deze parameters, buiten het domein waarbinnen de huidige mijnbouw plaatsvindt, aannemen kan slechts gespeculeerd worden. De afleiding van de marginale winningskosten vindt plaats in de appendix bij dit hoofdstuk.

Is de relatieve schaarste van koper het uitgangspunt dan is de onhoudbaarheid van het referentiescenario niet zonder meer duidelijk. Daarvoor is een beoordeling van het beslag dat de gestegen winningskosten op de economische middelen leggen noodzakelijk.

4.2.2 Het schaarste-risico vanuit een milieu-risico accepterend perspectief

In eerste instantie worden nu twee milieu-risico accepterende scenario's gepresenteerd. De koperschaarste wordt vanuit twee verschillende invalshoeken belicht zonder dat daarbij milieuoverwegingen voortvloeiend uit de winningsactiviteiten aan de orde komen.

De ontwikkeling van de kopervraag in de scenario's is de resultante van de ontwikkeling in het koperverbruik per hoofd en de bevolkingsontwikkeling. Voor de ontwikkeling in de omvang van de wereldbevolking is zoals gezegd aangesloten bij de bevolkingsprognoses van

de Verenigde Naties. Daarvan zijn het lage, het midden en het hoge scenario overgenomen. Waar niet vermeld is welke van deze prognoses is gehanteerd, moet van het midden scenario uitgegaan worden.

4.2.2.1 Een schaarste-risico mijndend scenario; sparen

Een duurzame ontwikkeling, die het risico van koperschaarste mijdt, houdt rekening met een absolute schaarste, dat wil zeggen dat de omvang van het reservepotentieel weliswaar onzeker maar beperkt is. Voor dit scenario zijn twee varianten doorgerekend, een waarbij het reservepotentieel 1500 mln ton bedraagt en een andere waarbij het reservepotentieel 3000 mln ton bedraagt.

Een mogelijke invulling van duurzame ontwikkeling voor het geval van een absolute schaarste is dat de ratio van voorraad en onttrekking boven een bepaalde kritische grens blijft. Deze ratio is equivalent aan het aantal jaren dat de voorraad bij het (vaste) onttrekkingsniveau strekt. Duurzame ontwikkeling houdt dan dus in dat de uitputtingstermijn nooit beneden een op subjectieve gronden vast te stellen termijn komt. Voor dit scenario wordt de termijn van 50 jaar als kritische grens gehanteerd. Het feit dat de ratio tussen de economische reserve en de onttrekking voor veel schaarse metalen in de orde van 50 jaar ligt, kan overigens niet als reden voor deze keuze worden opgevoerd.

Om de onttrekking tot in de lengte van dagen te kunnen voortzetten is het noodzakelijk dat het niveau van de onttrekking continu daalt, althans vanaf het moment dat de onttrekking op het niveau is gekomen, waarbij de kritische ondergrens voor de uitputtingstermijn is bereikt. Die noodzakelijkheid volgt uit het feit dat met elke onttrekking de reserves verder dalen. Om in een dergelijke situatie toch een bepaald verbruiksniveau te kunnen volhouden is het noodzakelijk dat het hergebruik wordt geïntensiveerd.

Mathematisch wordt de duurzaamheidseis als volgt uitgedrukt:

$$\frac{V_t}{\Delta V_{t+1}} \geq \tau$$

Als de ratio van de voorraad V met de onttrekking ΔV gelijk is aan de ondergrens voor de uitputtingstermijn τ geldt voor een duurzame onttrekking van koper:

$$\Delta V_{t+1} = \Delta V_t - \frac{1}{\tau} \Delta V_t$$

Als de uitputtingstermijn zich op het duurzame minimum bevindt, neemt de onttrekking in elke opvolgende periode af.

Het verbruik van koper G wordt gedekt uit de onttrekkingen ΔV en het hergebruik R .

$$G_t = \Delta V_t + R_t$$

Het hergebruik is een fractie η van het verbruik in een voorgaande periode. De gemiddelde verblijfstijd van koper in diverse toepassingen is in de scenario's op 20 jaar gesteld. Na deze periode komt het koper vrij voor hergebruik. De fractie die wordt hergebruikt ligt momenteel op wereldschaal op 18 procent. Het hergebruik kan aanzienlijk worden opgevoerd, maar er

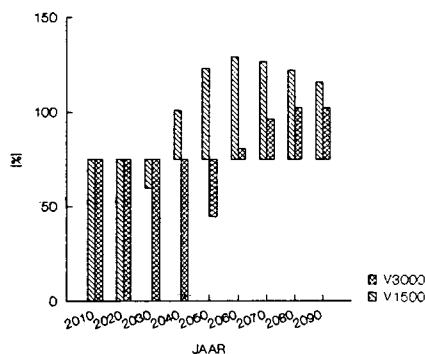
zijn grenzen aan de mogelijkheden van recycling. Er moet gerekend worden met beperkingen aan de mogelijkheden van inzameling en met verliezen bij de verwerking van oud schroot. In de scenario's is als maximale waarde van de hergebruiksfractie η van 75 procent aangehouden.

$$R_t = \eta_t G_{t-1}$$

De vraag is nu aan de orde of de mogelijkheden van hergebruik voldoende zijn om een duurzame ontwikkeling te garanderen of dat verdergaande maatregelen noodzakelijk zijn.

Het blijkt dat de mogelijkheden van hergebruik om in een ongestoorde vraagontwikkeling te voorzien onder de gemaakte veronderstellingen in vrijwel alle varianten te kort schieten. Enkel bij de lage bevolkingsvariant van de Verenigde Naties en een aanvankelijk reservepotentieel van 3000 mln ton bestaan mogelijkheden om in de komende eeuw de voorziening van koper ongestoord te laten verlopen. Er blijkt dat bij de bevolkingsvariant *midden* en een aanvankelijk reservepotentieel van 1500 mln ton vanaf 2040 een hergebruik van meer dan 75 procent noodzakelijk is. Hetzelfde blijkt vanaf 2060 het geval te zijn voor de bevolkingsvariant *midden* en een aanvankelijk reservepotentieel van 3000 mln ton. Een duurzame ontwikkeling van de kopervraag vereist daarom dat het niveau van de vraag per hoofd in de loop der tijd afneemt.

Figuur 4.10 Uit duurzaamheidsoverwegingen minimaal her te gebruiken; percentage in afwijking van het maximaal haalbare hergebruik; \square middenprojectie Verenigde Naties, $V=1500$ en $V=3000$

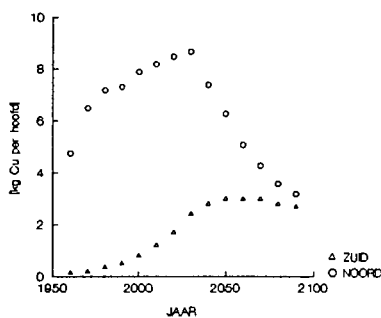


Bron: WRR

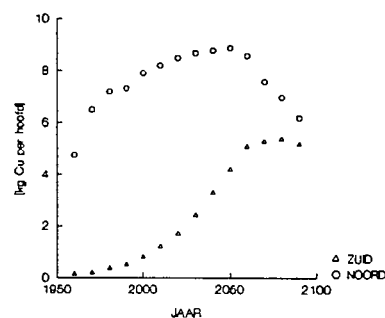
Om een afname van de kopervraag per hoofd te bewerkstelligen is het noodzakelijk dat de koperintensiteit sneller afneemt dan het inkomen per hoofd toeneemt. Een dergelijke ontwikkeling heeft zich tot nu toe niet voorgedaan. Het is denkbaar dat de technologische mogelijkheden om de koperintensiteit te reduceren tekort schieten om een drastische verlaging van het verbruik per hoofd als logisch uitvloeisel van een duurzame ontwikkeling te bewerkstelligen. Het is dan zaak de levensstijl aan te passen zodat het koperverbruik per hoofd teruggebracht wordt.

In de diverse bevolkingsvarianten impliceert duurzame ontwikkeling een drastische verlaging van het verbruik per hoofd. In onderstaande figuren is voor zowel Noord als Zuid de ontwikkeling van het verbruik per hoofd weergegeven in de bevolkingsvariant *midden* bij een reservepotentieel van 1500 mln ton en bij een reservepotentieel van 3000 mln ton. De duurzame verbruikshoeveelheid is in deze figuren naar rato van het verbruik bij onbelemmerde voorziening over Noord en Zuid verdeeld. Dit resulteert op den duur in convergentie van het koperverbruik per hoofd in Noord en Zuid.

Figuur 4.11 Duurzaam verbruik van koper per hoofd in een schaarsterisico mijndend perspectief; $V=1500$ mln ton



Figuur 4.12 Duurzaam verbruik van koper per hoofd in een schaarsterisico mijndend perspectief; $V=3000$ mln ton

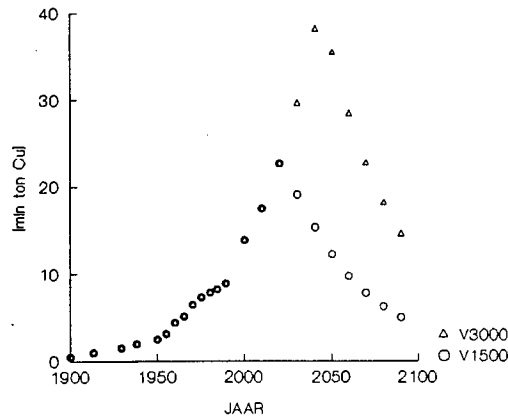


Bron: WRR

Bij een duurzaam gebruik van koper mag dat gebruik de hoeveelheid die door recycling en een duurzaam niveau van onttrekking beschikbaar komt niet overtreffen. Van een duurzame onttrekking is, zoals gezegd, sprake als de minimale uitputtingstermijn boven een kritische grens blijft. Doordat niet alle koper dat in omloop is hergebruikt kan worden en het niveau van duurzame onttrekking in de loop der tijd afneemt, zal bij een stabiliserende wereldbevolking het gebruik van koper per hoofd moeten blijven dalen.

De uit het oogpunt van duurzame ontwikkeling maximaal toelaatbare extractie van koper kan in dit scenario stijgen tot het niveau waarop de minimale uitputtingstermijn van 50 jaar is bereikt. Daarna daalt de maximaal toelaatbare extractie in samenhang met de omvang van de resterende voorraad. De binnen de grenzen van duurzaamheid maximaal toelaatbare extractie is bij een initiële voorraad van 3000 ton hoger dan bij een initiële voorraad van 1500 ton.

Figuur 4.13 Maximaal toelaatbare extractie in een schaarste-risico mijdend perspectief; $V=1500$ en $V=3000$



Bron: WRR

De cumulatieve extractie van primair koper blijft in dit scenario vanzelfsprekend lager dan het reservepotentieel. Bij een maximaal toelaatbare onttrekking resteren in het bevolkingsscenario *midden* de in tabel 4.3 weergegeven voorraden.

Tabel 4.3 Resterende voorraden; *midden*
[mln ton Cu]

jaar	variant	$V=1500$	$V=3000$
2040		614	1780
2090		201	583

Bron: WRR

- Een schaarste-risico mijdende conceptie van duurzaamheid noopt tot een maximale intensivering van het hergebruik en een krachtig nastreven van doelmatigheid van het gebruik en het bevorderen van substitutie door minder schaarse alternatieven.

Het is de vraag of de afweging tussen zekerheid en risico met betrekking tot de lange termijn voorziening van schaarse metalen in het algemeen en van koper in het bijzonder reeds in afdoende mate heeft plaatsgevonden. Gezien de explosieve groei van de vraag in Zuid, welke de komende decennia is te verwachten, is het van belang de discussie, die met Rio een nieuwe impuls heeft gekregen, verder aan te zwengelen. De legitimiteit van de schaarste-risico mijdende conceptie in aanmerking genomen verdienen haar consequenties serieuze overweging.

4.2.2.2 Een schaarste-risico accepterend scenario; benutten

Een conceptie van duurzame ontwikkeling, die het risico van koperschaarste accepteert, houdt rekening met een relatieve schaarste. Er wordt uitgegaan van een reservepotentieel dat enkele orden van groottes boven het cumulatieve verbruik in de volgende eeuw ligt. De vraag is hoe de winningskosten zich bij voortgaande exploitatie van de kopervoorraden zullen ontwikkelen.

Hierover bestaat ten principale onzekerheid. Voorkomens met lage ertsgehalten die in geologisch opzicht verschillen van de huidige typen voorkomens zullen garant moeten staan voor de kopervoorziening van de toekomst.

Duurzame ontwikkeling vereist dat toekomstige generaties niet met winningskosten geconfronteerd worden die een ongestoorde ontwikkeling van andere dan mijnbouwactiviteiten in de weg staan. Het economisch produkt Y laat zich met betrekking tot de inzet van produktiefactoren onderverdelen in de factorkosten voor de produktie van koper P en in de factorkosten ten behoeve van de overige produktie O . Net zoals in het voorgaande niet gesproken is over in-situ koperprijzen wordt dat hier achterwege gelaten. Er wordt dus geabstraheerd van factorkosten, die gerekend worden voor het in exploitatie geven van natuurlijke bodemschatten. Er wordt enkel rekening gehouden met zuivere winningskosten. Het is verder goed te bedenken dat koper hier model staat voor de eindige grondstoffen als groep.

$$Y_t = P_t + O_t$$

Of de ontwikkeling van de overige produktieactiviteiten ongestoord genoemd kan worden moet beoordeeld worden aan de hand van de verhouding tussen P en O .

De produktie van koper valt uiteen in de primaire produktie en de secundaire produktie. De primaire produktie betreft de winning van de ruwe grondstof en de secundaire produktie het hergebruik van oud koperschroot. De toegevoegde waarde van de primaire produktie is de resultante van het volume van de extractie ΔE en de factorkosten per eenheid van die extractie C_e . Evenzo is de toegevoegde waarde van de secundaire produktie de resultante van het volume van het hergebruik R en de factorkosten per eenheid van het hergebruik C_r .

$$P_t = \Delta E_t C_e + R_t C_r$$

De extractie van primair koper voorziet in dat gedeelte van het verbruik van koper, waarin niet door hergebruik voorzien wordt. Het verbruik is bepaald door het verbruik per hoofd σ en de bevolkingsontwikkeling Pop . Er wordt uitgegaan van de trendmatige groei van het koperverbruik per hoofd, waarbij voor Zuid convergentie met het niveau in Noord wordt verondersteld.

$$\Delta E_t = \sum_{r \in \{NOORD, ZUID\}} \sigma_{t,r} Pop_{t,r} - R_t$$

In welk gedeelte van het verbruik door winning en in welk gedeelte door hergebruik voorzien wordt, is afhankelijk van het verloop van de factorkosten per eenheid. De verdeling tussen winning en hergebruik zal steeds zo zijn dat gelijkheid bestaat tussen de factorkosten per eenheid primair koper en de marginale factorkosten per eenheid secundair koper C_r^m .

$$C_e = C_r^m$$

De factorkosten per eenheid primair koper nemen toe als functie van de gecumuleerde extractie E . Zoals gezegd is deze relatie niet met zekerheid te specificeren. In de appendix worden op basis van het CAG-model van Brinck een tweetal mogelijke specificaties afgeleid. In zijn algemeenheid geldt

De factorkosten per eenheid secundair koper nemen toe als functie van de fractie η die wordt hergebruikt. Bij een lage fractie van hergebruik zijn de factorkosten gering. Naarmate de

$$Ce_t = Ce(E_t)$$

$$\frac{dCe_t}{dE_t} \geq 0$$

materiaalketen meer gesloten wordt en de fractie hergebruik honderd procent benadert, nemen de marginale factorkosten per eenheid secundair Cr^m koper sterk toe. Daarmee stijgen ook de gemiddelde kosten van hergebruik Cr . Voor de marginale en gemiddelde kosten van hergebruik geldt

$$Cr^m_t = Cr^m(\eta_t), \quad Cr^m(0) = 0 \text{ en } Cr^m(1) = \infty$$

$$Cr(\eta_t) = \frac{1}{\eta_t} \int_0^{\eta_t} Cr^m(p) dp$$

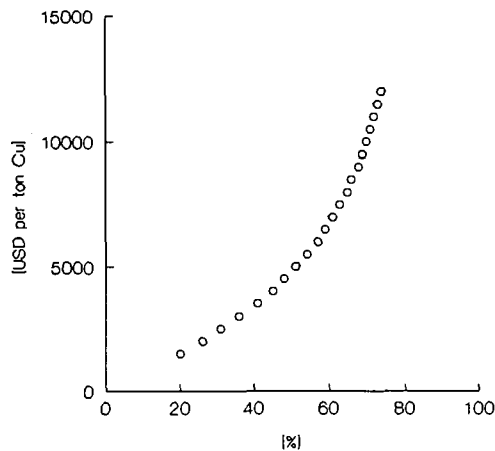
$$\eta_t = \frac{R_t}{\sum_{r \in \{NOORD, ZUID\}} \sigma_{t-1,r} Pop_{t-1,r}}$$

Vanwege te verwachten technologische ontwikkelingen op het gebied van ketenbeheer is de specificatie van de marginale hergebruikskosten onzeker. Ten behoeve van de scenario ontwikkeling is willekeurig een bepaalde specificatie verondersteld.

$$Cr^m_t = \alpha \frac{\eta_t}{1 - \eta_t^2}$$

Het verloop van de marginale hergebruikskosten volgens deze specificatie is geïllustreerd voor referentiekosten van 1500 USD/ton bij een hergebruik van 20 procent.

Figuur 4.14 Marginale hergebruikskosten als functie van het hergebruikspercentage η



Bron: WRR

Door de evenwichtsvoorwaarde voor de factorkosten per eenheid primair en secundair koper te combineren met bovenstaande kostenfunctie kan de hoeveelheid hergebruik afgeleid worden.

$$R_t = \frac{\sum_{r \in \{NOORD, ZUID\}} \sigma_{t-1,r} Pop_{t-1,r} Ce(E_t)}{\alpha + Ce(E_t)}$$

In de rest van het verbruik wordt voorzien door winning van primair koper ΔE . De cumulatieve extractie in de volgende periode is daarmee eveneens bepaald.

$$E_{t+1} = E_t + \Delta E_t$$

De momentane relaties voor de primaire winningskosten, de primaire en de secundaire winning alsmede de relatie voor de cumulatieve extractie bepalen tezamen de ontwikkeling van deze grootheden door de tijd.

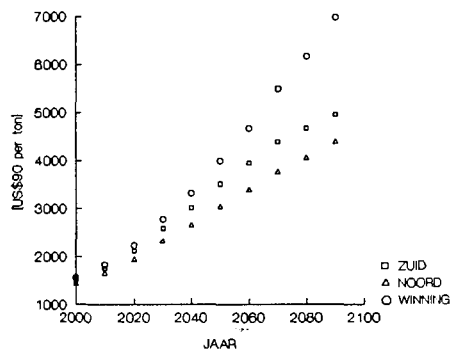
Cruciaal in het model is dat de produktiekosten van primair koper bij een toenemende cumulatieve extractie stijgen. Daardoor stijgen de kosten van het koperverbruik.

In Noord gaat de stijging in de kosten van het koperverbruik samen met een daling van de koperintensiteit. Zonder kostenstijging zouden relatief minder middelen ten behoeve van het koperverbruik behoeven te worden ingezet. In Zuid valt de stijging in de kosten van het koperverbruik echter samen met een stijging van de koperintensiteit. Zonder kostenstijging zouden hier, ook in relatieve zin, al meer middelen ten behoeve van het koperverbruik worden ingezet. In Zuid zal dus het aandeel van de kosten van het koperverbruik per hoofd in het inkomen per hoofd de komende decennia hoe dan ook stijgen. In Noord is een dergelijke ontwikkeling afhankelijk van de mate waarin de winningskosten van koper zullen stijgen.

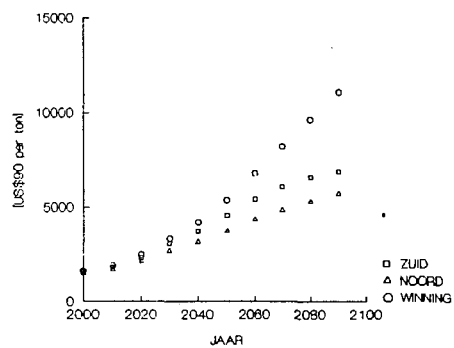
In Noord zijn de kosten van de kopervervoorziening per eenheid koper lager dan in Zuid. Dit wordt veroorzaakt door de combinatie van twee factoren. Ten eerste zijn de gemiddelde kosten van secundair koper lager dan de kosten van primair koper. Slechts de kosten van de laatste fractie hergebruik zijn gelijk aan de winningskosten van primair koper. Ten tweede is, ondanks het feit dat het hergebruikpercentage in beide wereldregio's gelijk is, het aandeel van secundair koper in de kopervervoorziening van Zuid geringer dan in Noord. Dat komt doordat het koperverbruik in Zuid sneller stijgt dan in Noord. Koper circuleert gedurende een bepaalde periode voordat het als oud schroot voor hergebruik beschikbaar komt. Er is met een verblijfstijd van 20 jaar gerekend. In Zuid bestaat vanwege de snelle groei een grotere kloof tussen het huidige verbruik per hoofd en het verbruik van 20 jaar geleden, waar het hergebruik aan gerelateerd is.

Ter illustratie van het voorgaande worden de kosten van de kopervervoorziening voor twee varianten van de winningskosten gepresenteerd. De kosten van de kopervervoorziening op basis van zowel primair als hergebruikt koper verschillen in Noord en Zuid. In de onderstaande figuren is de ontwikkeling van de kosten per ton voor zowel de kosten van de gehele kopervervoorziening in Noord en Zuid als voor de winning van koper voor elk van beide in de appendix afgeleide varianten van de winningskosten weergegeven. Beide figuren hebben betrekking op de bevolkingsprojectie *midden* van de Verenigde Naties en op een verzadigingsniveau van het hoofdelijk koperverbruik van 9,0 kg per hoofd in zowel Noord als Zuid. Merk op dat de schaal in beide figuren verschilt.

Figuur 4.15 Kosten van kopervervoorziening (gemiddeld) en winningskosten, lage variant



Figuur 4.16 Kosten van kopervervoorziening (gemiddeld) en winningskosten, hoge variant



Bron: WRR

Duidelijk komt naar voren dat de ontwikkeling van de kosten van de kopervervoorziening ten opzichte van de stijging van de winningskosten aanzienlijk gematigd is als gevolg van de stijging van het hergebruik. Dit hergebruik neemt toe van een huidig niveau van 18 procent naar respectievelijk 61 procent en 73 procent in 2090, gerekend voor de lage en de hoge winningskostenvariant. Ondanks het toegenomen hergebruik moet aan het einde van de volgende eeuw rekening gehouden worden met een verviervoudiging tot een vervijfvoudiging van het huidige extractieniveau van primair koper. Op dat niveau treedt dan evenwel een stabilisatie op.

In beide varianten loopt het aandeel van de kosten van de kopervervoorziening per hoofd in het inkomen per hoofd op, niet alleen in Zuid maar ook in Noord. De stijgende kosten van koper

staan in verband met een toenemende inzet van produktiefactoren als kapitaal en arbeid die benodigd zijn om de kopervoorziening gaande te houden. Het is de vraag hoe deze stijgende inzet van produktiefactoren beoordeeld moet worden in het kader van een streven naar duurzame ontwikkeling.

Het is aannemelijk dat als er werkelijk sprake van stijgende winningskosten van koper zal zijn, dat dan ook de voorziening in andere uitputbare grondstoffen met stijgende kosten gepaard zal gaan. De vraag hoe de stijgende inzet van produktiefactoren in het kader van een duurzame ontwikkeling beoordeeld kan worden, moet daarom niet voor koper afzonderlijk gesteld worden maar eerder voor koper in samenhang met alle andere essentiële grondstoffen. De optelsom van het beslag op kapitaal en arbeid voor de winning van al die essentiële grondstoffen is de relevante grootte voor de vraag naar een duurzame verbruiksontwikkeling van al die grondstoffen afzonderlijk.

Het gaat er in deze conceptie van duurzame ontwikkeling om dat het toenemende beslag op de economische middelen voor de voorziening in uitputbare grondstoffen een ongestoorde bevrediging van de behoeften van toekomstige generaties onverlet laat. Maar wat betekent dit nu concreet?

De operationalisatie van een dergelijk ontwikkelingspad is problematisch omdat de behoeften van toekomstige generaties zich slechts ex-post laten kennen, terwijl ex-ante de voorwaarden, waaronder de bevrediging van die behoefte tot stand komt, bepaald worden. Operationalisatie vereist dus een ex-ante inschatting van de behoeften van toekomstige generaties.

De soms gevoelde afhankelijkheid van de ongekende toekomst in een streven naar duurzame ontwikkeling is een kwestie van benadering en kan vermeden worden. De huidige generatie heeft invloed op de voorwaarden voor de realisatie van een toekomstige materiële welvaart waarvan aan de hand van de hedendaagse praktijk een beeld gevormd kan worden. Daarbij kan rekening gehouden worden met te verwachten technologische ontwikkelingen. Duurzame ontwikkeling kan zo gezien worden als het creëren van de voorwaarden voor een door de huidige generatie gewenste toekomstige materiële welvaart. Duurzame ontwikkeling impliceert daarmee een proactieve opstelling ten aanzien van toekomstige condities. In het verband van de grondstoffenproblematiek betreffen die condities de resterende voorraden en de kosten waarmee de winning daarvan ter hand genomen kan worden.

Laten we als uitgangspunt voor dit scenario nemen dat toekomstige generaties niet noodzakelijkerwijs welvarender dan de huidige generatie behoeven te zijn, maar zeker ook niet minder welvend. Door vervolgens de toekomstige behoeften de maat te nemen aan de huidige behoeften ontstaat een uitgangspunt dat werkbaar is. Het is duidelijk dat de gemaakte keuze slechts een van de vele mogelijkheden is om aan het begrip duurzame ontwikkeling inhoud te geven.

Het stijgen van de welvaart is in zijn algemeenheid te danken aan produktiviteitsverhoging. Doordat met minder middelen, in het bijzonder arbeid, dezelfde hoeveelheid goederen en diensten geproduceerd kunnen worden ontstaat ruimte voor de bevrediging van nieuwe behoeften. Voor het genereren van de welvaart wordt gebruik gemaakt van niet vernieuwbare grondstoffen. Er is geconstateerd³⁷ dat de economische schaarste van grondstoffen sinds de aanvang van de grootschalige exploitatie in de vorige eeuw niet toegenomen is. Als nu echter vanwege de schaal van de economische activiteit en het uitgeput raken van hoogwaardige grondstoffenvoorkomens de economische middelen, die benodigd zijn om een bepaalde

³⁷ H.J. Barnett and C. Morse, *Scarcity and growth: The economics of natural resource availability*; Baltimore, Johns Hopkins University Press, 1963.

hoeveelheid grondstoffen te winnen, gaan toenemen, gaat dit ten koste van de ruimte voor welvaartsverhoging. Een en ander zou impliceren dat de technologische ontwikkeling in de grondstoffenwinning de nadelen die aan de exploitatie van minder hoogwaardige voorkomens kleven niet kan compenseren. Sterker nog, bij een voortdurend stijgend beslag van de grondstoffenwinning op de economische middelen kan het niveau van de welvaart op termijn zelfs afkalven.

Stijgende winningskosten van grondstoffen treffen de samenlevingen in Noord en Zuid verschillend. De economische activiteit in Noord wordt gekenmerkt door een dalende grondstofintensiteit terwijl in Zuid vooralsnog sprake is van een stijgende grondstofintensiteit. Anders gezegd, in Zuid neemt het aandeel van de grondstofintensieve activiteiten in de economie toe terwijl dit aandeel in Noord afneemt. Een stijging van de grondstofkosten is daarom in Noord eenvoudiger te compenseren door een productiviteitsstijging in de sectoren buiten de mijnbouw dan in Zuid. De buffercapaciteit in de economie voor productiviteitsverlies bij de grondstofwinning is verschillend.

De stijgende winningskosten van grondstoffen kunnen ook direct gecompenseerd worden, namelijk door een stijging van de grondstofproductiviteit. Met de grondstofproductiviteit wordt bedoeld op de doelmatigheid van de grondstofinzet. De doelmatigheid is door grondstofbesparing en substitutie door minder schaarse grondstoffen te verbeteren. Een stijging van de grondstofproductiviteit, in de regel geïnduceerd door technologische ontwikkeling, werkt voor Noord en Zuid gelijk uit.

Er is in principe nog een andere weg denkbaar om de stijgende winningskosten van grondstoffen het hoofd te bieden. Deze heeft betrekking op leefstijl en de rol die grondstoffen daarin (als input) spelen. Voorstelbaar is dat ter compensatie van stijgende winningskosten en een tekortschietende grondstofproductiviteitsverhoging de leefstijl wordt veranderd zonder dat daarbij welvaartsverliezen optreden. Er zouden dan substituties mogelijk zijn tussen verschillende welvaartsgenererende activiteiten. Deze substituties zouden dan resulteren in een minder grondstofintensieve leefstijl.

Een streven naar duurzame ontwikkeling vereist dat over dergelijke leefstijlveranderingen van toekomstige generaties wordt nagedacht. Van belang daarbij is dat een oordeel wordt gevormd over de welvaartseffecten van die leefstijlveranderingen. Daartoe hoort bijvoorbeeld een oordeel over de welvaartseffecten van met toekomstige mobiliteit samenhangende leefstijlveranderingen, aangezien mobiliteit een bij uitstek grondstofintensieve zaak is. Als het oordeel zou luiden dat de welvaart als gevolg van compenserende leefstijlveranderingen afneemt, moet geconcludeerd worden dat het niveau van het grondstoffenverbruik per hoofd van de huidige generatie niet op een duurzaam niveau ligt. Het gaat immers ten koste van de welvaart van toekomstige generaties, ook wanneer de te verwachten stijging van de grondstofproductiviteit in aanmerking genomen wordt.

Alle drie de besproken compenserende factoren hebben hetzij direct hetzij indirect betrekking op de aan het begin van deze paragraaf genoemde verhouding tussen de factorkosten van de grondstofvoorziening P en de factorkosten ten behoeve van de overige productie O . De gekozen invulling van duurzame ontwikkeling, namelijk dat de welvaart niet zal dalen, vereist dat de stijgende kosten van de grondstofvoorziening ΔP de toename van de totale productie ΔY niet overschaduwten. Dan zal de overige productie niet afnemen, ΔO blijft positief. De grondstofwinning draagt enkel indirect, als input in de overige productie, bij aan de welvaart. Daarom wordt de welvaart afgemeten aan de overige productie O en duurzame ontwikkeling vereist dus dat de toename hiervan positief is.

Beschouwen we nogmaals de definitie van duurzame ontwikkeling en de invulling die daaraan gegeven is, dan is duidelijk dat het gaat om een intertemporele welvaartsverdeling. Daaraan vallen twee aspecten te onderscheiden. Het meest gangbaar is de vergelijking tussen de welvaart van de huidige en toekomstige generaties van een bepaalde bevolking. In het verband met de tweedeling tussen Noord en Zuid is verder ook een vergelijking zinvol tussen de welvaart van Noord in een bepaald stadium van economische ontwikkeling en de welvaart van Zuid in datzelfde stadium van economische ontwikkeling dat daar op een later tijdstip bereikt wordt.

Zuid heeft een ontwikkelingsachterstand op Noord. Doordat Noord als eerste op grote schaal de bodemschatten heeft geëxploiteerd kan Zuid bij zijn ontwikkeling in een nadelige positie komen te verkeren. De rijkste bodemschatten zijn uitgeput en de technologische ontwikkeling in de grondstoffenwinning zou in de toekomst tekort kunnen schieten om de daling van de produktiviteit en de daarmee gepaard gaande kostenstijging als gevolg van de exploitatie van armere voorkomens tegen te gaan. De ontwikkeling in Noord is dan ten koste van de ontwikkeling in Zuid gegaan, tenzij de produktiviteit van de grondstofinzet sterk verbeterd is sinds Noord zich in een zelfde stadium van ontwikkeling bevond. Dit laatste is evenwel voor de meeste grondstoffen het geval. De ontwikkelingsachterstand van Zuid op Noord belooft meer dan een kwart eeuw. De grondstofproductiviteit neemt over een dergelijke periode fors toe. Zuid kan daardoor haasje over springen. Bij de ontwikkeling van Zuid kan gebruik gemaakt worden van veel efficiënter technologie dan destijds in Noord gebruikt is.

Zolang de voordelen van de sprong door de technologie opwegen tegen de nadelen van de productiviteitsdaling in de grondstofwinning is de claim dat het beslag op de bodemschatten door de ontwikkeling van Noord ten koste gaat van de ontwikkeling van Zuid onterecht. Zuid kan een sprong door de technologie maken op voorwaarde dat de overdracht van die technologie van Noord naar Zuid ook daadwerkelijk plaats vindt.

Voor de opstelling van de scenario's is als uitgangspunt gekozen dat de stijging van de grondstofproductiviteit de productiviteitsdaling in de grondstofwinning kan compenseren.

In de koperscenario's die corresponderen met de twee varianten van de winningskosten uit de appendix nemen de kosten van de kopervoorziening, primair en secundair koper gezamenlijk, over de periode van 2000 tot 2090 toe met 1,2 procent in Noord en 1,3 procent in Zuid en 1,5 procent in Noord en 1,6 procent in Zuid voor respectievelijk de lage en de hoge kostenvariant. Het betreft hier gemiddelden, aan het begin van de periode is de stijging hoger dan aan het einde van de periode. Het toenemende hergebruik dempt de kostenstijging.

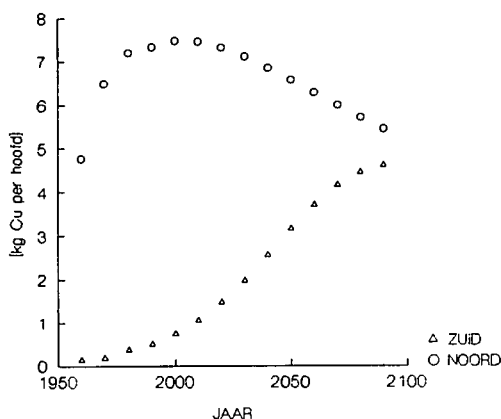
Sinds koper op grote schaal gebruikt wordt heeft zich eveneens een stijging van de koperproductiviteit voorgedaan. De omvang van die stijging is niet precies bekend. De daling van de koperintensiteit in Noord met circa 1,1 procent per jaar over de periode van 1960 tot 1990 is de resultante van de verandering in de economische structuur en de stijging van de koperproductiviteit. De stijging van de koperproductiviteit is dus in elk geval lager dan 1,1 procent.

Als de koperproductiviteit als gevolg van beleidsinspanningen sterker zou gaan stijgen zullen de kosten van de kopervoorziening minder toenemen. Laten we veronderstellen dat een extra stijging van de koperproductiviteit met 0,5 procent per jaar voldoende is om de productiviteitsdaling van de koperwinning te compenseren. Er is dan dus sprake van duurzame ontwikkeling in de hierboven omschreven zin. Wat zijn de gevolgen van een dergelijke toename van de koperproductiviteit?

De ontwikkeling van het koperverbruik per hoofd neemt een andere wending. Terwijl zonder een extra productiviteitsstijging het verbruik per hoofd naar veronderstelling naar een verzadigingsniveau tendeert, doordat productiviteitsstijging en verbruik voor nieuwe toepassingen elkaar in evenwicht houden, neemt bij een extra stijging van de koperproductiviteit het

verbruik per hoofd af, nadat een bepaald niveau van het verbruik per hoofd bereikt is. Met een zelfde hoeveelheid koper wordt in steeds meer functies voorzien. In de onderstaande figuur is weergegeven hoe het koperverbruik per hoofd zich in Noord en Zuid bij een extra stijging van de koperproductiviteit ontwikkelt.

Figuur 4.17 Verbruik van koper per hoofd bij een extra stijging van de koperproductiviteit met 0,5%

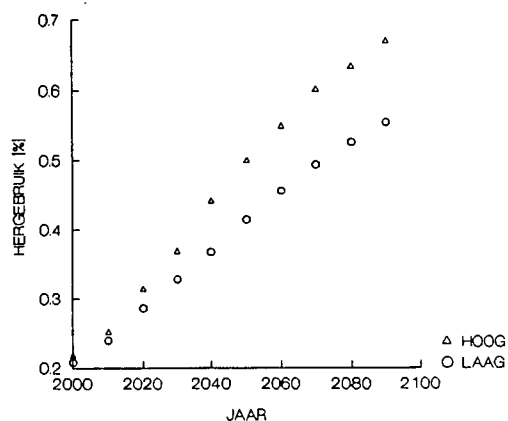


Bron: WRR

Logischerwijs zou voor beide varianten van de winningskosten een ander streefpercentage voor additionele koperproductiviteitsverhoging gegeven moeten worden. De toename van de koperproductiviteit in het referentiescenario is echter niet precies bekend en daarom is een dergelijke toevoeging voor de analyse weinig relevant.

Als gevolg van de verhoogde koperproductiviteitsontwikkeling is de ontwikkeling van de kosten van de kopervoorziening minder extreem. De vraag naar koper, waaronder primair koper, neemt immers minder snel toe. Ook de cumulatieve extractie van primair koper neemt daardoor minder snel toe en daarmee is ook de ontwikkeling van de winningskosten gematigder. Bij de lage kosten variant zijn de kosten van extractie in 2040 verdubbeld tot 3050 USD per ton en in de hoge kosten variant liggen de extractiekosten in 2040 op 3925 USD per ton, in 2090 zijn de extractiekosten verviervoudigd tot verzesvoudigd. De kosten van de kopervoorziening komen door het hergebruik uiteraard lager uit dan de winningskosten. De kosten van de voorziening in primair en secundair koper gezamenlijk liggen gemiddeld ongeveer op twee derde van de winningskosten. Vanwege de sterke groei van het koperverbruik in Zuid zijn de kosten van de kopervoorziening daar hoger dan in Noord. De beschikbaarheid van oud koperschroot is door de sterke groei in het verbruik immers geringer. Het verloop van het hergebruik is voor beide varianten van de winningskosten in de onderstaande figuur weergegeven.

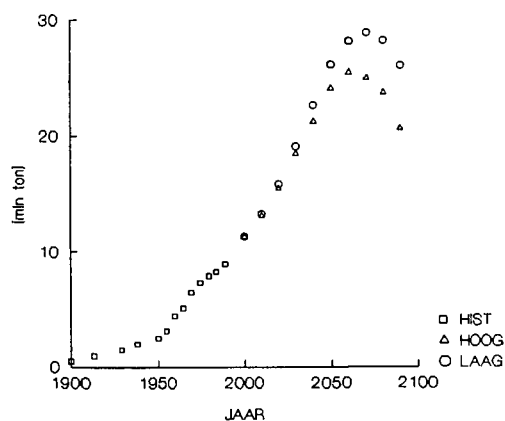
Figuur 4.18 Ontwikkeling van het hergebruik bij een extra stijging van de koperproductiviteit met 0,5%



Bron: WRR

Onder de veronderstelling van het bestaan van een verzadigingsniveau van het koperverbruik per hoofd en bij een extra stijging van de koperproductiviteit met 0,5 procent bereikt de extractie van primair koper in de loop de komende eeuw een maximum en neemt vervolgens af. Vanzelfsprekend ligt dit maximum bij de hoge winningskosten variant lager dan bij de lage winningskosten variant. In beide varianten vindt evenwel meer dan een verdriedubbeling ten opzichte van het huidige extractieniveau plaats.

Figuur 4.19 Ontwikkeling van de koperextractie bij een extra groei van de koperproductiviteit met 0,5% vanaf 1990



Bron: WRR

De cumulatieve extractie van primair koper is in dit scenario in principe onbegrensd. Voor de hoge en lage winningskosten varianten zijn bij het bevolkingsscenario *midden* de cumulatieve extracties in tabel 4.4 weergegeven. De cumulatieve extractie ontloopt elkaar in beide varianten niet dramatisch. De hoge mate van hergebruik draagt hier aan bij. Het verloop van

de marginale hergebruikskosten is sterk van invloed op het verloop van de cumulatieve extractie.

Het is opmerkelijk dat de cumulatieve extractie lager dan 3000 mln ton Cu blijft, een hoeveelheid die in het schaarste-risico mijdende scenario als variant voor de omvang van de initiële reserves werd gehanteerd.

Tabel 4.4 Cumulatieve extractie; *midden*
[mln ton Cu]

jaar	variant	lage kosten	hoge kosten
		variant	variant
2040		1170	1144
2090		2545	2332

Bron: WRR

Het denkbeeld dat in dit scenario is uitgewerkt is dat de stijging van de winningskosten van grondstoffen wordt gecompenseerd door een extra stijging van de grondstofproductiviteit en door een toename van het hergebruik. Zo hoeven toekomstige generaties per saldo geen nadeel van de uitputting van de rijkere ertsvoorkomens te ondervinden. De condities zijn geschapen waaronder toekomstige generaties ten minste een zelfde welvaartsniveau kunnen bereiken als voorgaande generaties. Daarmee is wat is komen te heten een duurzame ontwikkeling mogelijk gemaakt.

Een en ander houdt wel in dat de beoogde productiviteitsstijging ook daadwerkelijk bereikt moet worden. Vanwege de lange termijn waarop de beschouwing betrekking heeft, ligt het niet voor de hand dat de marktkrachten zelf op de situatie inspelen. Hun horizon is over het algemeen veel beperkter.

Naast het bevorderen van de produktiviteit van het grondstoffenverbruik is het ook mogelijk de voorwaarden voor hergebruik te verbeteren. Ook op dit terrein ligt een potentieel voor technologische ontwikkeling dat lokaal kan worden aangesproken. De derde weg om de schaarste van grondstoffen te mitigeren namelijk de verhoging van de produktiviteit van de grondstoffenwinning is bovenal het terrein van de grondstofproducenten zelf.

4.2.3 Het schaarste-risico vanuit een milieu-risico mijdend perspectief

Nadat het schaarste-risico vanuit de milieu-risico accepterende conceptie is belicht, worden nu twee scenario's gepresenteerd waarin het milieu-risico wordt gemedend. Het milieu-risico wordt benaderd als een complicatie voor het schaarste-risico. Het milieu-risico van de winning van metaalerts is in tegenstelling tot het schaarste-risico geen globaal maar eerder een risico met een beperkte geografische reikwijdte. Indien globaal echter een cultuur bestaat waarin lokale milieu-risico's gemedend worden, kunnen de gevolgen voor de globale schaarste niet uitblijven. Ofwel worden voorkomens uit milieuoverwegingen niet of niet ten volle geëxploiteerd, ofwel stijgen de kosten van winning doordat tal van milieuvorzieningen getroffen moeten worden.

De milieu-risico mijdende scenario's worden in deze benadering gezien als varianten op de milieu-risico accepterende scenario's.

In het schaarste-risico mijdende scenario wordt er aan het scala van reservebegrippen een toegevoegd, het reservepotentieel dat de draagkracht van het milieu niet te boven gaat. Hoewel een dergelijk reservebegrip weinig operationeel is, leent het zich als uitgangspunt voor een subjectief bepaald scenario.

In het schaarste-risico accepterende scenario wordt niet met een eindige reserve gewerkt. Hier tellen enkel de winningskosten, waarin de milieuvorzieningen substantieel kunnen doorklinken.

4.2.3.1 Nogmaals een schaarste-risico mijndend scenario; behoeden

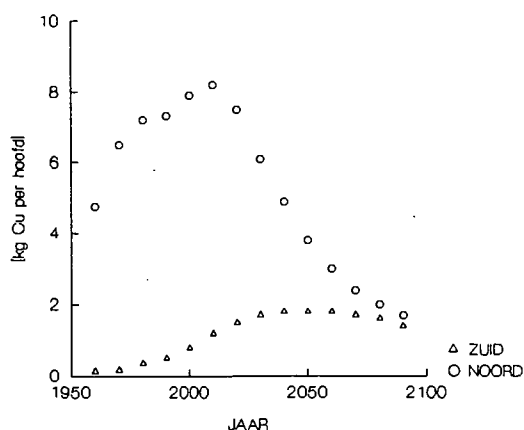
In dit scenario is de voor winning in aanmerking komende voorraad beperkt tot 750 mln ton koper. De feitelijke koperreserves zijn wel groter maar worden om milieuredenen niet aangesproken.

Evenals in het voorgaande schaarste-risico mijndende scenario is de verhouding tussen extractie en resterende voorraden op minimaal 50 jaar gehouden en het maximaal haalbare hergebruik is op 75 procent gesteld. Dit scenario is een variant op de eerder gepresenteerde schaarste-risico mijndende scenario's. De voor winning in aanmerking komende voorraad is dermate beperkt dat met inachtneming van het groeipotentieel in Zuid er op betrekkelijk korte termijn een noodzaak tot inperking van het verbruik per hoofd is. Desondanks is de voor winning in aanmerking komende reserve nog een slag groter dan de huidige reservebasis van 576 mln ton koper.

Al in 2010 ligt het percentage minimaal her te gebruiken koper op vijftig. Vanaf 2010 is een maximaal hergebruik vereist om aan de gestelde voorwaarde voor duurzame ontwikkeling te voldoen, namelijk het handhaven van een uiterste uitputtingstermijn van 50 jaar. Maar alleen met het maximaal opvoeren van het hergebruik is duurzame ontwikkeling nog niet haalbaar. Na 2010 zou het verbruik van koper bij een ontwikkeling als in het referentiep pad groter zijn dan wat uit hergebruik en een duurzame extractie aan koper beschikbaar komt. Voor een duurzame ontwikkeling is het dus niet alleen noodzakelijk om tot een maximale intensivering van het hergebruik te komen, ook zal het verbruik van koper per hoofd zelf teruggebracht moeten worden.

Er resulteert vanuit het oogpunt van duurzame ontwikkeling een maximaal toelaatbaar verbruik per hoofd dat in onderstaande figuur is weergegeven.

Figuur 4.20 Maximaal toelaatbaar verbruik per hoofd



Bron: WRR

Met name in Noord vereist een dergelijke verbruiksentwikkeling offers. Gedurende een groot gedeelte van de komende eeuw wordt in Noord in dit scenario een daling van het koperverbruik per hoofd gerealiseerd die zich beweegt tussen 2,0 procent en 2,5 procent per jaar. Op zijn laatst moet deze ontwikkeling over 25 jaar ingezet worden. Na een periode van een halve eeuw kan het tempo van de daling in het koperverbruik wat gematigd worden. Deels kan deze ontwikkeling gerealiseerd worden door een stijging van de koperproductiviteit, deels zal ook een aanpassing van de leefstijl in een minder grondstofintensieve richting plaatsvinden.

Als gevolg van de intensivering van het hergebruik en de daling van het verbruik, die zich ondanks het toenemende koperverbruik in Zuid vanaf het midden van de komende eeuw kan inzetten, daalt de extractie van primair koper van een niveau van 9,0 mln ton in 1990 naar een niveau van 2,0 mln ton in 2090. Van de aanvankelijk voor winning in aanmerking komende reserve van 750 mln ton resteert in 2090 nog 80 mln ton.

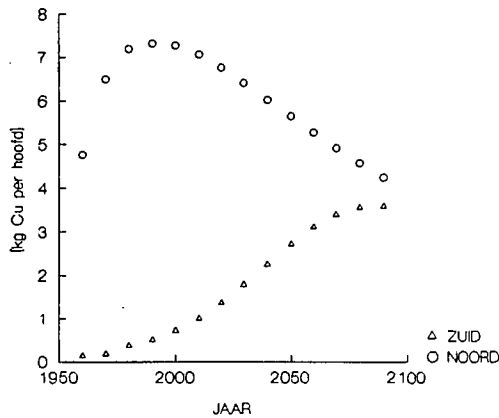
4.2.3.2 *Nogmaals een schaarste-risico accepterend scenario, beheren*

Mijnbouw is een vervuilende activiteit. Naarmate de ertsgehalten lager worden is er meer grondverplaatsing en wordt de inbreuk op de natuurlijke omgeving ernstiger. Tegenover het risico van uitputting wordt in dit scenario geen wezenlijk ander handelingsperspectief geplaatst dan in het voorgaande schaarste-risico accepterende scenario. Het belangrijke verschil met dat scenario is dat de kosten van primair koper niet enkel bestaan uit de winningskosten maar dat hieraan tevens de kosten van milieuvorzieningen zijn toegevoegd. Naarmate de ertsgehalten lager worden nemen de kosten van milieuvorzieningen per ton koper meer dan evenredig toe. Aangezien ceteris paribus ook de winningskosten bij afnemende ertsgehalten toenemen kunnen de totale kosten van primair koper aan de winningskosten C_e gerelateerd worden. In dit scenario zijn de kosten van primair koper C_p bij wijze van illustratie, empirische onderbouwing ontbreekt, als volgt geformuleerd

$$C_{p,t} = C_{e,t} \left(\frac{C_{e,t}}{C_{ref}} \right)^{1,1}$$

Om toekomstige generaties niet met de lasten van de huidige exploitatiepraktijken op te zadelen, in de zin dat zij door hoge kosten minder dan de huidige generatie van de beschikbare bodemschatten kunnen profiteren, moet de produktiviteit van de koperinzet dusdanig stijgen dat zowel winningskosten als milieukosten er door worden gecompenseerd. In dit scenario is aangenomen dat een dergelijk evenwicht ontstaat indien een extra toename van de koperproductiviteit met jaarlijks 0,75 procent wordt gerealiseerd. In de onderstaande figuur is weergegeven welke ontwikkeling van het koperverbruik per hoofd deze aanname impliceert.

Figuur 4.21 Verbruik van koper per hoofd bij een extra stijging van de koperproductiviteit van 0,75%

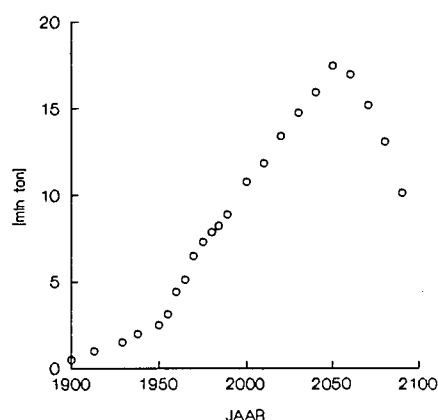


Bron: WRR

Het scenario is verder enkel voor de lage winningskosten variant uitgewerkt.

De stijging van de kosten van de kopervoorziening blijft beperkt, enerzijds dankzij de sterke stijging van de koperproductiviteit anderzijds dankzij de ontwikkeling van het hergebruik. In 2040 zijn in dit scenario de kosten van de kopervoorziening, dat wil zeggen de kosten van hergebruik en winning inclusief milieukosten, in Noord en Zuid respectievelijk 3800 USD per ton en 5050 USD per ton, in 2090 bedragen deze kosten respectievelijk 5300 USD per ton en 7525 USD per ton. Toch zijn de kosten van primair koper in 2090 het tienvoudige van de kosten van primair koper in 1990. De hergebruiksfractie loopt op van 57 procent in 2040 tot 79 procent in 2090. De extractie van koper bereikt rond het midden van de komende eeuw een maximum en valt daarna terug tot een niveau vergelijkbaar met het huidige extractie-niveau. De cumulatieve extractie loopt op van 1018 mln ton in 2040 tot 1747 mln ton in 2090.

Figuur 4.22 Extractie van koper bij een extra groei van de koperproductiviteit met 0,75% en internalisering van milieukosten



Bron: WRR

Meer nog dan in het voorgaande schaarste-risico accepterende scenario is hier een ingrijpen in de markt verondersteld. Ten eerste is er van uitgegaan dat er milieuvorzieningen in de mijnbouw worden getroffen, die de vervuiling tot op een maatschappelijk geaccepteerd niveau kunnen terugbrengen. Ten tweede is een aanzienlijke extra stijging van de grondstofproductiviteit verondersteld. Het is duidelijk dat hiervoor een gericht besparingsbeleid noodzakelijk is.

4.2.3.3 Nabeschouwing

In de schaarste-risico mijdende en accepterende scenario's zijn uiteenlopende benaderingen van de schaarste gehanteerd. In het schaarste-risico mijdend scenario wordt een verbruikswikkeling gedicteerd door een eindige reserve, waarvan de grenzen in zicht zijn. In het risico-accepterend scenario wordt een verbruikswikkeling gestuurd door stijgende kosten van primair koper als gevolg van de uitputting van de rijkere ertsreserves. De risicohouding ten opzichte van het ecologisch risico accentueert beide benaderingen.

In alle scenario's is aan het einde van de volgende eeuw de cumulatieve extractie groter dan de huidige reservebasis van 570 mln ton Cu. De technische reserve van 2120 mln ton Cu ligt in dezelfde orde als de cumulatieve extractie in de beide varianten van het scenario benutten en in het scenario beheren. Dit is het resultaat van de specificatie van de winningskosten en de hergebruikskosten. De onzekerheid over de validiteit van deze specificaties is groot. In het licht van de schatting van de technische reserves zijn deze specificaties echter niet geheel uit de lucht gegrepen. In de scenario's sparen en behoeden is de schatting van de technische reserve als eikpunt genomen. Een markant resultaat van de scenario's is dat met name door de groei van de kopervraag in Zuid de uitputting van een dergelijke reserve in de komende eeuw reëel is.

Ondanks dat in de schaarste-risico accepterende scenario's van een in principe oneindige reserve wordt uitgegaan, ontstaat toch het beeld dat door een explosieve groei in de kopervraag op de lange termijn uitputtingsproblemen kunnen ontstaan. De noodzaak van aanpassin-

gen aan de vraagzijde, bij het hergebruik of bij de winning komt naar voren. De termijn waarop die aanpassingen in de scenario's noodzakelijk zijn is korter dan een halve eeuw.

In de praktijk vinden nu reeds vele veranderingen plaats. De vooruitgang in de winningstechnologie compenseert de uitputting van de rijkere voorkomens. In een aantal toepassingen is het gebruik van koper teruggedrongen ten voordele van andere materialen en ook voor de mogelijkheden van hergebruik bestaat nu expliciete aandacht.

Het is een open vraag of deze veranderingen in het lange termijn perspectief ook snel genoeg plaatsvinden. De scenario's geven verschillende gezichtspunten op deze vraag.

5. BESLUIT

Zowel in het schaarste-risico mijdende als in het schaarste-risico accepterende scenario impliceert duurzame ontwikkeling een afnemend verbruik per hoofd. Die afname van het hoofdelijk verbruik zal het eerst in de ontwikkelde economieën moeten plaatsvinden en in latere instantie in de Derde Wereld. In de Derde Wereld ligt het verbruik per hoofd nog op een laag niveau. Een stijging van het grondstofverbruik is hier door het navolgen van een vergelijkbare economische ontwikkeling als in de meer ontwikkelde economieën onontkoombaar. Pas nadat een grondstofintensieve hobbel in de economische ontwikkeling is genomen kan het verbruik per hoofd ook in de Derde Wereld dalen.

De afname van het verbruik per hoofd gaat zowel in het schaarste-risico mijdende als in het schaarste-risico accepterende scenario gepaard met een stijging van het hergebruik. In bepaalde gevallen gaat dit zover dat het hergebruik in de ontwikkelde economieën voorziet in het verbruik in de Derde Wereld. Omdat echter de mogelijkheid tot hergebruik beperkt is, moet op het verbruik per hoofd bespaard worden. Naarmate de mogelijkheid bestaat om de materiaalketen verder te sluiten, kan het verbruik per hoofd meer ongemoeid gelaten worden.

Een intensivering van de grondstofproductiviteitstijging ten einde de kosten van de grondstoffvoorziening voor toekomstige generaties beperkt te houden zal niet op een vrije markt tot stand kunnen komen. Hier worden de belangen van toekomstige generaties immers niet of nauwelijks in investeringsbeslissingen meegewogen. Enige vorm van externe sturing is dus noodzakelijk om de grondstoffenschaarste voor toekomstige generaties te mitigeren. Onvermijdelijk rijst daarbij de vraag hoe beperkt de kosten van de grondstoffenvoorziening voor toekomstige generaties gehouden moeten worden. De vermeende *essentialiteit* van het grondstoffenverbruik komt daarbij aan de orde. Het is duidelijk dat het daarbij om een rekbaar begrip gaat. De mate van externe sturing om een duurzame ontwikkeling in gang te zetten is uiteindelijk enkel op subjectieve gronden te bepalen.

5.1 Mogelijkheden voor beleid

Het terugbrengen van het grondstofverbruik per hoofd kan langs verschillende wegen plaatsvinden. Een eerste onderscheid is dat tussen een in essentie technische benadering gericht op de verhoging van de grondstofproductiviteit en een benadering gericht op veranderingen in consumptieve voorkeuren.

De eindige levensduur van produkten leidt er toe dat gegeven een bepaalde inzet van duurzame produktiemiddelen in zowel de produktieve als de consumptieve sfeer een voortdurende vervangingsvraag naar grondstoffen blijft bestaan. Een manier om de vraag naar grondstoffen in te dammen is door de levensduur van de duurzame produktiemiddelen waarin de grondstoffen vervat zijn te verlengen. Dit doel kan bereikt worden door te komen tot produktontwerpen die een langere levensduur van produkten mogelijk maken. Dit kan ondermeer betekenen dat produkten beter afgeschermd worden tegen externe invloeden die de levensduur bekorten. De levensduur van produkten of hun onderdelen kan ook verlengd worden door tijdens de gebruiksperiode de aandacht voor onderhoud en reparatie te intensiveren. Deels is hier in te voorzien door onderhoudsvriendelijke produktontwerpen. Deels kunnen ook institutionele barrières geslecht worden die het veelal arbeidsintensieve onderhoudsproces in de weg staan. Het is bijvoorbeeld opmerkelijk dat het belastingstelsel het afdanken van grondstoffen relatief onbelast heeft gelaten en het verlengen van de gebruiksfase daarentegen wel belast.

Er bestaan nog andere benaderingen gericht op het verhogen van de grondstofproductiviteit. Ter verduidelijking, onder grondstofproductiviteit wordt verstaan de produktie van goederen en diensten waarvoor een grondstof als input wordt gebruikt gerekend per eenheid van die grondstof. De produktiviteit van een grondstof als koper is naast een verlenging van de gebruiksduur op verschillende wijzen te vergroten.

De gebruiksintensiteit van koper is direct van invloed op de koperproductiviteit. Door de gebruiksintensiteit van produkten waarin koper verwerkt is te verhogen wordt gedurende de levensduur van die produkten een groter nut aan die produkten onttrokken. De gebruiksintensiteit is onder andere te verhogen door maatregelen die het gebruik van duurzame produktiemiddelen relatief begunstigen ten opzichte van het bezit ervan. Daarbij kan gedacht worden aan gebruikerspools of aan verhuursystemen.

De koperproductiviteit kan ook verhoogd worden door materiaalbesparing. De technologische ontwikkeling stelt in staat met steeds minder materiaal eenzelfde functie te verrichten. In dit verband moet eveneens de trend naar miniaturisering genoemd worden. Economische prikkels kunnen een rol spelen bij het doorvoeren van materiaalbesparingen.

Ten slotte kan de koperproductiviteit verhoogd worden door substitutie van koper door andere materialen. Bekende voorbeelden zijn de vervanging van koper door aluminium in hoogspanningskabels en in autoradiatoren. Door de technologische ontwikkeling in de substitutiemogelijkheden wordt koper steeds verder teruggedrongen in toepassingen waarin geen alternatieven voorhanden zijn of waarin de alternatieven tot een hogere kostprijs leiden. Een stijging van de koperprijs trekt de marginale koperproductiviteit omhoog.

Het grondstofverbruik per hoofd kan daarnaast teruggebracht worden door een verandering in de consumptieve voorkeuren. Een dergelijke verandering voltrekt zich in de regel in reactie op veranderende schaarste verhoudingen. Het is mogelijk dat verschillen in leefstijl, anders dan voortkomend uit de demografische opbouw of de inkomensverdeling, eveneens van invloed zijn op het grondstofverbruik per hoofd. Mocht dit het geval zijn dan kan men zich afvragen of de keuze voor een bepaalde leefstijl voor beïnvloeding vatbaar is.

Anders dan bij bijvoorbeeld energie is er bij een grondstof als koper geen sprake van directe consumptie. De vraag naar koper is een afgeleide vraag van de goederen en diensten waarvoor het een input vormt. Een koperbesparingsbeleid gedreven door het prijsmechanisme heeft daarom slechts indirect effect op de consumentenvoorkeuren.

Het beperken van de lekverliezen uit de grondstofketen, het realiseren van een zo hoog mogelijk niveau van hergebruik, moet aangrijpen op twee fronten. Ten eerste moet het rendement van de inzameling verhoogd worden. Om dat doel te bereiken dient voorkomen te worden dat bijvoorbeeld koperhoudende produkten voor inzameling verloren gaan. Daartoe staan in principe verschillende mogelijkheden open. Voor diverse produktgroepen kan een prijsprikkel in de vorm van een statiegeldsysteem wat betreft effectiviteit hoge ogen gooien. Ten tweede moet het rendement van de terugwinning zelf verhoogd worden. Dit is hoofdzakelijk een technische kwestie. Het gaat daarbij om een produktontwerp dat de herwinning ook mogelijk maakt. Verder zijn de processen waarmee de herwinning van grondstoffen gerealiseerd wordt voor verbeteringen vatbaar.

Grotendeels kunnen dergelijke maatregelen niet geïsoleerd in een nationale context doorgevoerd worden. Technologische ontwikkeling voltrekt zich in toenemende mate in een mondiale context. Internationale coördinatie en samenwerking zijn op dit terrein onontbeerlijk. Het slechten van institutionele barrières om bijvoorbeeld tot hergebruik of tot langduriger of intensiever gebruik van grondstoffen te komen leent zich daarentegen meer voor een nationale beleidsinitiatieven. Vanwege de mondiale reikwijdte van de problematiek van de grondstoffen-

schaarste draagt een inkadering in een internationale overeenkomst in belangrijke mate bij aan de zinvolheid van dergelijke initiatieven.

De inperking van milieuvervuiling in de mijnbouw is een thema dat als gevolg van de geleidelijke uitputting van armere ertslen steeds belangrijker zal worden. Het is een thema dat met name voor producerende landen telt. Aangezien grondstoffen op grote schaal internationaal verhandeld worden bestaat er een spanning tussen milieudoelstellingen en doelstellingen met betrekking tot handelsbevordering en de daarmee verbonden economische groei. De verweving van milieudoelstellingen in internationale handelsakkoorden zou er aan kunnen bijdragen dat deze spanning in goede banen wordt geleid. Het laat zich aanzien dat deze problematiek, die zich in de onlangs afgeronde Uruguay-ronde in een breder verband al liet voelen, in toekomstige handelsbesprekingen prominent op de agenda zal staan.

5.2 Implicaties van onzekerheid

Op grond van bestaande kennis is het praktisch onmogelijk om gefundeerde uitspraken te doen over de uiteindelijk winbare voorraden van de schaarse metalen. Voor koper zijn deze voorraden zeer waarschijnlijk vele malen groter dan de nu bekende reserves van krap 500 mln ton.

Technische doorbraken zijn bovendien van grote invloed op de economisch winbare reserves. Een sprekend voorbeeld van een dergelijke technische doorbraak is de winning van koper uit porfierafzettingen, die aan het begin van deze eeuw mogelijk werd. Voor die tijd werden deze afzettingen als een geologische curiositeit gezien, thans zijn ze goed voor meer dan de helft van de wereldproductie van koper. Het valt bepaald niet uit te sluiten dat zich ook in de toekomst van deze verrassende ontwikkelingen zullen voordoen.

De geschiedenis van de mijnbouw leert dat door technologische ontwikkeling de winningskosten in de hand zijn gehouden. Door de benutting van steeds armere ertslen hangt een stijging van de winningskosten echter voortdurend in de lucht.

Er is gezien de trend in de vraagontwikkeling van koper met name in delen van de Derde Wereld noodzaak tot aanpassing aan de vraagzijde, niet alleen in de Derde Wereld maar ook in de ontwikkelde economieën. Daartoe zou het wenselijk zijn dat hergebruik, besparing en substitutie worden geïntensiveerd.

Welke consequenties kunnen aan de verschillende scenario's verbonden worden? De onzekerheid over de voorraadsituatie maakt een zekere mate van aanpassing aan de vraagzijde wenselijk. Het beleid op dit gebied staat nog in de kinderschoenen. Daardoor kunnen de komende decaden een aantal betrekkelijk pijnloze successen behaald worden. Het milieutechnologiebeleid kan verder uitgebouwd worden. Verwacht mag worden dat een dergelijk beleid zijn vruchten kan afwerpen voor de mate waarin het hergebruik tegen commerciële voorwaarden gerealiseerd kan worden.

Uit de scenario's komt naar voren dat een hoge mate van hergebruik een matigende invloed uitoefent op scherp gestegen winningskosten. Het bevorderen van hergebruik kan dus gezien worden als een verzekeringspremie tegen ernstige schaarste. Het hoeft bij de bevordering van hergebruik niet te blijven bij louter technologiebeleid. De introductie van een beleidsmatig ondersteunde restwaarde kan een heilzame invloed op het hergebruik uitoefenen. Een dergelijk instrument is ook vanuit een afvalbeleid te ondersteunen.

Ook substitutietechnologie verdient aandacht. De mogelijkheden van substitutie zijn reëel. De toepassing van koper spitst zich bijvoorbeeld meer en meer toe op de geleiding van elektriciteit. Het in geologisch opzicht veel minder schaarse aluminium vormt een alternatief voor deze toepassing van koper, hoewel de substitutie van koper door aluminium op veel fronten

vooral nog wordt verhinderd door een serie technische nadelen. In menig opzicht is hier sprake van een onvoldoende ontwikkelde technologie. Het onderzoek gericht op het vergroten van de gebruiksmogelijkheden van aluminium voor elektrische toepassingen is in potentie een van de belangrijkste bijdragen aan het voorkomen van een ernstige koperschaarste.

5.3 De zin van de onderscheiden handelingsperspectieven

Vanwege de lange termijn onzekerheden, die op het gebied van de exploitatie en het verbruik van schaarse metalen bestaan, is het hanteren van min of meer formele scenario's, waarin juist door de bestaande onzekerheid op een aantal punten empirische validatie achterwege moet blijven, gerechtvaardigd. Zonder dat de gepresenteerde invulling van de verschillende grootheden een absolute waarde kan worden toegedicht, geeft de gehanteerde methode wel de gelegenheid om de dimensies van de problematiek te verkennen en in hun consequenties te doordenken.

De onzekerheid geeft aanleiding tot het ontwikkelen van sterk verschillende concepties van duurzaamheid. Vooral ten aanzien van maatschappelijke veranderingen zoals hergebruik, productiviteit en verbruik zijn de marges groot. Dat illustreert het belang van politieke keuzen en de verantwoordelijkheid van de wetenschap om materiaal en inzichten aan te dragen waarop normatieve risico's en de bestaande wetenschappelijke onzekerheid beter beoordeelbaar worden.

A.1 EEN MODELLERING VAN DE WINNINGSKOSTEN

Ondanks de afnemende ertsgehalten zijn de kosten van de koperwinning niet noemenswaardig gestegen. De voorwaarden voor de winning zijn aanmerkelijk verslechterd maar dankzij de technologische ontwikkeling in de mijnbouw konden typen voorkomens benut worden waarvan de exploitatie voorheen buiten het bereik van de mogelijkheden lag. De benutting van de schaalgrootte van met name de porfierafzettingen is een belangrijke factor geweest in het laag houden van de winningskosten.

Het is niet eenvoudig uitspraken te doen over de ontwikkeling van de winningskosten op lange termijn. Ooit zullen ook de typen voorkomens waar de huidige mijnbouw zich op concentreert uitgeput raken. De exploitatie zal dan gericht moeten worden op in de huidige optiek ongunstiger voorkomens. Gedacht kan worden aan de exploitatie van mangaanknollen op de bodem van de oceaan, maar evenzeer aan voorkomens op grotere diepte of met lagere ertsgehalten. Het is niet uit te sluiten dat de technologische ontwikkeling een ingang zal bieden om ook dit soort voorkomens tegen beperkte kosten aan de oppervlakte te halen. Het is echter wel duidelijk dat de geofysische obstakels voor de winning steeds groter zullen worden.

Er mag van uitgegaan worden dat de technologische ontwikkeling de winning van koper ook onder sterk verslechterde winningsomstandigheden nog lange tijd mogelijk zal maken. Het is plausibel dat daarbij de inzet van energie zal stijgen. Ook is niet uit te sluiten dat verzwaarde winningscondities een rem zetten op de ontwikkeling van de arbeidsproductiviteit. Zowel energie als arbeid zullen naar de gangbare inschatting in de toekomst kostbaarder worden, energie in verband met een vergelijkbare schaarsteproblematiek en bovendien in verband met de kosten van een toenemend milieubeslag, arbeid in verband met de stijgende welvaart en de stijgende arbeidsproductiviteit in andere sectoren. Uiteraard zal ook in de mijnbouw de tendentie van stijgende efficiënties van de inzet van arbeid en energie voortgang vinden, maar of daardoor op den duur per saldo de arbeidsproductiviteit en de energieintensiteit van de mijnbouw nog zullen stijgen respectievelijk dalen is onzeker.

In het licht van deze opmerkingen is het voorstelbaar dat de 'opportunity costs' van de delfstofwinning in de toekomst zullen stijgen. De technologische ontwikkeling in de mijnbouw kan tekort schieten om bepaalde geofysische obstakels in dit opzicht te neutraliseren.

In deze appendix wordt een model gepresenteerd van de winningskosten van een mineraal als koper. Het model bestaat uit twee delen, een beschrijving van de spreiding van het mineraal over de aardkorst en een relatie tussen de winningskosten van een bepaald voorkomen en de kenmerken van dat voorkomen.

Er wordt een formele beschrijving gegeven van het voorkomen van het mineraal in de aardkorst. Vanwege de globale schaal waarop dit voorkomen wordt beschouwd betreft het een abstracte benadering van de verdeling van het mineraal over de aardkorst. Er is met name geabstraheerd van meer gedetailleerde geologische inzichten over de vorming en de concentratie van mineralen. De beschrijving is ontleend aan De Wijs en Brinck³⁸. Het gaat in essentie om een beschrijving van de verdeling van ertsgehalten in verschillende voorkomens met behulp van een logbinomiaal model. De merites van deze beschrijving staan ter discussie. De validatie van deze beschrijving over een breed domein van ertsgehalten is nagenoeg ondoenlijk. De beschrijving kan daarom slechts als een werkhypothese geadopteerd worden. Er ligt een eenvoudige redenatie over het ontstaan van mineralen aan de beschrijving ten grondslag.

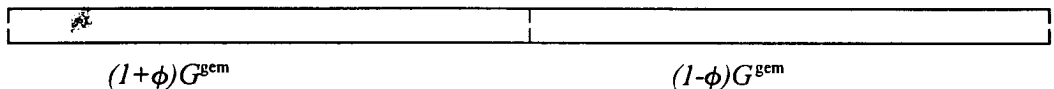
³⁸ D.P. Harris, *Mineral resources appraisal*; Oxford, Clarendon Press, 1984.

De relatie tussen winningskosten en kenmerken van voorkomens is geënt op technisch-economische expertise. De kosten zijn herleid op algemene kenmerken als gehalte, schaal van het voorkomen en bereikbaarheid. De Vries³⁹ hanteert een soortgelijke kostenfunctie. Ook hier geldt dat over het brede domein van ertsgehalten, dat in beschouwing genomen wordt, de empirische basis ontbreekt. De kwantitatieve specificatie van dergelijke kostenfuncties is wel verricht over het gangbare bereik van ertsgehalten⁴⁰. De mogelijke gevolgen van technologische vooruitgang blijven in deze analyses buiten zicht.

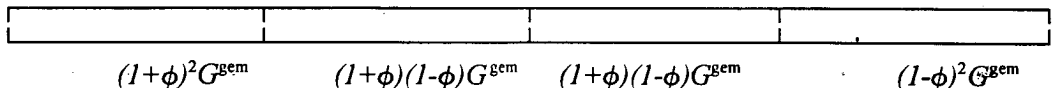
De interpretatie van de winningskosten gaat in verband met de toepassing in hoofdstuk 4 in de richting van 'opportunity costs'.

De verdeling van ertsgehalten

Voorkomens van een schaars metaal als koper worden onder andere getypeerd door hun ertsgehalte. Over de verdeling van het koper in de aardkorst naar ertsgehalte kunnen veronderstellingen gemaakt worden. De veronderstelling van een logbinomiale verdeling voor het voorkomen van koper voert zoals gezegd terug op de Wijs en Brinck. Aan deze verdeling ligt een eenvoudig schema voor de verspreiding van koper door de aardkorst ten grondslag. Het ontstaan van minerale voorkomens is gemodelleerd als een sequentie van geologische gebeurtenissen, waarbij steeds een gedeelte van de aardkorst verrijkt wordt ten koste van een verarming van een ander gedeelte. Het schema werkt als volgt. Als G^{gem} het gemiddeld kopergehalte van de aardkorst voorstelt, is na een eerste gebeurtenis de helft van de aardkorst verrijkt tot $(1+\phi)G^{gem}$ en de andere helft verarmd tot $(1-\phi)G^{gem}$. Hier stelt ϕ de specifieke mineralisatiecoëfficiënt voor.



In de volgende stap (geologische gebeurtenis) worden beide gedeelten van de aardkorst in tweeën gedeeld en op hun beurt weer verrijkt en verarmd.



Na β stappen is de aardkorst verdeeld in 2^β blokken. Een blok kan geïnterpreteerd worden als een mineraal voorkomen. Het ertsgehalte G_k in de blokken varieert volgens

$$G_k = (1+\phi)^{\beta-k}(1-\phi)^k G^{gem}$$

De kans dat een blok $\beta-k$ maal verrijkt is en k maal verarmd volgt een binomiale verdeling $B(\beta, 0.5)$.

³⁹ H.J.M. de Vries, *Sustainable resource use, An enquiry into modelling and planning*; Groningen, Proefschrift RUG, 1989.

⁴⁰ Zie bijvoorbeeld: P. Foley and J. Clark, "US copper supply: An economic/engineering analysis of cost-supply relationships", *Resources Policy*, 1981(3), pp. 171-187.

Als een blok met een aardmassa S_i een ertsgehalte G_i heeft en de massa van de aardkorst tot op mijnbare diepte M bedraagt, is de hoeveelheid koper m die de aardkorst bevat

$$m = \sum_{i=1}^{2^\beta} G_i S_i$$

$$= G^{gem} \frac{M}{2^\beta} \sum_{k=0}^{\beta} \binom{\beta}{k} (1+\phi)^{b-k} (1-\phi)^k$$

Ook kan nu geconcludeerd worden dat het kopergehalte van de aardkorst een logbinomiale verdeling volgt. De gehalten van de verschillende blokken lopen immers factorgewijs op. Evenzeer geldt dat de logarithme van de kopergehalten $\log(G_k)$ volgens deze redenering binomiaal verdeeld is.

$$\text{Prob}(\log(G_k) - \log(G^{gem}) =$$

$$\beta \log(1-\phi) + k [\log(1+\phi) - \log(1-\phi)]) =$$

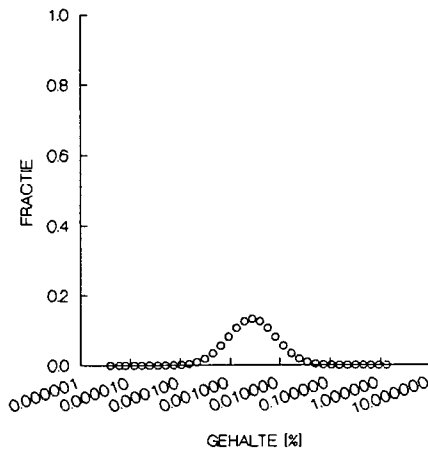
$$\binom{\beta}{k} \frac{1^k}{2} \frac{1^{\beta-k}}{2}$$

De verdeling van de ertsgehalten is conditioneel op het aantal partities β . Aangezien een blok wordt geïnterpreteerd als een mineraal voorkomen, bepaalt β de schaal S van het voorkomen. Voor deze schaal geldt

$$S = \frac{M}{2^\beta}$$

Voor iedere schaal is dus een andere verdeling gegeven. Bij kleinere schaalgroottes loopt de verdeling over een breder domein van ertsgehalten. Naarmate er meer partities in beschouwing worden genomen en de schaalgrootte van voorkomens kleiner wordt, neemt ook het aantal minerale verrijkingen toe. Dat betekent dat naarmate de schaalgrootte kleiner is, de verdeling zich uitstrekt over hogere ertsgehalten.

Figuur 4.23 Verdeling van ertsgehalten bij $\beta=36$



Bron: WRR

Winningskosten

Een gebruikelijke veronderstelling voor de ontwikkeling van de winningskosten is dat de voorkomens met de laagste winningskosten het eerst in exploitatie genomen worden. Uitgaande van deze exploitatievolgorde kan gesproken worden over de winningskosten C_e als functie van de cumulatieve extractie E .

Onder de winningskosten C_e worden de winningskosten van de marginale extractie verstaan. Deze kosten zijn in principe afhankelijk van de geo-fysieke kenmerken van het minerale voorkomen waarop de marginale extractie zich concentreert. Een aantal karakteristieken van een voorkomen zijn bepalend voor de winningskosten. Voorop staan daarbij het ertsgehalte G en de schaal S van het voorkomen. Daarnaast maakt het onder andere voor de winningskosten uit wat de 'stripping rate' is. Deze hangt samen met de grondverplaatsing die noodzakelijk is om de erts naar boven te halen. Ook is voor de winningskosten van belang of de winning in dagbouw of ondergronds plaatsvindt. Deze laatste factoren hangen samen met de bereikbaarheid van de erts. Voor de afleiding van de winningskosten is er van uitgegaan dat de factor bereikbaarheid benaderd kan worden door de diepte waarop de erts zich bevinden. Naarmate de winning op groter diepte plaatsvindt nemen de winningskosten toe.

Bovendien is aangenomen dat de kans op een voorkomen van een bepaald gehalte op elke diepte even groot is.

Een bruikbare kostenfunctie voor de winningskosten van een mineraal voorkomen is

$$C_e = c_{ref} \left(\frac{G_{ref}}{G} \right)^\lambda \left[-m_1 \left(\frac{G}{G_{ref}} \right)^\nu \left(\frac{S}{S_{ref}} \right)^\gamma + m_2 \left(\frac{D}{D_{max} - D} \right)^\omega \right]^\pi$$

met $m_1, m_2 > 0$

Hierin zijn referentiewaarden voor gehalte, schaal en initiële winningskosten opgenomen. Er is een maximum D_{max} aan de winningsdiepte D gesteld. De parameters λ , ν , γ , ω en π hebben alle een positieve waarde.

Voor elke gehalteklasse G_k , $k=0,1,\dots,\beta$, is bij een bepaald kostenniveau c^0 een diepte D_k^0 te bepalen, waarop de winningskosten gelijk aan dit kostenniveau zijn. De cumulatieve extractie tot dit kostenniveau E^0 is

$$E^0 = \sum_{k=0}^{\beta} \frac{D_k^0}{D_{\max}} X_k$$

$$X_k = \binom{\beta}{k} G_k S$$

De inverse van de relatie tussen een bepaald kostenniveau en de cumulatieve extractie tot dit kostenniveau is de winningskostenkromme $Ce(E)$.

Kwantitatieve uitwerking

Ter illustratie van het voorgaande en ten behoeve van de scenario's die in hoofdstuk 4. zijn uitgewerkt, worden hier twee rekenvoorbeelden van de winningskostenfunctie gegeven. Er zij nogmaals op gewezen dat de empirische basis van deze voorbeelden beperkt is. Andere keuzen voor de parameterwaarden leiden tot verschillende resultaten.

De hier gehanteerde waarde van de verrijgingscoëfficiënt $\phi=0,18$ hangt samen met een aantal gegevens zoals het gemiddelde kopergehalte van de aardkorst, het kopergehalte in voorkomens die in exploitatie genomen zijn en de schaal van die voorkomens.

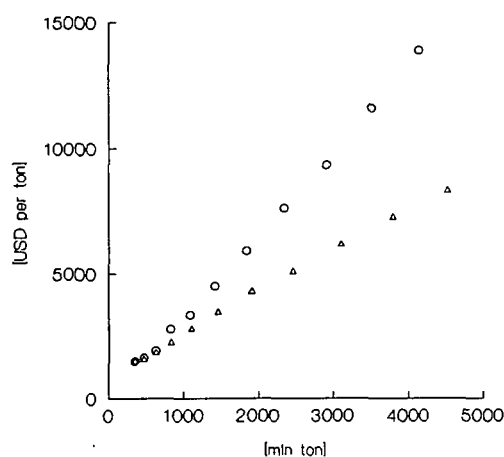
Het aantal verrijkingen β legt in modeltermen de schaal van het voorkomen vast. Bij een keuze voor een waarde van de verrijgingscoëfficiënt legt β ook het hoogste gehalte bij een dergelijke schaal vast. Naarmate de schaal kleiner wordt, neemt het hoogste gehalte toe. In werkelijkheid kunnen kopergehalten tot 10 procent voorkomen. De meeste rijke voorkomens van enige omvang hebben echter gehalten in de orde van 2 procent. Voor de referentie schaalgrootte is aangehouden $S_{\text{ref}}=15$ mln ton. Daarmee correspondeert een waarde van $\beta=36$. Maar ook hogere en lagere waarden van β kunnen relevant zijn.

De keuze van de verrijgingscoëfficiënt legt ook een verband tussen de omvang van de koperreserves en het minimale kopergehalte van deze reserves. Door het Bureau of Mines wordt een cijfer voor de uiteindelijk winbare koperreserves in de orde van 1800 mln-ton gegeven. Onder de huidige economische omstandigheden zijn voorkomens met gehalten tot circa 0,2 procent in exploitatie genomen.

Voor het gemiddeld kopergehalte van de aardkorst wordt een waarde van $G^{\text{scm}}=0,005$ procent gegeven. Voor de massa van de continentale aardkorst tot een maximaal mijnbare diepte van $D_{\max}=2000\text{m}$ wordt $M=10^{18}$ ton aangehouden.

In 1990 bedroeg de cumulatieve productie van koper circa 350 mln ton. De winningskosten lagen in 1990 niet hoger dan 1500 USD per ton. Deze gegevens zijn gebruikt als startwaarde voor de winningskosten curve, dat wil zeggen $c_{\text{ref}}=1500$ en $Ce(350)=1500$. De gebruikte parameterwaarden zijn: $m_1=0,5$, $m_2=1,5$, $\lambda=0,75$, $\gamma=0,75$, $\nu=2,50$, $\pi=1,25$ en $\omega=0,75$ voor de hoge kosten variant en $\omega=0,50$ voor de lage kosten variant. Om aan de startwaarde te voldoen is het referentie ertsgehalte genormeerd. Bij een waarde van $\beta=36$ neemt in de hoge kosten variant het referentiegehalte een waarde $G_{\text{ref}}=2,9$ procent aan en in de lage kosten variant een waarde $G_{\text{ref}}=1,2$ procent. In de onderstaande figuur zijn beide varianten van de winningskosten weergegeven.

Figuur 4.24 Winningskosten van koper;
hoge en lage kosten variant



Bron: WRR

De gekozen functionele vorm impliceert bij een constante schaal een monotone stijging van de winningskosten. Zoals al eerder opgemerkt is in werkelijkheid geen sprake van stijgende winningskosten. Deels heeft de vooruitgang in de winningstechnologie de achteruitgang in de winningscondities kunnen compenseren, deels heeft de schaalvergroting hiervoor zorg gedragen. Het effect van schaalvergroting op de winningskosten is met de gekozen functionele vorm te illustreren. Technologische vooruitgang, voorzover van invloed op de relatie tussen gehalte en bereikbaarheid enerzijds en de winningskosten anderzijds is niet gemodelleerd. Ook is geen expliciete aandacht geschonken aan de kosten van exploratie.

De afgelopen 150 jaar is 350 mln ton koper gedolven. De winningskosten in de bovenstaande figuur hebben betrekking op een cumulatieve productie die oploopt tot meer dan tien maal deze historische productie en ook tot duidelijk meer dan de uiteindelijk winbare koperreserves waarvan een schatting door het Bureau of Mines is gegeven. De implicatie van de figuur is dat dit koper ook winbaar is, zij het tegen kosten die ten opzichte van de huidige winningskosten meer dan vijf tot tien keer zo hoog liggen.