

Het verband tussen afval-arme methoden en energiegebruik bij de winning van minerale grondstoffen (toegepast op koperwinning uit Duluth gabbro, Minnesota, VS)

Citation for published version (APA):

Lambert, A. J. D., & Marijnissen, J. C. M. (1988). *Het verband tussen afval-arme methoden en energiegebruik bij de winning van minerale grondstoffen (toegepast op koperwinning uit Duluth gabbro, Minnesota, VS)*. (EUT - BDK report. Dept. of Industrial Engineering and Management Science; Vol. 31). Technische Universiteit Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1988

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Het verband tussen afval- arme methoden en energiegebruik bij de winning van minerale grondstoffen

(Toegepast op koperwinning uit Duluth gabbro, Minnesota, VS)

door

A.J.D. Lambert

J.C.M. Marijnissen

HET VERBAND TUSSEN AFVAL-ARME METHODEN EN
ENERGIEGEBRUIK BIJ DE WINNING VAN MINERALE
GRONDSTOFFEN

(Toegepast op koperwinning uit Duluth gabbro,
Minnesota, VS)

door

A.J.D. Lambert
J.C.M. Marijnissen

Report EUT/BDK/31
ISBN 90-6757-031-1
Eindhoven 1988

Eindhoven University of Technology
Department of Industrial Engineering and
Management Science
Eindhoven, Netherlands

CIP-gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag.

Het verband tussen afval-arme methoden en energiegebruik bij de winning van minerale grondstoffen:

(toegepast op koperwinning uit Duluth-gabbro, Minnesota, V.S.)/

door A.J.D. Lambert en J.C.M. Marijnissen. - Eindhoven:

Eindhoven University of Technology,

Department of Industrial Engineering and Management Science. - Fig. -

(EUT report / Eindhoven University of Technology,

Department of Industrial Engineering & Management Science ; BDK/31)

Met lit. opg.

ISBN 90-6757-031-1

SISO 643 UDC 620.9:622.2

Trefw.: mijnbouw; energie-analyse.

1. Inleiding.

De primaire winning van minerale grondstoffen heeft ingrijpende gevolgen voor het milieu in de vorm van aantasting van het oorspronkelijke landschap en het vrijkomen van diverse schadelijke stoffen. Voorts zijn minerale grondstoffen in meerdere of mindere mate gevoelig voor uitputting, hetgeen onder meer inhoudt dat steeds armere voorkomens moeten worden geëxploiteerd. Factoren van geografische, klimatologische, infrastructurele en strategische aard zijn ervoor verantwoordelijk dat de uitputting eerder manifest wordt dan strikt op grond van de aanwezige wereldvoorraden het geval zou zijn.

Een snelle technologische ontwikkeling gedurende de afgelopen decennia, zoals in de dagbouw en in de verrijkingstechniek, heeft de rendabele benutting van steeds armere en moeilijker winbare voorkomens mogelijk gemaakt. Toch is het waarschijnlijk dat bij een aantal mineralen de offers die voor de winning van een eenheid ervan moeten worden gebracht in de nabije toekomst zullen toenemen [1], [2]. Een bijkomend aspect van de winning van armere ertsen is de steeds aangroeiende stroom reststoffen, zowel schadelijke als inerte. Het valt te verwachten dat de technologische vooruitgang het in toenemende mate aantrekkelijk zal maken om deze reststoffen - geheel of gedeeltelijk - als nuttige grondstof te gebruiken. Dit kan de aantasting van het milieu beperken en uitputting van grondstoffen vertragen. Bovendien levert het gebruik van reststoffen economisch rendement op waardoor dan - bij een gegeven stand van techniek - de winbare voorraden worden vergroot. Het concept van volledig hergebruik van reststoffen vindt men o.a. beschreven in [3]. Bovengenoemde beschouwingen zijn eveneens van toepassing op de winning van fossiele energiedragers en uraan.

Voor winning, vrijmaking en zuivering van minerale grondstoffen zijn vaak grote hoeveelheden energie nodig. Doordat men zijn toevlucht tot steeds armere ertsen moet nemen, zal het specifieke energiegebruik per eenheid zuivere grondstof een toenemende tendens vertonen, een effect dat getemperd wordt door de technologische vooruitgang. Nuttig gebruik van reststoffen draagt de mogelijkheid in zich van energiebesparing. De verwerking van reststoffen kost echter òòk energie. Dit maakt het interessant om de energie die vereist is om een eenheid produkt uit reststoffen te maken, te vergélijken met de energie die nodig is om hetzelfde produkt als hoofdprodukt te verkrijgen.

Deze studie kan tevens worden gezien als een voorstudie voor de ontwikkeling van een mathematisch model voor het nuttig gebruik van reststoffen. In dit kader is een praktijkgeval bestudeerd waarvan voldoende gegevens voorhanden waren om er een energie-analyse op uit te voeren teneinde te onderzoeken of winning van bijprodukten oock energetisch voordelen biedt in de huidige situatie.

In deze analyse maken we gebruik van de volgende termen: Een primaair produktieproces is een produktieproces waarbij grondstoffen uit natuurlijke hulpbronnen worden bereid. Het hoofdproces is het primaair produktieproces van de materialen waarvoor de betreffende winning oorspronkelijk is opgezet. De hoofdprodukten vertegenwoordigen (qua hoeveelheid en/of prijs) de hoogste marktwaarde. Zij doorlopen het grootste gedeelte van het hoofdproces. Van co-produktie wordt gesproken as er meerdere hoofdprodukten zijn. Bij het hoofdproces komen tal van reststoffen vrij: Schadelijke stoffen, zwak-schadelijke of inerte bulkstoffen en reststoffen waaruit nog waardevolle materialen kunnen worden gewonnen. Het verwerken van de schadelijke reststoffen tot nuttige produkten noemen we waste-recovery. Voorop staat hierbij het opheffen van de schadelijkheid van het betreffende afval c.q. het

vermijden van hoge opslagkosten. Het verwerken van de reststoffen, primair gericht op het verkrijgen van waardevolle materialen, noemen we by-product recovery. De bedoelde produkten noemen we bijprodukten, de daarvoor benodigde processen bijprocessen. Indien men uit de reststoffen ook bulkprodukten wint, begeeft men zich op het pad van afvalarme winningsmethoden in de richting van total-recovery. Toenemende schaarste, technologische ontwikkeling en scherpe milieueisen zijn de drijvende krachten die het gebruik van reststoffen gaandeweg aantrekkelijker kunnen maken. Daarom is het noodzakelijk om de mogelijkheden hiertoe intensief te bestuderen.

2. Hoofdpijnen.

Indien men de primaire winning van minerale grondstoffen vanuit bovenstaande optiek beschouwt, zijn de volgende stappen in elk geval noodzakelijk:

1. Gedetailleerde mineralogische analyse van het ertsvoorkomen.
2. Ontwerp en optimalisering van het hoofdproces. Kosten/baten analyse.
3. Opstellen van de massabalans voor het hoofdproces.
4. Onderzoek naar mogelijkheden voor waste-recovery, by-product recovery en total-recovery. Hiertoe behoort marktonderzoek, eventueel speurwerk naar nieuwe toepassingen en produkten, onderzoek naar bijprocessen en eventueel onderzoek naar nieuwe processen.
5. Optimaliseren van de bijprocessen, kosten/baten analyse.
6. Opstellen van de massabalans voor de bijprocessen.

De studie concentreert zich op het opstellen van de energie-analyse voor hoofdproces en bijprocessen. Voor de bijprocessen wordt de uitkomst ervan getoetst aan de energie die nodig is voor het verkrijgen van produkten op conventionele wijze.

Als werkveld wordt de Duluth gabbro afzetting in de staat Minnesota, VS, geanalyseerd, waarover een uitgebreide literatuur bestaat (zie [3] en de referenties daarin). Het betreft een ertsvoorkomen dat naar schatting 28.000.000 t Cu en 8.000.000 t Ni, en verder o.a. nog Co bevat. Het erts kan deels ondergronds en deels in dagbouw ontgonnen worden. In analogie met Marijnissen [3] wordt voor de verdere studie een open-pit model beschouwd waarbij het erts 0,494% Cu en 0,114% Ni bevat. Winning van dit Ni is slechts rendabel als ook het Cu gewonnen

wordt. Het in het Duluth gabbro voorkomend Ni vormt een aanzienlijk deel van de huidige Ni-voorraden in de VS [4]. Om een idee te krijgen over de hoeveelheid Co zij vermeld dat een bepaald ertsmonster 0,027% Co bevat.

Voor wat betreft de winning in de VS vertoont het Cu uitputtingsverschijnselen. Van het in de VS Ni moet het merendeel in de VS worden ingevoerd. Primair Co wordt in de VS vrijwel niet gewonnen. Opmerking: In deze studie wordt met 't' of 'ton' altijd metrische ton bedoeld. Als het vermogen in kWhe opgegeven is, wordt zuiver elektrisch vermogen bedoeld. Vermogen uit fossiele brandstof wordt in kWht uitgedrukt. Indien elektrisch vermogen naar haar brandstof-equivalent moet worden omgerekend, wordt hier een centrale-rendement van 33% in rekening gebracht, zodat:

$$1 \text{ kWhe} = 3 \text{ kWht}$$

3. Het productieproces.

3.1. Mogelijke hoofdprodukten.

Koper: Omstreeks 1980 was de gemiddelde ertsgraad bij de kopermijnen in de wereld gedaald tot 1,15%. In de VS verliep de daling sneller, van 0,92% in 1940 via 0,76% en 0,6% in 1960 resp. 1970 tot 0,5% omstreeks 1980 ([1,5]). De wereldproductie van primair Cu bedroeg in 1982 8.283.000 t (Cu-inhoud van het gedolven erts). De cut-off grade (het gehalte waarbeneden geen economische exploitatie mogelijk is) werd rond 1975 gesteld op 0,35% en rond 1980 op 0,3% [1]. Voor de VS bedroeg de produktie 1.150.000 t/jr in 1986.

Nikkel: De Ni-ertsen die tegenwoordig gewonnen worden hebben, over de gehele wereld gezien, een Ni-gehalte van 0,5-3% [1], voor de VS bedroeg in 1970 het gemiddeld Ni-gehalte 1,4% [6]. De Ni-inhoud van het gedolven erts bedroeg in 1981: 692.000 t in de wereld en 11.000 t in de VS. De laatste hoeveelheid vertoont een sterk afnemende trend [7] en komt overeen met 7% van de binnenlandse consumptie. Aanbevolen wordt daarom om over te gaan tot exploitatie van het Ni in Duluth gabbro om de Ni-productie in de VS te verzekeren. De cut-off grade voor Ni-erts bedroeg in 1975 ongeveer 0,9%. [2]

Cobalt: Dit wordt voornamelijk gewonnen als bijproduct bij de winning van andere metalen, waaronder Ni en Cu. De primaire consumptie van Co in de niet-socialistische wereld vertoont een sterk stijgende tendens (17.000 t in 1984 en 23.000 t in 1986). In de VS bedroeg ze in 1978 ongeveer 6.500 t, voornamelijk door import verkregen, en ze is vrijwel constant. Voor de cut-off grade voor Co wordt 0,2% opgegeven.

De marktprijzen (1987) bedragen bij benadering: Voor Cu: \$ 1710/t, voor Ni: \$ 4950/t, voor Co: \$ 4000/t. De metalen Cu, Ni, Co worden genoemd omdat ze in sommige studies over de Duluth gabbro [4] als hoofdprodukten worden beschouwd. We merken op dat co-productie de winbare voorraad aan grondstoffen doet toenemen: Ni en Co waren afzonderlijk niet economisch winbaar uit Duluth gabbro. Hun afzonderlijk aandeel ligt ver beneden de cut-off grade.

3.2. Het hoofdproductieproces en haar massastromen.

Het hoofdproces is zodanig ingericht dat Cu en Ni de hoofdprodukten zijn [8]. De globale volgorde van de bewerkingen is weergegeven in fig.1. Het hoofdproces wordt onderverdeeld in delven, concentreren, smelten en raffineren. Genoemde bewerkingen vinden op verschillende locaties plaats en onderscheiden zich voorts door de massastromen die de processen doorlopen. Het gecombineerde Cu,Ni-winningsproces werd vereenvoudigd ten behoeve van de bepaling van de energiestromen (fig.2). Een gedetailleerde massabalans is gegeven in fig.3, waarbij gebruik gemaakt is van [3,9,10]. In de massabalans wordt geen rekening gehouden met de kapitaalgoederen. De systeemgrens wordt zoveel mogelijk om het productieproces in engere zin gelegd. Zo wordt bijvoorbeeld de benodigde ruimteverwarming van fabrieken e.d. niet meegerekend. De massa's zijn omgerekend naar 1 t (metrische ton) gewonnen zuiver Cu.

3.2.1. Het delven.

De winning geschiedt in dagbouw. Per eenheid eindprodukt dient een hoeveelheid losse deklaag en een hoeveelheid vast gesteente te worden verwijderd, terwijl ook grondwater moet worden opgepompt om de mijn

droog te houden. Voor het losbreken van gesteenten, waaronder erts, is springstof nodig, waarvan het grootste gedeelte ANFO (ammoniumnitrate-fuel oil mix) kan zijn. Ten behoeve van het schieten moeten gaten worden geboord. De losgeschoten brokken gesteente moeten soms nog tot kleinere brokken worden gereduceerd, teneinde ze met laadschoppen in zware vrachtwagens te kunnen laden. Deze brengen het steriele gesteente en het laagwaardig erts naar dumpplaatsen, en vervoeren het erts naar de concentrator. Een belangrijke grootheid bij het delven is de stripping-ratio (ook: waste-to-ore-ratio), gedefiniëerd als de verhouding tussen de massa van het steriele gesteente en die van het erts. Zij bedraagt in het hier behandelde voorbeeld $307/236 = 1,3$. (Zie fig. 1).

Verschillende bewerkingen in de mijn doen stof vrijkomen.

3.2.2. Het concentreren.

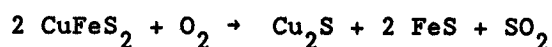
In de concentrator worden de brokken erts in kaak- en kegelbrekers gebroken tot deeltjes met een middellijn in de orde van 0,5 cm en kleiner. Het gebroken erts wordt samen met water aan de kogelmolens toegevoerd. Deze vermalen de deeltjes verder tot kleiner dan ca. 0,2 mm. Aan de molens wordt vaak ook kalksteen toegevoerd, dat een rol speelt bij het op het malen volgende flotatieproces. Daarnaast moeten de molens regelmatig van nieuwe maalkogels worden voorzien, teneinde de wegslijtende kogels aan te vullen. De pulp gaat vanuit de molens naar de flotatietanks. Daar worden chemicaliën toegevoegd. Lucht wordt doorgeblazen en de deeltjes met Cu- of Ni-sulfide aan hun oppervlak hechten zich aan de luchtbellen en worden naar boven gevoerd. Zij vormen het concentraat, dat op deze manier van de restfractie, voornamelijk bestaande uit ganggesteente, gescheiden wordt. Deze

restfractie vormt de tailings. Het concentraat bevat in het beschreven geval 13% Cu en 2,4% Ni. Uiteraard is ook in de tailings nog een restfractie Cu en Ni aanwezig die in principe verloren gaat. In verdere processen verdwijnt nog meer Cu en Ni via de reststoffen. Het percentage Cu of Ni, dat van de totaal aanwezige hoeveelheid daadwerkelijk gewonnen wordt, heet de recovery. Voor het totale hoofdproces bedraagt deze hier voor koper 85,7% en voor nikkel 66,9%. Het concentraat wordt, door middel van een indikkings- en een filtratieproces ontwaterd en daarna soms thermisch gedroogd.

3.2.3. Het smelten.

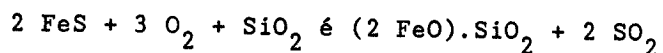
Vervolgens vinden, in de smelter, de volgende bewerkingen plaats: roosten, smelten, concentreren.

Bij het roosten, dat overigens lang niet altijd toegepast wordt, verhit men het concentraat tot 900 °C onder toevoer van lucht. Een wezenlijke reactie voor het kopermineraal chalcopyriet is:



De ontstane massa wordt gesmolten, b.v. in een zgn. reverberatory furnace. Wanneer men slechts met de winning van koper te maken heeft gebeurt het volgende: Kalk en silica flux wordt toegevoegd om zich met een deel der verontreinigingen te binden tot een slak die voornamelijk bestaat uit ijzeroxiden en -silicaten. Deze slak komt bovendrijven op het mengsel van koper-nikkel en ijzersulfiden, de matte. Zij wordt van de matte gescheiden en afgevoerd terwijl de matte naar de converter gaat. Hier wordt opnieuw silica toegevoegd en tevens een krachtige

luchtstroom door de smelt geblazen, waarbij de volgende reacties dominant zijn:



Er ontstaat nu vrij Cu. De converterslak, die veel Cu bevat, wordt naar de smeltoven teruggevoerd. In het hier beschreven geval echter hebben we te maken met een hoog nikkelgehalte, reden waarom een verwerkingsmethode wordt gevolgd die afwijkt van de gebruikelijke gang van zaken. Het smelt/conversie procedé verloopt in twee stappen met daartussen een scheidingsproces. Na de eerste maal converteren laat men namelijk de matte uitkristalliseren in de vorm van koper- en nikkelsulfiden en een Cu-Ni legering. De laatste kan, na granulatie, via magnetische separatie worden afgescheiden en wordt daarna langs elektrolytische weg verder verwerkt. De koper- en nikkelsulfiden worden, na malen, in een flotatieproces gescheiden. De Ni- en Cu-sulfiden doorlopen vervolgens gescheiden hun weg, en worden opnieuw geroost, gesmolten en geconverteerd. Het eindprodukt van de Cu-conversie is blisters koper met een verontreinigingsgraad in de orde van 1,5%. Er wordt van uitgegaan dat het proces voor nikkel bij benadering op dezelfde wijze verloopt als voor koper. Het proces kan dan naar koper worden omgerekend. Na de tweede conversie ondergaan zowel het koper als het nikkel een bewerking die 'fire-refining' genoemd wordt. Opnieuw wordt daartoe het bad in contact met lucht gebracht. De in de lucht aanwezige zuurstof oxideert het overgrote deel der resterende verontreinigingen, die een slak vormen dan wel in gasvormige toestand verdwijnen. Op het einde van dit proces

wordt aardgas of propaan doorgeblazen (of vers hout ingebracht) om het eventueel geoxideerde koper weer te reduceren ('poling').

3.2.4. De elektrolytische raffinage.

Het aldus geraffineerde Cu heeft een zuiverheidsgraad van 99,5% en is reeds geschikt voor een aantal toepassingen op werktuigbouwkundig gebied. Voor elektrotechnische toepassingen dient het echter zuiverder te zijn, hetgeen wordt bereikt door middel van elektrolytische raffinage. Hiertoe is zwavelzuur vereist. Een deel van het anode- en kathode-afval wordt naar de anode-oven teruggevoerd. Zouten(sulfaten) en anodeslib vormen de bijprodukten van de elektrolytische raffinage.

3.3. De nevenprocessen en hun massastromen.

Uit de massabalans van fig.3 blijkt welke bijprodukten en afvalstoffen bij de winning en raffinage van het Cu/Ni-houdend Duluth gabbro ontstaan. Aangegeven zijn daarbij de stoffen die in het milieu terecht kunnen komen omdat ze onschadelijk zijn, dan wel moeilijk op te vangen. Tot de eerste categorie behoort waterdamp. Tot de tweede categorie behoren, naast CO₂-gas, vooral luchtstromen met fijne stofdeeltjes en lage concentraties SO₂.

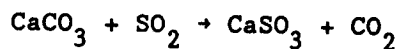
Op vele plaatsen in het proces wordt water aangewend. Op de waterkringloop wordt hier niet ingegaan, hoewel zij van belang is. Afgegraven deklaag en gesteenten worden gecontroleerd opgeslagen en kunnen later gebruikt worden bij de herinrichting van het landschap. De slak kan, indien de chemische samenstelling dat niet onmogelijk maakt, worden gebruikt in de wegebouw. Het overige materiaal zal eveneens gecontroleerd moeten worden opgeslagen (fig. 5).

Als opmerking zij vermeld dat ertsen ook uitgeloogd kunnen worden waarbij koper en nikkel met behulp van b.v. zwavelzuur in oplossing worden gebracht en vervolgens via electrowinning worden gewonnen. Ook uit laagwaardige ertsen en zelfs tailings kunnen zo nog metalen worden verkregen.

Ook moet nog vermeld worden dat het gas dat afkomstig is van smelter en converter, hoge concentraties aan SO₂ en stof bevat. Een groot deel van het stof wordt opgevangen en het merendeel van het SO₂ wordt omgezet in zwavelzuur in een zwavelzuurfabriek.

Het anodeslib bevat dermate hoge concentraties aan o.m. edelmetalen (Au, Ag, Pt, Se), dat verwerking in een gespecialiseerde raffinaderij rendabel is. Een processchema daarvan is ontleend aan [10], zie fig. 6.

Het gas met lage SO₂-concentratie kan nog verwerkt worden in een scrubber waar het stof wordt uitgewassen en het SO₂ wordt gebonden tot gips met behulp van de kalk, die wordt toegevoegd:



3.4. Verwerking van de tailings.

Een uiterst belangrijke reststof vormen de tailings. Zij vertegenwoordigen een grote massastroom die bovendien een energie-intensieve bewerking, namelijk malen, heeft ondergaan. Het is daarom van belang te onderzoeken of zij verder kunnen worden verwerkt tot nuttige produkten. Scheiding is daarvoor de meest voor de hand liggende weg.

Een mineralogische analyse van de tailings, vergezeld van een marktonderzoek, geeft een indicatie van de economische haalbaarheid van de winning van verkoopbare stoffen uit de tailings. Hierbij moet in aanmerking worden genomen dat ook aan de opslag van de tailings aanzienlijke kosten en milieu-effecten verbonden zijn. Bovendien bevatten de tailings componenten die in ontsloten toestand schadelijk zijn voor het milieu c.q. de menselijke gezondheid. De verwerking van tailings tot nuttige produkten vermindert de vraag naar primaire produkten en beschermt op deze wijze het milieu tegen extra belasting en de grondstoffenvoorraden tegen uitputting.

De mineralogische analyse van de tailings en de marktwaarde van de bestanddelen, in de volgende tabellen vermeld, zijn ontleend aan [3].

TABEL 1:

Mineraal:	gew. %	Chemische samenstelling	Opmerkingen
Olivijn	19,54	$(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$	
Pyroxeen	18,18	$(\text{Fe}, \text{Mg})\text{SiO}_3$	
Anorthiet	43,03	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	een veldspaat
Biotiet	3,18	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	een mica
Ilmeniet	5,24	FeTiO_3	
Magnetiet	4,21	Fe_3O_4	
Sulfiden	0,1	$(\text{Cu}, \text{Ni})\text{FeS}_2$	
	1,33	niet-ontsloten deeltjes.	
Overige	5,16		

TABEL 2:

Produkt:	Prijs (US\$/t)	Opmerkingen:
Magnetiet concentraat	\$ 28.87	bevat 61,98% Fe
Ilmeniet concentraat	\$ 28.34	bevat 50,14% TiO_2
Olivijn concentraat	\$ 22.--	bevat 87% olivijn
Anorthiet concentraat	\$ 7.15	

Bij de marktanalyse moeten de hoedanigheden van het betreffende materiaal dat ter beschikking komt in aanmerking worden genomen, zoals zuiverheid, deeltjesgrootte en chemische samenstelling. Soms zal het nodig zijn onderzoek te doen naar geheel nieuwe toepassingen van het betreffende produkt, of naar substitutie van bestaande grondstoffen door deze materialen.

Van het anorthiet, dat een zeer hoog percentage van de tailings uitmaakt en bovendien ruimschoots in de aardkorst aanwezig is, kan slechts een klein deel van de winbare hoeveelheid worden afgezet. Voor zowel anorthiet als pyroxeen zijn toepassingen denkbaar in o.m. de cementindustrie. Magnetiet is een ijzererts. Uit ilmeniet wordt TiO_2 gewonnen, dat toegepast wordt als pigment. Toepassingen van het olivijn die bij de gegeven hoedanigheid in aanmerking komen zijn: Straalzand, gietzand en flux in pelletvorm voor het hoogovenbedrijf.

Een monster van het uit de tailings gewonnen sulfide concentraat bevatte 1,11% Cu, 1,98% Ni, 0,17% Co, 7,81% S, 28,10% Fe en 7,26% TiO_2 . Dit heeft een te lage concentratie Cu en Ni om als Cu- resp. Ni-concentraat te worden beschouwd. De massastroom is te gering voor directe uitloging. Voorgesteld wordt [3] om deze reststof op te slaan tot er een voldoende hoeveelheid van aanwezig is om verder te verwerken.

Biotiet tenslotte is een soort mica. De ter beschikking staande fijn verdeelde vorm en chemische samenstelling is echter momenteel nog voor weinig toepassingen geschikt. Verondersteld wordt dat dit materiaal voorlopig niet kan concurreren met fijnverdeeld mica van andere bronnen (secundair gewonnen, bijvoorbeeld).

In deze studie wordt uitgegaan van een scheidingsschema zoals dat beschreven is in [3]. Hoewel dit schema uitgebreid op laboratoriumschaal is beproefd en geoptimaliseerd, zou een ander proces niettemin de voorkeur kunnen verdienen indien de marktomstandigheden sterk veranderden. Zo wordt bij de voorgestelde scheidingsmethode geen pyroxeen- of mica concentraat gewonnen, hoewel dit in principe technisch mogelijk zou zijn.

Voor 93% van de tailings (fig. 9) kan voorlopig geen enigszins rendabele toepassing worden gevonden. Deze tailings moeten dus uiteindelijk toch nog, na eventuele ontwatering, worden opgeslagen.

Korte beschrijving van het scheidingsproces van de tailings:

De tailings, die 70% water bevatten, worden vanuit de concentrator verpompt naar de Humphrey spiralen waar een eerste scheiding volgens het principe van de zwaartekrachtsseparatie plaatsvindt. Het concentraat wordt verder ontleed met behulp van 'low-intensity magnetic separation' waarbij verkoopbaar magnetiet concentraat ter beschikking komt. De tails worden onderworpen aan een flotatieproces om ze van de sulfiden te ontdoen, en daarna worden ze gedroogd. Tenslotte wordt met behulp van elektrische separatie het ilmeniet concentraat en olivijn concentraat afgescheiden. Beide produkten zijn dan in droge, fijngemalen vorm voorhanden. Van de tails van de Humphrey spiralen wordt slechts een klein deel verder gebruikt. Met behulp van 'high-gradient magnetic separation' en een reeks cleaners wordt daaruit het anorthietconcentraat afgescheiden dat, na ontwatering, een verkoopbaar produkt oplevert.

4. Primaire winning van de bijprodukten.

In dit hoofdstuk wordt beknopt beschreven hoe de produkten die als bijprodukt uit de reststoffen worden verkregen, op de conventionele wijze kunnen worden gewonnen.

4.1. Olivijn.

In de Noorse plaats Aaheim wordt een voorkomen geëxploiteerd dat zeer grote hoeveelheden vrijwel zuiver (90-95%) olivijn bevat [11], voornamelijk in de vorm van forsteriet ($(2\text{MgO})\cdot\text{SiO}_2$), dat een MgO-gehalte van 49% bezit. Verontreinigingen bestaan onderandere uit pyroxeen, chloriet e.d. Het olivijn van de Duluth gabbro bevat slechts 21,4% MgO, doch het heeft een hoger fayalietgehalte ($(2\text{FeO})\cdot\text{SiO}_2$). Het smeltpunt wordt door het fayaliet omlaag gebracht. Het bedraagt 1400°C tegenover 1760°C voor het Noorse olivijn. Voor toepassingen waarbij juist het hoge smeltpunt van belang is, is het Duluth gabbro olivijn dus niet geschikt. Voor toepassingen waarbij een grove vorm (onzuiver, grof verdeeld) voldoende is, is het te duur. Voor toepassingen als grondstof voor pellets die aan hoogovens worden toegevoegd is het geschikt. Het MgO functioneert dan als flux en vervangt dolomiet, terwijl het in het fayaliet aanwezige ijzer wordt vrijgemaakt en gewonnen wordt.

De totale wereldproduktie van olivijn bedroeg tot 1975 niet meer dan enkele honderdduizenden t/jr, met als voornaamste toepassingen het gietzand en straalzand. De mijn in Aaheim opende in 1948 en produceerde in 1975 150.000 t. Door gericht onderzoek naar nieuwe toepassingen kon de vraag sterk worden opgevoerd. In 1980 werd in Europa reeds 1.700.000

t olivijn geconsumeerd, waarvan 70% als flux in het hoogovenbedrijf. In de VS steeg de consumptie veel trager, van 50.000 t/jr in 1969 tot iets boven 100.000 t/jr in 1983, waarvan 40% in hoogovens en 40% als gietzand. Aan die vraag werd voldaan door twee kleine binnenlandse mijnen. In 1985 produceerde Aaheim alleen al 1.700.000 t/jr. Het winningsproces in Noorwegen omvat het delven met behulp van strippen of schieten. Vervolgens worden de brokken olivijn via een belt conveyor naar een mobiele breekinstallatie gevoerd waar ze in een systeem van brekers en zeven worden gebroken en in diverse fijnheidsfracties uitgesplitst. Met 50-tons vrachtwagens vervoert men dit produkt over een afstand van 7 km naar zee. Daar bevinden zich enkele verwerkingsfabrieken, doch het grootste deel van het materiaal wordt zonder verdere bewerking in bulkvorm met zeeschepen afgevoerd. Synthetisch gietzand van hoge kwaliteit vereist zuiver en droog olivijnzand. Als voorbeeld voor de bereiding daarvan wordt uitgegaan van een studie [12] die dit proces beschrijft voor materiaal dat gewonnen wordt in North Carolina, VS. Het processchema is gegeven in fig. 5. In de studie wordt op de mogelijkheid gewezen om ook talk en chromiet, waarvan 10% resp. 1% aanwezig is, als nevenprodukt te winnen.

4.2. Ilmeniet.

Ilmeniet wordt gebruikt voor de fabricage van pigment op basis van TiO_2 . Dit vindt haar toepassing in de verf-, papier- en kunststofindustrie. Ilmeniet komt voor in bepaalde gesteenten, onder andere in Canada, doch ook in zandafzettingen ('placer deposits') die men bijvoorbeeld in Australië aantreft. Het primaire productieproces wordt gegeven voor het laatste geval, zie fig. 6. De processtappen spreken voor zich. De wereldreserves voor ilmeniet bedroegen in 1980

alleen al in de placer afzettingen circa 90.000.000 t Ti, overeenkomend met 150.000.000 t TiO_2 . Bovendien bevatten deze afzettingen ook nog eens 13.000.000 t zircon. Dit Zr wordt in co-productie gewonnen. De wereldproductie van ilmeniet bedroeg in 1986 4.600.000 t/jr overeenkomend met ongeveer 2.300.000 t/jr aan TiO_2 (In 1980: 1.900.000 t/jr). Voor de VS staat tegenover een consumptie van omstreeks 900.000 t/jr een produktie van 500.000 t/jr. Het TiO_2 -gehalte van de voorkomens varieert van enkele tientallen procenten voor voorkomens in vast gesteente tot 1% (gemiddeld 1,4% TiO_2 of 3,33% ilmeniet) voor placer voorkomens [1].

4.3. Overige mineralen.

Het magnetiet concentraat wordt gebruikt om er ijzer uit te winnen. Het dient dus te worden vergeleken op basis van ijzergehalte met gedolven en verrijkt ijzererts concentraat.

Wat we anorthiet noemen is een plagioklaas ($NaAlSi_3O_8$ en $CaAl_2Si_2O_8$), behorend tot de veldspaten. Voor een bepaald monster is de CaO/Na_2O -verhouding 2,1:1. Vanwege dit hoge CaO-gehalte spreekt men van anorthiet. De totale produktie van veldspaat bedroeg in de wereld 3.000.000 t/jr voor 1982 en in de VS 662.000 t/jr voor 1986, waarvan de glas- en keramiekproduktie ruwweg de helft afnamen. Talrijke andere toepassingen zijn echter te overwegen, met name als grondstof in de cementindustrie [3]. Daar anorthiet zeer veel voorkomt in magmatisch gesteente zal de markt voor het Duluth gabbro anorthiet sterk regionaal gericht zijn en mede begrensd worden door transportkosten. Tenslotte moet nog worden opgemerkt dat het gebroken gabbro als zodanig toegepast kan worden in de wegenbouw.

5. Energie-analyse van het hoofdproces.

5.1. Algemeen.

5.1.1. Koper.

In het algemeen zal de energiehoeveelheid die vereist is voor de primaire produktie van een eenheid geraffineerd Cu toenemen met de stripping-ratio en afnemen met het kopergehalte. In de VS wordt van alle takken van minerale winning voor de koperwinning het meeste materiaal verzet. (Uitgezonderd: bulkmaterialen voor de bouw, steenkool en bruinkool). Enkele schattingen voor het totale energiegebruik voor de primaire winning van 1 t geraffineerd koper zijn:

55.000 kWh/t Cu, Marijnissen [3], voor Cu-gehalte 0,49%

36.200 kWh/t Cu, Batelle, in [9], voor Cu-gehalte 0,76%

31.500 kWh/t Cu, Rosenkranz, in [9]

33.000 kWh/t Cu, in [13], voor Cu-gehalte 0,6%

Bij deze cijfers is geen rekening gehouden met co-produktie.

Chapman [14] geeft de empirische formule:

$$E = [11,8/(g - 0,15)] + 7,5 \quad \text{kWh/t Cu}$$

Hierin is g het kopergehalte in procenten uitgedrukt. Voor Duluth gabbro levert bovenstaande formule 41.800 kWh/t Cu op.

Bij de interpretatie van dit soort getallen is het van belang om de systeemgrens zeer goed in acht te nemen. In de onderhavige studie wordt het systeem gedefinieerd als het produktieproces in engere zin, met uitsluiting van de energie-inhoud van de kapitaalgoederen. (In de literatuur wordt daarvoor meestal een waarde van 10% van het energiegebruik aangenomen). Voorts zijn er gemiddelde waarden in omloop waarin ook de sekundaire produktie (uit schroot) en de primaire produktie d.m.v. uitlogingsprocessen is meegenomen. Deze getallen komen lager uit. Opgemerkt wordt dat voor de niet-socialistische landen de sekundaire produktie ongeveer 21% van de primaire produktie aan geraffineerd Cu bedraagt [15], voor de VS ligt deze waarde zelfs op 36%.

10% van de koperproduktie in de VS vindt in 1977 plaats door uitloggen [10]. Bij dit uitloggen ontstaat cementkoper. Batelle (cf. [16,17]) geeft aan dat een energiegebruik vereist is van 27.800 kWh/t cementkoper, onderverdeeld in pompvermogen (13.300) en het cementeren (verdringing van Fe door Cu) gevolgd door een zuiveringsproces. Een beknopte beschrijving van diverse uitloogprocessen vindt men in [10]. Voor de energie die nodig is om langs sekundaire weg koper te produceren kan een gemiddelde van 7000 kWh/t Cu worden aangehouden [1].

5.1.2. Nikkel.

Op basis van gegevens van het Batelle-instituut (zie [1]) wordt een getal van 75.600 kWh/t geraffineerd Ni aangenomen, waarbij is uitgegaan van sulfidisch Ni-erts, ondergronds gewonnen, met een gehalte van 1,5% Ni. Indien product-recoveries in rekening gebracht worden (80%

voor concentreren en 80% voor smelten) blijkt dat 104 t erts moet worden gedolven om 1 t geraffineerd Ni te verkrijgen.

Het energiegebruik is als volgt verdeeld:

19.600 kWh/t voor het delven.

14.400 kWh/t voor het concentreren.

41.600 kWh/t voor het smelten en raffineren.

Bij het beschreven winningsproces is overigens sprake van co-productie van Cu, waar men ongeveer de helft van de vereiste energie voor delven en concentreren (17 kWh/t) aan kan toekennen, zoals Chapman dat doet.

5.2. Energie-aspecten van de winning van Cu en Ni uit Duluth gabbro.

De operaties worden gegroepeerd in delven, concentreren, smelten en raffineren (fig. 1).

5.2.1. Delven.

Waarden van Batelle en Chapman [17] geven, omgerekend op Duluth gabbro, 6.600 kWh/t Cu voor het delven. Per ton Cu moet in totaal 543 t vast gesteente worden verzet. Uitgaande van gegevens van eenheidsoperaties [1] komt men bij het delven op 12.000 kWh/t Cu, verdeeld over boren (1.500), pompen (1.500), schieten (1.500), afgraven en laden (3.000) en transport (4.500). Voor nauwkeurigere schattingen zijn gegevens van belang over hardheid en soortelijke massa van het gesteente, diepte van de pit, capaciteit van de machines en gegevens omtrent het al dan niet elektrisch aangedreven zijn ervan. Het transport uit de pit naar opslag of concentratiefabriek blijkt bij open-pit mijnbouw vaak een groot deel

van het energiegebruik te vertegenwoordigen. Dit transport geschiedt gewoonlijk met zware trucks die stapvoets over 'wegen' van steenslag rijden. Van belang is het hoogteverschil en de afstand die 200 m resp. 2,5 km zijn geschat. Het rendement van de truckmotor wordt op 1/3 gesteld en dit alles leidt tot een waarde van 4.400 kWh/t Cu. Voor het boren van gaten om springladingen in aan te leggen, en voor de voor het eigenlijke schieten benodigde energie, kan men schattingen maken aan de hand van tabellen over het aantal m³ te boren gaten per m³ of ton gesteente, alsmede de energie-inhoud van de springstof. Is deze springstof ANFO (vnl. ammoniumnitraat) dan is de netto energie-inhoud hiervan 1.130 kWh/t ANFO, doch de bruto energie-inhoud (inclusief de energie die nodig is om de stof te vervaardigen) wordt geschat op 5.400 kWh/t [18].

Voor het boren komt men op 56 kWh/t Cu. Voor het schieten wordt 0.136 kg springstof/t gesteente aangehouden, hetgeen neerkomt op 400 kWh/t Cu. Voor het bijbehorende thermisch vermogen moet het rendement van de elektriciteitscentrale in rekening worden gebracht, dat zoals gezegd op 33% is gesteld. Voorzichtigheid is hierbij geboden, daar de elektriciteit afkomstig kan zijn van kern- of waterkrachtcentrales. Deze elektriciteit kan dan goedkoper zijn dan het bijbehorende (fossiele) brandstofequivalent.

Voor het afgraven en laden werd, uitgaande van technische gegevens [6], 1 kWh/t gesteente geschat, neerkomend op 543 kWh/t Cu. Voor het afschrappen van de bovenlaag, pompen enz. werd 100 kWh/t Cu genomen.

Dit alles leidt tot de volgende energiebalans:

Verwijderen bovenlaag (9 m ³)	100 kWh/t Cu	
Pompen (9,5 m ³)		
Boren	60 "	
Graven en laden	540 "	
	<hr/>	+
	700 "	
Schieten (ammoniumnitraat)		400 kWh/t Cu
Transport (diesel)		4.400 "
		<hr/>
		4.800 "
Omzetting kWh in kWh (maal 3):		2.100 "
		<hr/>
		6.900 kWh/t Cu
		<hr/> <hr/>

5.2.2. Concentreren.

In de concentrator is de massastroom geringer dan in de mijn, namelijk 236 t/t Cu. Het concentreren omvat de eenheidsoperaties breken, malen, flotatie, ontwateren en eventueel thermisch drogen. De massastroom bij het ontwateren en drogen is inmiddels sterk afgenomen, en wel tot 7,5 t/t Cu (droge stof) en van dezelfde grootte-orde als de massastroom door de smelter. Daarom worden breken, malen en flotatie vaak als een geheel genomen (beneficiation). Hiervoor is een hoeveelheid energie vereist die aan de hand van de literatuur geschat kan worden, waarbij

omgerekend wordt naar erts met een kopergehalte van 0,494% Cu en waarbij 236 t erts nodig is voor het verkrijgen van 1 t Cu.

Batelle, cf. [17]:	19.780 kWh/t Cu
Chapman, cf. [1]:	18.360 "
Rosenkranz, cf. [9]:	18.670 "
Mular en Bhapu, cf. [19]:	13.270 "
Minerals Yearbook, cf. [1]:	19.670 "

Het breken vindt plaats met kaakbrekers en roterende brekers tot b.v.

1 cm zeefmaat. Voor het breken vindt men waarden als (omgerekend):

1.150, 1.900 en 2.290 kWh/t Cu uit resp. [19,17,1].

Voor het malen (tot 0,2 mm zeefmaat, zie tabel in [5]) vindt men zeer uiteenlopende waarden: 7.910, 12.290 en 6.560 kWh/t Cu uit resp.

[19,17,1].

Men kan de voor het malen benodigde energie afschatten met de formule van Bond:

$$E = 10 W_i \cdot [(\sqrt{D_2}) - \sqrt{D_1}]$$

Hierin is W_i de 'Bond work index', geschat op 15 kWh/t erts. D_1 is de zeefmaat vóór, en D_2 de zeefmaat ná het malen, beide in μm .

De formule geeft voor $D_1=10.000$ en $D_2=200$ een waarde van 6.450 kWh/t Cu. Inclusief hulpapparatuur wordt de energie die benodigd is voor het malen op 7.500 kWh/t Cu geschat.

De energie-inhoud van de 0,22 t benodigde maalkogels (zie fig. 3) wordt geschat met behulp van de bruto energie-inhoud van ruw ijzer en die voor afgewerkt staal, resp. 8.330 en 13.200 kWh/t produkt [1,18]. Hier

wordt zij ergens tussenin verondersteld, en wel op 10.000 kWh/t, waarmee de bruto energie-inhoud van de maalkogels 520 kWh/t Cu is. Voor de organische reagentia wordt als gemiddelde een energie-inhoud opgegeven die in het onderhavige geval overeenkomt met 1.103 kWh/t Cu, waarbij gesteld is dat voor de produktie van 1 t geraffineerd Cu, 200 kg organische reagentia nodig zijn.

De energie-inhoud van de overige additieven is moeilijk in te schatten. Voor kalk kan gebruik worden gemaakt van schattingen bij de industrie die ongebluste kalk (CaO) vervaardigt uit kalksteen (CaCO₃) [20,21].

Men vindt daar de waarden 1.350 resp. 1.780 kWh/t CaO. In het massastroomdiagram komt dit overeen met 770 kWh/t Cu voor de kalktoeslag in de concentrator. Deze toeslag wordt weliswaar aan de molens toegevoegd doch is vereist bij het flotatieproces en dient daarin te worden verdisconteerd.

In de literatuur vindt men voor het flotatieproces sterk uiteenlopende waarden van het energiegebruik, o.a. 3.420, 5.590 en meer dan 6.560 kWh/t Cu (cf. [19,17,1]). In deze studie wordt 6.000 kWh/t Cu aangehouden.

Voor de behandeling en opslag van de tailings (verpompen, ontwateren e.d.) wordt, uitgaande van [19], een waarde van 2.000 kWh/t Cu gesteld, overeenkomend met de opslag van 228,5 t tailings.

Voor het concentreren in haar totaliteit wordt de volgende energiebalans aangehouden:

Breken	670 kWh/t Cu	
Malen	2.500	"
Flotatie	2.000	"
Behandelen tailings	670	"
	<hr/>	+
	5.840 kWh/t Cu	
Maalkogels		520 kWh/t Cu
Kalk		770 "
Additieven		1.100 "
		<hr/>
		2.390 kWh/t Cu
Omzetting kWh in kWh (maal 3):		17.520 "
		<hr/>
		19.910 kWh/t Cu
		<hr/> <hr/>

5.2.3. De smelter.

In de massastroombenadering wordt met 'de smelter' het traject bedoeld van concentraatverwerking, via (eventueel) roosten en smelten, tot en met converteren, ongeacht op welke locatie deze processen plaatsvinden. De locatie is immers slechts van invloed op een eventuele bijdrage voor het transport.

Het concentraat is in dit specifieke voorbeeld, met 13% Cu en 2,4 % Ni, armer dan doorgaans (ongeveer 25% Cu) het geval is. Om dit verschil in

rekening te brengen is het voor de hand liggend om de waarden uit de literatuur voor de massastroom te corrigeren. Verder moet men zich realiseren dat diverse processen, ten behoeve van de co-productie van Ni, tweemaal doorlopen worden. Ook hiervoor moet een correctie worden aangebracht.

Enkele getallen die voor de genoemde processen worden vermeld zijn: 18.340, 19.610 en 21.650 kWh/t Cu in [1,17,9]. Alle waarden werden omgerekend naar een massastroom van 7,5 t/t Cu. In [17] wordt ook een waarde opgegeven voor het geval energie wordt teruggewonnen uit de rookgassen van het reverberatory furnace. Indien dit (gebruikelijke) procedé wordt toegepast is voor de smelter nog 13.170 kWh/t Cu nodig. Beschouwt men nu de eenheidsstappen: Allereerst moet het concentraat, dat in pulpvorm de concentrator verlaat, worden gedroogd. Dit gebeurt in etappes. Door bezinking wordt het vaste-stofgehalte gebracht op 60% waarna het door filtratie tot 80 à 90% kan worden verhoogd. Het watergehalte kan door thermisch drogen nog met bijvoorbeeld 10% worden teruggebracht, een methode die in dit voorbeeld wordt toegepast. Een alternatief procedé is het zogenaamde nat smelten.

De voor het thermisch drogen benodigde energie wordt doorgaans in de vorm van olie of gas geleverd. Voor het bezinken en filtreren is, uitgaande van [1], een vermogen van 150 kWh/t Cu vereist, terwijl voor het thermisch drogen waarden van 1.250, 1.180 en 1.680 kWh/t Cu te vinden zijn in resp. [1,17,3]. Een eigen berekening, bij een brandstofrendement van 50%, levert 1.400 kWh/t Cu op.

Het roosten en smelten wordt gezamenlijk beschouwd. De hiertoe vereiste energie wordt verkregen uit fossiele energiedragers, aangevuld met de energie die vrijkomt bij de oxidatie van het in het concentraat aanwezige zwavel. De waarden uit de literatuur, omgerekend naar de grotere massastromen, zijn 13.170 en 14.890 kWh/t Cu [17]. Exclusief

warmteterugwinning, doch inclusief de 3.820 kWh/t die is vertegenwoordigd in 0.472 t steenkool/t Cu, wordt een waarde van 13.500 kWh/t Cu aangehouden. De bruto energie-inhoud van het toegepaste kalksteen en silica wordt verwaarloosbaar geacht. Voor warmteterugwinning wordt in de literatuur 38% opgegeven van de aan het reverberatory furnace toegevoerde energie [17].

Het energiegebruik voor het converteren is -eigen aan de aard van dit proces- betrekkelijk gering. Aan de literatuur kunnen uiteenlopende getallen worden ontleend. Deze dienen gecorrigeerd te worden voor de massastroom naar de converter, waartoe ze worden vermenigvuldigd met de factor 5,08/3,3. (zie fig. 4 en [17]). De waarde die door Batelle wordt opgegeven komt dan uit op 2.910 kWh/t Cu, terwijl waarden van Chapman overeenkomen met 1.487 kWh/t u, voor 'overig' energiegebruik [17]. In dezelfde bron zijn nog waarden te vinden die meer dan een factor 3 hoger, resp. lager liggen. De waarde volgens Chapman wordt aangehouden. Daar het opgevangen stof wordt teruggevoerd naar de converter is het zinvol om ook het energiegebruik van de stofafscheiders tot het hoofdproces te rekenen. Omgerekend naar rato van de hoeveelheid opgevangen stof komt dit overeen met 347 kWh/t Cu. De hoeveelheid Cu in het stof bedraagt, naar Batelle, 0,135 t/t u.

Voor de smelter is de energiebalans:

Ontwateren	150 kWhe/t Cu	
Stofbehandeling	347 "	
		_____ +
	497 kWe/t Cu	
Thermisch drogen	1.400 kWh/t Cu	
Roosten/smelten	13.500 "	
Converteren	1.490 "	
		_____ +
	16.390 kWh/t Cu	
Omzetting kWhe in kWh (maal 3)	1.490 "	
		_____ +
	17.880 kWh/t Cu	
Af: Warmteterugwinning	5.130 "	
		_____ -
	12.750 kWh/t Cu	
		=====

5.2.4. De raffinaderij.

Voor fire-refining van Cu vindt men in de literatuur [17] een energiegebruik van 1.220 kWh/t Cu. In deze energiebehoefte wordt voornamelijk door aardgas voorzien. In dezelfde bron vindt men dat 350 kWhe/t Cu aan elektrische energie nodig is voor de elektrolytische raffinage. Daarnaast zijn fossiele energiedragers vereist voor een aantal hulpprocessen, zoals de behandeling van het te recirculeren elektroliet. Deze komen overeen met 1.390 kWh/t Cu.

Per ton Cu is voorts ongeveer 80 kg aan chemicaliën nodig (zoals lijm) en 18 kg nieuw (en zuiver) H_2SO_4 . De bruto energie-inhoud van deze stoffen samen wordt geschat op 500 kWh/t Cu.

De energiebalans voor de raffinage wordt dus:

Elektrolyse	350 kWh/t Cu	
Fire-refining		1.220 kWh/t Cu
Hulpprocessen		1.390 "
Chemicaliën		500 "
		----- +
		3.110 kWh/t Cu
Omzetting kWh in kWh (maal 3)		1.050 "
		----- +
		4.160 kWh/t Cu
		=====

5.2.5. Totaaloverzicht.

Nu kan de totale energiebehoefte voor de primaire produktie van geraffineerd koper worden opgesteld:

Proces:	Elektrisch:	Niet-elektrisch:	Totaal:
Delven	700 kWhe/t Cu	4.800 kWh/t Cu	6.900 kWh/t Cu
Concentreren	5.840 "	2.390 "	19.910 "
Smelten	497 "	16.390 "	17.880 "
Raffineren	350 "	3.110 "	4.160 "
	———— +	———— +	———— +
Sub-totaal	7.387 kWhe/t Cu	26.690 kWh/t Cu	48.850 kWh/t Cu
Warmteterugw.			5.130 "
			———— -
Totaal			43.720 kWh/t Cu

5.3. Correctie voor het nikkel.

De aanwezigheid van een hoog percentage Ni doet het energieverbruik toenemen door grotere massastromen en een ingewikkelder proces, zie fig. 1 en 2. Zeer globaal zijn de massastromen weergegeven die een tweede flotatieproces en een tweede circuit door de smelter doorlopen, en verder de granulatie en separatie, alsmede de extra massastroom die geraffineerd moet worden. Tegenover deze complicaties staat dat naast 1 t Cu ook 0,18 t Ni wordt gewonnen, een hoeveelheid die een marktwaarde bezit die van dezelfde grootte-orde is als die van het Cu.

De schatting in figuur 2 is een pessimistische. Omdat geen exacte gegevens bekend zijn is aangenomen dat 7,5 t het eerste smeltercircuit doorloopt en 5 t het tweede circuit. De extra's, omgerekend naar 1 t Ni, bedragen dan:

Extra flotatie:	240 kWhe	224 kWht	944 kWht/t Ni
Extra smelter:	555 "	60.643 "	62.308 "
Extra raffinage:	350 "	3.110 "	4.160 "
Granulatie:	20 "		60 "
Separatie:	50 "		150 "
	-----	+	-----
		+	
Sub-totaal:	1.215 kWhe	63.977 kWht	67.622 kWht/t Ni
Warmteterugw.			18.981 "

Extra voor Ni-winning, totaal:			48.641 kWht/t Ni
			=====

Deze schatting die, zoals reeds vermeld, pessimistisch is, resulteert nog altijd in een energiegebruik dat lager is dan de waarde die in sectie 5.1.2. voor de 'conventionele' winning van Ni is aangenomen, zelfs als die is gecorrigeerd voor de co-productie van Cu. De uitkomst is echter zeer gevoelig voor details van het tweede smeltproces. Zoals nog zal worden toegelicht is het overigens niet aanbevelenswaardig om het 'extra' energiegebruik geheel aan het Ni toe te kennen en het 'conventionele' energiegebruik geheel aan het Cu. Beide processen kunnen moeilijk los van elkaar worden gezien en de co-productie van Cu en Ni moet worden beschouwd als één proces. Voorts moet worden opgemerkt dat het extra energiegebruik voor de winning van 0,18 ton Ni, als co-product van 1 ton Cu, slechts

8.755 kWh extra bedraagt.

5.4. Uitloggen.

Men kan in aanmerking nemen dat -naast het bovenbeschreven proces- ook Cu kan worden gewonnen door uitloggen van erts, laagwaardig erts en/of tailings. Voor 1 ton door uitloging verkregen koper kan, met behulp van [17] en de reeds genoemde gegevens, de volgende globale energiebalans worden opgesteld:

Uitloggen en cementeren:	27.800 kWh/t Cu
Smelterij:	2.000 "
Raffinaderij:	4.160 "
	----- +
Totaal:	33.960 kWh/t Cu

Hierbij is voor de smelter en de raffinaderij een energiegebruik genomen waarbij de waarden die reeds gebruikt zijn, gecorrigeerd werden voor de hier aanwezige massastroom. Bedenk dat het hier vermelde energiegebruik gerekend is per ton door uitloging verkregen Cu. Hoewel het proces in de praktijk iets anders zal kunnen verlopen, is dit een aanvaardbare inschatting waar het de orde van grootte van het energiegebruik betreft. De cijfers tonen aan dat het energetisch gunstig is om uitloging toe te passen in combinatie met de conventionele bereiding van primair koper. Aangenomen wordt, conform de literatuur, dat (in de VS) door uitloging 10% van het primair koper wordt gewonnen.

5.5. Berekening van de bruto energie-inhoud van Duluth gabbro koper en nikkel.

Uit bovenstaande beschouwingen volgt een bruto energie-inhoud van:

$48.850 - 5.130 = 43.720$ kWh voor de winning van 1 ton koper uit Duluth gabbro langs de klassieke weg via flotatie, en een bruto energie-inhoud van $67.622 - 18.981 = 48.641$ kWh voor de winning in co-productie van 1 ton Ni uit Duluth gabbro langs dezelfde weg, en een bruto energie-inhoud van 33.960 kWh voor de winning van 1 ton Cu door uitloging.

De hoeveelheden van deze produkten staan in een bepaalde verhouding tot elkaar, die wordt bepaald door de samenstelling van het erts, technische mogelijkheden enz. Bij de verhouding 1 : 0,18 : 0,1 vindt men een energiegebruik van 55.871 kWh voor de winning van 1,1 ton geraffineerd Cu en 0,18 ton geraffineerd Ni. Vergelijk ook de waarden in paragraaf 5.1.1.

Indien er sprake is van co-productie bestaat het probleem van de toekenning van de gebruikte energie over de diverse produkten. Hiervoor zijn een aantal verdeelsleutels denkbaar, waarvan er in [1] twee worden vermeld, namelijk de eerste hier genoemde:

1. Naar gewichtsprocenten. Deze methode geeft twijfelachtige resultaten, met name als de verschillende produkten te zeer in waarde c.q. gewichtshoeveelheid verschillen. Vooral als er naast kostbare produkten (zoals koper) ook typische bulkprodukten (zoals anorthiet) voorkomen, laat deze methode verstek gaan. Ook bij gecombineerde productie van Cu en Ni, waarvoor een Battelle rapport deze verdeelsleutel hanteert, is het geen goede methode. Bedacht moet worden dat de marktwaarde per gewichtseenheid van Ni ongeveer drie maal zo groot is als van Cu.

2. Naar traditionele waarden voor energiegebruik, zoals die in de literatuur worden vermeld, of zoals die uit gemiddelden van bestaande productieprocessen kunnen worden bepaald.

3. Naar technische criteria, waarbij bij bepaalde processen het energiegebruik wordt toegekend aan het produkt waar dit proces in het bijzonder betrekking op heeft. In het geval van Cu en Ni zou dat inhouden dat er een hoofdproces wordt beschouwd voor de winning van Cu en dat de extra complicaties die vereist zijn om ook het Ni te winnen, geheel aan het Ni worden toegekend. Deze methode is, indien er sprake is van co-productie, minder geschikt, doch bij de energie-analyse van nevenprodukten kan het soms zinvol zijn om de betreffende nevenprocessen geheel aan dergelijke produkten toe te kennen.

4. Naar marktprijs. Dit criterium blijkt, zoals ook deze studie aantoont, goed te voldoen. Voor een kostenanalyse is zij eigenlijk vanzelfsprekend, bij een energie-analyse is de methode geldig indien voor de diverse produkten de gebruikte energie een redelijk gelijk percentage van de kostprijs vertegenwoordigt.

Een vijfde methode, die niet enkel voor energie doch voor kosten in het algemeen geldt, houdt een zodanige verdeling over de produkten in dat de prijs ervan optimaal wordt hetgeen betekent dat de omzet resp. de winst wordt gemaximaliseerd. De criteria zijn daarbij sterk marktafhankelijk en daarnaast gevoelig voor geografische factoren, in verband met transport e.d.

Voor de vier eerstgenoemde methoden wordt de bruto energie-inhoud van Cu en Ni, inclusief warmteterugwinning doch exclusief uitloggen, berekend:

Om 1 ton Cu en 0,18 ton Ni te winnen is 52.475 kWh/t vereist. Volgens methode 1 is de verdeelsleutel 1 : 0.18, dat komt neer op 44.470 kWh/t Cu en 44.470 kWh/t Ni.

Volgens methode 2 wordt de verdeelsleutel bepaald met de waarden uit paragraaf 5.1., te weten: 36.100 kWh/t Cu en 75.600 kWh/t Ni. Voor Duluth gabbro betekent dit dat 38.073 kWh/t Cu en 79.732 kWh/t Ni vereist is.

Volgens methode 3 wordt gewerkt met grootheden uit secties 5.2.5. en 5.3., te weten: 43.720 kWh/t Cu en 48.641 kWh/t Ni.

Volgens methode 4 wordt de verdeelsleutel gegeven door de kostprijs, die op \$ 1710.-/t Cu en \$ 4950.-/t Ni is gesteld. Met behulp van 2.475 kWh wordt dan voor \$ 2601.- aan produkten vervaardigd. Met de verdeelsleutel naar marktprijs wordt aldus gevonden dat 34.499 kWh/t Cu en 99.771 kWh/t Ni vereist zijn

5.6. Transport.

Bij de energie-analyse is ook de verdeling van het produktieproces over verschillende locaties van belang, omdat het transport, vaak over aanzienlijke afstanden, een wezenlijke bijdrage aan het energiegebruik kan leveren. Hierbij moet worden gedacht aan transport van (gedroogd) concentraat van concentrator naar smelterij, en aan transport van anodes van smelter naar raffinaderij.

In de literatuur (zie bijvoorbeeld [1,17,22,23]) vindt men waarden voor het energiegebruik bij transport, die echter onderling sterk afwijken. Daarenboven is er nog sprake van factoren die kunnen variëren, zoals de beladingsgraad.

Ruwe schattingen voor vrachttransport zijn, uitgedrukt in brandstofgebonden energiegebruik per tonkilometer:

Zeeschip	0,1 kWh/tkm	
Binnenvaartschip	0,2	"
Trein	0,2	"
Vrachtauto	0,4	"
Vliegtuig	4	"

Verder zijn ook de volgende transportmiddelen van belang:

Pijpleiding	0,2 kWh/tkm	
Conveyor	1,4	"

Voor een off-road truck op vlakke weg, die stapvoets rijdt, kan de luchtweerstand verwaarloosd worden ten opzichte van de rolweerstand. Voor de laatste worden, afhankelijk van de toestand van het wegdek, de volgende waarden aangenomen:

Goede weg, geen wielindruk:	0,115 kWh/tkm	
Verharde weg, wel wielindruk:	0,275	"
Los zand en grind:	0,55	"
Niet onderhouden weg:	0,95	"

Bij deze waarden is een beladingsgraad van 50% verondersteld (b.v. vol heen, leeg terug). Voorts zijn de tonkm berekend naar netto (ladings-)gewicht, waarbij voor het gewicht van de truck werd aangenomen dat zij de helft van het maximale laadvermogen bedraagt. Bij de waarden voor de rolweerstand dient de potentiële energie in rekening

te worden gebracht, die wordt opgebouwd indien de vrachtwagen een helling op rijdt. Deze potentiële energie wordt volledig gedissipeerd als het transportmiddel weer omlaag rijdt. Men vertaalt dit proces in een extra weerstandskracht, de hellingweerstand, die bij de rolweerstand dient te worden opgeteld als de truck een helling beklimt.

6. Energie-analyse van de nevenprocessen.

Processen die niet in de berekening zijn opgenomen betreffen de herinrichting van het landschap en de recycling van het proceswater. Bij het laatste gaat het om 552 m^3 water/t Cu in de concentrator en 1076 m^3 water/t Cu in de smelterij. Vanwege gebrek aan meer gedetailleerde informatie moest een analyse van deze recycling achterwege blijven.

6.1. De verwerking van afvalgassen van de smelter.

De stofafscheiding is reeds behandeld in paragraaf 5.2.4. Het in voldoende concentratie aanwezige SO_2 wordt verwerkt in een zwavelzuurfabriek die $5,37 \text{ t H}_2\text{SO}_4/\text{t Cu}$ produceert. Een schatting voor het energiegebruik in deze fabriek, gebaseerd op gegevens van Battelle, is 3000 kWh/t Cu , of $559 \text{ kWh/t H}_2\text{SO}_4$, hetgeen meer is dan in gebruikelijke zwavelzuurfabrieken. In die fabrieken wordt immers meestal elementair zwavel verbrand (exotherme reactie!), waarbij bovendien de SO_2 -concentratie veel hoger is dan in de afvalgassen van een kopersmelter. In beide gevallen wordt het SO_2 over katalysatoren geleid (contactprocedé) en daar omgezet in SO_3 , hetgeen eveneens een exotherme reactie is. Het energiegebruik per eenheid H_2SO_4 neemt toe met afnemende SO_2 -concentratie. De belangrijkste energiegebruikers in de zwavelzuurfabriek zijn namelijk de blowers, die bij afnemende concentratie meer gas dienen te verplaatsen. De zwavelzuurproductie bij

de kopersmelterij verloopt dus i.h.a. veel minder efficiënt dan in een gewone zwavelzuurfabriek. Ze vindt dan ook primair plaats om aan milieu-eisen te voldoen.

Opgemerkt wordt dat de warmte die vrijkomt bij de exotherme reacties in de zwavelzuurfabriek meestal wordt gebruikt voor de opwekking van stoom.

Zwavelzuur, dat langs gebruikelijke weg werd verkregen, heeft een lage bruto energie-inhoud. Batelle schat deze op 300 kWh/t H_2SO_4 , maar schattingen vanuit de kunstmest-industrie komen veel lager uit. Zo wordt in [24] een waarde opgegeven van 14 kWh/t H_2SO_4 .

In de Batelle studies wordt aan het voor de elektrolyse benodigde zwavelzuur dezelfde bruto energie-inhoud meegegeven als die waarmee het zwavelzuur vergeleken wordt dat uit de afvalgassen wordt geproduceerd. Dat is geen juiste benadering. Zwavelzuur is namelijk beschikbaar in tal van kwaliteiten en de technische kwaliteit (96 %) kan het beste als uitgangspunt worden genomen. Deze kwaliteit zwavelzuur heeft een prijs van naar schatting \$ 85.-/ton (f 170.-/ton) terwijl de prijs voor een chemische kwaliteit kan worden geschat op \$ 500.-/t H_2SO_4 .

Omtrent zwavelzuur worden nog enige gegevens gepresenteerd die aan [10] ontleend zijn, en die gelden voor 1980:

Produktie, gehele wereld	142.200.000 t/jr
idem, VS	40.200.000 "
hiervan: uit elementair S	82 %
uit kopersmeltergas	5,2 %
uit gebruikt zwavelzuur	8 %
 Consumptie, VS	 41.200.000 t/jr
hiervan: kunstmestindustrie	69,5 %
petroleumraffinage	4,5 %
uitlogen koper	2,8 %
alkoholproduktie	2,6 %
produktie TiO ₂ -pigment	1,8 %

Zoals uit deze gegevens blijkt, werd in 1980 in de VS voor uitlogen van koper 1.160.000 t H₂SO₄ gebruikt. De primaire koperproduktie bedroeg ongeveer 1.000.000 t waarvan omstreeks 100.000 t door uitloging werd verkregen, zodat in de VS 11,6 t zwavelzuur vereist was voor de produktie van 1 ton cementkoper.

6.2. De verwerking van de tailings.

6.2.1. Prijs en energie-inhoud van de bijprodukten.

Bij de verwerking van de tailings wordt uitgegaan van [3]. De massastromen zijn weergegeven in figuur 9. Beperkingen bij de tailingsverwerking zijn deels produktietechnisch, deels markttechnisch

van aard. Gewonnen wordt magnetiet, ilmeniet, olivijn en anorthiet. Wijzigingen en verfijningen van het verwerkingsproces zijn mogelijk. De marktprijzen, excl. transport, van deze bijprodukten zijn, vgl. [3]:

Magnetiet concentraat	\$ 28.87/t
Ilmeniet concentraat	\$ 28.34/t
Olivijn concentraat	\$ 22.--/t
Anorthiet concentraat	\$ 7.18/t

De bruto energie-inhoud van de bijprodukten moet worden afgeschat voor het geval ze langs gebruikelijke weg verkregen zouden zijn.

Magnetiet wordt als ijzererts gebruikt. 1 ton magnetiet bevat 0,72 t Fe. Voor de bruto energie-inhoud nemen we dan die van ijzererts dat dezelfde hoeveelheid ijzer bevat. Daartoe wordt de waarde van Battelle uit [1] genomen, overeenkomend met 178 kWh/t Fe. Voor magnetiet (Fe_3O_4) komt dit overeen met 247 kWh/t magnetiet.

Ilmeniet wordt voor de produktie van pigment gebruikt. Uit de schets van het productieproces, weergegeven in fig. 8, volgt met de gegevens voor de unit operaties ontleend aan [1,8]:

Alluviale mijnbouw	555 kWh/t ilmeniet
Gravity concentration	430 "
Ontwateren en th. drogen	305 "
Elektrische separatie	70 "
Magnetische separatie	40 "
	----- +
	1400 kWh/t ilmeniet
	=====

Deze berekening moest nogal grof zijn. Globale waarden uit [1] leiden tot 2015 resp. 3299 kWh/t ilmeniet. In deze studie wordt de waarde van 2000 kWh/t ilmeniet concentraat aangehouden.

Olivijn in droge, gemalen vorm heeft een aantal toepassingen die in paragraaf 3.4. zijn behandeld. Een zeer globale indruk van de voor de winning van olivijn benodigde energie wordt afgeleid aan de hand van fig. 7:

Delven	40 kWh/t olivijn
Breken	15 "
Malen	56 "
Maalkogels	4 "
Flotatie	59 "
Tweede flotatie	43 "
Ontwateren	20 "
Thermisch drogen	246 "
Additieven 1 kg à 5,52	5,5 "
<hr/>	
488,5 kWh/t olivijn	
<hr/> <hr/>	

Dit is de bruto energie-inhoud die in deze studie wordt gehanteerd voor het verkrijgen van 1 ton olivijn concentraat van de gewenste kwaliteit langs de gebruikelijke weg.

Anorthiet kan worden toegepast in de cement-industrie bij de bereiding van klinker. Het substitueert daar bijvoorbeeld mergel. Voor de berekening van de energie-inhoud wordt gebruik gemaakt van gegevens uit [21]. Afgraven, transport (b.v. in trucks), breken en malen

(waarbij tegelijkertijd diverse bestanddelen gemengd worden) vormen de eenheidsbewerkingen.

Voor de energie-inhoud van cementbestanddelen wordt uitgegaan van:

Delven en transport	14 kWh/t
Energie voor breken en malen	139 "
	————— +
	153 kWh/t cem. best.
	=====

Hierbij is uitgegaan van het zogenaamde droge proces.

Aan het ontwaterde anorthiet concentraat wordt aldus 153 kWh/t bruto energie-inhoud toegekend, overeenkomend met het gebruikelijk substituuat.

Samenvattend vindt men dan voor de 'conventionele' energie-inhoud van de diverse bijprodukten:

Magnetiet concentraat	247 kWh/t
Ilmeniet concentraat	2000 "
Olivijn concentraat	430 "
Anorthiet concentraat	153 "

6.2.2. De energie-inhoud van de bijprodukten, gewonnen uit tailings.

In [3] is een gedetailleerd overzicht gegeven van het energiegebruik van de scheidingsfabriek. Dit is uitgewerkt in het energieschema van fig.9. Met behulp van dit schema kan men een bruto energie-inhoud

toekennen aan de diverse bijprodukten, afhankelijk van de in sectie 5.4. gegeven methode.

Hieronder volgt een tabel, waarin de bruto energie-inhouden van deze produkten worden vergeleken met die van de uit Duluth gabbro te winnen produkten. Daarbij is zowel de energie-inhoud gegeven indien het totale energiegebruik gewogen is naar conventionele bruto energie-inhoud, als die waarbij gewogen is naar marktwaarde. Alle getallen in kWh/ton produkt.

Stof:	Bruto energie-inhoud	uit Duluth gabbro naar br. en.-inh.	uit Duluth gabbro naar marktw.
koper	36.180	33.305	29.976
nikkel	75.600	69.552	86.774
granulaat	28	26	175
zwavelzuur	300	276	1.489
anorthiet	153	141	125
magnetiet	244	224	506
ilmeniet	2.000	1.840	497
olivijn	488	449	386

7. Eindresultaat.

Het is met behulp van de tot nu toe verzamelde gegevens mogelijk om voor Duluth gabbro een energieschema voor het geheel van hoofd- en bijprocessen op te zetten, zoals dat in fig. 10 is geschied. De naar buiten tredende energiestromen betreffen daar warmteterugwinning of (bij de tailings verwerking) vermindering van de voor de opslag benodigde energie.

Men kan alle hoofd- en nevenprocessen tezamen nemen, ook dan blijft de systeemgrens arbitrair. Zo is in fig. 11 het anodeslib als verkoopbaar produkt aangemerkt (dat als grondstof aan de gespecialiseerde raffinaderij wordt geleverd). De gespecialiseerde raffinaderij blijft dan buiten de systeemgrenzen.

De energiestroom die het systeem binnengaat treedt voor een deel weer uit als bruikbare, teruggewonnen energie. Niet aangegeven is de rest van de energie. Een deel daarvan wordt omgezet in chemische en/of potentiële energie die in het produkt ligt opgeslagen (b.v. door reductie van sulfiden), een zeer groot deel gaat echter ook verloren in de vorm van afvalwarmte. Dat is o.a. zeer duidelijk bij het malen.

Beschouwen we nu de hoeveelheid verkoopbare produkten (het proces is incl. uitlogen):

stof:	massa:	opbrengst:	bruto en-inh (kWht):
Koper	1,1 t	\$ 1881.-	39.798
Nikkel	0,18	\$ 891.-	13.608
Granulaat	6,72	\$ 67.20	188
Zwavelzuur	5,37	\$ 456.-	1.611
Anorthiet	1	\$ 7.15	153
Magnetiet	0,27	\$ 7.80	66
Ilmeniet	4,87	\$ 138.-	9.740
Olivijn	7,13	\$ 157.-	3.479
Sulfiden	0,2		
Anodeslib	0,01		
	----- +	----- +	----- +
Totaal	26,78 t	\$ 3605.15	68.643 kWht

Om een schatting te maken van de directe energiekosten als percentage van de totale opbrengst kan men gebruik maken van de vuistregel dat 1 kWht ongeveer \$ 0.02 kost. Dit betekent dat de in het proces benodigde energie ongeveer 38% van de totale opbrengsten voor haar rekening neemt, als de verkoopbare produkten langs de gebruikelijke weg verkregen zouden worden. Voor Duluth gabbro is dat 40% zonder terugwinning en 35% met terugwinning van energie. Opvallend is de extreem hoge bruto energie-inhoud van ilmeniet, gerelateerd aan de kostprijs.

De bruto energie-inhoud van de produkten uit Duluth gabbro bedraagt 63.198 kWh netto. Deze naar gewicht verdelen over de diverse verkregen produkten is zinloos. Wordt een verdeelsleutel gehanteerd naar conventionele energie-inhoud dan wel naar de marktwaarde, dan ontstaat de tabel die reeds in paragraaf 6.2.2. gegeven was.

Indien een kostprijs wordt toegekend ligt het voor de hand om de benodigde energie als een kostenpost te beschouwen die zodanig over de produkten wordt verdeeld dat de opbrengst maximaal wordt.

Daarnaast kan het van belang zijn om bepaalde deelprocessen afzonderlijk te beschouwen en daarvoor een aparte energie-analyse op te stellen. Een voorbeeld is de bruto energie-inhoud van koper uit Duluth gabbro die 36.100 kWh/t is zonder bijprocessen en uitloggen, en 33.305 kWh/t met bijprocessen en uitloggen.

8. Conclusies en aanbevelingen.

Uit de studie, en met name uit de tabel van sectie 6.2.2., blijkt dat in het geval van Duluth gabbro het reeds uit het oogpunt van direct energiegebruik interessant is, om de winning van bijprodukten uit de tailings verder te bestuderen. Doordat de energie-intensieve ontsluiting bij de tailings reeds geschied is, kost het scheiden van de bijprodukten uit de tailings relatief weinig energie. Co-productie is noodzakelijk en het gebruik van reststoffen is wenselijk om de winning van koper en nikkel uit Duluth gabbro überhaupt energetisch aantrekkelijk te maken, zelfs indien men slechts uitgaat van de omstandigheden in de VS, waar toch al relatief arme ertsen worden gewonnen.

Indien men echter in aanmerking neemt dat gebruik van reststoffen bijdraagt tot het sparen van het milieu en van de betreffende grondstoffen zal blijken dat, naarmate men een langduriger tijdvak in ogenschouw neemt, een scenario met hergebruik van reststoffen gunstiger resultaten oplevert qua energie en kosten.

Ten aanzien van verdere modelvorming nog het volgende:

Het is van groot belang om de techniek van massa- en energiebalansen consequent toe te passen, waarbij men -uitgaande van de behoudswetten- alle reststofstromen in rekening brengt.

Een modulaire opbouw valt te bepleiten. Dit houdt in dat iedere 'black box' in een processchema kan worden opgevat als een nieuw samenstel van processen. Daarbij kan sprake zijn van parallele processen, bijvoorbeeld twee verschillende procedés die in globale cijfers zijn uitgemiddeld. Ook gecompliceerde schema's van

produktieprocessen in bestaande fabrieken kunnen eventueel worden ingevuld. De in- en uitgangsgrootheden, en de bijbehorende overdrachtsfuncties en -coëfficiënten, moeten dan uitwisselbaar zijn met die, welke behoren bij een andere invulling van de 'black box'. Op deze wijze kan men modellen construeren waarin bepaalde concrete situaties snel kunnen worden doorgerekend en vergeleken met andere situaties en met gemiddelde grootheden.

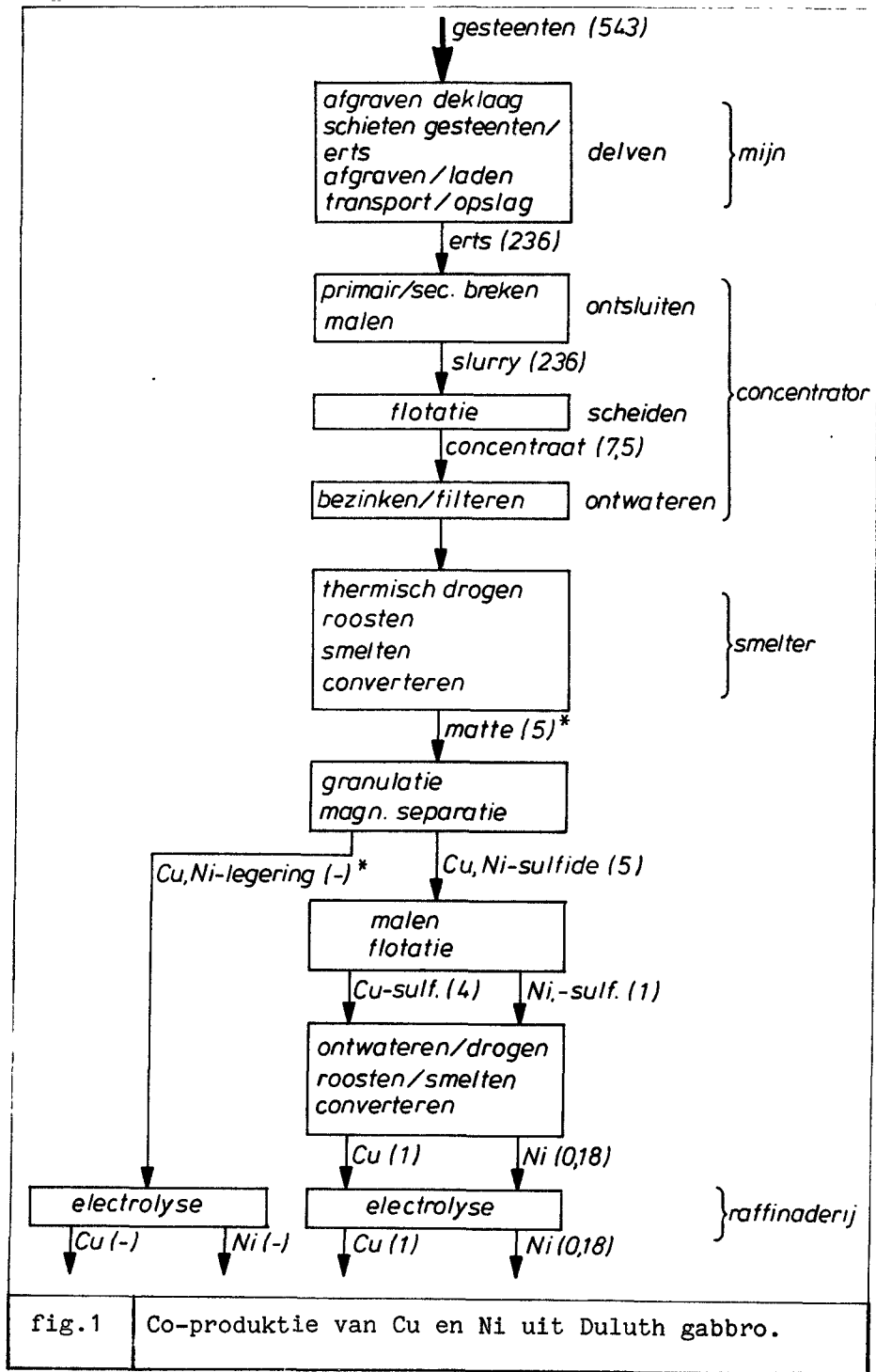
Een pleidooi is hier ook op haar plaats voor het brengen van meer eenheid in de statistische gegevens die her en der in de literatuur verspreid staan en die vaak moeilijk met elkaar in verband kunnen worden gebracht. Vaak bevatten deze gegevens te weinig informatie over de wijze waarop ze tot stand gekomen zijn. Zowel in de keuze van de relevante gegevens als in de totstandkoming ervan dient meer uniformiteit te komen.

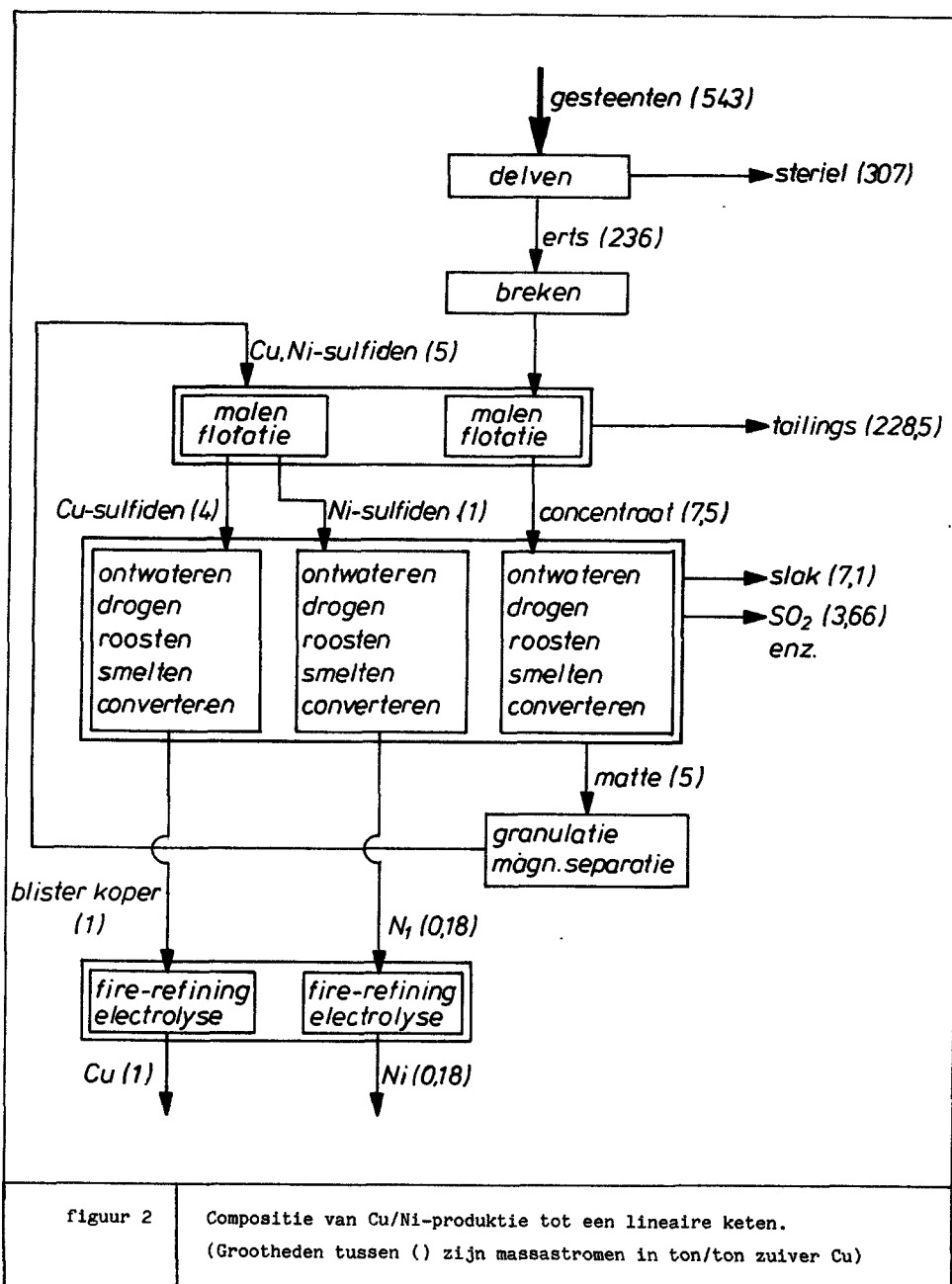
Een opmerking is gewettigd aangaande de warboel in traditioneel overgeleverde eenhedenstelsels. Diverse maateenheden worden gebruikt welke soms niet eens voldoende toegelicht worden. Zo kan 'ton' nu eens metrische ton, dan weer 'short ton', en vervolgens weer 'long ton' betekenen, al naar gelang de soort materiaal, en de Engelse dan wel Amerikaanse herkomst van de betreffende publicatie. Tal van andere exotische massa- en inhoudsmaten, en eenheden voor energie e.d. lijden aan hetzelfde euvel.

Het verdient aanbeveling om de massabalansen sluitend te maken. Ook stromen van zuurstof, kooldioxide, waterdamp enz. dienen erbij te worden betrokken. De energiestromen moeten worden uitgesplitst naar verliezen en aan massa gebonden energiestromen waarbij ook moet worden aangegeven of het om chemische dan wel een andere vorm van energie gaat. Op deze wijze wordt niet alleen een inzicht verkregen in

eventueel terug te winnen energie doch ook in de thermische belasting van het milieu.

De systeemgrenzen dienen duidelijk te worden aangegeven. De modellen dienen te kunnen worden gekoppeld zodat ook inzicht kan worden verkregen in de effecten die optreden als diverse sectoren van de economie sterker vervlochten raken, een integratie die noodzakelijk lijkt om afvalstromen te beperken en grondstofvoorraden te sparen.





figuur 2

Compositie van Cu/Ni-productie tot een lineaire keten.
(Grootheden tussen () zijn massastromen in ton/ton zuiver Cu)

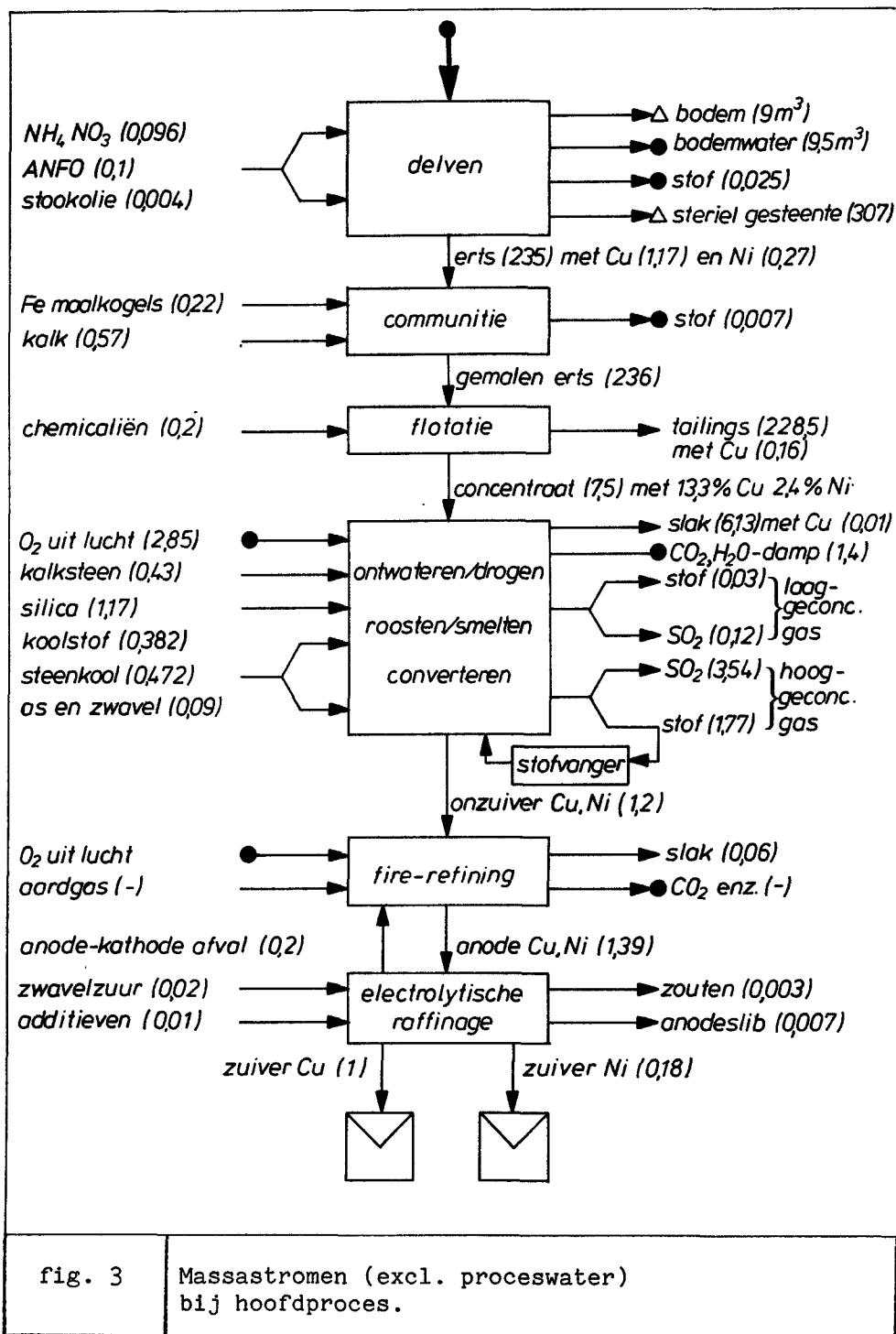
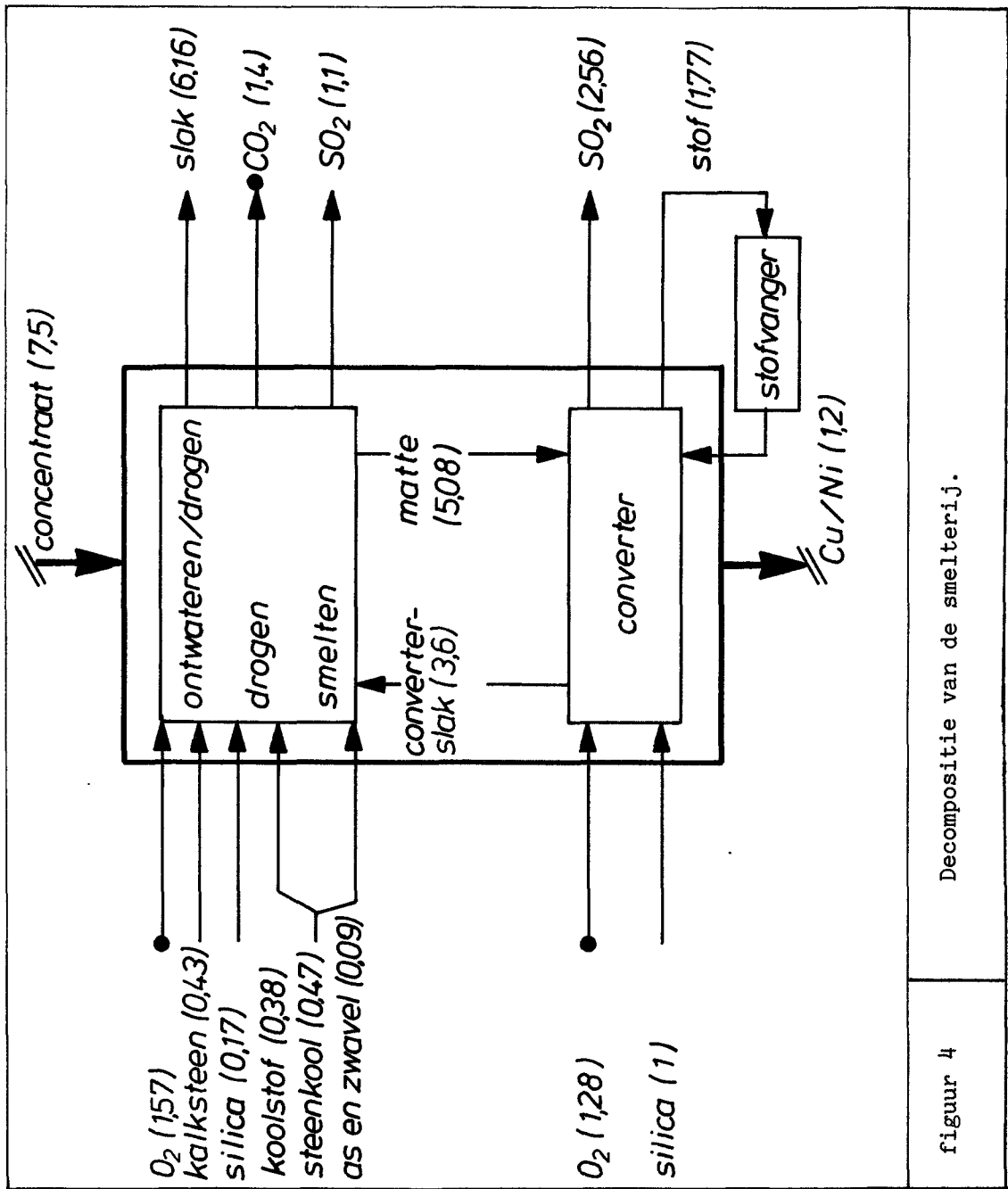


fig. 3

Massastromen (excl. proceswater) bij hoofdproces.



Decompositie van de smelterij.

figuur 4

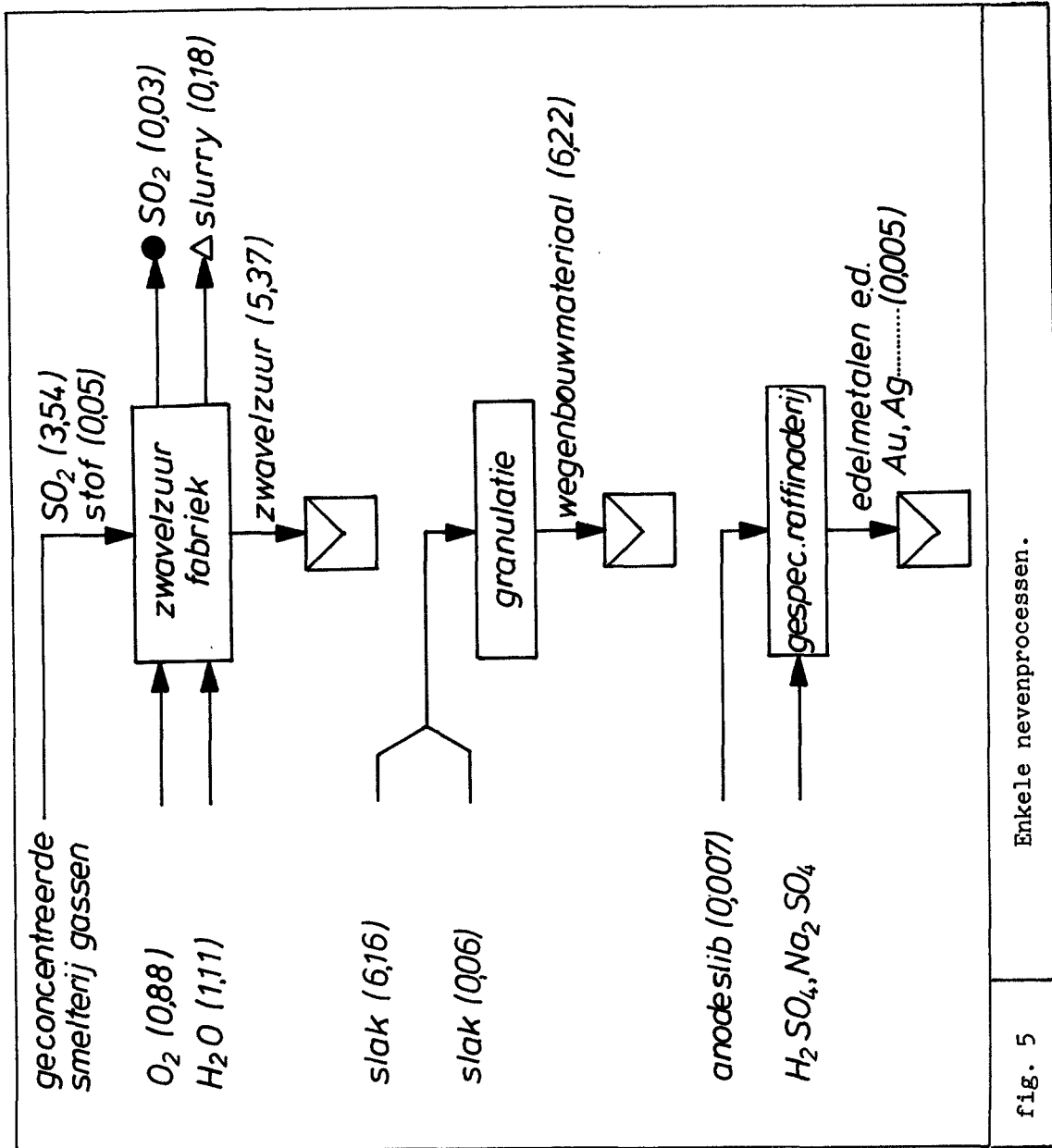


fig. 5

Enkele nevenprocessen.

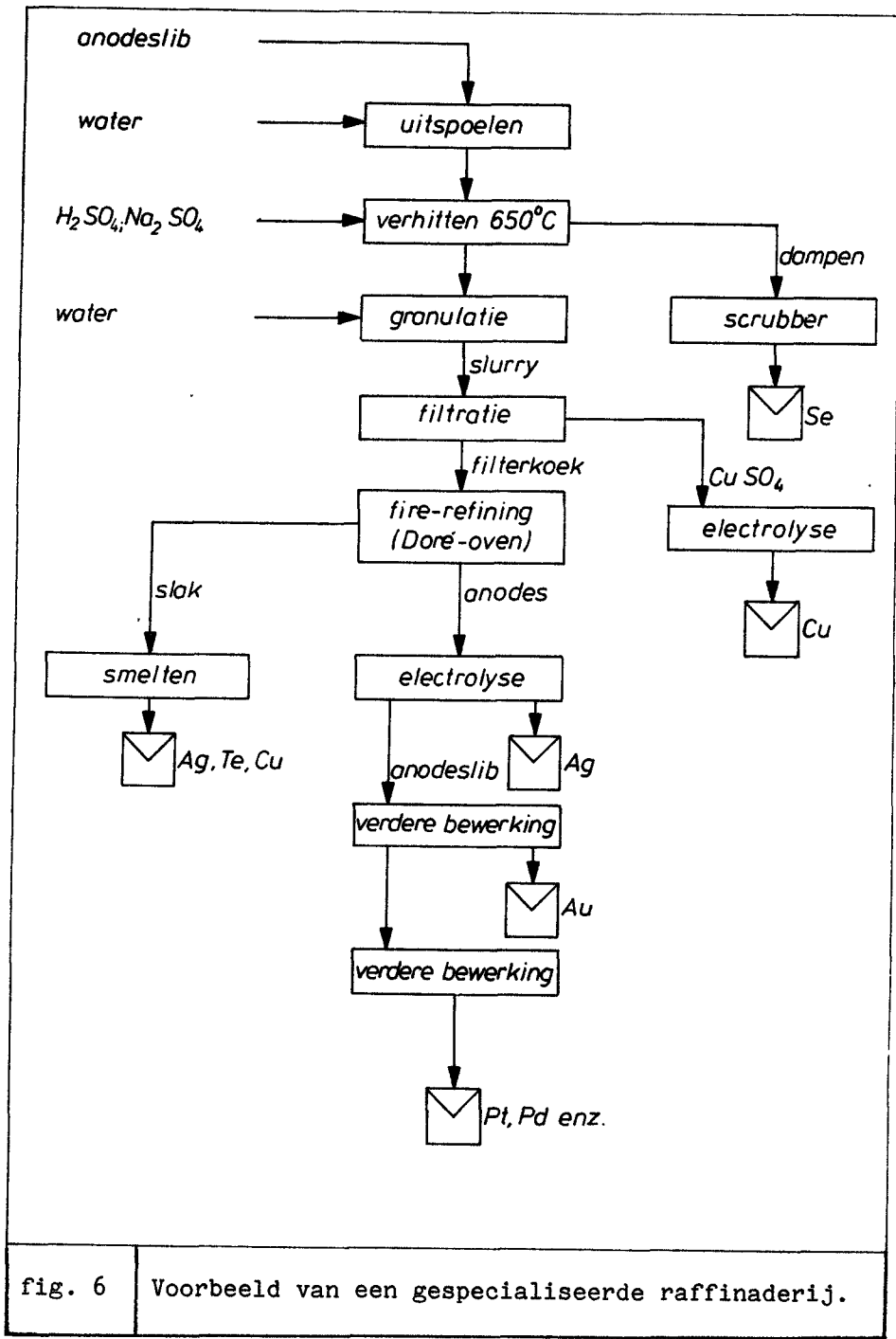
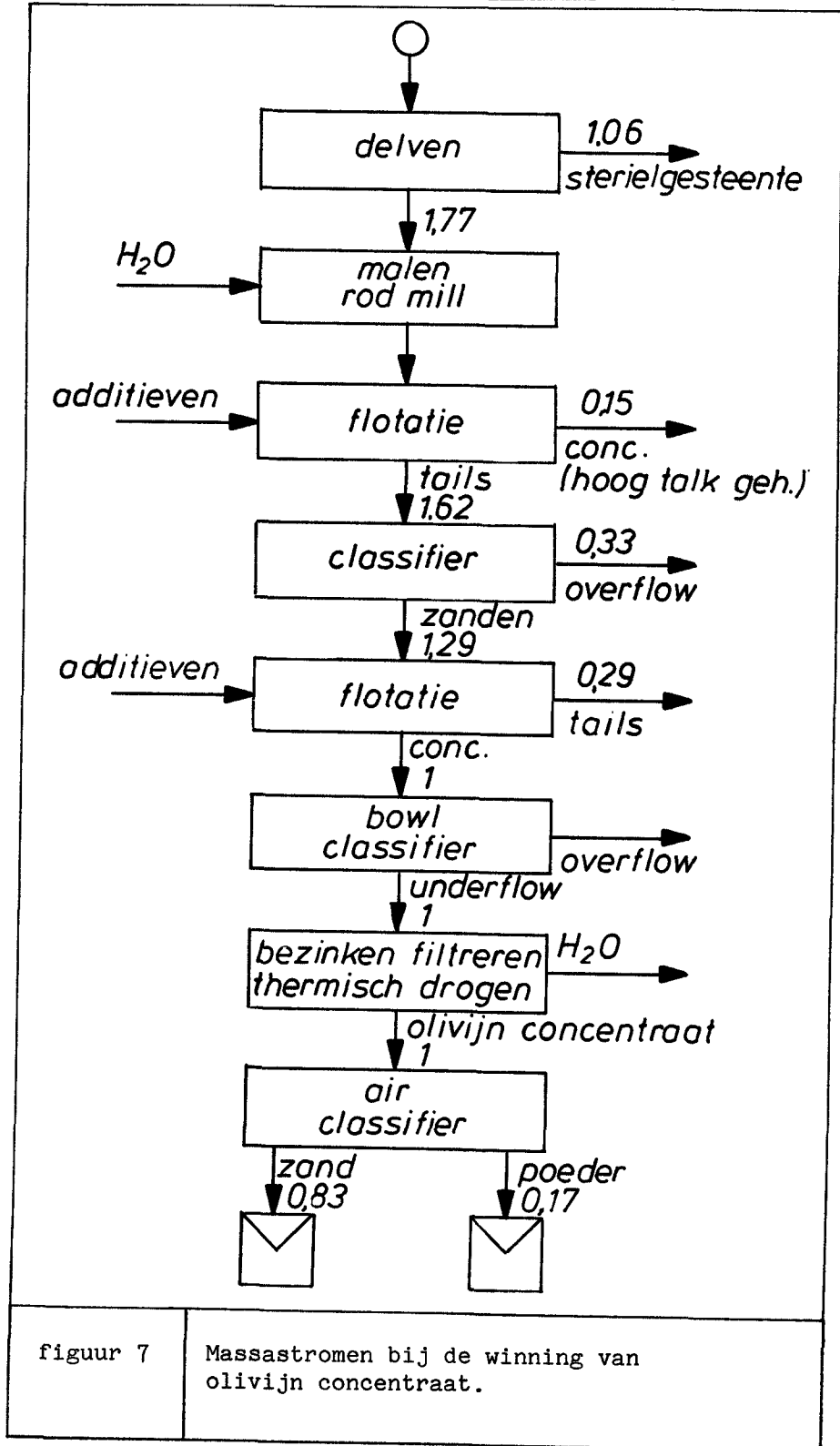
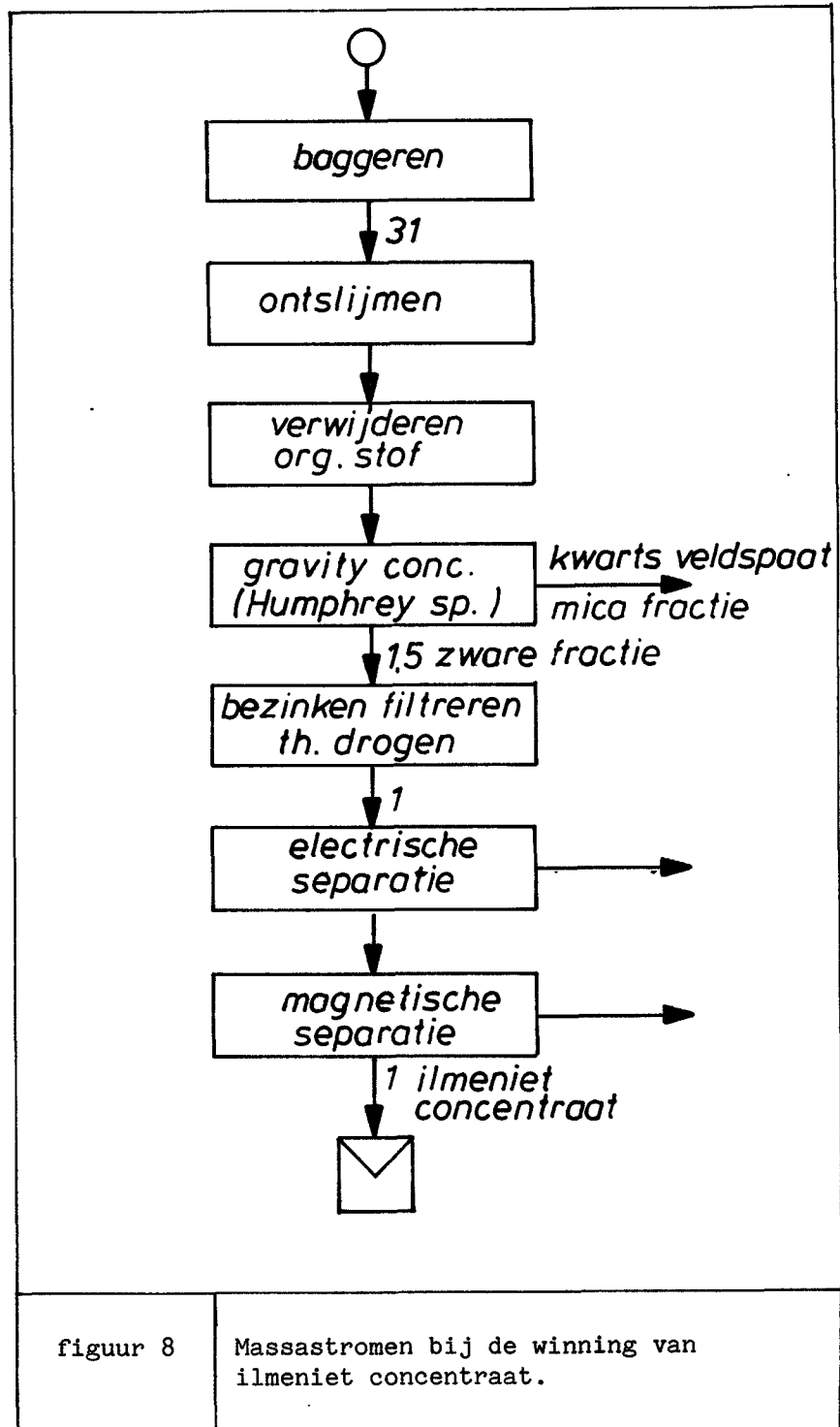


fig. 6 Voorbeeld van een gespecialiseerde raffinaderij.



figuur 7

Massastromen bij de winning van olivijn concentraat.



figuur 8

Massastromen bij de winning van ilmeniet concentraat.

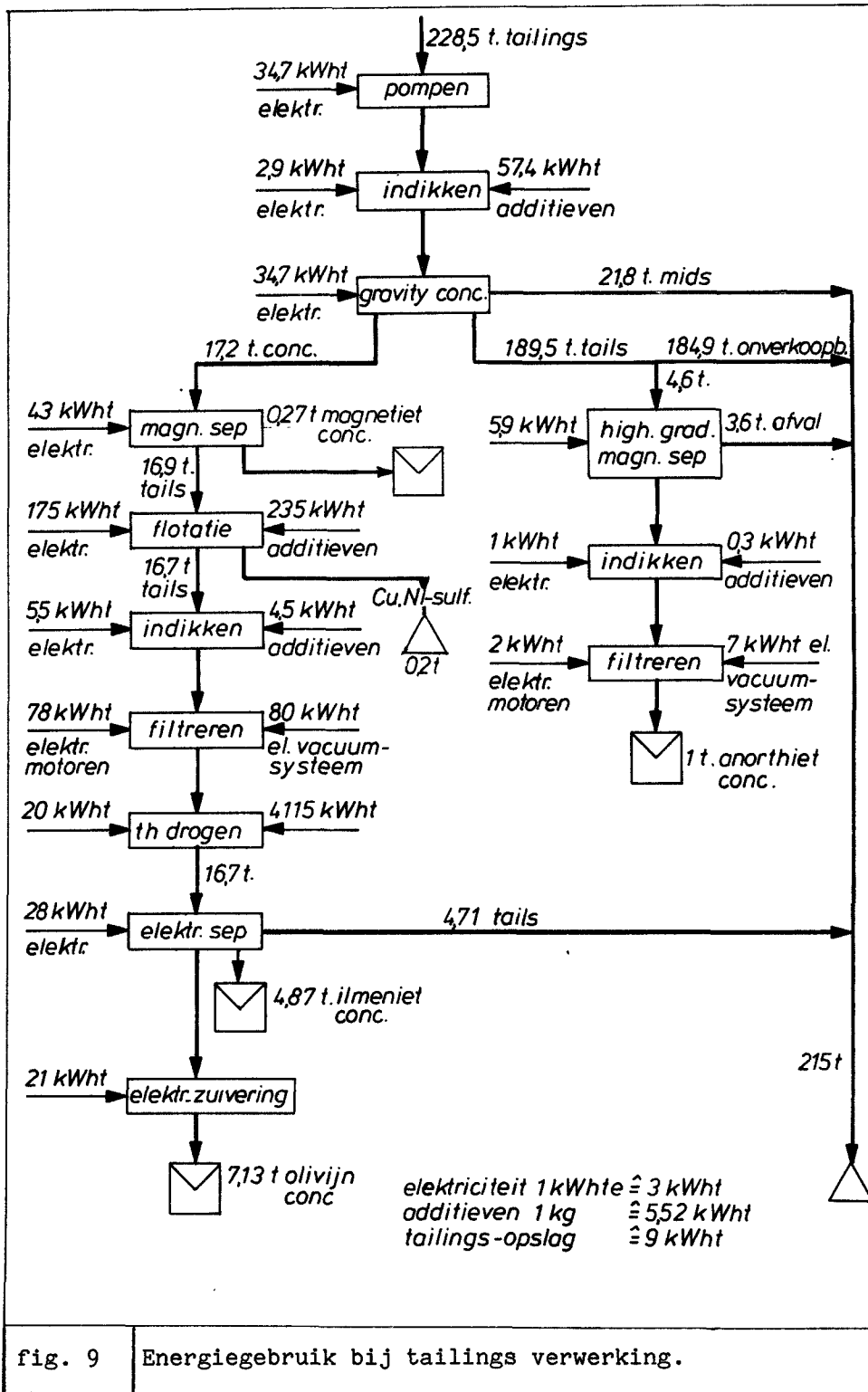


fig. 9 Energiegebruik bij tailings verwerking.

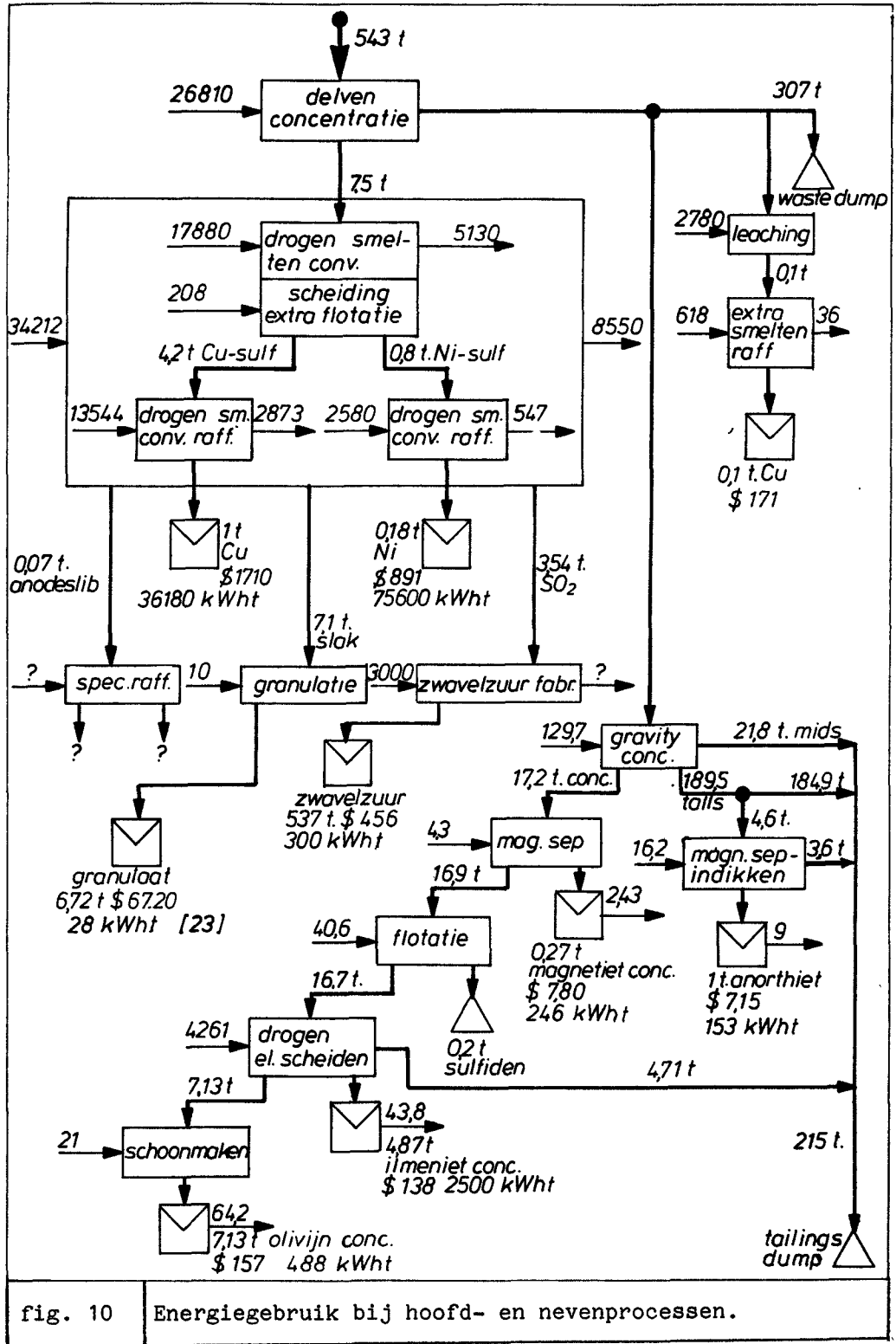


fig. 10 Energiegebruik bij hoofd- en nevenprocessen.

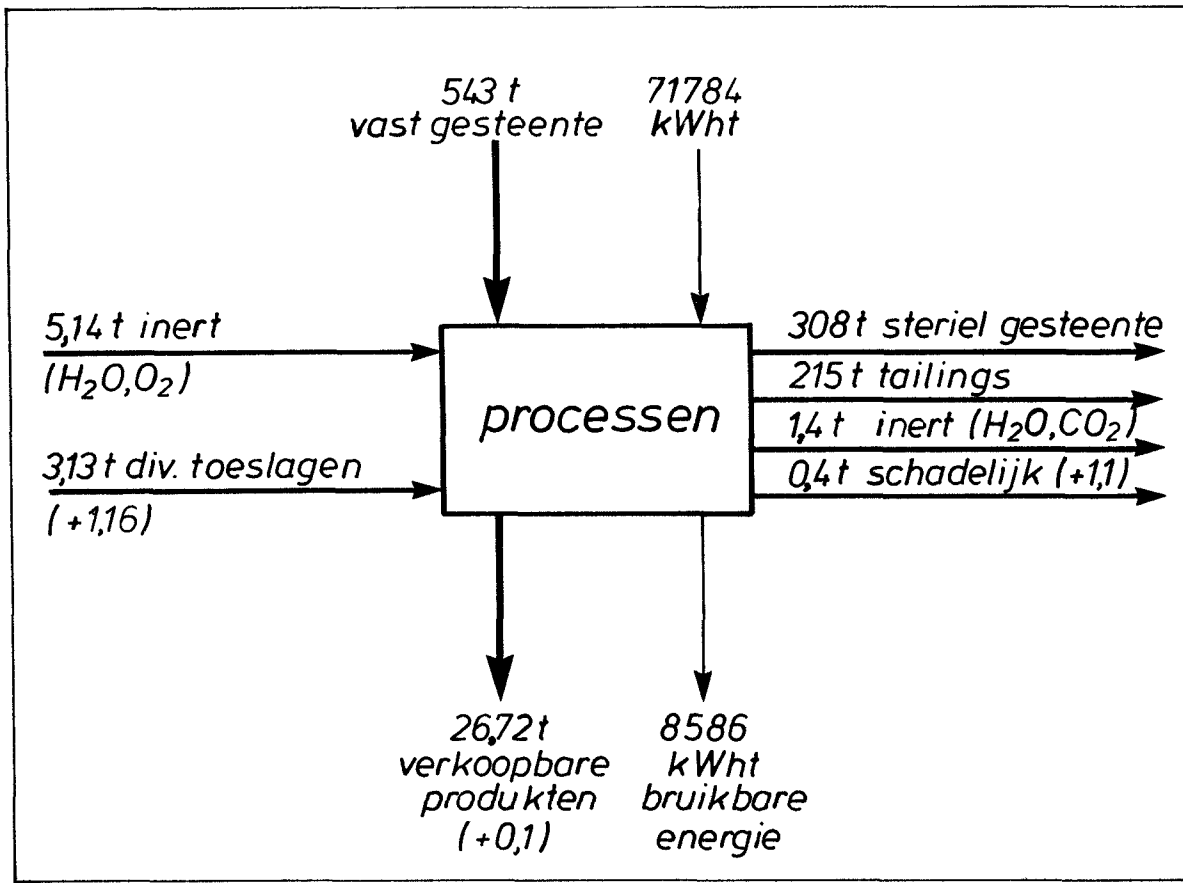


fig. 11 Hoofd- en nevenprocessen tezamen genomen.

REFERENTIES.

- [1] P.F. Chapman en F. Roberts, Metal Resources and Energy, Butterworths, London, 1983
- [2] E. Cook, Limits to Exploitation of Nonrenewable Resources, in Materials: Renewable and Nonrenewable Resources, Am. Ass. for the Advancement of Science, Washington DC, 1976
- [3] J. Marijnissen, The Total-recovery concept as Applied to Mineral Engineering, proefschrift, Univ. of Minnesota, 1984.
- [4] R.C. Kirby en A.S. Prokopovitch, Technological Insurance against Shortages in Minerals and Metals in: Materials: Renewable etc. cf. [2]
- [5] B.A. Wills, Mineral Processing Technology, Pergamon, 1981
- [6] A.B. Cummins et. al., Mining Engineering Handbook, SME, New York, 1973
- [7] Statistical Yearbook, United Nations, 1982
- [8] Mineral Facts and Problems, US Bureau of Mines bull-667, 1976
- [9] S. David Hu, Handbook of Industrial Energy Conservation, Van Nostrand Reinhold, New York.
- [10] Kirk-Othmer, Encycl. of Chemical Technology, Wiley, New York, 1979
- [11] A/S Olivin, A success story which illustrates how demand can be generated to meet supply, World Mining Equipment, 1986
- [12] W.G. Wells jr., Olivine and beneficiation methods.
- [13] B.A. Wills, Mineral Processing Technology, Pergamon, 1981

- [14] D. Altenpohl et. al., Energy Accounting of Aluminium, in contr. to 9th Int. TNO Conf. on the Energy Accounting of Materials etc., 1976.
- [15] Mining Annual Review, published by The Mining Journal, 1986
- [16] E.T. Hayes, Energy Implications of Materials Processing, cf.
[2]
- [17] Industrial Energy Use Data Handbook, Oak Ridge Ass. University, 1980
- [18] P.F. Chapman, The energy cost of producing copper and aluminium from secondary sources, Open University Report ERG 002, UK
- [19] Mular/Bhapu, Mineral Processing Plant Design, SME (USA), 1980
- [20] Ford Foundation, Energy Consumption in Manufacturing, Ballinger, Cambridge Mass., 1973
- [21] P.C. Kreijger, Energy Analysis of Materials and Structures in the Building Industry, in [12].
- [22] E.J. Tuininga, Energy Analysis of Transportation Systems, in
[14]
- [23] P.F. Chapman et.al., Energy Requirement of some Energy Sources, in
[14]
- [24] TNO, Industriële Energiebesparing 1979-1984, TNO-rapport 86-264, Apeldoorn, 1986.

INHOUDSOPGAVE.

1. Inleiding.	1
2. Hoofdlijnen.	4
3. Het produktieproces.	6
3.1. Mogelijke hoofdprodukten.	6
3.2. Het hoofdproduktieproces en haar massastromen.	7
3.2.1. Het delven.	7
3.2.2. Het concentreren.	8
3.2.3. Het smelten.	9
3.2.4. De elektrolytische raffinage.	11
3.3. De nevenprocessen en hun massastromen.	11
3.4. Verwerking van de tailings.	12
4. Primaire winning van de bijprodukten.	17
4.1. Olivijn.	17
4.2. Ilmeniet.	18
4.3. Overige mineralen.	19
5. Energie-analyse van het hoofdproces.	20
5.1. Algemeen.	20
5.1.1. Koper.	20
5.1.2. Nikkel.	21
5.2. Energie-aspecten van de winning van Cu en Ni uit Duluth gabbro	22
5.2.1. Delven.	22
5.2.2. Concentreren.	24
5.2.3. De smelter.	27
5.2.4. De raffinaderij.	30
5.2.5. Totaaloverzicht.	32

5.3. Correctie voor het nikkel.	32
5.4. Uitloggen.	34
5.5. Berekening van de bruto energie-inhoud van Duluth gabbro koper en nikkel.	35
5.6. Transport.	37
6. Energie-analyse van de nevenprocessen.	40
6.1. De verwerking van afvalgassen van de smelter.	40
6.2. De verwerking van de tailings.	42
6.2.1. Prijs en energie-inhoud van de bijprodukten.	42
6.2.2. De energie-inhoud van de bijprodukten, gewonnen uit tailings.	45
7. Eindresultaat.	47
8. Conclusies en aaelingen.	50
FIGUREN.	53
REFERENTIES.	64
INHOUDSOPGAVE.	66

De auteurs.

dr.ir. A.J.D. Lambert is werkzaam bij de Vakgroep Technische Productiesystemen (TPS), Faculteit der Bedrijfskunde van de Technische Universiteit Eindhoven.

dr.ir. J.C.M. Marijnissen is werkzaam bij de Vakgroep Chemische Technologie, Faculteit der Scheikundige Technologie van de Technische Universiteit Delft.

Dankbetuiging.

Dank is verschuldigd aan ir. T. Cartier van Dissel (TUD) voor het zorgvuldig nakijken van het werk en zijn aanvullende opmerkingen en suggesties.

EUT-reports can be obtained, free of charge, as long as stocks permit, by writing to Eindhoven University of Technology, Library of Industrial Engineering and Management Science, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, Netherlands.

Twenty latest EUT-Reports:

- EUT/BDK/12 Production and inventory control with the base stock system
J.P.J. Timmer, W. Monhemius, J.W.M. Bertrand
- EUT/BDK/13 Participative development of a budget system for
operational control Johan J.A. Bakker, Johan C. Wortmann,
Jacques A.M. Theeuwes
- EUT/BDK/14 Integrating management control and operational control
Johan J.A. Bakker, Jacques A.M. Theeuwes, Johan C. Wortmann
- EUT/BDK/15 Halffabrikaten van koper en koperlegeringen: Een analyse
van produktie en afzet in mondiaal perspectief Ad Sannen
- EUT/BDK/16 Studie-bijeenkomst contingentie-benadering Vakgroep
Organisatiekunde
- EUT/BDK/17 Internationale industriële produktie: De economische
theorie en de bedrijfskundige praktijk A.D.M. v.d. Ven
- EUT/BDK/18 Flexibele produktie-automatisering: Het bedrijfskundig
beoordelen ervan tijdens het ontwerpproces van
produktiesystemen bij Volvo Car B.V. H.C.M. Schepers
- EUT/BDK/19 De organisatie van de verplegingsdienst in algemene
ziekenhuizen: I Meetinstrumenten R.J.M. Mercx
- EUT/BDK/20 On the applications of energy analysis and second law
analysis W. Willeboer
- EUT/BDK/21 Een economische kijk op energiesubstitutie, uitgaande van
processen P. van den Heuvel
- EUT/BDK/22 Interne budgettering van de klinische verpleging op basis
van werklasteronderzoek in het St. Annaziekenhuis te Oss
P.W.H.M. van Stiphout
- EUT/BDK/23 Prestatiegrafieken van gereedschappen (Een nieuw
informatiesysteem voor terugkoppeling op korte en lange
termijn) J.M.A. van de Molengraft
- EUT/BDK/24 Vragenlijst verpleegkwaliteit: Onderzoek naar validiteit en
betrouwbaarheid van een instrument voor verpleegkwaliteit
B.J.S. Lacko
- EUT/BDK/25 De organisatie van de verplegingsdienst in algemene
ziekenhuizen
II Vooronderzoek R.J.M. Mercx
- EUT/BDK/26 Prestatiebeoordeling in zeven organisaties
H.F.J.M. van Tuijl, P.M. Janssen, J.A. Algera
- EUT/BDK/27 Economische prestatie meting van industriële activiteiten
H.J.M. van der Veeke
- EUT/BDK/28 Het begroten van softwareprojecten: meten is weten!
F.J. Heemstra
- EUT/BDK/29 Continuous casting in the copper industry P.F. Cuypers
- EUT/BDK/30 Model van een trommeldroger F.P.M. Spruit
- EUT/BDK/31 Het verband tussen afval-arme methoden en energiegebruik
bij de winning van minerale grondstoffen A.J.D. Lambert,
J.C.M. Marijnissen