



De energie-analyse voor de kernenergie

DR. H. J. BLAAUW*

Inleiding

In de discussie over (kern)energie die in ons land wordt gevoerd, is vrij recent opnieuw de energie-analyse te berde gebracht. Dat gebeurde bij het verschijnen van het boek *Tussen kernenergie en kolen. Een analyse* van ir. J. W. Storm van Leeuwen 1). In het boek is onder meer een analyse gemaakt van de energetische aspecten van de omzetting van verbrandingsenergie uit aardgas, olie en kolen, en van kernsplijtingsenergie in elektrische energie. De auteur komt daarbij tot de slotsom dat bij de toepassing van kernenergie er meer energie nodig is voor de instandhouding van de splijtstofkringloop — dat is de verzameling van alle processen die de splijtstof moet doorlopen (van winning, verrijking, splijting tot en met afvalberging) — dan een kerncentrale kan leveren.

Deze conclusie staat lijnrecht tegenover de gevestigde opvatting, dat bij elektriciteitsopwekking met behulp van kerncentrales er juist betrekkelijk weinig energie nodig is voor de splijtstofkringloop. Bij een kritische studie op het Ministerie van Economische Zaken 2) over het genoemde boek zijn gerede twijfels gerezen ten aanzien van de argumenten van Storm van Leeuwen en de daaraan opgehangen bewering. Belangrijke punten van kritiek die in het

rapport van het ministerie worden genoemd, betreffen de berekeningen van de hoeveelheden energie die moeten worden aangewend bij de winning en zuivering van het uraniumerts, de bouw en ontmanteling van de kerncentrale en de verwerking en berging van het radioactieve afval. Wat betreft ertswinning en afvalverwerking zijn de hoeveelheden erts en afval zeer discutabel. Voor de bouw en ontmanteling van de centrale blijkt de methode van berekening die door Storm van Leeuwen wordt gehanteerd aanvechtbaar.

In dit artikel wordt op de methoden voor de schattingen van het energiegebruik bij de bouw van een kerncentrale ingegaan, zoals die in een aantal publikaties zijn gehanteerd. Opvallend is dat bij al die methoden gebruik wordt gemaakt van factoren voor omrekeningen van geld naar energie. Het lijkt daarom zinvol een vergelijking van die methoden aan een economisch georiënteerd publiek voor te leggen.

Energie-analyse

De grondslag van de diverse methoden is te vinden in de energie-analyse. Onder energie-analyse (voorheen ook wel „energy accounting” genoemd) wordt verstaan de bepaling van de energie, waarop beslag wordt gelegd in het productieproces van een goed of een dienst, binnen het kader van een aantal afspraken, en/of de toepassing van de aldus verkregen informatie 3). De afspraken waarop in deze definitie wordt bedoeld, zijn in hoofdzaak fysisch van aard. De meest belangrijke is de scheiding van energie in elektrische energie (e) en niet-elektrische (veelal thermische) energie (t). Elektrische energie is een hoogwaardige vorm van energie, omdat zij voornamelijk wordt verkregen door omzetting uit thermische energie. Het omzettingsrendement is betrekkelijk laag (niet meer dan zo'n 40%) maar de gebruiksmogelijkheden van elektrische energie zijn veel ruimer dan die van thermische energie.

Hoe bepaalt men de energie die in een productieproces wordt gebruikt?

Gewoonlijk kan men een drietal categorieën aangeven voor de bepaling van die energie. De eerste categorie is eenvoudig te doorgronden: de energie die direct aan het proces moet worden toegevoerd. Te denken is aan bij voorbeeld de hoeveelheid energie in de benzine voor een motor die in het proces wordt gebruikt, of de elektrische energie voor het proces die kan worden afgelezen van een kWh-meter. De tweede categorie betreft de materialen voor het proces. Ter bepaling van de gedachten: zwavelzuur wordt aangewend bij de extractie van uranium uit ruw uraniumerts. De bereiding van het zwavelzuur is een chemisch proces dat ten dele voor het proces zelf, ten dele voor de vervaardiging van de benodigde apparaten e.d. energie verbruikt. Die hoeveelheid energie moet men toerekenen aan het te produceren goed, in dit voorbeeld uranium. Men spreekt dan van indirecte energie voor het productieproces. Ook de derde categorie betreft indirecte energie. In deze categorie worden de hoeveelheden energie ondergebracht die worden aangewend voor de constructie van gebouwen, machines, gereedschappen e.d. Daarbij wordt nog een onderverdeling gehanteerd naar energie die direct nodig is voor die constructie, en energie die in de procesmaterialen bij de constructie is geïnvesteerd. De bepaling van de energie uit de eerste categorie is simpel, maar uit de twee andere categorieën ingewikkeld. Immers, in het voorbeeld van het zwavelzuur kan men stellen, dat de benodigde chemische apparaten in een speciale fabriek worden vervaardigd. Die vervaardiging vergt niet alleen directe energie, maar ook de bouw van de fabriek heeft energie gekost die aan de apparaten moet worden toegekend. Voor de bouw van de fabriek heeft men beton nodig die bij bereiding ook weer energie kost enz. Aldus kan men ketens opbouwen waarvan per schakel het energiegebruik moet worden vastgesteld om tot de bepaling van de totale energie voor het uiteindelijke productieproces te komen. Het is daarbij wel te verwachten, dat hoe verder men in de keten van de eerste schakel, het hoofdproces, teruggaat, men steeds minder energie vindt die kan worden toegerekend aan het hoofdproces. Denkt men bij voor-

*De auteur is verbonden aan het Directoraat-Generaal voor Energie van het Ministerie van Economische Zaken.

1) J. W. Storm van Leeuwen, *Tussen kernenergie en kolen. Een analyse*, Ekologische Uitgeverij/Intermediair Bibliotheek, Amsterdam, 1980.

2) Ministerie van Economische Zaken, *Commentaar op het boek „Tussen Kernenergie en Kolen. Een Analyse” van ir. J. W. Storm van Leeuwen, 's-Gravenhage, 1981.*

3) Zie M. Slesser, in: *Proceedings of the 9th International TNO Conference*, Rotterdam, 1976.

beeld weer aan dat zwavelzuur, dan is het duidelijk dat bij meer afnemers van dat zuur het energiegebruik voor vervaardiging van de chemische apparaten over die afnemers moet worden gespreid.

Het belang van energie-analyse is, dat er inzicht ontstaat in de structuur van het totale energiegebruik bij het betreffende productieproces. Met dat inzicht kan men een energetische evaluatie uitvoeren van energie-besparingsmaatregelen en van toe te passen technologieën. Ook kan men onderzoeken wat de mogelijkheden zijn — vanuit energetisch oogpunt — voor substituties van materialen en energie en van „recycling” van artikelen. Men kan berekeningen maken over de korte-termijnelasticiteiten voor brandstofkosten en voorspellingen doen over behoefte aan energie op middellange termijn bij toeleverende bedrijven. Verder kan men uit de energie-analyse fysische grenzen afleiden voor economische activiteiten. Deze mogelijkheden geven de energie-analyse een plaats naast economische analyses.

Een bijzondere betekenis krijgt de energie-analyse, als het te produceren goed elektrische energie is. Dan is een directe vergelijking van de opbrengst aan elektrische energie met het totale energiegebruik mogelijk. Zo'n afweging kan aangeven of het proces van opwekking van elektrische energie uit bij voorbeeld kernenergie, verbranding van aardgas e.d. energetisch rendabel is. Dat wil zeggen, als er meer energie wordt gebruikt voor de opwekking dan er uitkomt, is sprake van energievernietiging en dat zou een grond kunnen zijn om het opwekkingsproces af te wijzen (uiteraard spelen ook andere argumenten — bij voorbeeld economische en milieutechnische — daarbij een rol). Hier zal verder alleen over opwekking van elektriciteit worden gesproken.

Model voor de energie-analyse

Zoals in het voorafgaande al is gesteld, is de bepaling van het totale energiegebruik voor een productieproces complex. Dat geldt zeker ook voor de elektriciteitsopwekking. Men denke alleen al aan een ingewikkeld produkt als de elektriciteitscentrale. Een model dat is ontwikkeld voor de berekening van het energiegebruik, sluit aan bij het input-outputmodel dat in de economische wetenschappen wordt gehanteerd bij de Nationale Rekeningen. Met name hebben Rombough en Koen 4), en Rotty en anderen 5) dit model uitgewerkt en toegepast. Zij hebben daarbij gebruik gemaakt van de energie-input-outputmatrix. Voor de VS is een dergelijke matrix opgesteld door Herendeen 6). De essentie van dat model is de berekening van „energiecoëfficiënten: de verhouding van de totale produktie die een energiebedrijfsklasse (bij voorbeeld elektriciteitsopwekking met oliestook,

Tabel 1. Energiekosten voor de bouw van een 1.000 MW(e)-kerncentrale met een drukwaterreactor

Industriële indeling a)	Kosten in mln. \$	Energiecoëfficiënt b) in MJ/\$	Energieverbruik b) in PJ
Stone & Clay Mining, Quarry	2.5265	99,309	0,2509
New Construction, Residential	0.1500	63,479	0,0095
New Construction, Highway	0.2420	103,826	0,0251
New Construction, Other	8,2975	75,114	0,6233
Maintenance & Repair Constr.	0,2957	70,741	0,0209
Floor Coverings	0,0060	83,624	0,0005
Wood Structures	5,6173	49,603	0,2786
Wood Products	0,1690	55,730	0,0094
Metal Office Furniture	0,0500	81,623	0,0041
Metal Partitions & Fixtures	0,0085	87,789	0,0007
Furniture & Fixtures	0,1169	69,882	0,0082
Misc. Chemical Products	0,9220	301,233	0,2777
Paints & Allied Products	0,5709	148,951	0,0850
Petroleum Refining	0,0025	207,280	0,0052
Glass Containers	0,0020	171,865	0,0034
Concrete Blocks & Brick	4,0202	125,331	0,5039
Gaskets & Insulation	1,3865	83,583	0,1159
Non-Metallic Mineral Products	0,0050	68,523	0,0034
Primary Metal Products	3,9548	129,990	0,5141
Metal Cans	0,8150	144,377	0,1177
Plumbing Fittings & Brass	0,4855	82,492	0,0401
Heating Equip (non-electrical)	3,2125	77,475	0,2489
Fabricated Structural Steel	18,3710	130,053	2,3892
Metal doors, sash & trim	0,2170	115,845	0,0251
Fabricated Plate Work	2,2181	121,863	0,2703
Sheet Metal Work	0,4920	121,157	0,0596
Architectural Metal Work	0,0396	149,489	0,0059
Misc. Fabricated Wire Products	0,4975	152,461	0,0758
Pipe, Valves & Fittings	27,8474	77,724	2,1644
Fabricated Metal Products	5,9298	96,961	0,5750
Steam Engines & Turbines	47,3070	88,781	4,1999
Internal Combustion Engines	0,9400	63,569	0,0598
Construction Machinery	6,7800	77,036	0,5223
Elevators & Moving Stairways	0,0750	62,511	0,0047
Conveyors & Conveying Equip.	0,1206	67,861	0,0082
Hoists, Cranes & Monorails	0,9267	79,484	0,0737
Special Dies & Tools	0,0571	56,130	0,0032
Special Industry Machinery	0,7765	68,594	0,0533
Pumps & Compressors	7,8049	61,400	0,4792
Blowers & Fans	3,0433	66,743	0,2031
Power Transmission Equip.	0,9267	69,962	0,0648
General Industrial Machinery	3,7290	65,872	0,2456
Computers	1,6847	28,943	0,0488
Refrigeration Machinery	0,0750	67,472	0,0051
Electric Measuring Instruments	0,0400	40,361	0,0016
Transformers	0,6537	85,427	0,0558
Switchgears & Switchboards	1,5076	51,418	0,0775
Motors & Generators	0,8845	68,908	0,0610
Industrial Controls	4,7130	40,743	0,1920
Electrical Industrial Appar.	0,9750	74,304	0,0724
Lighting Fixtures	1,0890	80,781	0,0880
Wiring Devices	4,4860	78,293	0,3512
Telephone & Telegraph	0,0850	45,133	0,0038
Storage Batteries	0,0300	79,982	0,0024
Electrical Equipment	0,0140	65,061	0,0009
Railroads & RR Cars	1,1650	116,583	0,1358
Engineering & Scientific Instr.	2,4800	43,326	0,1074
Misc. Manufactures	0,0100	71,567	0,0007
Water & Sanitary Services	1,3650	122,960	0,1678
Misc. Business Services	2,7000	33,799	0,0913
Misc. Professional Services	23,7500	27,988	0,6647
Educational Services	0,5000	52,497	0,0262
Other non-energy expenses (such as Land)	2,2350	—	—
			16,7840 +

a) Terwille van de duidelijkheid is de Amerikaanse nomenclatuur aangehouden.

b) 1 MJ = 10⁶ J; 1 PJ = 10¹⁵ J; 1 MJ = 0,2733 kWh.

kernenergie e.d.) moet leveren aan de economie opdat een bepaalde bedrijfsklasse een eenheidshoeveelheid produkt (veelal per gulden, dollar enz.) levert voor finaal gebruik. Door het gebruik van deze energiecoëfficiënten wordt ook het indirecte energiegebruik automatisch meegenomen. In formulevorm zou men dan kunnen schrijven:

$$X = \sum_{j=1}^N e_{ij} Y_j$$

waarbij

X_i : de totale energieproduktie in de energiebedrijfsklasse i (uitgedrukt in J);

Y_j : de totale produktie (in geld), die door bedrijfsklasse j wordt geleverd voor eindverbruik;

e_{ij} : de energiecoëfficiënt;

N: enz. het aantal onderscheiden bedrijfsklassen.

4) Ch. T. Rombough en B. V. Koen, *The Total Energy Investment in Nuclear Power Plants*, Technical Report ESL-31, Energy Systems Laboratory, Coll. of Engineering, Univ. of Texas, Austin, 1974.

5) R. M. Rotty e.a., *Net Energy from Nuclear Power*, Report IEA-75-3, Institute for Energy Analysis, Oak Ridge Associated Universities, 1975.

6) R. A. Herendeen, *An Energy Input-Output Matrix for the United States, 1963, User's Guide*, Center for Advanced Computation, Univ. of Illinois, CAC Doc. nr. 69, Urbana, 1973.

Voor een korte schets van de wiskundige achtergrond wordt verwezen naar de appendix. De zin van deze formule kan worden toegelicht aan de hand van tabel 1 die in het werk van Rombough en Koen is vermeld. Deze tabel bevat voor de Amerikaanse situatie de produkten die voor de bouw en inrichting van van een kerncentrale van 1.000 MW(e) nodig zijn. De hoeveelheden van die produkten worden gemeten in dollars (tweede kolom). De energiecoëfficiënten (derde kolom) worden uit de input-output-matrix berekend en dienen dan voor omrekening naar energiegebruik (vierde kolom).

Het grote voordeel van het gebruik van dit model zit in het verband met het economische input-outputmodel. Veel economische gegevens zijn voorhanden en betrekkelijk gemakkelijk bruikbaar. Bovendien is de begripsvorming ten aanzien van het energieberekeningsmodel vanwege dat verband eenvoudig. Met name de disaggregatie van energieverbruik over bedrijfsklassen geeft de mogelijkheid op juiste wijze het vaak lastig te traceren indirecte energiegebruik te bepalen. Een ander belangrijk punt, dat verderop nog zal worden aangevoerd, is dat in het input-outputmodel voor de Nationale Rekeningen het verbruik in de diverse bedrijfsklassen centraal staat. De toegevoegde waarde wordt niet in de transacties tussen bedrijfsklassen meegenomen. Nu bestaat die toegevoegde waarde veelal voornamelijk uit lonen en rente. Die lonen en rente hebben (vrijwel) niets met energiegebruik te maken. Voor rente is dat direct duidelijk, maar voor lonen is het volgende sommetje illustratief (zie voetnoot 4). Een mens die zware lichamelijke arbeid verricht, levert in een werkdag van 12 uren ongeveer 1 kWh aan energie. Hij consumeert daarvoor voedsel dat circa 3,5 kWh (per dag) vertegenwoordigt. Maar gemiddeld consumeert hij dagelijks zo'n 175 kWh aan energie (dit geldt voor in Nederland; in de VS is dit ca. 290 kWh) in andere vorm dan voedsel. Immers, voor 1976 was het totaal binnenlands energieverbruik (TVB) ongeveer 65.000 kWh per jaar per hoofd van de bevolking 7). De menselijke inbreng is ten opzichte van die 175 kWh zeer gering: 0,6%. En dat geldt alleen dan als zware lichamelijke arbeid wordt verricht. Een gemiddelde over de gehele bevolking is moeilijk te geven, maar zal ruim onder deze 0,6% liggen. Bij berekening van het energieverbruik voor productieprocessen, en dus ook voor de bouw van een kerncentrale, kan de menselijke energie gevoelig buiten beschouwing blijven.

Er kleven uiteraard ook bezwaren aan het model. Die bezwaren wijken niet af van die van het input-outputmodel in de economische wetenschappen en betreffen in hoofdzaak het globale karakter van het model. Ten eerste is de indeling in bedrijfsklassen niet eenduidig: er bestaat een zekere vrijheid voor die indeling. Daarbij is het overigens ook de

vraag of die indeling — voor macro-economische berekeningen wellicht optimaal — wel de beste is voor de energie-analyse. Ten tweede kan een bedrijfsklasse een breed scala van goederen produceren, zodat middeling over die bedrijfsklasse kwestieus kan zijn. Zo omvat de productie van de bedrijfsklasse „chemische industrie etc.” (bedrijfsklasse 13 in 1978) produkten die ook qua energiegebruik ver uiteenlopen (zie tabel 1, de posten „misc. chemical products”, „paints & allied products”, „petroleum refining”). Het is te verwachten, dat voor een complex produkt, zoals een kerncentrale, deze bezwaren van weinig belang zijn vanwege statistische uitmiddeling over vele onderdelen.

Een interessante verkorte versie van dit model werd gehanteerd door Kistemaker 8). Hij heeft voor de berekening allereerst de kosten van een kerncentrale gehalveerd omdat de toegevoegde waarde naar zijn inzicht in dat geval ongeveer 50% van de produktiewaarde is. Daarbij heeft hij een grove indeling gemaakt van de onderdelen van de centrale. Van die onderdelen heeft Kistemaker primair de energie-inhoud en de kosten van de materialen bepaald, omdat voor de omrekening van hoeveelheid materiaal naar energie-inhoud rechtstreekse informatie voorhanden is, en daarna de overige kosten berekend.

Op die laatste categorie heeft hij de verhouding van totaal binnenlands energieverbruik tot het bruto nationale produkt (BNP) toegepast om tot de energie-inhoud ervan te komen (situatie in de VS). Zijn bevindingen staan vermeld in tabel 2. De overeenkomst met de resultaten van Rombough en Koen en Rotty e.a. is opmerkelijk. Dit duidt erop, dat Kistemaker bij de indeling de meest energie-intensieve posten apart heeft genomen. Een vergelijking met tabel 1 bevestigt dit (zie de posten: „fabricated structural steel”, „pipe, valves and fittings” en „steam engines and turbines”). Toch is ook kritiek ten aanzien van de rekenwijze op zijn plaats. Kistemaker hanteert bij de categorie „overige” een energiecoëfficiënt (TVB/BNP), waarin ook de toegevoegde waarde wordt meegerekend, namelijk in het BNP. Vermoedelijk heeft deze kritiek geen grote invloed op het eindresultaat, omdat Kistemaker was begonnen met halvering

van de bouwkosten juist met het oog op de toegevoegde waarde.

De meest verregaande vereenvoudiging van het model wordt door Storm van Leeuwen toegepast. Hij rekent met één energiecoëfficiënt (namelijk de verhouding van TVB tot BNP) de totale bouwkosten van een 1.000 MW(e)-kerncentrale om in energieverbruik. In het licht van het voorgaande is duidelijk, dat Storm van Leeuwen bij gebruik van zowel die ene energiecoëfficiënt als de totale bouwkosten de toegevoegde waarde meeneemt. Het is dan ook niet verwonderlijk, dat hij een factor drie à vier hoger uitkomt dan Rombough, Rotty en Kistemaker. De waarde die aan de calculatie van Storm van Leeuwen moet worden toegekend, moet om die reden zeer gering worden geacht.

Het gebruik van TVB/BNP als energiecoëfficiënt is alleen te verdedigen als geen of uitermate weinig informatie over het geproduceerde goed en over de disaggregatie van het energiegebruik bij de productie voorhanden is. Het is te verwachten, dat deze methode dan alleen een bovengrens voor het energiegebruik stelt.

Het totale energiegebruik voor elektriciteitsopwekking met behulp van kerncentrales

Ten slotte wordt een overzicht gegeven van het totale energiegebruik voor het genereren van elektrische energie uit kernenergie. Daartoe moet voor het gehele proces van uraniumwinning, -verrijking, -versplijting tot en met opwerking van verbruikte splijtstof en afvalverwerking, het energiegebruik worden bepaald. De meest gezaghebbende studie hierover is die van Rotty en anderen, die een intensief gebruik hebben gemaakt van het input-outputmodel. Die studie is ook gehanteerd in het rapport van het Ministerie van Economische Zaken. In tabel 3 zijn de resultaten weergegeven.

7) Zie bij voorbeeld Algemene Energieraad, *Klein Vademecum voor de Energie 1980*, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1980.

8) J. Kistemaker, *Energie-analyse van de totale kernenergie-cyclus gebaseerd op licht-water-reactoren*, Amsterdam, 1975.

Tabel 2. Energie voor de bouw van een 1.000 MW(e)-kerncentrale volgens Kistemaker

Onderdeel	Kosten in mln. \$	Specificatie	Energie-inhoud a)
Grond en gebouwen	60.	Beton en staal Overig (\$ 50 mln.)	1,91 PJ(t) 3,15 PJ(t)
Reactorvat en toebehoren	70.	Staal en uranium Overig (\$ 50 mln.)	0,60 PJ(t) + 1,81 PJ(e) 3,15 PJ(t)
Turbo-generatoren	107.	Staal en koper Overig (\$ 107 mln.)	0,45 PJ(t) 6,84 PJ(t)
Koeltorens	30.	Beton en staal Overig (\$ 30 mln.)	0,22 PJ(t) 1,80 PJ(t)
		Totaal	18,1 PJ(t) + 1,81 PJ(e) +

a) (e): elektrische energie; (t): niet-elektrische (thermische) energie.

De post „afvalverwerking en -berging” (0,1 PJ) is in het rapport berekend met TVB/BNP als energiecoëfficiënt, omdat de informatie over energiegebruik voor de aanleg van een zoutmijn gering is. De beperking die in de vorige paragraaf is aangegeven, is dan ook van toepassing.

Tabel 3. Energiegebruik voor de splijstofcyclus (1.000 MW(e)-centrale, capaciteitsfactor 0,75)

Onderdeel splijstofcyclus	Energiegebruik per jaar
Mijnbouw, zuivering erts	0,20 PJ
Conversie naar uraanhexafluoride	0,23 PJ
Verrijking (gasdiffusie)	1,39 PJ
Splijstofelementenfabricage	0,10 PJ
Transport	0,01 PJ
Bouw en ontmanteling centrale	0,76 PJ a)
Opwerking	0,01 PJ
Afval	0,10 PJ
	+ 2,80 PJ
Centrale levert per jaar 23,65 PJ	

a) Gemiddeld over de technische levensduur van 30 jaren.

Uit de tabel blijkt dat het energiegebruik voor verrijking van het uranium de belangrijkste post vormt. Energiebesparing zou juist daar de meeste zoden aan de dijk zetten. De opmerking van Kistemaker dat verrijking van uraan door ultracentrifugeren ongeveer een factor tien minder aan energie kost dan verrijking via gasdiffusie, is dan ook veelbetekend. Het blijkt verder dat een kerncentrale van 1.000 MW(e), die aan energie ruwweg 20 PJ heeft gekost, zich zelf in termen van energie heeft terugverdiend in circa één jaar.

In het rapport van Economische Zaken wordt een energie-analytische vergelijking getrokken tussen de diverse energiedragers voor elektriciteitsopwekking. Daarbij wordt als „figure of merit” de verhouding van netto energieopbrengst tot het totale energiegebruik gehanteerd. Tabel 4 geeft daarvan een overzicht.

Tabel 4. Vergelijking energiedragers voor elektriciteitsopwekking

Energiedrager	„Figure of merit”
Aardgas	7,4
Kolen	3,1 - 3,5 a)
Olie	2,4 - 4,3 b)
Uranium	8,4

a) De marge, die is aangehouden, betreft een mogelijke keuzevrijheid voor het proces van ontzwaveling.

b) De mate, waarin de energie voor olieraffinage aan stookolie kan worden toegerekend, is weerspiegeld in deze marge. Veelal wordt stookolie als een residu beschouwd.

De getallen voor de fossiele brandstoffen hebben slechts een indicatieve waarde, omdat er tot op heden betrekkelijk weinig is gedaan aan de energie-analyse van elektriciteitsopwekking met centrales die gestookt worden met olie, aardgas en kolen.

Slotwoord

De boodschap, die dit artikel tracht uit te dragen is, dat energie-analyse een nuttig instrument is — naast andere instrumenten van economische en milieutechnische aard — voor beoordeling van processen. De toepassing van de energie-analyse vereist evenwel de nodige zorgvuldigheid. In het kader van de energie-analyse voor elektriciteitsopwekking slaat kernenergie een zeer goed figuur ten opzichte van verbrandingsenergie uit gas, olie en kolen.

H. J. Blaauw

Appendix

Ter verduidelijking van de in de tekst gebruikte formule volgt hier een beknopte schets van het model. Aangenomen wordt dat in de economie N bedrijfsklassen zijn te onderscheiden. Gedefinieerd worden dan (uitgedrukt in geld):

X_i : de totale jaarlijkse produktie van bedrijfsklasse i ($i = 1, \dots, N$);

X_{ij} : de hoeveelheid produkten van bedrijfsklasse i , die per jaar wordt afgenomen door bedrijfsklasse j ;

Y_i : de hoeveelheid produkten van bedrijfsklasse i die per jaar wordt afgezet voor finaal gebruik.

Er geldt dan:

$$X_i = \sum_{j=1}^N X_{ij} + Y_i \quad (i = 1, \dots, N)$$

Definieert men $A_{ij} = X_{ij}/X_j$ (de hoeveelheid produkt van bedrijfsklasse i die nodig is voor de produktie van een eenheidshoeveelheid produkt door bedrijfsklasse j) dan geldt:

$$X_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} X_j + Y_i \quad (i = 1, \dots, N)$$

Kent men A_{ij} en Y_i dan kan men deze vergelijking oplossen (mits aan een aantal wiskundige condities is voldaan):

$$X_i = \sum_{j=1}^N q_{ij} Y_j \quad (i = 1, \dots, N)$$

waarbij q_{ij} is bepaald door:

$$q_{ij} = \delta_{ij} + \sum_{k=1}^N q_{ik} A_{kj} \quad (i, j = 1, \dots, N)$$

Een mogelijke oplossingsmethode is iteratie. Zij na k een bedrijfsklasse die elektrische energie produceert, dan wordt genoteerd:

$$X_k = \sum_{j=1}^N e_{kj} Y_j$$

Dus met de constructie van e_{kj} wordt dat deel van Y_j dat voor de produktie van elektrische energie wordt aangewend, vertaald in energie die bij die produktie wordt gebruikt.