1981-09_gistingsgas-energiebron

stora

Gistingsgas als energiebron op rioolwaterzuiveringsinrichtingen

1981-09

81-9

stora

postbus 414, 2280 AK Rijswijk Z.H. 070 - 980.287 stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

Gistingsgas als energiebron op rioolwaterzuiveringsinrichtingen

STOWA
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 8090
3503 RB Utrecht
tel. 030-321199
fax 030-321766

Publikaties en het publikatieoverzicht kunt u uitsluitend bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-611188
fax 079-613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en een duidelijk afleveradres.

	Inhoud	I - II
	Ten geleide	III
1	SAMENVATTING	1 - 4
2	INLEIDING	5
3	ENERGIEBESPARINGSMOGELIJKHEDEN	6 - 8
4	GISTINGSGASPRODUKTIE EN ENERGIEBEHOEFTE	9 - 14
4.1	Gistingsgasproduktie	9
4.2	Energiebehoefte	10 - 12
4.2.1	*algemeen*	10 - 11
4.2.2	*warmtebehoefte van de gisting*	11
4.2.3	*krachtbehoefte van de beluchting*	11 - 12
4.2.4	*krachtbehoefte van overige onderdelen*	12
4.3	Energieproduktie en energiebehoefte (overzicht)	13 - 14
5	HET RENDEMENT VAN EIGEN ENERGIEOPWEKKINGSINSTALLATIES	15 - 19
6	ENERGIEMODEL	20 - 33
6.1	Inleiding	20 - 21
6.2	Energiemodel	21 - 23
6.3	Parameterfluctuaties	24 - 25
6.4	Resultaten	26 - 32
6.5	Overige systemen	32 - 33
7	KOSTENMODEL	34 - 46
7.1	Inleiding	34
7.2	Kostenmodel	34 - 37
7.3	Parameters	38 - 41
7.3.1	*energetische invoergegevens*	38
7.3.2	*aardgas en elektriciteitsprijzen*	38 - 39
7.3.3	*inflatiepercentage*	39 - 40
7.3.4	*looptijd*	40
7.3.5	*economische invoergegevens*	40 - 41
7.4	Resultaten	42 - 46
8	INVESTERINGSKOSTEN EIGEN ENERGIEOPWEKKINGSINSTALLATIES	47 - 52
9	NETTO BESPARINGEN VAN EIGEN ENERGIEOPWEKKING	53 - 57
10	OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN	58
11	LITERATUUR	59

Bijlage 1

1	INVENTARISATIE GISTINGSGASPRODUKTIE EN ENERGIEPRODUKTIE	61 - 75
1.1	Inleiding	61 - 62
1.2	Gasproduktie per kg afgebroken organische droge stof	62 - 63
1.3	Afbraak organische stof	63 - 64
1.3.1	*gistingstemperatuur*	64
1.3.2	*gistingstijd*	65
1.3.3	*pH, alkaliniteit, vluchtige vetzuren*	66
1.3.4	*aanwezigheid toxische stoffen*	66 - 67
1.3.5	*menging in de gistingstank*	67 - 68
1.3.6	*aanwezigheid voedingsstoffen*	68
1.3.7	*afbraakpercentage*	68 - 71
1.4	Gasproduktie per kg organische stof, optimaal	71
1.5	Gasproduktie per kg organische stof, huidige praktijk	71 - 72
1.6	Gasproduktie per kg droge stof	72
1.7	Gasproduktie per i.e.	73 - 74
1.8	Energieproduktie per i.e.	74 - 75

Bijlage 2

2	INVENTARISATIE ENERGIEBEHOEFTE	76 - 86
2.1	Inleiding	76
2.2	Verwarming gistingstanks	77 - 80
2.2.1	*opwarming slib*	77 - 78
2.2.2	*transmissieverliezen*	79 - 80
2.2.3	*totale warmtebehoefte*	80
2.3	Krachtverbruik beluchting	80 - 86
2.3.1	*BZV-verwijdering*	80 - 82
2.3.2	*endogene ademhaling*	82
2.3.3	*stikstofverwijdering*	83 - 84
2.3.4	*totale zuurstofbehoefte*	84
2.3.5	*zuurstoftoevoerrendement*	85
2.3.6	*energieverbruik*	85 - 86
2.4	Overig krachtverbruik	86

Bijlage 3

3	ENERGIEBESPARING BIJ TOEPASSING EIGEN ENERGIEOPWEKKING	87 - 89

Bijlage 4

4	GEVOELIGHEIDSANALYSES ENERGIEMODEL	90 - 94

Bijlage 5

5	GEVOELIGHEIDSANALYSES KOSTENMODEL	95 -107

Ten geleide

In de afgelopen jaren is de prijs van aardolie en aardgas sterk gestegen. Gelet op de beperkte hoeveelheid van deze fossiele brandstoffen en de aanhoudend grote vraag daarnaar, heeft deze stijging een structureel karakter gekregen waaraan ook de zuiverende overheid het hoofd zal moeten bieden.

Het wordt daardoor steeds interessanter om het gistingsgas, dat bij de zuivering van rioolwater kan worden gewonnen, als eigen energiebron op rioolwaterzuiveringsinrichtingen te gebruiken.

Gistingsgas kan worden gebruikt om electrische energie op te wekken met behulp van gasmotoren, maar ook om apparaten - zoals beluchters - via zulke motoren rechtstreeks aan te drijven; de warmte die daarbij vrijkomt kan worden benut voor verwarming.

Dit onderzoek richt zich op de technisch-economische aspecten van de gistingsgasproduktie, als functie van de capaciteit van de zuiveringsinrichting en de energieprijs.
Uit deze studie blijkt dat eigen energieopwekking belangrijke besparingsmogelijkheden biedt op de energiekosten.

In het algemeen is de kracht-warmtecombinatie het meest attractief. Daarbij zij aangetekend, dat het onderzoek niet ingaat op de zeer interessante mogelijkheid om surplusenergie - als electriciteit - terug te leveren aan het openbare lichtnet. Dit, omdat de meeste electriciteitsbedrijven ten tijde van het onderzoek niet veel voor zo'n koppeling voelden, met als belangrijkste strijdpunt de prijs waarvoor de electriciteitsproducent de teruggeleverde kilowattuur zou kopen.

Het project werd uitgevoerd door Witteveen + Bos Raadgevend Ingenieursbureau en namens de STORA* begeleid door een commissie bestaande uit: ir. A.A. van der Koppel (voorzitter), ing. E. de Ferrante, ing. J.Th. Haas, ir. F. van Hernen en ir. A. Kiestra.

Dit jaar is in hetzelfde kader een project gestart met als doel de resultaten van eigen energieopwekking te vergelijken met de oorspronkelijke technische, technologische en economische ontwerpgrondslagen en de uitkomsten van het thans voorliggende onderzoek.

Rijswijk, augustus 1981.

De directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

---

*

De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en dr.ir. H.J. Eggink, prof.dr. P.G. Fohr, ir. R. Karper, ir. C.H. Kuggeleijn, ir. J.S. Kuyper, ir. Th.G. Martijn, ir. H.A. Meijer, ir. H.M.J. Scheltinga, dr.ir. D.W. Scholte Ubing, ir. J. van Selm, ir. M. Tiessens, drs. A.A. Wismeijer (leden).

1 SAMENVATTING

Een belangrijk deel van de exploitatiekosten van een rioolwaterzuiveringsinrichting wordt bepaald door de aankoop van energie.
Besparingen hierop kunnen worden verkregen door een zo optimaal mogelijk gebruik van het geproduceerde gistingsgas.
De totale gistingsgasproduktie in Nederland wordt geschat op circa $34.10^6 m^3$/jaar, wat een waarde van circa *f* $7,6.10^6$ vertegenwoordigt (situatie en prijspeil 1979).
Bij de toepassing van gistingsgas als brandstof voor de verwarming van gistingstanks en gebouwen ontstaat in het algemeen een overschot aan gas; voor andere doeleinden moet nog elektriciteit worden ingekocht.
De opwekking van een combinatie van kracht en warmte in een zogenaamde eigen energieopwekkingsinstallatie biedt dan ook goede mogelijkheden voor een optimaler benutting van het gistingsgas.
Hierbij kan zowel gedacht worden aan een volledige of gedeeltelijke opwekking van de benodigde elektriciteit in gasmotor-generatorcombinaties (TE-systemen) als aan de directe aandrijving van bepaalde werktuigen door een gasmotor (PE-systeem). De warmte die vrijkomt bij de koeling van de gasmotor wordt benut voor verwarmingsdoeleinden. Een eventueel tekort aan gistingsgas kan worden aangevuld met aardgas.

Een inventarisatie van de energieproduktie en het energieverbruik kan globaal aangeven welke energiebronnen gemiddeld op een rioolwaterzuiveringsinrichting optreden en welke fluctuaties zich daarbij kunnen voordoen.

geïnventariseerde parameters

Voor rioolwaterzuiveringsinrichtingen met eigen energieopwekking is inzicht nodig in de

- energieproduktie uit het gistingsgas
- warmtebehoefte van de rioolwaterzuiveringsinrichting
- krachtbehoefte voor beluchting en overige onderdelen
- warmte- en krachtrendement van de eigen energieopwekking

Bij de gasproduktie spelen de slibproduktie per inwonerequivalent per dag, gehalte en afbreekbaarheid van de organische stof en methaangehalte van het gistingsgas een rol.

De gasproduktie is voornamelijk afhankelijk van de hoeveelheid organisch materiaal die wordt afgebroken. Deze hoeveelheid hangt, op haar beurt, af van de samenstelling van de organische stof, de gistingstemperatuur en gistingstijd, pH, alkaliteit, menging in de gistingstank en eventueel aanwezige, toxische stoffen.

Gebleken is dat het afbraakpercentage van de organische stof in Nederland (42%) aanzienlijk minder is dan de in de voornamelijk Amerikaanse literatuur gevonden waarden (63%). Met het gemiddelde afbraakpercentage van de organische stof in Nederland wordt een energieproduktie berekend van 298 kJ/(i.e.d) in oxydatiebedinstallaties en 408 kJ/(i.e.d) in actief-slibinstallaties. De variantiecoëfficiënt is ruim 0,70.

De warmtebehoefte van een rioolwaterzuiveringsinrichting wordt in hoofdzaak gevormd door de verwarming van de slibgistingstanks.

De totale warmtebehoefte is uit de praktijkresultaten in Nederland bepaald op:

oxydatiebedden	
. zomer	78 kJ/(i.e.d)
. winter	113 kJ/(i.e.d)
actief-slibinstallaties	
. zomer	125 kJ/(i.e.d)
. winter	181 kJ/(i.e.d)

De variantiecoëfficiënt is ongeveer 0,40.

De krachtbehoefte voor de beluchting is afhankelijk van de zuurstofbehoefte voor het biologisch afbraakpercentage en het zuurstofinbrengrendement.

De overige krachtbehoefte is sterk afhankelijk van specifieke omstandigheden die niet in een algemeen beeld te vangen zijn. Een inventarisatie van praktijkresultaten geeft echter wel een goede indruk van het overige krachtverbruik.

De berekeningen betreffende de krachtbehoefte resulteren in:

krachtbehoefte oxydatiebedden	66 kJ/(i.e.d)
krachtbehoefte actief-slibinstallaties	
- beluchting	
. hoogbelast bellenbeluchting	56 kJ/(i.e.d)
. hoogbelast oppervlaktebeluchting	75 kJ/(i.e.d)
. laagbelast bellenbeluchting	107 kJ/(i.e.d)
. laagbelast oppervlaktebeluchting	145 kJ/(i.e.d)
- overige onderdelen	56 kJ/(i.e.d)

Inventarisatie van verschillende typen gasmotoren en generatoren heeft de volgende resultaten opgeleverd:

	gemiddeld	minimum	maximum
krachtrendement TE-installaties	29%	25%	33%
krachtrendement PE-installaties	33%	29%	37%
warmterendement	35%	31%	39%

energiemodel

Uitgaande van de energiestromen op een rioolwaterzuiveringsinrichting is een energiemodel ontwikkeld waarmee kan worden bepaald welke de extra aardgasinkoop en de besparing op elektriciteit zijn bij toepassing van TE of PE.
Deze besparing en extra inkoop zijn voor de verschillende typen zuiveringssystemen berekend met behulp van de gemiddelde waarden van de geïnventariseerde parameters. Daarbij is tevens met een gevoeligheidsanalyse de invloed van variaties in de verschillende parameters onderzocht.

Het netto-energievoordeel aan primaire energie is voor alle typen actief-slibinstallaties gemiddeld circa 120.000 kJ/(i.e.j) en voor oxydatiebedden circa 70.000 kJ/(i.e.j) bij volledige eigen energie-opwekking. Voor laagbelaste actief-slibsystemen heeft volledige eigen energieopwekking nauwelijks energetische voordelen boven gedeeltelijke eigen energieopwekking voor de beluchting. Hoogbelaste actief-slibsys-

temen met gedeeltelijke opwekking hebben een nettobesparing van 60.000 kJ/(i.e.j) aan primair energieverbruik.
Het percentage van de benodigde energie dat met het gistingsgas kan worden opgewekt voor de verschillende systemen is:

TE laagbelaste actiefslib		
- oppervlakte beluchting	59%	
- bellenbeluchting	73%	
TE hoogebelast actiefslib		
- oppervlaktebeluchting	90%	
- bellenbeluchting	100%	
TE oxydatiebed	100%)	
PE laagbelast actiefslib	100%)	overschot aan gistingsgas
PE hoogbelast actiefslib	100%)	

Niet alle mogelijke zuiveringssystemen zijn in deze studie aan de orde gekomen. Met behulp van de gevoeligheidsanalyses kan echter wel voor andere systemen, zoals tweetraps zuiveringssystemen, een globale indruk worden verkregen.

kostenmodel en besparingen

Het economisch voordeel van eigen energieopwekking moet blijken uit een afweging van enerzijds de besparing op energie-inkoop en anderzijds de extra investeringskosten en onderhoudskosten.
Deze afweging wordt uitgevoerd in een kostenmodel, waarbij gebruik is gemaakt van de "contante waarde" methode. Hierdoor kunnen de kosten en baten van een bepaald project, gespreid over de tijd, onderling worden vergeleken.

Als variabele economische parameters zijn in dit model verwerkt:

- de elektriciteitsprijs, onderverdeeld in brandstoftoeslag en overige kosten
- de aardgasprijs
- algemene inflatie
- inflatie in totale primaire energie (aardgas + brandstoftoeslag elektriciteit)
- inflatie aardgas (onafhankelijk van elektriciteitsprijsstijgingen)
- disconteringsvoet
- looptijd
- onderhouds- en personeelskosten.

Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt dat vooral de elektriciteitsprijs exclusief de brandstoftoeslag sterk bepalend is voor de maximale investering.

Op basis van prijspeil 1-1-1979 blijkt de maximale investering:

TE oxydatiebed	*f* 8,00/i.e.
TE actiefslib hoogbelast	
- bellenbeluchting	*f* 13,40/i.e.
- oppervlaktebeluchting	*f* 14,60/i.e.
TE actiefslib laagbelast	
- bellenbeluchting	*f* 15,60/i.e.
- oppervlaktebeluchting	*f* 17,40/i.e.

PE actiefslib hoogbelast	*f* 6,70/i.e.
PE actiefslib laagbelast	*f* 12,90/i.e.

Uit de vergelijking van de werkelijke investeringskosten en de maximale investering kunnen de nettobesparingen van eigen energieopwekking worden bepaald. Deze vergelijking is uitgewerkt als functie van de capaciteit van de rioolwaterzuiveringsinrichting, met daarbij de mogelijke afwijkingen op basis van gevoeligheidsanalyse.
Voor rioolwaterzuiveringsinrichtingen kleiner dan 400.000 i.e. geeft gedeeltelijke eigen energieopwekking bij laagbelaste systemen hogere netto besparingen dan een volledige TE-installatie. Voor hoogbelaste systemen ligt deze grens op circa 200.000 i.e.

De kapitaalsproduktiviteit, dit is de verhouding tussen de besparingen en de investeringskosten, stijgt bij toenemende capaciteit. De kapitaalsproduktiviteit bij actief-slibsystemen is nauwelijks afhankelijk van de uitvoeringsvorm maar wel sterk van het eigen energieopwekkingssysteem. PE-systemen hebben een hogere kapitaalsproduktiviteit dan gedeeltelijke TE-systemen. Volledige TE-systemen hebben de laagste kapitaalsproduktiviteit.
Eigen energieopwekking voor oxydatiebedden is pas rendabel vanaf circa 100.000 i.e. De nettobaten en kapitaalsproduktiviteit zijn ook voor grotere zuiveringsinrichtingen vrij gering.

De resultaten van deze studie kunnen niet altijd direct worden gehanteerd voor iedere specifieke situatie vanwege de grote spreidingen die kunnen optreden. De berekeningsmethoden zijn echter wel zodanig opgezet dat iedere situatie doorgerekend kan worden.

2 INLEIDING

Volgens de uitkomsten van de NVA-slibenquête van 1978[4] wordt op rioolwaterzuiveringsinrichtingen met een totale belasting van 6,5 miljoen inwonerequivalenten (44% van de totale belasting van rioolwaterzuiveringsinrichtingen) slib door middel van anaërobe gisting gestabiliseerd. Voor de toekomst kan worden verwacht dat de slibgisting een groot aandeel zal blijven innemen. Dit geldt zeker voor de grotere inrichtingen; voor kleinere (tot 25.000 à 40.000 i.e.) lijkt de aërobe stabilisatie via het oxydatieslootprincipe aantrekkelijker.

Tijdens het gistingsproces komt gistingsgas vrij, dat voor circa 67% uit methaan bestaat. Bij een aanname van een gasproduktie van 15 l/i.e.d is de gistingsgasproduktie circa 34 miljoen m^3/j.
Op basis van de aardgasprijs van 1979 (29,5 cent/m^3) vertegenwoordigt dit een waarde van 7,6 miljoen gulden.

Het gistingsgas kan voor diverse toepassingen worden gebruikt. Vele inrichtingen passen het gas uitsluitend toe voor de verwarming van gistingstanks en gebouwen; daarbij treedt veelal een gasoverschot op. Het gistingsgas kan ook dienen voor de opwekking van kracht in een eigen energieopwekkingsinstallatie; de daarbij vrijkomende warmte kan bovendien worden benut voor verwarming.

De vraag op welke wijze het gistingsgas optimaal kan worden benut hangt af van een groot aantal factoren: de gasproduktie, kracht- en warmtebehoefte van de rioolwaterzuiveringsinrichting, extra in de kopen energie, rendement van de kracht- en warmteopwekking, fluctuaties in produktie en behoefte aan energie, kosten van de energieopwekking e.d.
De invloed van deze factoren kan voor de verschillende inrichtingen sterk uiteenlopen. Bovendien is het mogelijk dat bepaalde processen niet optimaal verlopen.
In dit rapport zijn de energiebehoefte en energieproduktie nader bestudeerd. De factoren die hierop van invloed zijn en de mate waarin zij de resultaten kunnen beïnvloeden zijn aangegeven in een gevoeligheidsanalyse. Hierbij is voor een rekenkundige benadering gekozen, waarbij de Nederlandse situatie is ingevuld: metingen zijn niet uitgevoerd.

In een economisch model kunnen de besparingen of de extra kosten worden aangegeven bij de toepassing van eigen energieopwekking ten opzichte van een conventionele installatie waarbij het gistingsgas alleen wordt toegepast voor de verwarming van de slibgistingstanks.
Met behulp van dit model kan worden onderzocht bij welke capaciteit een bepaald eigen energieopwekkingssysteem (volledig of gedeeltelijk) voor een bepaald type zuiveringsinrichting aantrekkelijk wordt. Door middel van een gevoeligheidsanalyse is weergegeven in welke mate fluctuaties in de veronderstellingen van invloed zijn op de resultaten. Aan de hand hiervan kan een indruk worden verkregen van de economische aantrekkelijkheid van eigen energieopwekking.

3 ENERGIEBESPARINGSMOGELIJKHEDEN

Een belangrijk deel van de totale kosten van een rioolwaterzuiveringsinrichting wordt besteed aan de inkoop van energie. Bovendien wordt verwacht dat er in de toekomst minder energie beschikbaar is en dat de kosten hiervan aanzienlijk zullen stijgen.
Uit economische overwegingen is het wenselijk de inkoop van energie zoveel mogelijk te beperken, waarbij een goed verloop van het zuiveringsproces gewaarborgd moet blijven.

Een beperking van de energie-inkoop kan worden verkregen door:

- een zo volledig mogelijk gebruik van het geproduceerde gistingsgas. Deze mogelijkheid is alleen toepasbaar voor systemen met een anaërobe slibstabilisatie;
- maatregelen in het zuiveringsproces; hierbij kan worden gedacht aan:

  keuze van het biologisch zuiveringssysteem

  Het energieverbruik neemt af in de volgorde:

  . oxydatiesloot
  . laagbelast actiefslib
  . tweetraps actiefslib
  . tweetraps oxydatiebed-actiefslib
  . hoogbelast actiefslib
  . oxydatiebed

  De keuze van de processen wordt meestal niet alleen bepaald door het energieverbruik. Andere factoren zoals effluenteisen, investeringskosten, beschikbare ruimte, slibafzetmogelijkheden en overlast aan de omgeving zijn eveneens belangrijke criteria bij de systeemkeuze.

  keuze van het slibverwerkingssysteem

  Natte afvoer en natuurlijke ontwatering zijn in het algemeen energetisch gunstiger dan mechanische ontwateringsmethoden. Vooral de thermische processen zoals slibdroging, slibverbranding, thermische slibconditionering en slibpasteurisatie kunnen aanzienlijke hoeveelheden energie verbruiken.

  afstemming van het energieverbruik op de behoefte

  Dit is ondermeer te bereiken door toepassing van getrapte beluchting, een goede zuurstofregeling in de beluchtingstanks en temperatuurregeling in de gistingstanks. Ook door warmteterugwinning en goede isolatie wordt verlies van energie beperkt.

  optimalisatie van de diverse processen

  Door bijvoorbeeld een vergaande indikking vermindert de energiebehoefte voor de verwarming van de gistingstank en voor de eventuele slibverwerking aanzienlijk; verder kunnen de dimensionering en situering van de onderdelen van de rioolwaterzuiveringsinrichting en een goede bedrijfsvoering van de inrichting aan energiebesparing bijdragen.

  verhoging van de gistingsgasproduktie

  Dit is vooral van belang wanneer er extra aardgas moet worden ingekocht, zoals bij toepassing van eigen energieopwekking en thermische

slibbehandeling veelal het geval is. De praktijkresultaten van gistingsgasinstallaties in Nederland geven de indruk dat een verhoging van de gasproduktie met enige liters per inwonerequivalent per dag mogelijk moet zijn. Iedere liter gas die per i.e. per dag meer kan worden geproduceerd, geeft een besparing van *f* 0,08 per i.e. per jaar aan aardgasinkoop.

verhoging energetisch rendement van de apparatuur

Bijvoorbeeld van beluchtingssystemen en verwarmingsketels en door een goed ontwerp en keuze van de apparatuur.

De belangrijkste energiebesparing wordt echter verkregen door optimale toepassing van de geproduceerde energie uit het gistingsgas.

Deze energie kan op twee manieren worden benut:

- voor de opwekking van warmte ten behoeve van de slibgisting, de centrale verwarming van de gebouwen en de thermische slibverwerkingsprocessen. In Nederland wordt het slib meestal nat afgevoerd, natuurlijk ontwaterd of behandeld volgens een niet-thermische methode. In deze situatie zal de gasproduktie de warmtebehoefte veelal kunnen dekken, zodat een gedeelte van het gistingsgas wordt gespuid. Toepassing van dit systeem is uit het oogpunt van energiebenutting niet optimaal;
- voor de opwekking van een combinatie van kracht en warmte in de zogenaamde eigen energieopwekkingssystemen. Hierbij kan onderscheid worden gemaakt in:

  Total Energy-systeem (TE-systeem)

  Hierbij wordt elektriciteit opgewekt met gasmotor-generatorcombinaties. Hiet is mogelijk om de gehele elektriciteitsbehoefte op deze wijze op te wekken (volledige TE-systemen) of slechts een gedeelte van de behoefte, bijvoorbeeld ten behoeve van de beluchting (gedeeltelijke TE-systemen). In het laatste geval wordt het restant uit het elektriciteitsnet betrokken.

  Partial Energy-systemen (PE-systemen)

  Een systeem, waarbij een werktuig direct wordt aangedreven door een gasmotor. Een toepassingsvorm hiervan is bijvoorbeeld de aandrijving van de blowers ten behoeve van bellenbeluchting bij actief-slibsystemen.

Eigen energieopwekkingssystemen zijn primair gericht op krachtopwekking. De warmte wordt geleverd door het koelwater en eventueel de rookgassen. De warmteproduktie is dus afhankelijk van de krachtproductie. Wanneer meer warmte nodig is dan het systeem levert, moet bijgestookt worden met een verwarmingsketel.

Energieopwekking met gasmotoren kan zowel geschieden met gistingsgas als met aardgas. Een tekort aan gistingsgas kan zodoende worden aangevuld met aardgas. Ook is een combinatie van gas en dieselolie mogelijk in zogenaamde dual-fuel motoren.
De keuze van de verbrandingsmotor wordt voornamelijk bepaald door de kosten van de primaire energiebron.

Bij de toepassing van PE-systemen wordt een rendementsvoordeel verkregen doordat de mechanische arbeid direct wordt overgedragen.
Bij TE-systemen wordt de mechanische energie eerst omgezet in elektrische energie en later weer opnieuw in mechanische arbeid door middel van een elektromotor.

Bij de toepassing van eigen energieopwekking spelen de volgende factoren een belangrijke rol.

- energieproduktie uit het gistingsgas
- behoefte aan kracht en warmte op de rioolwaterzuiveringsinrichting
- energetisch gedrag van de eigen energieopwekkingsinstallatie
- fluctuaties in de energiebehoefte en energieproduktie, zowel in absolute zin als ten opzichte van elkaar.

4 GISTINGSGASPRODUKTIE EN ENERGIEBEHOEFTE

4.1 Gistingsgasproduktie

Bij de anaërobe vergisting van zuiveringsslib wordt organische stof biologisch afgebroken. Dit proces verloopt in fasen waarbij de produkten van de ene fase als substraat voor de volgende dienen. De eindprodukten zijn eenvoudige, gasvormige verbindingen, in hoofdzaak methaan en kooldioxyde naast geringe hoeveelheden waterstof, waterstofsulfide en stikstof.

Bij de gasproduktie spelen de slibproduktie per inwonerequivalent per dag , gehalte en afbreekbaarheid van de organische stof en methaangehalte van het gistingsgas een rol.

De gasproduktie is voornamelijk afhankelijk van de hoeveelheid organisch materiaal die wordt afgebroken. Deze hoeveelheid hangt, op haar beurt, af van de samenstelling van de organische stof, de gistingstemperatuur en gistingstijd, pH, alkaliniteit, menging in de gistingstank en eventueel aanwezige, toxische stoffen.

Vooral de verdeling in koolhydraten, eiwitten en vetten is van belang vanwege de verschillen in koolstof- en zuurstofgehalten van deze stoffen, evenals de hoeveelheid vluchtige vetzuren.

Het resultaat van de literatuuranalyse (bijlage 1, pp. 61 - 75) is gegeven in tabel 1.

		buitenland	Nederland
gasproduktie			
- per kg afgebroken organische droge stof	(1)	1000 ± 10 %	
- per kg organische droge stof	(1)	632 ± 25 %	424 ± 56 %
- per kg droge stof	(1)	436 ± 27 %	293 ± 57 %
gasproduktie per inwonerequivalent per dag			
. oxydatiebed	(1)	18,4 ± 49 %	12,4 ± 73 %
. actief-slibinstallatie	(1)	25,4 ± 46 %	17 ± 70 %

Tabel 1. Gemiddelde gasproduktie (liters) van rioolwaterzuiveringsinrichtingen

Bij de berekeningen is aangenomen dat gistingstijd, temperatuur en menging optimaal waren en dat het proces niet werd geremd door toxische stoffen.

Uit tabel 1 blijkt, dat in Nederland slechts 42% van de organische stof wordt afgebroken, tegen 63% elders. Daardoor bedraagt de gasproduktie in ons land slechts 67% van de produktie in het buitenland. Dit wordt bevestigd door toetsing aan de uitkomsten op een aantal Nederlandse rioolwaterzuiveringsinrichtingen.

4.2 Energiebehoefte

4.2.1 *algemeen*

De energiebehoefte van rioolwaterzuiveringsinrichtingen bestaat uit krachtbehoefte en warmtebehoefte. De warmtebehoefte wordt voornamelijk gevormd door de slibverwarming ten behoeve van het gistingsproces.
In actief-slibinstallaties wordt de belangrijkste krachtbehoefte gevormd door het beluchtingssysteem. De energiebehoefte voor de beluchting en de gisting is vooral afhankelijk van de biologische en hydraulische belasting van deze onderdelen en van de werking van de apparatuur, zoals indikkingsgraad voorindikkers, zuurstoftoevoervermogen, rendement verwarmingsapparatuur enz.

In oxydatiebedden is weinig of geen energie nodig voor de zuurstoftoevoer. Het versproeien van het afvalwater over de bedden wordt als overig energieverbruik beschouwd.

Het overig energieverbruik is afhankelijk van het gekozen zuiverings- en slibverwerkingssysteem, van het aanvoerpeil van het influent, het peil van de effluentlozing en van andere voorzieningen (stankbestrijding, veiligheid enz.).

Belangrijke overige energieverbruikers zijn:

kracht	*warmte*
transport van water of slib d.m.v. pompen of vijzels	verwarming bedrijfsgebouwen
meet- en regelsystemen	thermische slibbehandeling . conditionering . pasteurisatie . droging, verbranding
verlichting terrein en bedrijfsgebouwen	
ruimers, voorbeluchting, flotatie	
compressoren gasinblazing	
diverse ventilatoren bv. voor stankbestrijding	
slibbehandeling	

De overige energiebehoefte is sterk afhankelijk van de specifieke omstandigheden. Zo mogelijk wordt het slib na de gisting nat afgevoerd, natuurlijk ontwaterd of mechanisch ontwaterd na chemische conditionering. Het energieverbruik hiervan is slechts zeer gering. Grotere energieverbruikers zoals flotatie, voorbeluchting en thermische slibbehandelingsmethoden, worden slechts op zeer beperkte schaal toegepast.
De energiebehoefte is in bijlage 2 in detail berekend met methodieken die een algemene indruk geven van de Nederlandse situatie. Bovendien is het mogelijk elk concreet geval daarmee op eenvoudige wijze door te rekenen.
De benodigde gegevens zijn ontleend aan de jaarverslagen van beheerders van rioolwaterzuiveringsinrichtingen in Nederland. Om zowel een beeld te krijgen van, als een inzicht in de onderlinge verschillen tussen de zuiveringsinrichtingen, worden bij de resultaten tel-

kens de gemiddelde waarden en de variantiecoëfficiënten vermeld. De verdere verwerking van deze waarden geschiedt volgens de in de statistiek gebruikelijke methoden.

Het resultaat van de inventarisatie is in de volgende paragrafen gegeven.

4.2.2 *warmtebehoefte van de gisting*

De factoren die bij de berekeningen een rol hebben gespeeld zijn:

- slibproduktie
- indikkingsgraad
- temperatuur in gistingstank
- temperatuur vers slib
- buitentemperatuur in zomer en winter
- isolatie gistingstank

De totale hoeveelheid nettowarmte die per i.e. aan de gistingstank moet worden toegevoegd is berekend, waarbij onderscheid is gemaakt tussen oxydatiebedden en actief-slibinstallaties.
Er is uitgegaan van een volledig gehomogeniseerde tankinhoud.

	oxydatiebedden		actief-slibinstallaties	
	zomer	winter	zomer	winter
totale warmtebehoefte t.b.v. gisting				
. gemiddelde waarde kJ/(i.e.d)	78,2	112,7	125,2	180,5
. variantiecoëfficiënt	0,44	0,41	0,41	0,37

Tabel 2. Warmtebehoefte van het gistingsproces

4.2.3 *krachtbehoefte van de beluchting*

Het krachtverbruik van het beluchtingssysteem hangt af van de zuurstofbehoefte van het actiefslib, het zuurstoftoevoerrendement van het beluchtingssysteem en het zuurstofgehalte van de beluchtingstank. De zuurstofbehoefte van het actiefslib is opgebouwd uit de zuurstofbehoefte voor BZV-verwijdering, endogene ademhaling en stikstofverwijdering.

In bijlage 2 zijn de berekeningen gegeven van het krachtverbruik voor de diverse beluchtingssystemen; er bestaan aanzienlijke verschillen tussen hoog- en laagbelaste actief-slibsystemen.
De resultaten hiervan zijn in tabel 3 (p. 12) vermeld.

De praktijkresultaten geven waarden die globaal goed overeenkomen met de hierboven weergegeven waarden. Vanuit de praktijkgegevens is het echter niet mogelijk gebleken om een goede uitsplitsing van de diverse typen zuiveringssystemen te geven, omdat hiervan niet voldoende gegevens beschikbaar zijn.

totale krachtbehoefte voor beluchting	hoogbelaste actief-slibinstallatie		laagbelaste actief-slibinstallatie	
	bellenbeluchting	oppervlaktebeluchting	bellenbeluchting	oppervlaktebeluchting
. gemiddelde waarde (kJ/i.e.d)	55,5	75,0	106,9	144,5
. variantiecoëfficiënt	0,29	0,29	0,27	0,27

Tabel 3. Krachtbehoefte van de beluchting

4.2.4 *krachtbehoefte van overige onderdelen*

Deze behoefte, die afhankelijk is van vele specifieke omstandigheden, kan niet met een algemene methode worden berekend. Uit de jaargegevens van rioolwaterzuiveringsinrichtingen kan evenwel een goede indruk worden verkregen. Hierbij werd geen verschil tussen de verschillende actief-slibinstallaties gevonden.
Voor oxydatiebedden is het overig krachtverbruik gelijk aan het totaal krachtverbruik, aangezien de beluchting geen krachtbehoefte heeft.

overige krachtbehoefte	oxydatiebedden	actief-slibinstallaties
. gemiddelde waarde (kJ/i.e.d)	66,2	56,2
. variantiecoëfficiënt	0,35	0,43

Tabel 4. Krachtbehoefte van overige onderdelen

Uit bovengenoemde waarden blijkt dat krachtbehoefte van oxydatiebedden enigszins hoger is dan de overige krachtbehoefte van actief-slibinstallaties.Het verschil is echter vrij gering.
Wellicht wordt dit verklaard door het feit dat geen retourslibvijzels aanwezig zijn, terwijl bij de oudere oxydatiebedden vaak geen aparte indikking plaatsvindt en de gistingstanks niet intensief worden gemengd.

4.3 Energieproduktie en energiebehoefte (overzicht)

Uit de berekeningen van de energieproduktie en de energiebehoefte van de voorgaande paragrafen kan het volgende overzicht worden opgesteld.

energieproduktie uit gistingsgas	oxydatiebed		actief-slibinstallatie	
	buitenland	Nederland	buitenland	Nederland
gemiddelde produktie (kJ/i.e.d)	442	298	605	408
variantiecoëfficiënt	0,49	0,73	0,46	0,70

warmtebehoefte slibgisting	oxydatiebed		actief-slibinstallatie	
	zomer	winter	zomer	winter
gemiddelde behoefte (kJ/i.e.d)	78,2	112,7	125,2	180,5
variantiecoëfficiënt	0,44	0,41	0,41	0,37

krachtbehoefte beluchting	hoogbelast		laagbelast	
	beluchting			
	oppervlakte-	bellen-	oppervlakte-	bellen-
gemiddelde behoefte (kJ/i.e.d)	75,0	55,5	144,5	106,9
variantiecoëfficiënt	0,29	0,29	0,27	0,27

overige krachtbehoefte	oxydatiebed	actief-slibinstallatie
gemiddelde behoefte (kJ/i.e.d)	66,2	56,2
variantiecoëfficiënt	0,35	0,43

Tabel 5. Overzicht energieproduktie en energiebehoefte

In tabel 6 wordt de gemiddelde energiebehoefte voor de verschillende processen gegeven in percentages van de energieproduktie.

	warmtebehoefte		krachtbehoefte
	zomer	winter	
oxydatiebed	26,2% (0,91)	37,8% (0,89)	22,2% (0,85)
actief-slibinstallatie			
beluchting			
. hoogbelast bellenbeluchting			13,6% (0,78)
. hoogbelast oppervlakte beluchting			18,4% (0,78)
. laagbelast bellenbeluchting			26,2% (0,77)
. hoogbelast oppervlakte beluchting			35,4% (0,77)
overige onderdelen	30,7% (0,86)	44,2% (0,83)	13,8% (0,87)

Tabel 6. Energiebehoefte als percentage van energieproduktie voor Nederlandse praktijkomstandigheden (tussen haakjes de variantiecoëfficiënt)

5 HET RENDEMENT VAN EIGEN ENERGIEOPWEKKINGSINSTALLATIES

In eigen energieopwekkingsinstallaties wordt de krachtbehoefte van de rioolwaterzuiveringsinrichting geheel of gedeeltelijk opgewekt met behulp van gistingsgas en eventueel extra in te kopen aardgas. Bij gedeeltelijke opwekking wordt nog een hoeveelheid elektriciteit ingekocht. Uit het koelwater en de rookgassen kan bovendien een hoeveelheid warmte worden gewonnen die de warmtebehoefte van de rioolwaterzuiveringsinrichting geheel of gedeeltelijk kan dekken.

Bij TE-installaties wordt elektriciteit opgewekt in een generator die wordt aangedreven door een gasmotor.
Het totale krachtrendement van de TE-installatie wordt dan ook bepaald door het rendement van de gasmotor en van de generator.

Het rendement van de gasmotor is afhankelijk van:
- de bouwwijze van de motor
- het vermogen
- de belastingsgraad
- het toerental
- de compressieverhouding
- de luchtverhouding
- de ontsteking
- de geluiddemping

Ieder type gasmotor levert enigszins andere prestaties.
Als voorbeeld wordt in figuur 1 het verloop van de rendementen gegeven van gasmotoren met verschillende vermogens als functie van toerental en belasting.

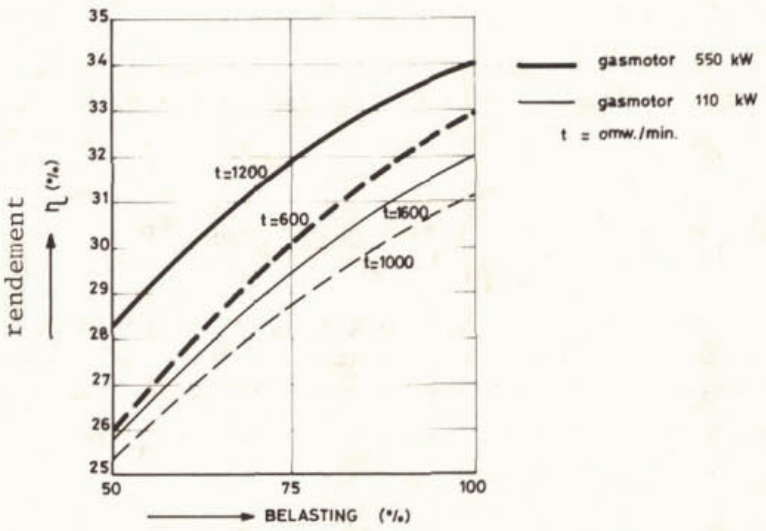

Fig. 1. Rendement gasmotoren als functie van de belastingsgraad bij verschillend vermogen en toerental.

Het energetisch rendement van een generator is afhankelijk van het vermogen, de belastingsgraad en de bouwwijze. De relatie tussen het rendement en het vermogen bij verschillende belastingsgraad is in figuur 2 globaal weergegeven.

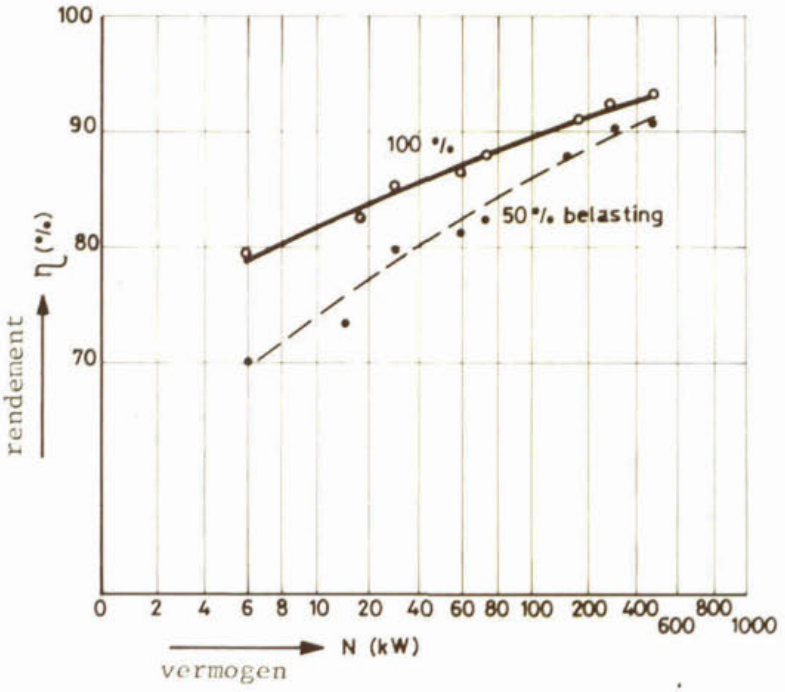

Fig. 2. Rendement generatoren als functie van vermogen bij verschillende belastingsgraad.

De primaire energie, die aan het TE-systeem wordt toegevoegd, wordt gedeeltelijk omgezet in elektriciteit. Het overige gedeelte wordt omgezet in:

- warmte in het koelwater en olie
- warmte in de rookgassen
- verliezen, zoals stralings- en transmissieverliezen in de gasmotor en omzettingsverliezen in de generator.

Uit de gegevens over verschillende combinaties van gasmotoren en generatoren kan een globale relatie worden opgesteld tussen de verdeling van primaire energie en de belastingsgraad van de TE-installatie (zie figuur 3 en 4).

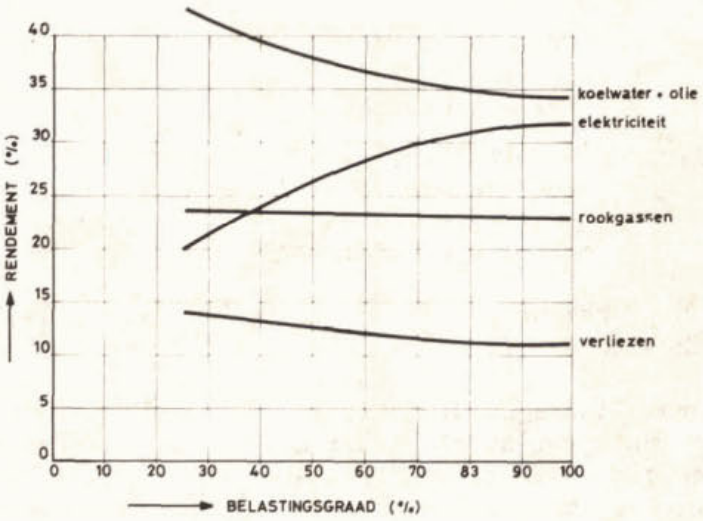

Fig. 3. Verloop van de warmte- en krachtrendementen van een gasmotor-generatorcombinatie als functie van de belastingsgraad (%).

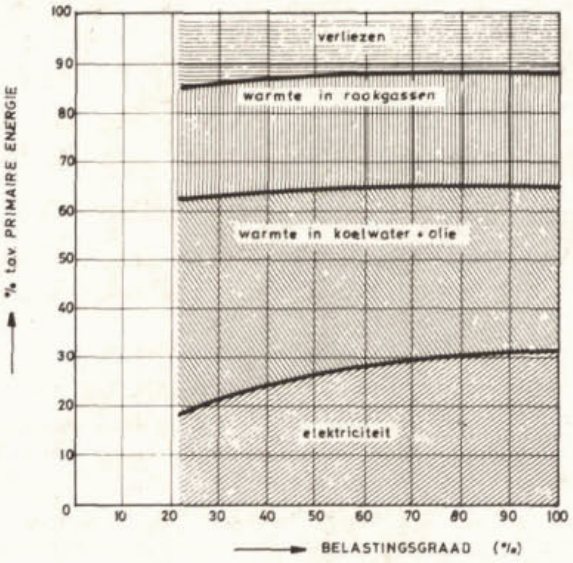

Fig. 4. Energie diagram gasmotor-generator-combinatie

Uit de figuren 3 en 4 blijkt dat bij lage belastingsgraad het krachtrendement afneemt en het warmterendement van het koelwater in nagenoeg dezelfde mate toeneemt. Het gedeelte van de primaire energie dat als warmte met de rookgassen wordt afgevoerd en dat verloren gaat is nauwelijks afhankelijk van de belastingsgraad.

Voor de verdere berekeningen zijn de volgende waarden gebruikt:

krachtrendement	minimale waarde:	25%
	gemiddelde waarde:	29%
	maximale waarde:	33%

warmterendement(zonder warmteterugwinning uit de rookgassen)

	minimale waarde:	31%
	gemiddelde waarde:	35%
	maximale waarde:	39%

Hierbij is er vanuit gegaan dat de gekozen combinatie zodanig is afgestemd op de behoefte dat de belasting minimaal circa 40% bedraagt.

Wanneer een PE-installatie wordt gebruikt vervallen de energetische verliezen van de generator en de elektromotor. Deze verliezen kunnen worden geschat op circa 12% t.o.v. de toegevoerde secundaire energie ofwel circa 4% t.o.v. de primaire energie, die naar de gasmotor wordt gevoerd. Hieruit volgt voor het krachtrendement bij een PE-installatie:

minimale waarde:	29%
gemiddelde waarde:	33%
maximale waarde:	37%

Met behulp van de hierboven bepaalde energetische rendementen van de eigen energieopwekkingsinstallaties is het mogelijk de energetische besparingen van de installaties ten opzichte van conventionele installaties te berekenen[12].

In bijlage 3 is een macro-economische beschouwing van de voordelen van eigen energieopwekking gegeven. Hierbij is nog niet de eigen gasproduktie van de zuiveringsinrichting betrokken.
Hieruit blijkt dat een belangrijke grootheid bij de toepassing van eigen energieopwekking de verhouding warmtebehoefte - krachtbehoefte is.

Er bestaat een optimale verhouding waarbij de geproduceerde kracht en warmte beiden volledig worden benut. Bij een lage verhouding van warmtebehoefte - krachtbehoefte kan een gedeelte van de geproduceerde warmte niet worden benut en moet worden afgevoerd. Een hoge warmtebehoefte ten opzichte van de krachtbehoefte betekent dat een gedeelte van de warmte in een verwarmingsketel moet worden opgewekt. Dit geeft geen voordelen ten opzichte van een conventioneel systeem.
De optimale verhouding ligt, afhankelijk van het feit of de krachtbehoefte geheel of gedeeltelijk zelf wordt opgewekt; tussen 0,8 en 1,5.

Warmtewinning uit de rookgassen wordt pas aantrekkelijk wanneer er geen warmteoverschot optreedt. Voor volledige TE-systemen is dit bij verhoudingen warmtebehoefte - krachtbehoefte groter dan 1,2 en voor gedeeltelijke TE- of PE-systemen groter dan 0,7.

Uit bijlage 3 blijkt bovendien dat het bij lage verhoudingen van warmtebehoefte - krachtbehoefte energetisch gunstiger kan zijn slechts een gedeelte van de benodigde kracht zelf op te wekken. Dit wordt veroorzaakt door het lager krachtrendement van gasmotoren ten opzichte van elektriciteitscentrales en het grotere warmteoverschot bij volledige eigen opwekking van de totale krachtbehoefte.

Doordat de eigen gasproduktie ook wordt benut zullen de energetische besparingen zich anders gedragen dan in bijlage 3 wordt weergegeven. Hierop zal in het volgende hoofdstuk, waarin een energiemodel wordt opgesteld, nader worden ingegaan.

6 ENERGIEMODEL

6.1 Inleiding

In voorgaande hoofdstukken zijn de energiebehoefte en de energieproduktie bepaald voor diverse typen rioolwaterzuiveringsinrichtingen.
Tevens blijkt dat - rendementstechnisch - de belangrijkste methode om primaire energie te besparen eigen energieopwekking is met een gasmotor.
De voordelen hiervan zijn:

- de gecombineerde opwekking van warmte en kracht is energetisch gunstiger dan de inkoop van beide energievormen.
- het geproduceerde gistingsgas kan beter worden benut.

Bij toepassing van eigen energieopwekking vermindert de hoeveelheid ingekochte elektriciteit van een rioolwaterzuiveringsinrichting ten opzichte van het conventionele systeem. De benodigde kracht wordt nu geheel of gedeeltelijk opgewekt met behulp van een gasmotor. De gasmotor levert bovendien de benodigde warmte, eventueel aangevuld door een verwarmingsketel. De energie voor de gasmotor en eventueel de verwarmingsketel wordt geleverd door het geproduceerde gistingsgas; indien noodzakelijk wordt aardgas ingekocht.
De economische voordelen van eigen energieopwekking zijn ondermeer afhankelijk van de hoeveelheid bespaarde elektriciteit en de hoeveelheid extra aardgas die moet worden ingekocht. Om een inzicht in deze factoren te verkrijgen is een energiemodel ontwikkeld.

Met dit model kan met behulp van de in voorgaande hoofdstukken berekende kracht- en warmtebehoefte en energieproduktie uit het gistingsgas de energiebehoefte van de eigen energieopwekkingsinstallatie ten opzichte van een conventioneel systeem worden bepaald. Dit kan worden gedaan voor verschillende zuiveringssystemen, te weten:

- oxydatiebed
- hoogbelast actief-slibinstallatie met bellenbeluchting (slibbelasting k = 0,3 - 0,4 kg BZV/kg d.s.d)
- hoogbelast actief-slibinstallatie met oppervlaktebeluchting
- laagbelast actief-slibinstallatie met bellenbeluchting (k = 0,15 - 0,2 kg BZV/kg d.s.d)
- laagbelast actief-slibinstallatie met oppervlaktebeluchting.

De in het model in te voeren parameters zijn in de praktijk niet constant maar kunnen vaak onafhankelijk van elkaar variëren binnen bepaalde grenzen. De variaties in de technologische parameters, zoals gasproduktie en eventuele verliezen van het gas ondermeer door te kleine buffercapaciteit, warmtebehoefte, krachtbehoefte voor de beluchting en de overige onderdelen van de rioolwaterzuiveringsinrichting, zijn in de hoofdstukken 4 en 5 aangegeven door middel van variantiecoëfficiënten.
Ook andere benodigde parameters zijn in de praktijk variabel.

Deze parameters zijn:
- krachtrendement van de eigen energieopwekkingsinstallatie
- warmterendement van de eigen energieopwekkingsinstallatie
- warmterendement van de verwarmingsketel.

Met de computersimulatie van het energiemodel kan de invloed van de variaties in de verschillende parameters op de elektriciteitsbesparing en de extra aardgasinkoop worden bepaald.

De berekeningen van de elektriciteitsbesparing en de extra aardgasinkoop en de gevoeligheidsanalyse voor de verschillende invoerparameters zijn uitgevoerd voor:

- een TE-systeem, waarin alle benodigde kracht door middel van een combinatie van een gasmotor en een generator wordt opgewekt.
- een PE-systeem, waarbij de beluchtingsenergie door direkte aandrijving van de blowers door de gasmotor wordt verkregen. De krachtbehoefte voor de overige onderdelen wordt onttrokken aan het elektriciteitsnet. Dit systeem is slechts toepasbaar voor een bellenbeluchtingsinstallatie.

Bij de studie wordt er vanuit gegaan dat de eigen energieopwekking geschiedt met behulp van een gasmotor, zoals in Nederland op dit moment gebruikelijk is. Een alternatieve methode, namelijk het gebruik van dual-fuel motoren, waarbij een mengsel van gistingsgas en dieselolie als brandstof wordt gebruikt, zal niet nader worden uitgewerkt. Het betreft hier geen wezenlijk verschillende situatie, gezien ook de huidige koppeling tussen de aardgas- en olieprijzen.

In deze studie zullen slechts de eerdergenoemde combinaties van zuiveringssystemen en eigen energieopwekkingssystemen uitgebreid worden onderzocht op hun energetische en economische voordelen.
Met behulp van de gevoeligheidsanalyses kan echter ook voor andere systemen een globale indruk worden verkregen van de energie- en kostenbesparingen. Hierbij kan worden gedacht aan tweetrapszuiveringssystemen en gedeeltelijke TE-installaties. Hierop zal in het kort worden ingegaan aan het eind van dit hoofdstuk.

6.2 Energiemodel

Het energiemodel heeft de volgende invoerparameters:

K_b = krachtbehoefte voor de beluchting (kJ/i.e.h)

K_{ov} = krachtbehoefte voor de overige onderdelen (kJ/i.e.h)

Q = warmtebehoefte (kJ/i.e.h)

G_g = gistingsgasproduktie (kJ/i.e.h)

e = spuigasverlies in fractie van G_g

η_k = krachtrendement eigen energieopwekking

η_w = warmterendement eigen energieopwekking

η_{vk} = warmterendement verwarmingsketel

De berekeningen geschieden als volgt:

Methaangasbehoefte gasmotor (G_m) :

TE-installaties : $G_m = \frac{K_b + K_{ov}}{\eta_k}$ kJ/i.e.h

PE-installatie : $G_m = \frac{K_b}{\eta_k}$ kJ/i.e.h

Methaangasbehoefte verwarmingsketel (G_{vk}) :

voor $\eta_w \times G_m > Q$ geldt : $G_{vk} = 0$ kJ/i.e.h

voor $\eta_w \times G_m \leqslant Q$ geldt : $G_{vk} = \frac{Q - \eta_w G_m}{\eta_{vk}}$ kJ/i.e.h

Totale methaangasbehoefte : $G_{tot} = G_m + G_{vk}$ kJ/i.e.h

Aardgasinkoop (G_a) :

voor $(1 - e)\, G_g > G_{tot}$ geldt: $G_a = 0$ kJ/i.e.h

voor $(1 - e)\, G_g \leqslant G_{tot}$ geldt: $G_a = G_{tot} - (1-e)\, G_g$ kJ/i.e.h

Aardgasinkoop conventioneel systemen (G_{ac}) :

voor $(1 - e)\, G_g > \frac{Q}{\eta_{vk}}$ geldt : $G_{ac} = 0$ kJ/i.e.h

voor $(1 - e)\, G_g \leqslant \frac{Q}{\eta_{vk}}$ geldt : $G_{ac} = \frac{Q}{\eta_{vk}} - (1-e)\, G_g$ kJ/i.e.h

Extra aardgasinkoop eigen energie-opwekkingssystemen (ΔG_a) :

$\Delta G_a = G_a - G_{ac}$ kJ/i.e.h

$\Delta G_a = 0{,}2767\ (G_a - G_{ac})$ m^3/i.e.j

Elektriciteitsbesparing (ΔE) :

TE-installatie : $\Delta E = K_b + K_{ov}$ kJ/i.e.h $= 2{,}433\ (K_b + K_{ov})$ kWh/ i.e.j

PE-installatie : $\Delta E = K_b$ kJ/i.e.h $= 2{,}433 K_b$ kWh/i.e.j

Voor oxydatiebedden geldt uiteraard $K_b = 0$

Bij de berekeningen wordt er van uitgegaan dat de diverse parameters in de tijd constant zijn. In de praktijk zullen hierin echter fluctuaties optreden zoals dag- en nachtfluctuaties, weekendinvloeden, flucterende industriële lozingen, seizoeninvloeden en recreatieinvloeden. De fluctuaties in de energiebehoefte en in de gasproduktie komen in het algemeen echter niet gelijktijdig en in dezelfde mate voor. Door het opnemen van spuigasverliezen in het model kan de invloed van de fluctuaties op een eenvoudige wijze worden weergegeven.

Ter verduidelijking van het energiemodel en de verschillende parameters hierin worden in figuur 5 enige voorbeelden gegeven van energiestroomdiagrammen.

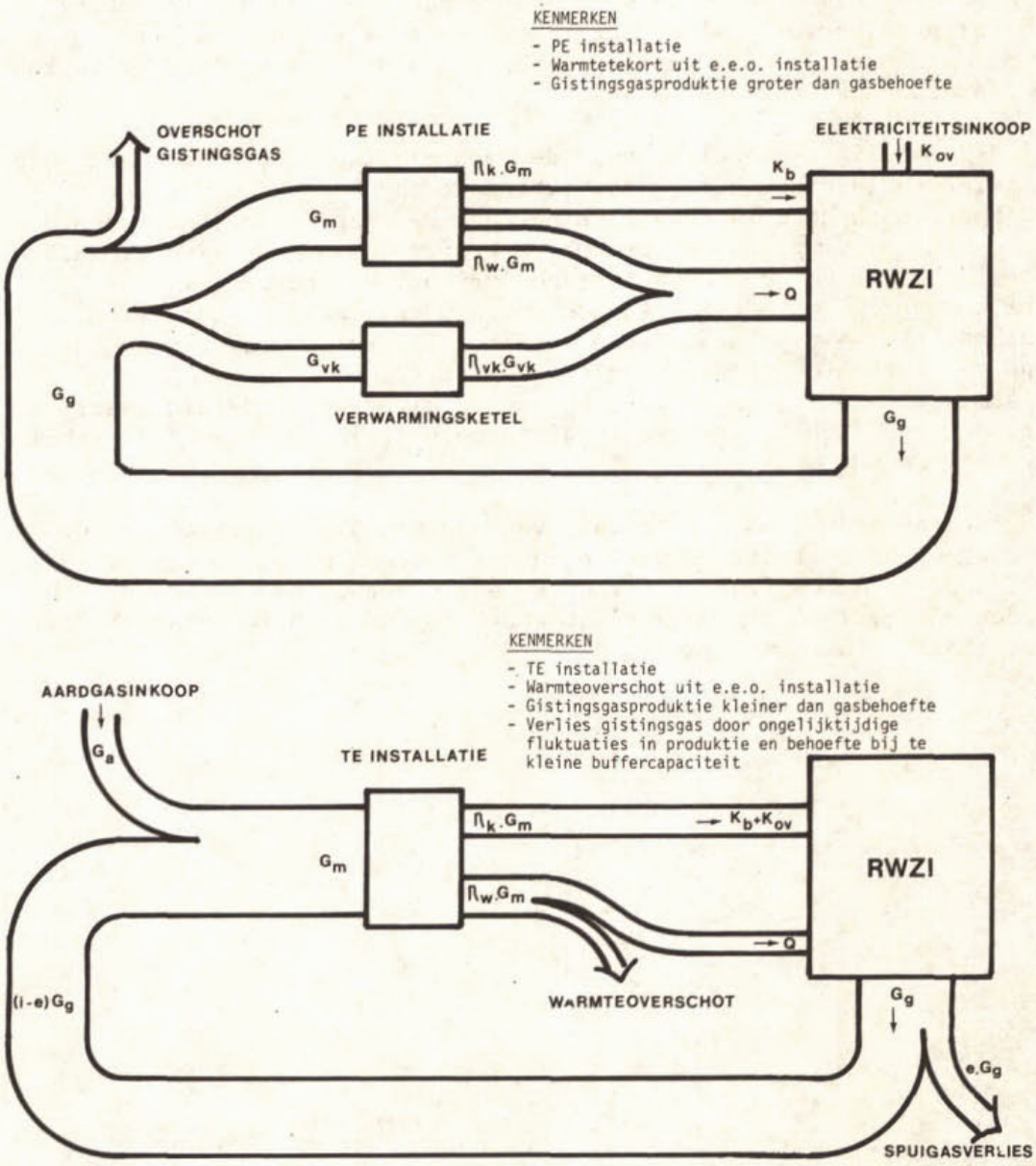

Fig. 5. Voorbeelden van energiestroomdiagrammen.

6.3 Parameterfluctuaties

De waarden van de diverse technologische parameters, zoals deze in hoofdstuk 4 zijn bepaald, geven een grote spreiding te zien.
De variantiecoëfficiënten liggen tussen 0,30 en 0,70 bij een aantal waarnemingen van ongeveer 10 - 15.

De oorzaken van de sterk afwijkende waarden die voor enige zuiveringsinrichtingen zijn gevonden, zijn niet bekend. Waarschijnlijk is, dat specifieke omstandigheden zoals de kwaliteit van het afvalwater, overbelasting, slechte werking van sommige onderdelen of processen (b.v. lage gasproduktie door het uitspoelen van licht slib, beperkte regelmogelijkheden, hoge warmtebehoefte door een slechte indikking) een belangrijke rol spelen. Deze extreme gevallen mogen echter in deze algemene studie naar de toepassing van gistingsgas als energiebron geen overwegende rol spelen.

Bij de gevoeligheidsanalyse voor de technologische parameters zal dan ook niet zoals gebruikelijk het gebied beschouwd worden met een 90 - 95% betrouwbaarheidsinterval. De beschouwde waarden zullen binnen de standaardafwijking van het geschatte gemiddelde moeten liggen, welk interval circa 65% van de zuiveringsinrichtingen bevat.
Voor de overige parameters (rendementen mechanische installaties en spuigasverlies) zijn gemiddelde en uiterste waarden gekozen aan de hand van literatuurgegevens en praktijkervaringen.
De gemiddelde en uiterste waarden van de diverse parameters, waarvoor de gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd, zijn samengevat in tabel 7.

Voor de gasproduktie is uitgegaan van Nederlandse praktijkwaarden. In buitenlandse situaties worden hogere waarden bereikt, namelijk gemiddeld 18,42 kJ/i.e.h (variantiecoëfficiënt 0,49) voor oxydatiebedden en 25,21 kJ/i.e.h (variantiecoëfficiënt 0,46) voor actief-slibinstallaties (zie paragraaf 4.3).

	gemiddeld	ondergrens	bovengrens
krachtbehoefte beluchting (kJ/i.e.h)			
. oxydatiebed	-	-	-
. hoogbelast a.s. bellenbeluchting	2,31	1,63	2,99
. hoogbelast a.s. opp.beluchting	3,12	2,22	4,99
. laagbelast a.s. bellenbeluchting	4,45	3,24	5,67
. laagbelast a.s. opp.beluchting	6,02	4,41	7,63
krachtbehoefte overige onderdelen (kJ/i.e.h)			
. oxydatiebed	2,76	1,79	3,72
. a.s. installatie	2,34	1,34	3,35
warmtebehoefte (kJ/i.e.h)			
. oxydatiebed	3,98	1,58	6,38
. a.s. installatie	6,37	2,87	9,87
gasproduktie (kJ/i.e.h)			
. oxydatiebed	12,42	3,35	21,48
. a.s. installatie	17,00	5,10	28,90
spuigasverlies (% van gasproduktie))			
. oxydatiebed	0	0	20
. a.s. installatie	0	0	20
krachtrendement e.e.o. (%)			
. TE-installatie	29	25	33
. PE-installatie	33	29	37
warmterendement e.e.o. (%)	35	31	39
warmterendement verwarmingsketel (%)	75		

Tabel 7. Invoergegevens energiemodel

a.s. = actiefslib
e.e.o. = eigen energieopwekking

6.4 Resultaten

De berekeningen van de besparingen aan elektriciteitsinkoop en de extra aardgasinkoop voor de verschillende typen zuiveringsinstallaties zijn eerst uitgevoerd uitgaande van de gemiddelde waarden van de invoerparameters. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 8.

	extra aardgasinkoop (m^3/i.e.j)	besparing elektriciteit (kWh/i.e.j)	nettovoordeel primaire energie (kJ/i.e.j)*
TE-installaties			
oxydatiebed	- 0,57	6,71	$0,71 \times 10^5$
hoogbelast actiefslib			
. bellenbeluchting	0,01	11,32	$1,20 \times 10^5$
. oppervlaktebeluchting	0,51	13,30	$1,25 \times 10^5$
laagbelast actiefslib			
. bellenbeluchting	1,78	16,54	$1,19 \times 10^5$
. oppervlaktebeluchting	3,28	20,35	$1,12 \times 10^5$
PE-installaties			
hoogbelast actiefslib			
. bellenbeluchting	- 1,32	5,63	$0,60 \times 10^5$
laagbelast actiefslib			
. bellenbeluchting	- 0,36	10,84	$1,15 \times 10^5$

Tabel 8. Besparingen elektriciteitsinkoop en extra aardgasinkoop voor diverse typen zuiveringsinrichtingen (gemiddelde situatie).

*Hierbij wordt aangenomen:
- rendement elektriciteitscentrale 34% ofwel 1 kWh = 10588 kJ primaire energie
- 1 m^3 aardgas = 31660 kJ

Uit tabel 8 blijkt dat de systemen met een PE-installatie en de oxydatiebedden met een TE-installatie gemiddeld nog een overschot aan gistingsgas hebben.

De resultaten van de gevoeligheidsanalyses zijn weergegeven in bijlage 4.
Een totaaloverzicht hiervan is gegeven in de figuren 6 en 7 in de vorm van blokgrafieken.
Aan de hand van een voorbeeld zal worden aangegeven hoe deze figuren moeten worden geïnterpreteerd.

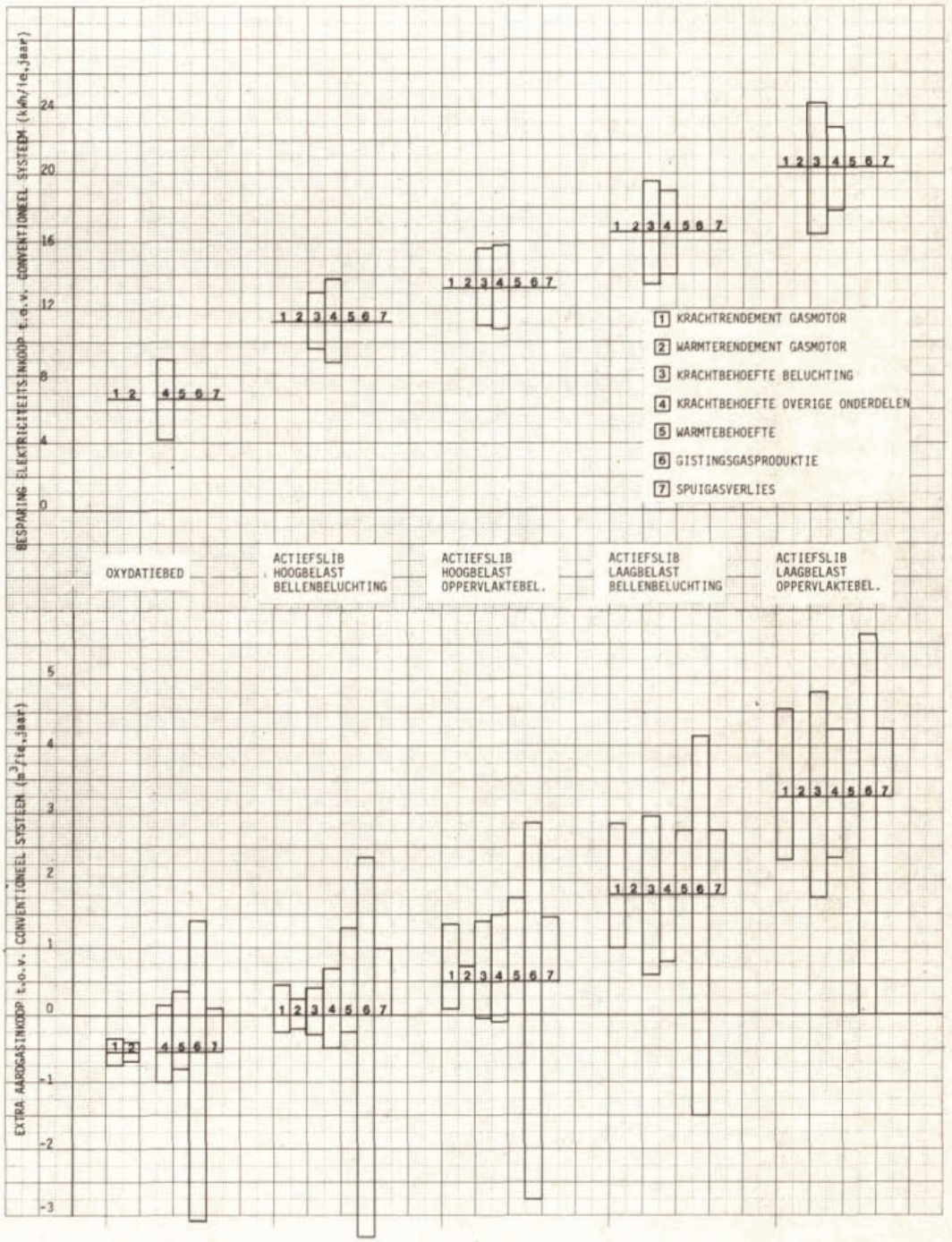

Fig.6. Overzicht gevoeligheidsanalyses energiemodel voor TE-installaties.

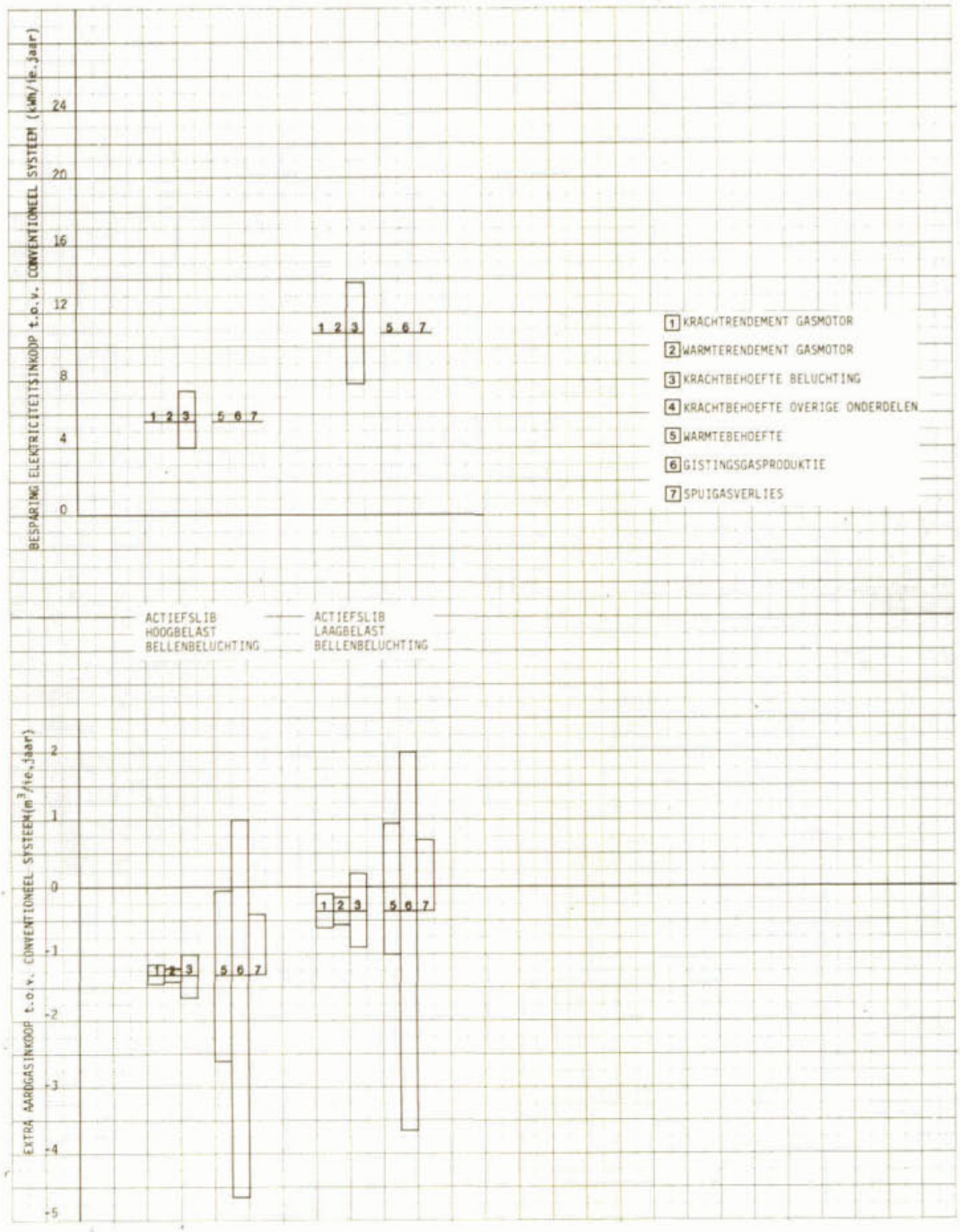

Fig. 7. Overzicht gevoeligheidsanalyses energiemodel voor PE-installaties.

Uit bijlage 4 blijkt dat voor een oxydatiebed met een TE-installatie een extra aardgasinkoop nodig is van -0,57 m^3/i.e.j bij gemiddelde omstandigheden. Dit betekent dus een overschot aan gistingsgas. Deze waarde is in het onderste gedeelte van figuur 6 weergegeven als een horizontale lijn. De elektriciteitsbesparing die wordt verkregen is 2,76 kJ/i.e.h = 6,71 kWh/i.e.j ; zie tabel 7, krachtbehoefte overige onderdelen, oxydatiebed. Deze waarde is weergegeven in het bovenste gedeelte van figuur 6.
Als in het krachtrendement variaties tussen 25 en 33% optreden (zie tabel 7) blijkt uit de gevoeligheidsanalyse dat de extra aardgasinkoop variëert tussen -0,36 en 0,77 m^3/i.e.j (zie bijlage 4 figuur 22). Blok 1 in het onderste gedeelte van figuur 6 wordt dan ook begrensd door deze waarden. Door deze variatie treedt er geen verschil in elektriciteitsbesparing op (blok 1 bovenste gedeelte van figuur 6) Aangezien bij oxydatiebedden geen krachtbehoefte voor beluchting bestaat is blok 3 van dit systeem niet ingevuld. Door krachtbehoeftevariaties voor de overige onderdelen kan de besparing voor elektriciteitsinkoop variëren tussen 4,1 en 8,5 kWh/i.e.j (blok 4 bovenste gedeelte). Dit heeft bovendien tot gevolg dat de extra aardgasinkoop varieert tussen -1,1 en +0,2 m^3/i.e.j (zie bijlage 4, figuur 24). Deze variatie is in blok 4 (onderste gedeelte) weergegeven.
De overige blokken zijn op dezelfde wijze tot stand gekomen met behulp van bijlage 4. De figuren 6 en 7 geven zodoende een totaalbeeld van de gemiddelde en uiterste waarden van de extra aardgasinkoop en van de elektriciteitsbesparing voor de verschillende systemen. Tevens wordt aangegeven wat de gevoeligheden zijn voor de diverse parameters. Hierbij moet wel rekening gehouden worden met het feit dat de waarden slechts gelden voor het beschouwde gebied waartussen de parameters zijn gevarieerd. Het geldt dus voor circa 65% van de zuiveringsinrichtingen.

Uit de resultaten van de gevoeligheidsanalyses (bijlage 4) kan het volgende worden geconstateerd:

- *algemeen*

  In een aantal grafieken komen knikken voor. Deze worden veroorzaakt doordat op dit punt de geproduceerde warmte van de gasmotor volledig wordt benut.
  Bij een grotere warmteproduktie of een kleinere warmtebehoefte is er een warmte-overschot. Een kleinere warmteproduktie of een grotere warmtebehoefte maakt het bijstoken met een verwarmingsketel noodzakelijk.

  Systemen met een PE-installatie en oxydatiebedden met een TE-installatie hebben bijna altijd een warmte-tekort. Laagbelaste actief-slibinstallaties met een TE-installatie hebben een warmte-overschot. Hoogbelaste actief-slibinstallaties met een TE-installatie zitten juist in het overgangsgebied.

- *krachtbehoefte en krachtrendement*

  Variaties in de krachtbehoefte of in het krachtrendement hebben in het geval dat er geen warmte-overschot is een vrij geringe invloed op de extra aardgasinkoop. Het aardgas wordt dan optimaal benut.

Wanneer er een warmte-overschot is, is de gevoeligheid voor deze parameters veel groter, omdat dan de potentiële energie van het aardgas erg onrendabel wordt gebruikt.
Een hogere krachtbehoefte geeft een hogere aardgasinkoop, maar hiertegenover staat ook een grotere besparing op de elektriciteitsinkoop. Vooral wanneer het gas optimaal wordt benut, dus bij een warmte-tekort, zijn extra besparingen gunstig ten opzichte van de extra aardgasinkoop (bijlage 4, figuren 22, 23 en 24).

- *warmtebehoefte en warmterendement*
  Variatie in de warmtebehoefte of het warmterendement heeft geen enkele invloed op de extra aardgasinkoop bij de laagbelaste actiefslibinstallaties met een aanzienlijk overschot aan warmte. Zodra er een warmte-tekort is, wordt de gevoeligheid voor de warmtebehoefte groot. Variaties in het warmterendement hebben ook nu nog een vrij geringe invloed op de extra aardgasinkoop (bijlage 4, figuren 22 en 24).

- *gistingsgasproduktie*
  De gevoeligheid van de gistingsgasproduktie is zeer groot.
  Er worden belangrijke energetische besparingen verkregen wanneer een hogere gistingsgasproduktie kan worden bereikt.
  Wanneer de gisting optimaal verloopt kan tot maximaal 2,5 m^3 aardgas/i.e.j worden bespaard (bijlage 4, figuur 25).

- *extra aardgasinkoop*
  Systemen met een PE-installatie en oxydatiebedden met een TE-installatie hebben nagenoeg altijd voldoende gistingsgas ter beschikking. Alleen bij lage gistingsgasprodukties kan het voorkomen dat een hoeveelheid aardgas (1-2 m^3/i.e.j)moet worden ingekocht.

  Hoogbelaste actiefslibinstallaties met een TE-installatie hebben gemiddeld een vrij geringe aardgasinkoop nodig (0-0,5 m^3/i.e.j).
  Zijn de omstandigheden wat gunstiger dan wordt snel een overschot aan gistingsgas verkregen. Bij ongunstiger omstandigheden kan de aardgasinkoop stijgen tot 0,5-1,5 m^3/i.e.j en bij een lage gistingsgasproduktie zelfs tot 2,5-3 m^3/i.e.j .

  Laagbelaste actief-slibinstallaties met een TE-installatie geven bij bellenbeluchting een extra aardgasinkoop van 1-3 m^3/i.e.j . Bij afwijkingen in de gasproduktie komt dit op 0-4 m^3 aardgas/i.e.j . Bij toepassing van oppervlaktebeluchting is een extra aardgasinkoop van 2-4,5 m^3/i.e.j nodig. Bij afwijkingen in de gasproduktie komt dit op 0,5-5 m^3/i.e.j .

- *spuigasverliezen*
  Door spuigasverliezen kan de hoeveelheid extra in te kopen aardgas maximaal 1 m^3/i.e.j hoger liggen dan de berekende gemiddelde waarde. Spuigasverliezen zullen waarschijnlijk niet snel optreden wanneer er een aanzienlijk tekort of overschot aan gistingsgas is.
  Alleen wanneer de gasbehoefte en -produktie nagenoeg in evenwicht zijn, zullen de fluctuaties in een of meerdere parameters kunnen leiden tot verliezen van gistigingsgas.

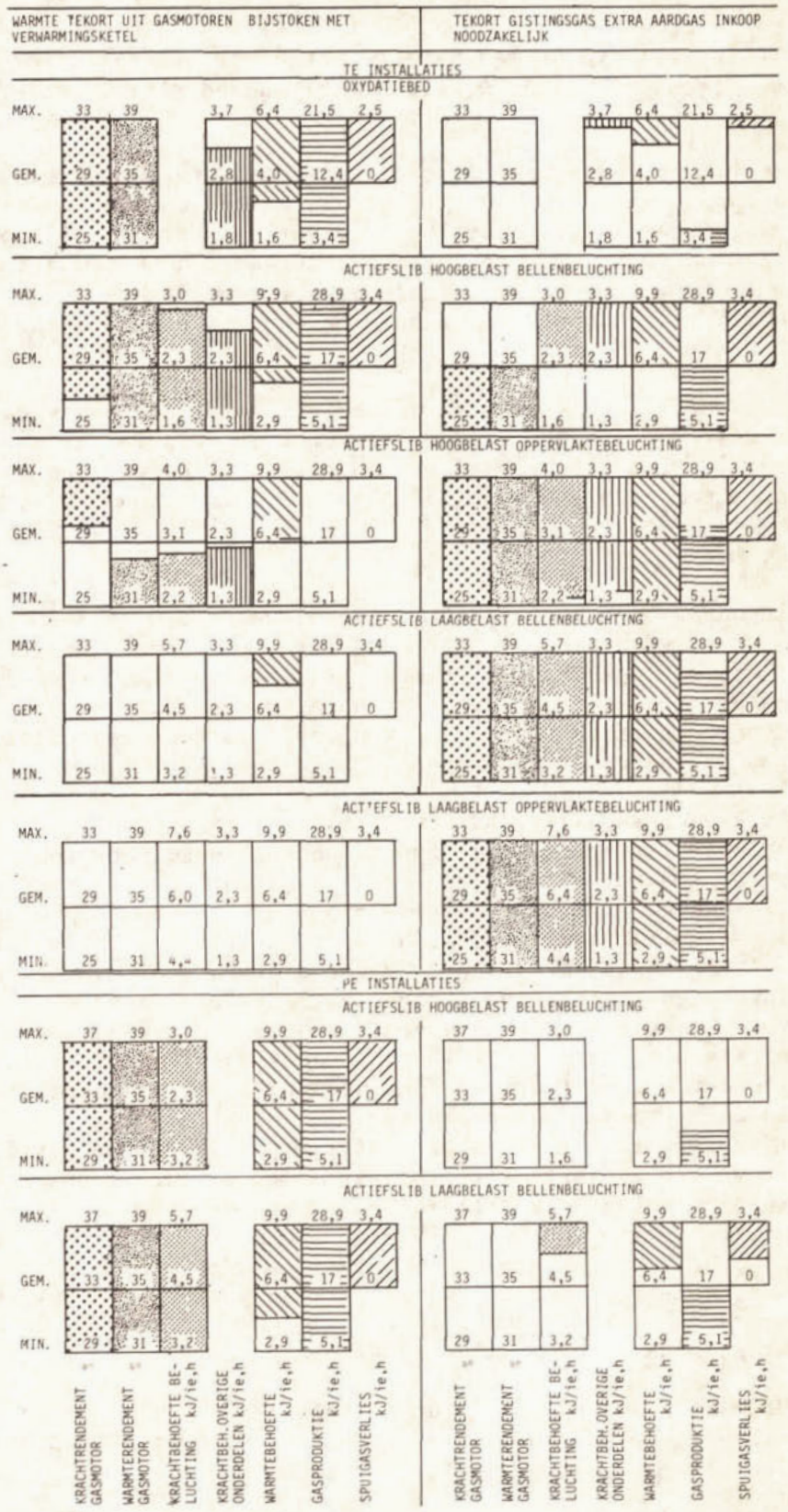

Fig. 8. Overzicht warmtetekort en gistingsgastekort bij variatie van de diverse parameters van het energiemodel.

Deze situatie treedt op bij hoogbelaste actief-slibinstallaties met een TE-installatie en laagbelaste actief-slibinstallaties met een PE-installatie (bijlage 4, figuur 26) en een kleine buffercapaciteit.

Ter verduidelijking wordt in figuur 8 nog een overzicht gegeven waaruit een indruk kan worden verkregen bij welke waarden van de verschillende parameters de verschillende zuiveringssystemen bij toepassing van eigen energie-opwekking een warmte-tekort hebben, waardoor bijstoken met een verwarmingsketel noodzakelijk wordt.
Op dezelfde wijze is aangegeven wanneer er een tekort aan aardgas optreedt.

Voor een bepaald zuiveringssysteem geeft ieder blok het beschouwde gebied weer waarbinnen een bepaalde parameter is gevarieerd. Het gearceerde gedeelte van een blok geeft aan tussen welke waarden van een bepaalde parameter een warmte-tekort of een gistingsgas-tekort optreedt.

6.5 Overige systemen

De berekeningen met het energiemodel zijn uitgevoerd voor de meest toegepaste zuiveringssystemen. De berekeningen voor andere systemen zoals tweetraps biologische zuiveringssystemen (tweetraps actiefslib of oxydatiebed-actiefslib) worden niet nader uitgewerkt.
Een indruk van de energiehuishouding van deze systemen is echter wel te verkrijgen met behulp van de gevoeligheidsanalyses.

Het belangrijkste verschil tussen tweetrapssysteem en eentrapssysteem is het krachtverbruik. Bij oxydatiebed-actiefslibcombinaties zal het overige krachtverbruik toenemen. De krachtbehoefte voor de beluchting is echter aanzienlijk lager ten opzichte van laagbelaste systemen die vergelijkbaar zijn wat betreft effluentkwaliteit. Bij tweetraps actiefslibsystemen is het krachtverbruik voor de beluchting enigszins lager ten opzichte van laagbelaste actiefslibsystemen, terwijl het overige krachtverbruik vergelijkbaar is. Met behulp van figuren 23 en 24 van bijlage 4 of blokken 3 en 4 van figuur 6 zijn dan voor iedere specifieke situatie de besparingen aan ingekochte elektriciteit en de extra aardgasinkoop te bepalen.
Uit theoretische overwegingen is het waarschijnlijk dat de gistingsgasproduktie van hoogbelaste actiefslibsystemen en tweetrapssystemen hoger is dan van laagbelaste actiefslibsystemen vanwege de minder vergaande mineralisatie van het slib.

Er zijn op dit moment echter te weinig praktijkvoorbeelden bekend om statistisch significante verschillen te kunnen waarnemen uit de praktijkresultaten, zodat hiermee in deze studie geen rekening is gehouden.
Aangezien de gistingsgasproduktie de belangrijkste parameter is voor eventuele besparingen op de energie-inkoop kan dit evenwel een belangrijke faktor zijn.

In voorgaande beschouwingen is ook niet nader ingegaan op gedeeltelijke TE-installaties. Hierin zijn echter sterke overeenkomsten aanwezig met een PE-installatie, aangezien in het algemeen de gedeeltelijke TE-installatie wordt toegepast om de kracht ten behoeve van de beluchting (voornamelijk oppervlaktebeluchting) op te wekken.
Het gedeelte van de totale krachtbehoefte dat met de gedeeltelijke TE-installatie wordt opgewekt ligt echter niet vast zodat eventueel hierin nog een optimalisatie mogelijk is. Een ander verschil met een PE-installatie is het lagere krachtrendement, omdat er een indirekte aandrijving plaats vindt waarbij rendementsverliezen in de generator en de elektromotor optreden.
Uit de gevoeligheidsanalyse voor variaties in het krachtrendement en de krachtbehoefte bij PE-installaties (Figuur 22 en 23 bijlage 4 of blokken 1 en 3 van figuur 7) kan toch een indruk worden verkregen van de besparingen voor een bepaalde gedeeltelijke TE-installatie.

7 KOSTENMODEL

7.1 Inleiding

Met behulp van het energiemodel is berekend welke besparingen op de elektriciteitsinkoop worden verkregen en hoeveel extra aardgas moet worden ingekocht bij toepassing van de verschillende systemen van eigen energieopwekking.
De vraag of toepassing van eigen energieopwekking economisch rendabel is, hangt behalve van de eerdergenoemde factoren echter ook nog af van een groot aantal economische factoren, zoals de extra investeringskosten voor de e.e.o.-installatie*, de prijs van het aardgas en de elektriciteit, de extra onderhouds- en personeelskosten bij toepassing eigen energieopwekking, de gewenste terugverdientijd van de gemaakte extra investeringen, de rentevoet en de jaarlijkse kostenstijgingen van de verschillende factoren.

Voor de bepaling van de economische aantrekkelijkheid van eigen energieopwekking is uitgegaan van een tweezijdige benadering.
Enerzijds kan uit de resultaten van het energiemodel en bij bepaalde waarden van de verschillende economische factoren worden bepaald welke investering maximaal mag worden verricht om het geïnvesteerde bedrag binnen een bepaalde tijd te hebben terugverdiend. Voor deze berekeningen is een kostenmodel ontwikkeld, waarmee tevens een gevoeligheidsanalyse kan worden uitgevoerd voor variaties die in de verschillende waarden kunnen optreden. Anderzijds is een inzicht nodig in de investeringen die moeten worden gedaan voor het aanschaffen van een eigen energieopwekkingsinstallatie. Deze investeringen zullen afhankelijk zijn van het te leveren vermogen inclusief de benodigde reservecapaciteit en de benodigde extra verwarmings- en/of koelingscapaciteit.

Uit een vergelijking van de beide waarden, door de maximaal toegestane en de werkelijke investeringskosten, kan een inzicht worden verkregen in de economische waarde van het toepassen van eigen energieopwekking.

In dit hoofdstuk zal het kostenmodel worden beschreven. Door dit model om te zetten in een computerprogramma kunnen de berekeningen worden uitgevoerd.

7.2 Kostenmodel

Bij het kostenmodel wordt gebruik gemaakt van de zogenaamde "contante waarde" methode. Hierbij worden alle kosten of baten van een bepaald jaar herleid tot een waarde in een bepaald basisjaar, in het algemeen het eerste jaar van de looptijd van het project. Met deze contante waarde methode is het zodoende mogelijk om de kosten en de baten van een bepaald project, die, gespreid over de tijd, voortvloeien uit het project, onderling vergelijkbaar te maken. Deze herleiding geschiedt met behulp van de disconteringsvoet volgens:

$$A_o = \frac{A_k}{(1+p)^k}$$

---

*e.e.o.: eigen energieopwekking

waarin A_k = baten of kosten in jaar k (*f*)

A_o = baten of kosten in basisjaar (*f*)

p = disconteringsvoet (fractie van A per jaar)

k = beschouwd jaar.

Bij het kostenmodel wordt de maximaal toegestane extra investering (ΔI) berekend die mag worden verricht voor een project met bepaalde jaarlijkse baten (B) en kosten (C), waarvan tevens de looptijd bekend is.

baten

Van het eigen energieopwekkingsproject zijn de baten de besparing aan elektriciteitsinkoop.
Deze zijn afhankelijk van de jaarlijks bespaarde hoeveelheid elektriciteit in kWh/jaar (ΔE), de elektriciteitsprijs en de inflatie in de elektriciteitsprijs.
De elektriciteitsprijs is opgebouwd uit twee factoren:

- kosten voor investeringen, personeel, onderhoud en winst (e_x*f*/kWh)
- kosten voor inkoop primaire energie (e_b*f*/kWh)

De jaarlijkse kostenstijging voor beide factoren kan verschillend zijn (resp i_x en i_b fractie van kosten per jaar). Herleid tot het basisjaar geldt voor de gecumuleerde baten gedurende een looptijd van n jaar:

$$B = \sum_{k=1}^{n} \left[\{ (e_x(1+i_x)^k + e_b (1+i_b)^k \} \frac{\Delta E}{(1+p)^k} \right]$$

De kosten kunnen als volgt worden onderverdeeld:

kosten extra aardgasinkoop

Op dezelfde wijze als hierboven kunnen de gecumuleerde kosten van het in te kopen aardgas als volgt worden bepaald:

$$C_g = \sum_{k=1}^{n} \{ g(1+i_g)^k \frac{\Delta G}{(1+p)^k} \}$$

waarin: C_g = gecumuleerde kosten extra aardgasinkoop (*f*)

g = gasprijs in basisjaar (*f*/m^3)

i_g = jaarlijkse kostenstijging gasprijs (fractie per jaar)

ΔG = hoeveelheid extra aardgasinkoop per jaar (m^3/jaar)

p = disconteringsvoet (fractie per jaar)

n = looptijd (jaar)

k = beschouwd jaar

onderhoudskosten

$$C_s = \sum_{k=1}^{n} \{ S_{em} (1+i_s)^k \frac{z.\Delta I}{(1+p)^k} + S_b (1+i_s)^k \frac{(1-z).\Delta I}{(1+p)^k} \}$$

waarin: C_s = gecumuleerde extra onderhoudskosten (*f*)

S_{em}, S_b = jaarlijkse onderhoudskosten elektromechanische en bouwkundige apparatuur in fractie van de investeringskosten van respectievelijk elektromechanische en bouwkundige apparatuur.

i_s = jaarlijkse onderhoudskostenstijging (fractie per jaar)

z = fractie elektromechanische investering van totale investering

ΔI = extra investeringskosten eigen energieopwekkingsinstallatie (*f*)

personeelskosten

$$C_v = \sum_{k=1}^{n} \{ V_{em} (1+i_v)^k \frac{z.\Delta I}{(1+p)^k} + V_b (1+i_v)^k \frac{(1-z).\Delta I}{(1+p)^k} \}$$

waarin: C_v = gecumuleerde extra personeelskosten (*f*)

V_{em}, V_b = jaarlijkse personeelskosten elektromechanische en bouwkundige apparatuur in fractie van de investeringskosten voor respectievelijk elektromechanische en bouwkundige apparatuur.

i_v = jaarlijkse personeelskostenstijging (fractie per jaar)

kapitaalskosten van de investering

In het model worden de maximale investeringen berekend die mogen worden verricht opdat de totale kosten in de looptijd van het project niet groter zijn dan de totale baten die in deze periode zijn verkregen. Om er voor te zorgen dat aan het project geen kosten meer verbonden zijn, nadat de looptijd is beëindigd, zal de afschrijvingstermijn van zowel het elektromechanische als het bouwkundige gedeelte gelijk moeten zijn aan de looptijd van het project.

Indien de afschrijving binnen de looptijd van het project ligt zal de contante waarde van de gecumuleerde kapitaalskosten gelijk zijn aan de kosten voor de investering aangezien de berekende rente van de kapitaalskosten op dezelfde wijze weer worden afgetrokken bij de berekening van de contante waarde.
Hierdoor geldt dus: $C_I = \Delta I$.

Ter vereenvoudiging van het kostenmodel worden de volgende aannamen gedaan.

- In het algemeen kan worden gesteld dat de jaarlijkse kostenstijgingen van personeelskosten (i_v), onderhoudskosten (i_s) en elektriciteit exclusief brandstoftoeslag (i_x) niet veel af zullen wijken van de gemiddelde inflatie i. De invloeden van onderlinge variaties hierin zullen dan ook niet worden onderzocht; derhalve wordt gesteld dat $i = i_v = i_s = i_x$.
  De inflaties in de brandstoftoeslag en in de gasprijs kunnen wel aanzienlijk afwijken van de algemene inflatie.

- Het bouwkundige gedeelte zal nauwelijks of geen onderhoudskosten en personeelskosten vergen. Bovendien wordt dit gedeelte versneld afgeschreven, zodat S_b en V_b gelijk aan 0 kunnen worden verondersteld.

Er geldt dus nu voor de totale baten van het project:

$$B = \sum_{k=1}^{n} \left[\{ e_x(1+i)^k + e_b (1+i_b)^k \} \frac{\Delta E}{(1+p)^k} \right]$$

De totale kosten zijn:

$$C = C_I + C_g + C_s + C_v$$

$$C = \Delta I + \sum_{k=1}^{n} \{ g(1+i_g)^k \frac{\Delta G}{(1+p)^k} + (S_{em} + V_{em}) (1+i)^k \frac{z\Delta I}{(1+p)^k} \}$$

De maximaal toegestane extra investering (ΔI_{max}) kan uit bovenstaande formules worden bepaald bij de voorwaarde:

$\Delta I = \Delta I_{max}$ indien $B = C$

Hieruit volgt dat:

$$\Delta I_{max} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \{e_x (1+i)^k + e_b (1+i_b)^k\} \frac{\Delta E}{(1+p)^k} - \sum_{k=1}^{n} g (1+i_g) \frac{\Delta G}{(1+p)^k}}{1 + \sum_{k=1}^{n} (S_{em} + V_{em}) (1+i)^k \frac{z}{(1+p)^k}}$$

Door invulling van de met het energiemodel berekende waarden voor ΔE en ΔG, die afhankelijk zijn van de verschillende eigen energieopwekkingssystemen (PE of TE) en van de verschillende biologische zuiveringssystemen kan de maximaal toegestane investering worden berekend voor bepaalde waarden van de economische parameters. Tevens kan met dit kostenmodel een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd voor variaties die kunnen optreden in de verschillende economische, mechanische en technologische parameters.

7.3 Parameters

7.3.1 *energetische invoergegevens*

De gemiddelde waarde van de extra aardgasinkoop (ΔG) en de besparingen op elektriciteitsinkoop (ΔE), zoals deze met het energiemodel zijn gevonden, worden in tabel 9 vermeld.

	extra aardgas-inkoop (ΔG) (m^3/i.e.j)	besparing elektriciteit (ΔE) (kWh/i.e.j)
TE-installaties		
oxydatiebed	0	6,71
hoogbelast a.s. met bellenbeluchting	0,01	11,32
hoogbelast a.s. met opp.beluchting	0,51	13,30
laagbelast a.s. met bellenbeluchting	1,78	16,54
laagbelast a.s. met opp.beluchting	3,28	20,35
PE-installaties		
hoogbelast a.s. met bellenbeluchting	0	5,63
laagbelast a.s. met bellenbeluchting	0	10,84

Tabel 9. Energetische invoergegevens kostenmodel
a.s. = actiefslib

De optredende variaties in deze parameters zijn weergegeven in de figuren 6 en 7 van het energiemodel. Deze waarden zullen bij de gevoeligheidsanalyses worden gebruikt.

7.3.2 *aardgas en elektriciteitsprijzen*

De opbouw en de toekomstige ontwikkeling van de aardgas- en elektriciteitsprijzen zijn uitvoerig belicht door de Ferrante[7].
Hieruit blijkt dat voor de eerste 170.000 m^3 afgenomen aardgas voor 1979 een prijs geldt van *f* 0,295 per m^3. Dit betekent een prijsstijging van circa 8% ten opzichte van 1978. Voor 1980 wordt eenzelfde verhoging verwacht. De prijs van dit gedeelte van het afgenomen aardgas wordt na 1981 gekoppeld aan de prijsstijgingen van huisbrandolie. De aardgasprijs bij een afname tussen 170.000 en 1.000.000 m^3/jaar op *f* 0,224/m^3. De prijsstijgingen hierin zijn afhankelijk van de stijging in de prijs van zware stookolie. De prijsstijgingen hiervan zijn mogelijk lager dan die van huisbrandolie.
De hierboven genoemde prijzen zijn allen inclusief 18% B.T.W.
In de noordelijke provincies Groningen, Friesland en Drenthe liggen de prijzen *f* 0,009 per m^3 lager dan in de overige delen van Nederland.

De samenstelling van de elektriciteitsprijs wordt bepaald door twee factoren:

- brandstofkosten (brandstoftoeslag)
- alle overige kosten, zoals investeringskosten, personeels- en onderhoudskosten en winstneming.

De brandstoftoeslag is afhankelijk van de gebruikte primaire energiebron, te weten olie, aardgas of kolen. In 1979 wordt verwacht dat de brandstoftoeslag zal liggen tussen ongeveer *f*0,048 en *f*0,068 per kWh. Gemiddeld bedraagt de brandstoftoeslag circa *f*0,058 per kWh. Hierbij zijn de maatschappijen die kolen gebruiken (voornamelijk in Noord-Brabant) enigszins goedkoper. De stijging in de brandstoftoeslag hangt sterk af van de marktsituatie en het aandeel dat de goedkopere steenkool in de elektriciteitsproduktie gaat nemen.
Door de verwachte vergroting van het kolenaandeel van nu 8-9% tot in 1986 17-18% is de gemiddelde prijsstijging mogelijk minder dan de stijging van de aardgasprijs. De prijsverschillen tussen de verschillende voorzieningsgebieden zullen echter wel groter worden.

De prijs van het overige gedeelte van de elektriciteit is sterk afhankelijk van het verbruikspatroon van de afnemer. Bovendien zijn de prijsverschillen tussen de diverse maatschappijen aanzienlijk. Geschat wordt dat voor 1979 de prijs voor de overige kosten ligt tussen *f*0,065 en *f*0,135 per kWh met een gemiddelde waarde van *f*0,093 per kWh. De prijsstijgingen hierin zullen in de nabije toekomst vrij gering zijn vanwege de huidige overcapaciteit en de te verwachten lagere winstneming.

7.3.3 *inflatiepercentage*

In verband met de keuze van de waarde voor de prijsstijgingen en de disconteringsvoet is het belangrijk dat de beide parameters in de berekeningen van de contante waarde altijd in relatie met elkaar voorkomen en wel in de vorm:

$$\left(\frac{1+i}{1+p}\right)^k$$

Deze factor kan ook geschreven worden als $\left(\frac{1}{1+p_r}\right)^k$, waarin $p_r = \frac{p-i}{i+p}$

p_r wordt ook wel de reële rentevoet genoemd, ofwel de rentevoet gecorrigeerd voor de daling van de geldwaarde ten gevolge van de inflatie.
Op langere termijn bezien blijkt dat de reële rentevoet redelijk constant is met een waarde van circa 3%. Door bijzondere omstandigheden kan het verschil tussen de rente en de inflatie tijdelijk hiervan afwijken maar in de praktijk blijkt dit verschil zich toch telkens weer te herstellen tot het niveau van circa 3%.

Bovenstaande geldt in eerste instantie voor het algemene inflatiecijfer. Bij deze studie heeft de prijsontwikkeling van aardgas en elektriciteit een zeer grote invloed aangezien de economische aantrekke-

lijkheid van toepassing van eigen energieopwekking gebaseerd is op de netto besparingen op energie-inkoop.

De ontwikkelingen in de energieprijzen op langere termijn zijn echter veel moeilijker te schatten in verband met de onzekere situatie in de toekomstige energievoorziening.

Dit maakt het noodzakelijk om naast een gevoeligheidsanalyse voor de reële rentevoet ook een gevoeligheidsanalyse uit te voeren waarbij de invloed van variaties in prijsstijgingen van primaire energie (brandstoftoeslag elektriciteit en aardgas) wordt onderzocht bij constante algemene inflatie.

Ook de invloed van de aardgasprijs afzonderlijk is van belang, aangezien het niet onwaarschijnlijk is dat de Nederlandse energiepolitiek er op gericht zal zijn te voorkomen dat de aardgasreserves te snel uitgeput raken. Hierdoor zullen extra prijsstijgingen ook ten opzichte van de elektriciteitsprijs mogelijk zijn. Het zoeken naar andere vormen van energie, ook voor eigen energieopwekking, kan dan ook zinvol zijn.

7.3.4 *looptijd*

De looptijd van het project wordt voor deze studie gesteld op gemiddeld 15 jaar. Tevens zal een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd voor andere waarden van de looptijd.

7.3.5 *economische invoergegevens*

Bovengenoemde beschouwingen hebben geresulteerd in de keuze van de economische parameters zoals deze in tabel 10 zijn vermeld. Tevens is hierin vermeld voor welke parameters een gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd en welke variaties hiervoor zijn onderzocht.

De berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de gemiddelde waarden van de extra aardgasinkoop en besparingen op de elektriciteitsinkoop (zie tabel 10).

Behalve voor deze gemiddelde waarden zijn de berekeningen ook uitgevoerd voor de variaties die hierin kunnen optreden ten gevolge van de variaties in de technologische en mechanische parameters zoals kracht- en warmtebehoefte, gasproduktie, diverse rendementen enz.

	gemiddeld	minimum	maximum
Elektriciteitsprijs (*f*/kWh)			
. brandstoftoeslag: e_b	0,058	0,048	0,068
. overige kosten: e_x	0,093	0,065	0,135
aardgasprijs: g (*f*/m^3)			
. 0 - 170.000 m^3	0,295		
. > 170.000 m^3	0,231		
% elektromechanische investeringen van totale investering: z	75	60	90
algemene inflatie: i (%)	5		
inflatie primaire energie: i_b, i_g (%) (brandstoftoeslag elektriciteit en aardgas)	5	5	10
inflatie aardgasprijs: i_g (%)	5	5	10
disconteringsvoet: p (%)	8	6,5	9
looptijd: n (jaar)	15	10	20
% jaarlijkse onderhouds + personeelskosten van elektromechanische investeringen: $S_{em} + V_{em}$	6,5	3,5	9

Tabel 10 Economische invoerparameters kostenmodel
(prijspeil januari 1979)

7.4 Resultaten

De resultaten van de berekeningen van de maximale extra investeringen, die mogen worden verricht in eigen energieopwekkingsinstallaties voor de verschillende typen zuiveringsinrichtingen, zijn weergegeven in tabel 11. Hierbij is uitgegaan van de gemiddelde waarden van de in paragraaf 7.3 vermelde parameters.

	max. investering (*f*/i.e.)
TE-installaties	
. oxydatiebed	8,0
. actiefslib hoogbelast bellenbeluchting	13,4
. actiefslib hoogbelast opp.beluchting	14,6
. actiefslib laagbelast bellenbeluchting	15,6
. actiefslib laagbelast opp.beluchting	17,4
PE-installaties	
. actiefslib hoogbelast bellenbeluchting	6,7
. actiefslib laagbelast bellenbeluchting	12,9

Tabel 11 Maximale investering in eigen energie-opwekkingssystemen voor diverse typen zuiveringsinrichtingen (prijspeil januari 1979).

Omdat de gasprijs bepaald wordt door de hoeveelheid afgenomen aardgas zijn de resultaten afhankelijk van de capaciteit van de rioolwaterzuiveringsinrichting. De berekeningen zijn daarom uitgevoerd voor een rioolwaterzuiveringsinrichting met een capaciteit van circa 100.000 i.e. Het capaciteitseffect is door middel van gevoeligheidsanalyse nagegaan.

De resultaten van de gevoeligheidsanalyses zijn vermeld in bijlage 5. Een overzicht hiervan is weergegeven in figuur 9 voor de economische parameters en in figuur 10 voor de technologische parameters.

Via de gevoeligheidsanalyses kunnen diverse invloeden worden afgeleid.

- *algemene inflatie en disconteringsvoet*
  Wanneer er vanuit wordt gegaan dat de disconteringsvoet in het algemeen de variaties van de algemene inflatie blijft volgen zodat de reële rentevoet constant blijft, dan is het resultaat niet gevoelig voor het inflatieniveau.
  Wanneer de reële rentevoet langdurig afwijkt van de hier aangenomen 3% dan zal het resultaat tot maximaal circa 7% kunnen afwijken van de gemiddelde waarden (zie bijlage 5, figuur 31).

- *inflatie primaire brandstof*
  Wanneer de inflatie in de primaire brandstof hoger is dan de algemene inflatie zal het maximaal te investeren bedrag ook hoger kunnen zijn, omdat de prijsstijgingen in de bespaarde elektriciteit sterker doorwerken dan de prijsstijgingen van de extra aardgasinkoop. Bij een TE-installatie voor laagbelaste actief-slibinstallaties is de gevoeligheid slechts gering omdat de hoeveelheid in te kopen aardgas aanzienlijk is. Voor de overige systemen is de extra aardgasinkoop vrij gering zodat de gevoeligheid voor het inflatieniveau van de primaire brandstof groot is (zie bijlage 5, figuur 30).

- *inflatie aardgasprijs*
  De gevoeligheid voor inflatie van de aardgasprijs is groot voor de systemen met een grote hoeveelheid extra aardgasinkoop, namelijk de TE-installaties voor laagbelaste actief-slibinstallaties. Hierdoor kan het te investeren bedrag voor deze systemen aanzienlijk minder worden wanneer de aardgasprijs sneller stijgt dan de overige prijzen. De overige systemen zijn niet of nauwelijks gevoelig voor het inflatieniveau van de aardgasprijs omdat geen of slechts weinig aardgas behoeft te worden ingekocht (zie bijlage 5, figuur 30).

- *capaciteit rioolwaterzuiveringsinrichting*
  De berekende waarden zijn alleen dan afhankelijk van de capaciteit van de zuiveringsinrichting wanneer de hoeveelheid in te kopen aardgas groter wordt dan 170.000 m^3 per jaar, omdat de prijs hiervan lager ligt. De gevoeligheid is ook dan echter vrij gering. De hoeveelheid in te kopen aardgas is gemiddeld groter dan 170.000 m^3 per jaar bij TE-installaties voor laagbelaste actief-slibinstallaties (> circa 60.000 i.e.) met oppervlaktebeluchting, voor laagbelaste actief-slibinstallaties (> circa 100.000 i.e.) met bellenbeluchting en voor hoogbelaste actief-slibinstallaties (> circa 400.000 i.e.) met oppervlaktebeluchting.
  De overige systemen behoeven nauwelijks of geen aardgas in te kopen (zie bijlage 5, figuur 27).

- *opbouw investeringen; personeels- en onderhoudskosten*
  Het gedeelte van de totale investeringen dat voor de elektromechanische apparatuur nodig is en de personeels- en onderhoudskosten die vooral afhankelijk zijn van de elektromechanische investeringen, zijn moeilijk te schatten. Ze worden mede bepaald door de specifieke omstandigheden. Variaties hierin kunnen de elektromechanische investeringen met maximaal circa 10% beïnvloeden en de personeels- en onderhoudskosten met maximaal 20% (zie bijlage 5, figuur 29).

- *looptijd*
  De looptijd van het project wordt bepaald door de afschrijvingstermijn van de apparatuur en het door de beheerder gewenste rendement van de investeringen. Hierdoor kan het maximaal te investeren bedrag nog maximaal circa 17% afwijken van het berekende gemiddelde bedrag (zie bijlage 5, figuur 31).

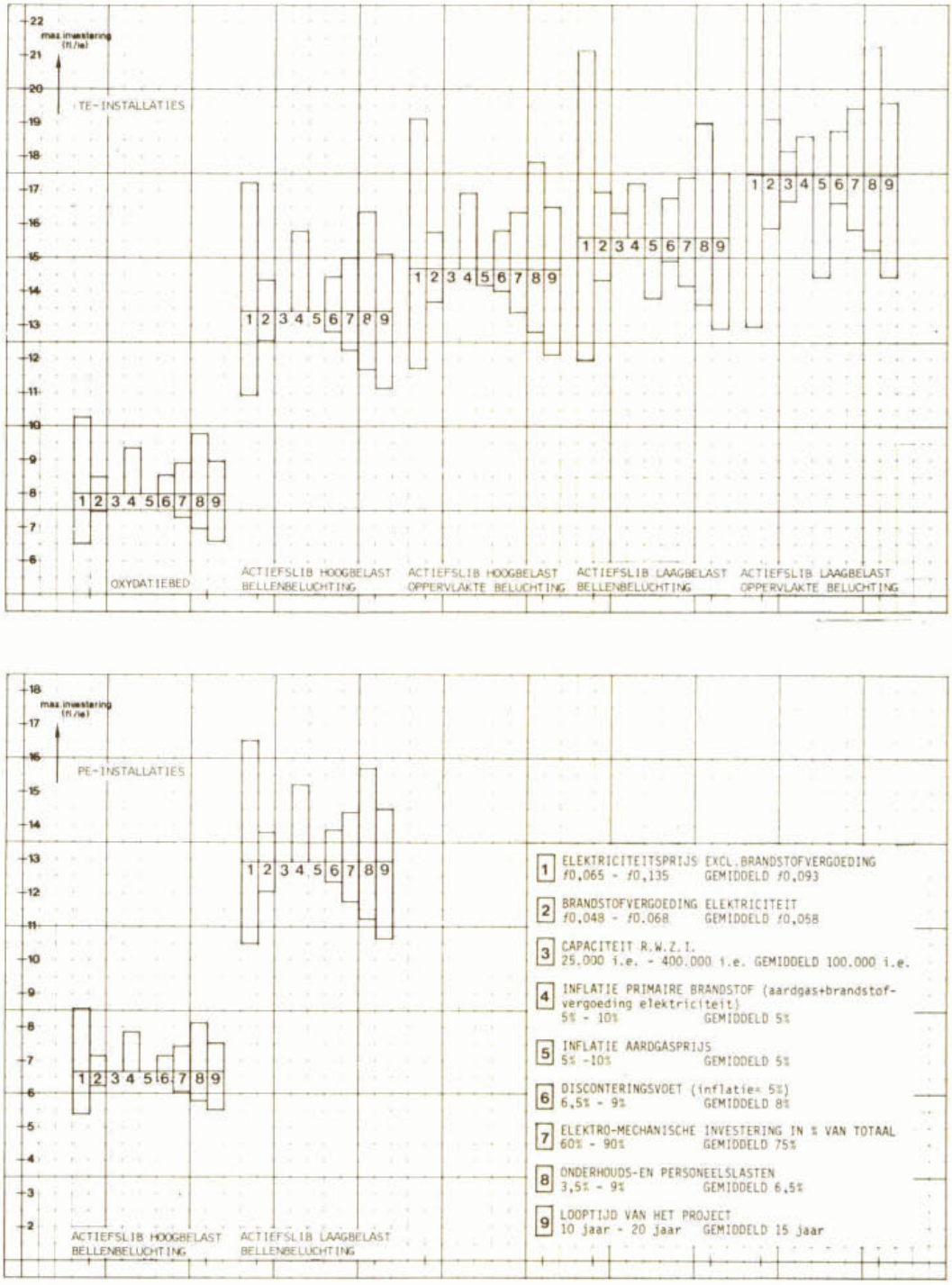

Fig. 9. Overzicht gevoeligheidsanalyses kostenmodel voor economische parameters.

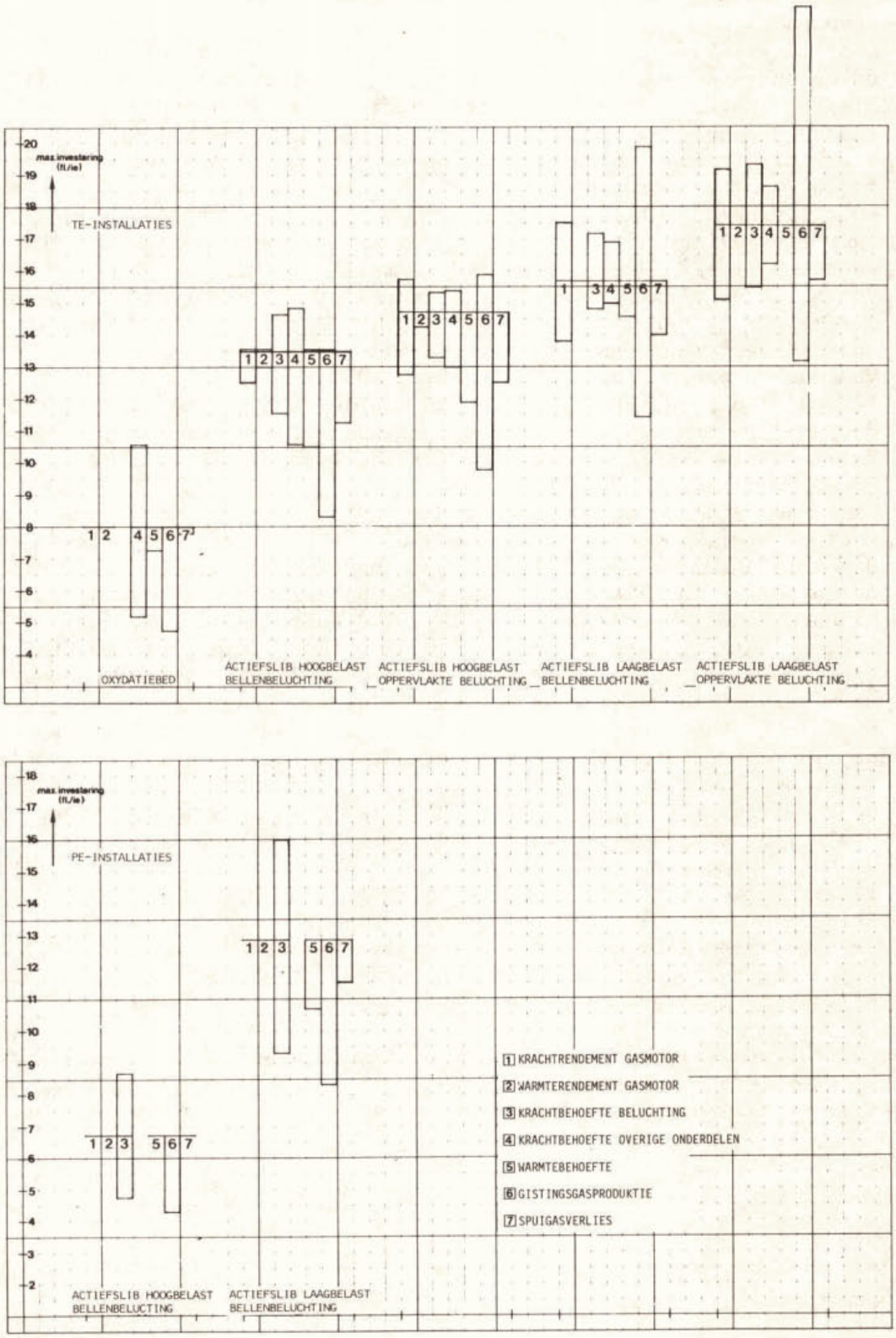

Fig. 10. Overzicht gevoeligheidsanalyses kostenmodel voor technologische en mechanische parameters.

- *energie*
  Door mogelijke variaties in de bespaarde hoeveelheid elektriciteit en de extra hoeveelheid in te kopen aardgas, evenals in de prijs hiervan, kunnen de resultaten zeer aazienlijk afwijken van de berekende waarden.
  Er geldt hierbij echter wel dat de verhouding tussen het maximaal te investeren bedrag en de jaarlijkse netto bespaarde kosten voor energie-inkoop gelijk is aan 7,9. Dit geldt wanneer de overige parameters gelijk zijn aan de in paragraaf 7.3 vermelde gemiddelde waarden (zie bijlage 5, figuur 32 t/m 35).
  Vooral in de elektriciteitsprijs exclusief brandstofvergoeding blijken grote verschillen te bestaan. Deze verschillen werken sterk door in de resultaten. Hierdoor kunnen afwijkingen van de berekende gemiddelde waarden oplopen tot bijna 40%.
  Verschillen in de brandstoftoeslag van de elektriciteitsprijs treden niet zo sterk op, zodat de gevoeligheid daar veel geringer is. Maximale afwijking is circa 10% (zie bijlage 5, figuur 28).

- *technologische en mechanische parameters*
  Voor de afwijkingen van de gemiddelde elektriciteitsbesparingen en de extra aardgasinkopen, die met het energiemodel bepaald zijn uit de variaties in de technologische en mechanische parameters, zoals kracht- en warmterendement van de eigen energieopwekkingsinstallatie, kracht- en warmtebehoefte van de rwzi, gistingsgasproduktie en spuigasverliezen, zijn met het kostenmodel de gevoeligheden bepaald voor verschillende waarden van enkele economische parameters.
  Evenals bij het energiemodel geldt ook hier dat de gistingsgasproduktie de parameter is die het sterkst bepalend is voor het resultaat. De gevoeligheid voor de krachtbehoefte wordt sterk beïnvloed door de elektriciteitsprijs en de inflatie in de primaire brandstofprijs. De gevoeligheid voor de gistingsgasproduktie wordt nog groter naarmate de inflatie in de brandstof- of aardgasprijs groter is ten opzichte van de algemene inflatie.
  Duidelijk wordt uit deze gevoeligheidsanalyse dat de resultaten sterk worden beïnvloed door de specifieke omstandigheden, vooral bij de zuiveringssystemen die een hoge energiebehoefte hebben (zie bijlage 5, figuren 36 t/m 39).

De berekende gemiddelde waarden zijn slechts als richtlijn bruikbaar; er mag echter geen algemeen geldende waarde aan worden toegekend, omdat de mogelijke variaties zeer grote verschillen kunnen opleveren.

8 INVESTERINGSKOSTEN EIGEN ENERGIEOPWEKKINGSINSTALLATIES.

De investeringskosten van eigen energieopwekkingsinstallaties zijn mede bepaald op basis van richtoffertes, aangevraagd bij diverse leveranciers van gasmotoren en stroomaggregaten.
De volgende leveranciers hebben medewerking verleend aan dit onderzoek:
- Geveke (Caterpillar)
- Gosau (MWM)
- Landré Ruhaak (Waukesha)

Het te installeren vermogen van de eigen energieopwekkingsinstallatie is afhankelijk van:
a. gemiddelde krachtbehoefte van de op de eigen energieopwekkingsinstallatie aangesloten onderdelen
b. benodigde reservecapaciteit
c. beschikbare vermogens van de in de handel zijnde apparatuur.

ad. a. De gemiddelde krachtbehoefte is afhankelijk van het zuiveringssysteem, het type eigen energieopwekking (TE, gedeeltelijke TE of PE) en de capaciteiten van de zuiveringsinrichting.
In tabel 12 en 13 worden van een aantal situaties de gemiddelde krachtbehoeften weergegeven. Hierbij zijn de resultaten van de inventarisatie van de krachtbehoefte (hoofdstuk 5) toegepast.

ad. b. De benodigde reservecapaciteit wordt bepaald door de pieken die op een bepaalde zuiveringsinrichting optreden in de krachtbehoefte van de aangesloten onderdelen en het al dan niet nodig zijn van stand-by capaciteit in verband met storingen of onderhoud.
Vanwege de verblijftijd van tenminste enige uren in de beluchtingstank en de continue werking van de beluchting is de spreiding in het opgenomen vermogen ten behoeve van de beluchting vrij gering.
Dit houdt in dat voor PE-installaties en voor gedeeltelijke TE-installaties, waarbij alleen de beluchting wordt aangedreven door de eigen energieopwekkingsinstallatie, het extra te installeren vermogen voor piekbelastingen vrij gering kan zijn.

Het overige energieverbruik vertoont echter wel een grote spreiding in de tijd als gevolg van de grote spreidingen in de aanvoerdebieten en de discontinue werking van vele onderdelen. De reservecapaciteit van volledige TE-installaties moet dan ook aanzienlijk groter zijn dan wanneer alleen de beluchting wordt aangesloten.

Bij grote zuiveringsinrichtingen is de buffercapaciteit van het aanvoerstelsel van het afvalwater groter dan bij kleine inrichtingen, zodat de piekaanvoeren worden afgevlakt. De reservecapaciteit kan daarom kleiner worden bij grotere zuiveringsinrichtingen.

	oxydatiebedden			hoogbelast actiefslibinstallaties						laagbelast actiefslibinstallaties					
				bellenbeluchting			oppervlaktebeluchting			bellenbeluchting			oppervlaktebeluchting		
capaciteit (ie.)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reserve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reser. ve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reserve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reserve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reserve (%)
25.000	19,1	-	-	32,3	120	270	38,0	120	220	47,2	160	240	58,1	160	175
50.000	38,3	120	210	64,6	180	175	75,9	210	175	94,4	260	175	116,2	290	150
100.000	76,6	210	175	129,2	320	150	151,8	380	150	188,8	470	150	232,3	580	150
200.000	153,2	380	150	258,4	650	150	303,9	680	125	377,6	850	125	464,6	1050	125
400.000	306,4	690	125	516,9	1160	125	607,3	1370	125	755,3	1700	125	929,2	2100	125

Tabel 12. Gemiddeld opgenomen vermogen en reservecapaciteit van volledige TE-installaties voor verschillende zuiveringssystemen als functie van de capaciteit van de rioolwaterzuiveringsinrichting.

	hoogbelast actiefslibinstallaties						laagbelast actiefslibinstallaties					
	bellenbeluchting PE-installatie			oppervlaktebeluchting ged. TE-installatie			bellenbeluchting PE-installatie			oppervlaktebeluchting ged. TE-installatie		
capaciteit (ie.)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reserve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reser. ve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgest. verm. (kW)	reserve (%)	gemidd. verm. (kW)	opgesl. verm. (kW)	reserve (%)
25.000	16,1	-	-	21,7	60	180	30,9	90	190	41,8	80	90
50.000	32,1	90	180	43,4	80	80	61,9	140	125	83,6	160	90
100.000	64,2	135	110	86,8	160	80	123,7	280	125	167,2	250	50
200.000	128,5	255	100	173,6	260	50	247,5	420	70	334,5	500	50
400.000	256,9	420	65	347,2	520	50	494,9	745	50	669,0	1000	50

Tabel 13. Gemiddeld opgenomen vermogen en reservecapaciteit van PE-installaties en gedeeltelijk TE-installaties voor verschillende zuiveringssystemen als functie van de capaciteit van de rioolwaterzuiveringsinrichting.

Bij volledige TE-installaties en PE-installaties kunnen de aangesloten onderdelen alleen worden aangedreven door de eigen energieopwekkingsinstallatie. Bij storing of onderhoud aan een installatie zal een andere installatie meteen ingeschakeld moeten worden zodat een stilstaande reserve nodig is. Het installeren van meer dan twee installaties is daarom vaak gunstiger omdat de stilstaande reservecapaciteit dan minder kan zijn. Dit effect speelt met name een rol naarmate de zuiveringsinrichtingen groter zijn.

Bij gedeeltelijke TE-installaties wordt, naast de elektriciteitsopwekking door de eigen energieopwekkingsinstallatie, nog een hoeveelheid elektriciteit ingekocht. Bij het buiten bedrijf nemen van de eigen energieopwekkingsinstallatie of een gedeelte hiervan kan dan overgeschakeld worden op het elektriciteitsnet. Een stilstaande reserve bij dat type installatie is niet noodzakelijk.

Het is ook bij volledige TE-installaties mogelijk een zodanige aansluiting met het openbare elektriciteitsnet te creëren dat dit als reserve functioneert, waardoor de investeringskosten aanzienlijk dalen. In dit rapprot wordt hierop niet nader ingegaan; met name zou hiervoor onderzocht moeten worden wat de opstelling is van de openbare nutsbedrijven ten aanzien van het installeren van een groot vermogen, dat zelden benut wordt, en wat de financiële consequenties hiervan zijn.

ad. c. Slechts een beperkt aantal typen gasmotoren kon worden geleverd. Wanneer het benodigde vermogen, inclusief reserve groot is kan door combineren van enige motoren dit vermogen vrij goed worden benaderd. Voor kleine benodigde vermogens is de keuze echter beperkt. Dit betekent dat het geinstalleerde vermogen bij kleine zuiveringsinrichtingen vaak aanzienlijk groter wordt dan de gemiddelde behoefte, zeker wanneer een stilstaande reserve nodig is.

Met inachtneming van bovengenoemde punten is in tabel 12 en 13 weergegeven wat het te installeren vermogen is als functie van de capaciteit van de rwzi voor de verschillende zuiveringssystemen.
De waarden zijn gegeven voor volledige TE-installaties, PE-installaties bij bellenbeluchtingssystemen en gedeeltelijke TE-installaties voor de beluchting van oppervlaktebeluchtingssystemen.
Andere toepassingsmogelijkheden van gedeeltelijke TE-installaties zijn niet nader onderzocht.
Vervolgens zijn de totale kosten bepaald als functie van het geïnstalleerde vermogen. De kosten zijn inclusief alle benodigde randapparatuur, zoals warmteterugwinning en noodkoeling, meet- en regelapparatuur, omschakeling aardgas-gistingsgas, funderingen en bouwkundige voorzieningen en alle overige kosten zoals installatiekosten, transportkosten, opstarten, advieskosten, B.T.W. en renteverlies tijdens de bouw. Bij de toepassing van eigen energieopwekking kan het zinvol zijn om de buffercapaciteit voor het gistingsgas te vergroten. Hierdoor ontstaan extra kosten vanwege de keuze van een grotere gashouder.

De installatie voor het zuiveren van het gistingsgas moet mogelijk ook worden aangepast. Aangezien niet bekend is welke onderlinge fluctuaties optreden tussen het verbruik en de produktie van gistingsgas is de benodigde optimale buffercapaciteit moeilijk te bepalen. De kosten van deze voorzieningen zijn dan ook niet opgenomen bij de berekeningen.

Met behulp van de berekende kosten voor een aantal installaties kan een relatie tussen de gemiddelde kosten (per kW geïnstalleerd vermogen) en het geïnstalleerd vermogen worden opgesteld voor zowel TE- als PE-installaties. Uit deze relatie kan voor ieder benodigd vermogen een indicatieve prijs voor de totale investering worden bepaald.
In figuur 11 en 12 zijn de kosten weergegeven.

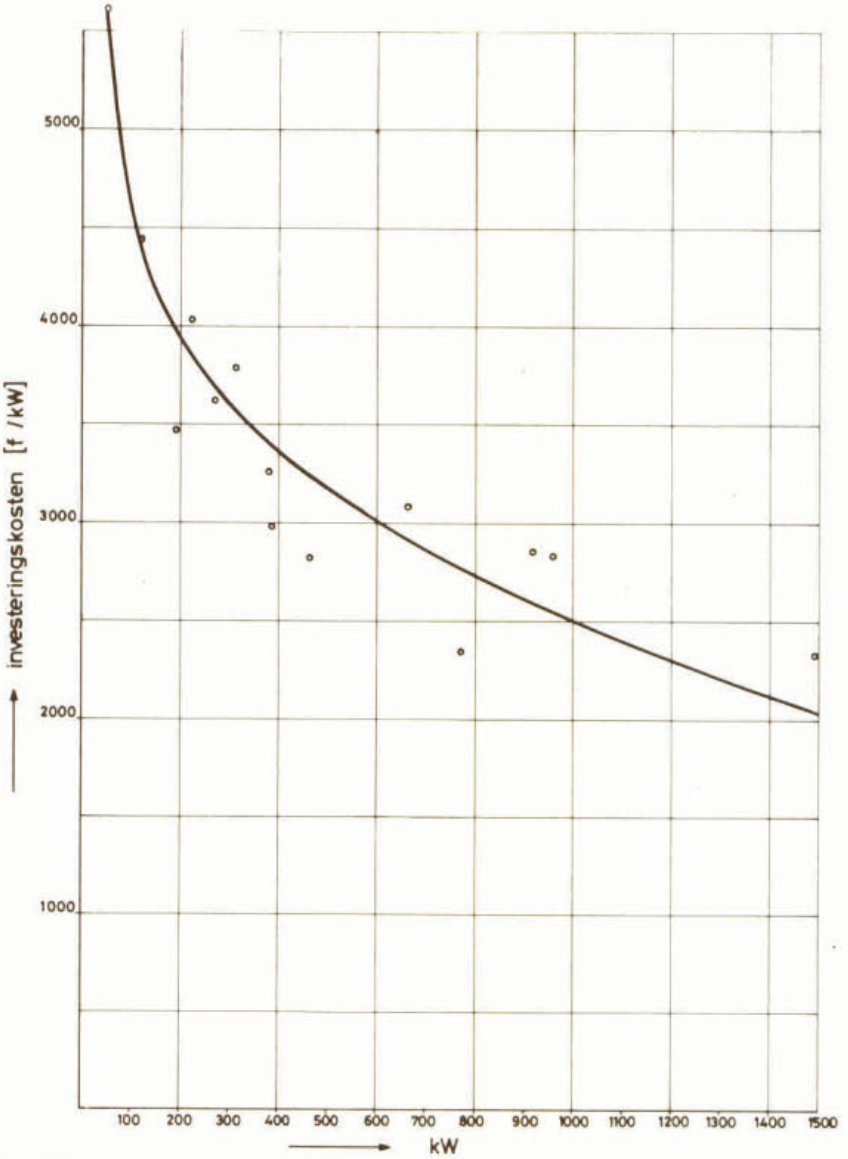

Fig. 11. Gemiddelde totale investeringekosten van TE-installaties als functie van het geïnstalleerde vermogen (prijspeil 1979)

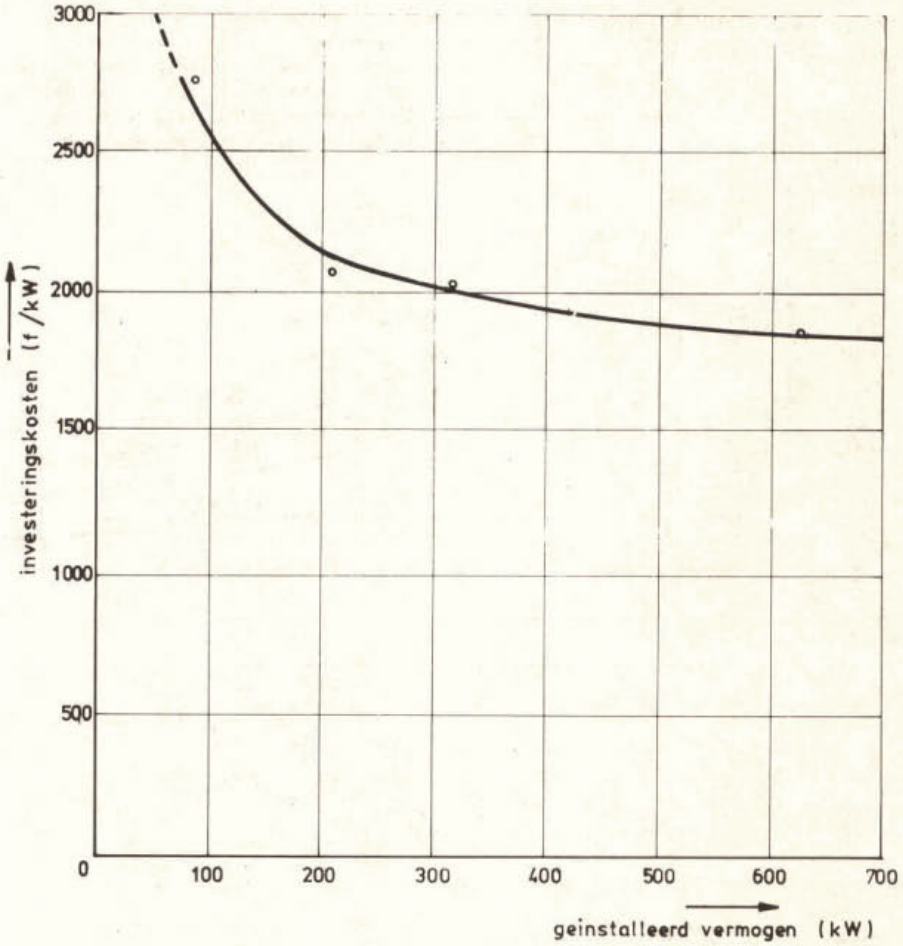

Fig. 12. Totale investeringskosten van PE-installaties als functie van het geïnstalleerde vermogen (prijspeil 1979).

Met behulp van het benodigde geïnstalleerde vermogen voor de verschillende zuiveringssystemen zoals weergegeven in tabel 12 en 13,en de kosten per kW geïnstalleerd vermogen zijn nu voor iedere type zuiveringssysteem de investeringskosten te bepalen als functie van de capaciteit van de zuiveringsinrichting. Deze kosten zijn weergegeven in de figuren 13 en 14.

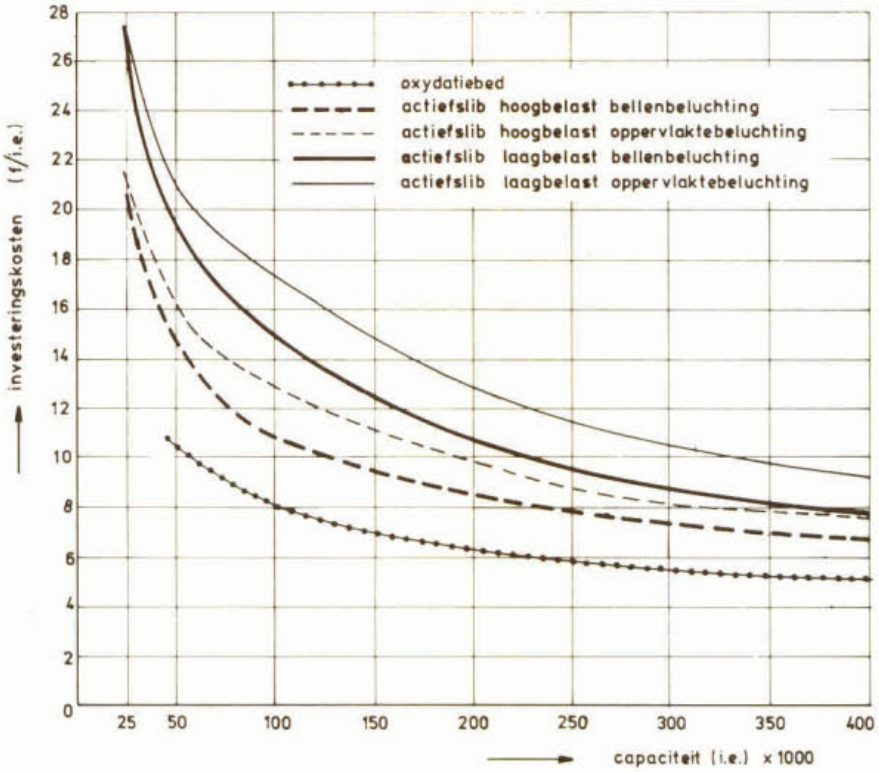

Fig. 13. Investeringskosten volledige TE-installaties als functie van de capaciteit van de rwzi.

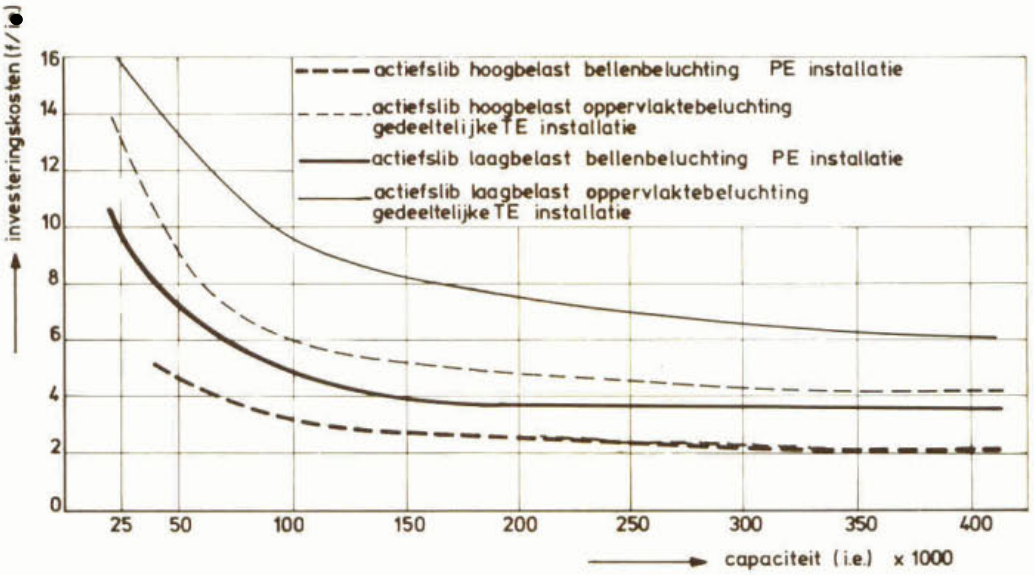

Fig. 14. Investeringskosten PE- en gedeeltelijke TE-installaties als functie van de capaciteit van de rwzi.

9 NETTO BESPARINGEN VAN EIGEN ENERGIEOPWEKKING

Uit de vergelijking van de investeringskosten van eigen energieopwekkingsinstallaties (hoofdstuk 8) en de maximale extra investeringen die mogen worden verricht, waarbij de totale kosten niet groter zijn dan de totale baten tijdens de looptijd van het project (hoofdstuk 7, kostenmodel), kan nu een indruk worden verkregen van de netto besparingen die optreden ten opzichte van een conventioneel systeem. In figuur 15 en 16 zijn de vergelijkingen weergegeven voor de diverse zuiveringssystemen bij toepassing van volledige TE-systemen, PE-systemen (bij bellenbeluchting) en gedeeltelijke TE-systemen (bij oppervlaktebeluchting).

De spreiding, die in de maximaal toegestane investering kan optreden zoals deze met de gevoeligdheidsanalyse voor het kostenmodel is bepaald, is eveneens in de figuren 15 en 16 weergegeven.

Een belangrijk punt is het snijpunt van de beide grafieken; dit geeft de capaciteit aan waarboven toepassing van eigen energieopwekking rendabel wordt. Voor de diverse systemen heeft deze capaciteit een andere waarde (zie tabel 14).

	gemiddeld	bovengrens	ondergrens
TE-systeem			
oxydatiebed	100.000 i.e.	440.000 i.e.	40.000 i.e.
actiefslib hoogbelast			
. bellenbeluchting	60.000 i.e.	230.000 i.e.	30.000 i.e.
. oppervlaktebeluchting	60.000 i.e.	210.000 i.e.	30.000 i.e.
actiefslib laagebelast			
. bellenbeluchting	100.000 i.e.	170.000 i.e.	40.000 i.e.
. oppervlaktebeluchting	120.000 i.e.	180.000 i.e.	40.000 i.e.
gedeeltelijk TE-systeem			
actiefslib hoogbelast oppervlaktebeluchting	50.000 i.e.	100.000 i.e.	30.000 i.e.
actiefslib laagebelast	30.000 i.e.	75.000 i.e.	-
PE-systeem			
actiefslib hoogbelast bellenbeluchting	30.000 i.e.	60.000 i.e.	-
actiefslib laagbelast bellenbeluchting	-	30.000 i.e.	-

Tabel 14. Minimale capaciteit van een rwzi met een rendabele toepassing energieopwekking.

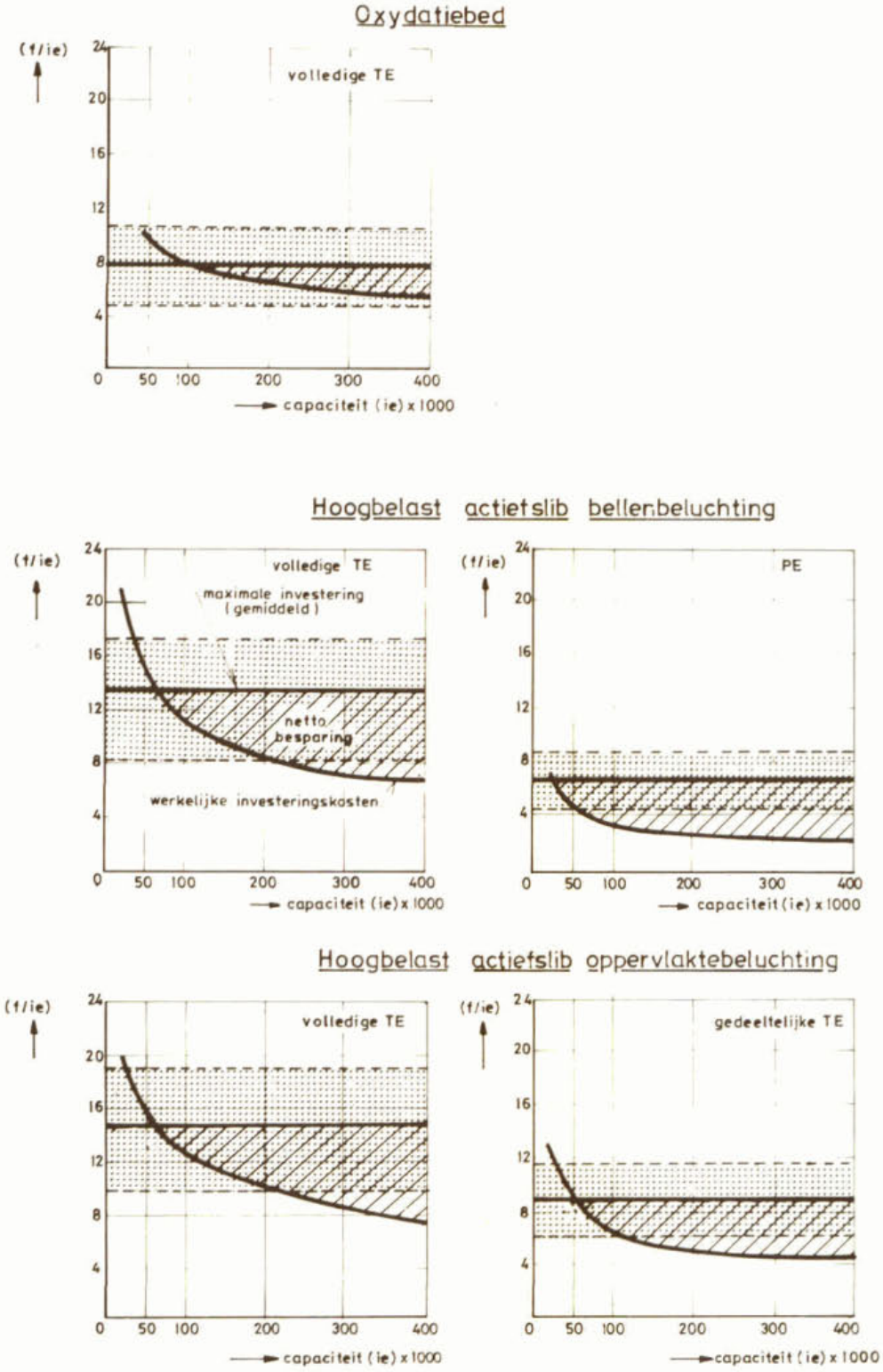

Fig. 15. Maximaal toegestane en werkelijke investeringskosten eigen energieopwekkingsinstallaties; oxydatiebedden en hoogbelast actief-slibinstallaties.

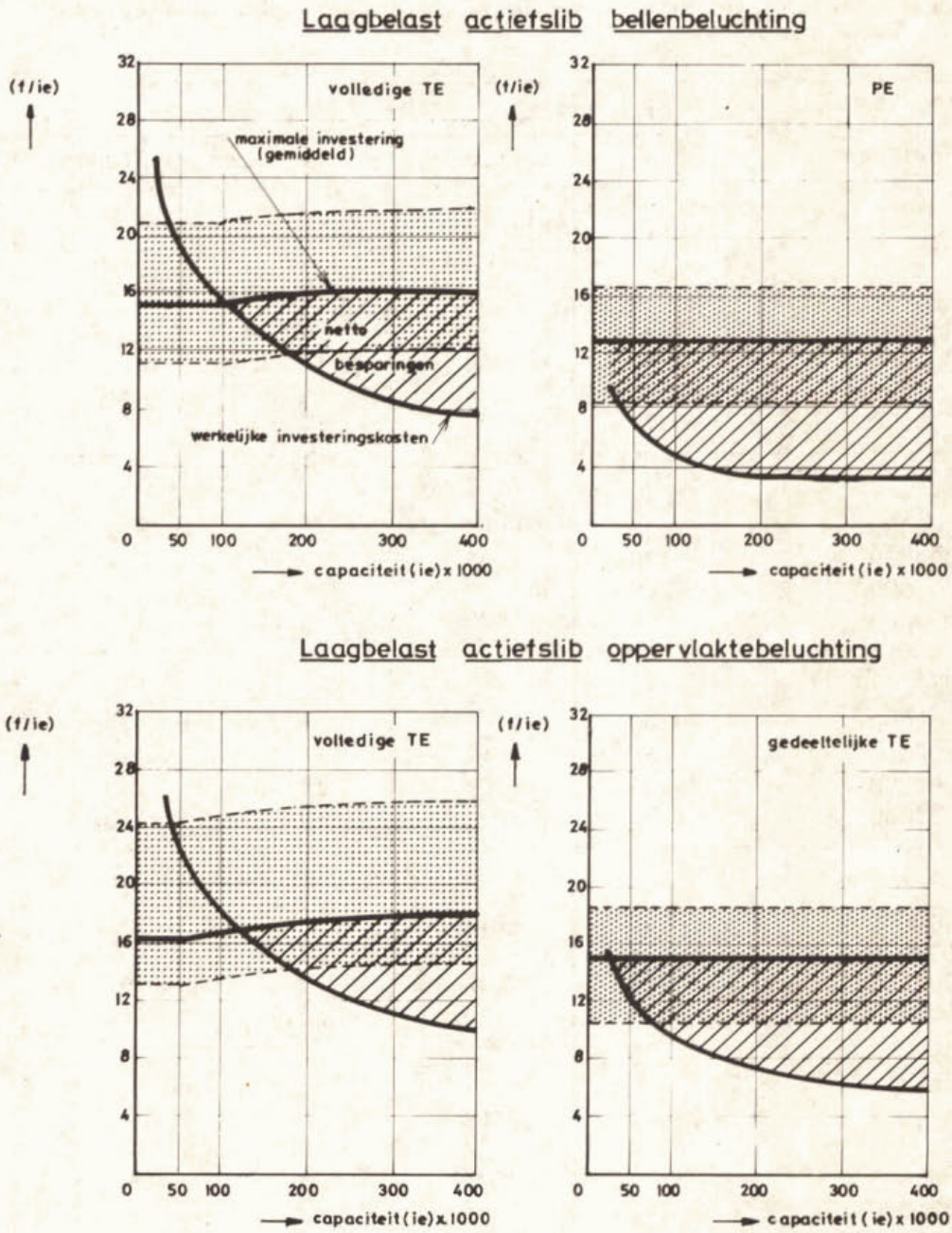

Fig. 16. Maximaal toegestane en werkelijke investeringskosten eigen energieopwekkingsinstallaties; laagbelast actief-slibinstallaties.

De grootte van de gemiddelde besparingen is afhankelijk van de capaciteit van de rwzi, zoals in het gearceerde deel van figuren 15 en 16 is weergegeven. Naast de netto baten van de eigen energieopwekking in absolute zin is ook de relatie tot de investeringskosten van belang. Het quotiënt van de gecumuleerde netto baten over de looptijd van het project en de investeringskosten wordt de kapitaalsproduktiviteit genoemd.
Tabel 15 geeft de gecumuleerde netto baten en de kapitaalsproduktiviteit weer.

capaciteit rwzi (i.e.)	volledige TE-systeem		ged. TE- en PE-systeem	
	netto baten (f/i.e.)	kapitaals-produktivi-teit (%)	netto baten (f/i.e.)	kapitaals-produktivi-teit (%)
actiefslib hoogbelast bellenbeluchting				
50.000	- f1,20	- 8%	f2,10	46%
100.000	f2,60	24%	f3,50	109%
200.000	f4,90	58%	f4,10	158%
400.000	f6,70	100%	f4,50	205%
actiefslib hoogbelast oppervlaktebeluchting				
50.000	- f1,50	- 9%	- f0,20	- 2%
100.000	f,170	13%	f3,00	50%
200.000	f4,60	49%	f4,20	88%
400.000	f7,00	92%	f4,80	114%
actiefslib laagbelast bellenbeluchting				
50.000	- f3,90	-20%	f5,70	79%
100.000	f0,60	4%	f7,90	158%
200.000	f5,30	50%	f9,20	249%
400.000	f8,50	109%	f9,30	258%
actiefslib laagbelast oppervlaktebeluchting				
50.000	- f4,40	-21%	f1,70	13%
100.000	- f0,10	- 1%	f5,40	56%
200.000	f5,10	40%	f7,40	97%
400.000	f8,90	97%	f8,90	146%
oxydatiebed				
50.000	- f2,60	-25%		
100.000	f0,20	2%		
200.000	f1,70	27%		
400.000	f2,90	57%		

Tabel 15. Gecumuleerde netto baten en kapitaalsproduktiviteit van eigen energieopwekking.

Uit bovenstaande berekeningen kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- Volledige TE-installaties worden - gemiddeld genomen - rendabel voor rwzi's met hoogbelaste actief-slibinstallaties van circa 60.000 i.e. en rwzi's met laagbelaste actief-slibinstallaties van 100.000 à 120.000 i.e.
  Een gedeeltelijk TE-systeem wordt reeds rendabel vanaf circa 30.000 à 50.000 i.e.

- Bij hoogbelaste installaties kleiner dan circa 200.000 i.e. zijn de netto baten van gedeeltelijke eigen energieopwekking groter dan van volledige energieopwekking. Bij laagbelaste zuiveringssystemen heeft volledige eigen energieopwekking pas hogere baten dan gedeeltelijke opwekking voor installaties groter dan 400.000 i.e.

- De kapitaalsproduktiviteit voor actief-slibinstallaties stijgt bij toenemende capaciteit. De kapitaalsproduktiviteit is nauwelijks afhankelijk van het beluchtingsproces, maar wel sterk afhankelijk van het eigen energieopwekkingssysteem. PE-systemen hebben een aanzienlijk hogere kapitaalsproduktiviteit dan gedeeltelijke TE-systemen, terwijl de volledige TE-systemen de laagste kapitaalsproduktiviteit hebben. De risico's bij investeringen in PE-installaties zijn dan kleiner dan bij de overige systemen.

- Eigen energieopwekking voor oxydatiebedden is pas voor zuiveringsinrichtingen vanaf 100.000 i.e. rendabel. Dit komt deels voort uit het relatief lage energieverbruik. De netto baten en kapitaalsproduktiviteit zijn ook voor grote zuiveringsinrichtingen nog vrij gering.

- Door de spreiding die mogelijk is in de maximaal toegestane investeringen ten gevolge van technologische en economische invloeden zijn nog grote variaties in de baten mogelijk.

10 OPTIMALISATIEMOGELIJKHEDEN

De optimalisatiemogelijkheden, die in de praktijk aanwezig zijn om de aantrekkelijkheid van eigen energieopwekking te verhogen, kunnen als volgt worden weergegeven.

- Het warmte- en krachtrendement van de eigen energieopwekking is vooral afhankelijk van de keuze van de apparatuur. Hierbij zal het optimale rendement ook moeten worden bezien in relatie tot de kosten van de apparatuur. Getracht moet worden om bij een zo hoog mogelijke belstingsgraad te werken, zodat het gunstigste rendement wordt behaald. Het installeren van meerderdere eenheden is dan wenselijk
- De krachtbehoefte van de rwzi is vooral afhankelijk van de systeemkeuze, die in hoofdzaak door externe factoren wordt bepaald.
  Een beperking van het krachtverbruik zal natuurlijk bij het ontwerp altijd een belangrijke rol moeten spelen. In het algemeen kan worden gesteld dat installaties met een groter krachtverbruik meer in aanmerking komen voor eigen energieopwekking.
- De warmtebehoefte kan worden beperkt door ondermeer een betere isolatie van de gistingstanks, verdergaande indikking en wellicht zelfs door warmteterugwinning uit de slibafvoer van de gistingstanks.
  In veel gevallen is er echter een overschot aan warmte uit de gasmotoren of kan er nog een aanzienlijke hoeveelheid warmte uit de rookgassen worden gewonnen.
  Dit laatste kan vooral in het geval van gedeeltelijke eigen energieopwekking interessant zijn.
- Het afbraakpercentage van de organische stof tijdens het gistingsproces blijkt in Nederland aanzienlijk achter te blijven bij de in de literatuur gevonden waarden voor buitenlandse installaties.
  Door de grote gevoeligheid van de gistingsgasproduktie op de netto baten is het daarom van groot belang dat aandacht wordt geschonken aan de mogelijkheden tot verhoging van de gasproduktie.
- De spuigasverliezen treden vooral op in situaties waarbij de gemiddelde gasproduktie ongeveer gelijk is aan de primaire energiebehoefte. Onderlinge fluctuaties in de behoefte en produktie leiden dan snel tot verlies aan gistingsgas. Dag-nacht, weekend en zomer-winter invloeden, recreatiepieken, fluctuerende industriële lozingen etc. spelen hierbij een belangrijke rol. Deze fluctuaties zijn veelal onvermijdelijk. Door een voldoende buffercapaciteit voor gistingsgas te installeren kunnen spuigasverliezen enigszins worden beperkt.
  Een duidelijker inzicht in deze factoren zal een praktijkonderzoek aan een aantal verschillende zuiveringsinrichtingen eerst kunnen geven
- Economische parameters, zoals aardgas- en elektriciteitsprijzen en de extra inflatie, die hierin optreedt ten opzichte van de algemene inflatie, zijn van groot belang bij de bepaling van de netto baten van de eigen energieopwekking. Deze factoren zijn echter vrij onzeker en afhankelijk van politieke, maatschappelijke en economische ontwikkelingen, zodat met een grote spreiding rekening moet worden gehouden. Een extra stijging van de energieprijzen ten opzichte van de overige prijzen lijkt echter onvermijdelijk, wat in vele gevallen de aantrekkelijkheid van eigen energieopwekking vergroot.
- De investeringskosten van TE-installaties zouden aanzienlijk gedrukt kunnen worden door de stilstaande reserve te verminderen. De mogelijkheden om over te schakelen op het openbare net in geval van storingen of onderhoud zal nader onderzocht moeten worden.

11 LITERATUUR

1. Bälz, W. - Umfang und Verlauf der alkalischen Schlammfaulung verschiedenartig zusammengezetzter organischer Substanzen. In: Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, München, Oldenbourg Verlag, 1966.
2. Brooks, R.W. - Conversion of sludge into utilisated gas. In: Practical waste treatment and disposal, Dickinson, D., London, Applied Science Publishers Ltd, 1974 : 55 - 74.
3. Eckenfelder, W.W. - Mechanism of sludge digestion, Water and Sewage Works, (1967) 6 : 207 - 210.
4. Engers, L.E. van - NVA enquête betreffende produktie, bestemming en kwaliteit van zuiveringsslib in Nederland in 1970, H_2O, (13) 1980: 293 - 294.
5. Fair, G.M. & Moore, E.W. - Observation on the digestion of a sewage sludge over a wide range of temperatures, Sewage Works Journal, 9 (1937) 3.
6. Fair, G.M. & Geyer, J.C. & Okun, D.A. - Elements of water supply and wastewater disposal, New York, John Wiley and Sons, 1971.
7. Ferrante, E. de - Energieprijsontwikkeling, een toekomstverkenning. Lezing op de voorlichtingsdag van de afdeling Energiezaken van Krachtwerktuigen te Amersfoort d.d. 7 december 1978.
8. Fohr, P.F. - Zuivering van Water II. Diktaat Afdeling Waterzuivering. Wageningen, Landbouwhogeschool, 1972.
9. Haug, H.T. - Sludge processing to optimize digestibility and energyproduction, J.W.P.C.F., (1977) 7 : 1713 - 1721.
10. Hobson, P.N. & Bousfield, S. & Summers, R. - Anaerobic digestion of organic matter, CRC Critical Reviews in Environmental Control, 1974.
11. Köhler, R. - Schadewirkungen auf den Schlammfaulungsprozess durch stagnierend und toxisch wirkende Stoffe, Wasser, Luft und Betrieb, 10 (1966) 6.
12. Kok, H.E. & De Mol van Otterloo, J.W.H. - De toepassing van gasmotoren op rioolwaterzuiveringsinrichtingen, H_2O, 11 (1978) 18 : 402 - 406.
13. Lettinga, G. - Anaërobe gisting en afvalwaterbehandeling, Wageningen, Landbouwhogeschool, Vakgroep Waterzuivering, 1977.
14. Pallasch, O.& Triebel, W. - Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band III, Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn, 1975.
15. Peters, H. - Anaërobe slibgisting, H_2O, 1 (1968) 5 : 190 - 112.
16. Pfeffer, J.T. - Reclamation of an organic refuge, Washington, Progress Dept. Solid Waste Program, EPA, 1971.
17. Pöpel, F. - Gaserzeugung und Stoffverluste bei der Schlammfaulung, Gesundheidsingenieur, (1947) 3 : 85.
18. Roediger, H. - Die anaerobe alkalische Schlammfaulung, GWF, Wasser-Abwasser, Heft 1, 3e dr. München, R. Oldenbourg Verlag, 1967.
19. Triebel, W. - Leitfaden für den Betrieb von Kläranlagen, Bonn, Abwassertechnische Vereinigung, 1971.
20. Witteveen+Bos - Zuurstofbehoefte en energieverbruik in beluchtingstanks, Technologisch rapport No. 2, Deventer, raadgevend ingenieursbureau Witteveen+Bos, 1978.
21. Witteveen + Bos - Kosten-baten analyse, Technologisch rapport No. 4, Deventer, Raadgevend Ingenieursbureau Witteveen + Bos, 1979.

Bijlagen

1 INVENTARISATIE GISTINGSGASPRODUKTIE EN ENERGIEPRODUKTIE

1.1 Inleiding

Tijdens de gisting van zuiveringsslib wordt een gedeelte van de organische stof, aanwezig in het slib, anaëroob afgebroken. Dit biologische afbraakproces verloopt in een aantal fasen waarbij de afscheidingsprodukten van de ene fase weer als substraat dienen voor de volgende fase. Bij de laatste stap van de afbraak ontstaan dan eenvoudige gasvormige verbindingen. Dit gistingsgas bestaat in hoofdzaak uit methaan (CH_4) en kooldioxyde (CO_2); ook komen geringe hoeveelheden waterstof (H_2), waterstofsulfide (H_2S) en stikstof (N_2) voor.

De gasproduktie per kg toegevoerd slib wordt bepaald door de mate waarmee deze laatste fasé zich voltrekt en is ondermeer afhankelijk van:

- gistingstijd
- gistingstemperatuur
- pH, alkaliniteit
- fractie organische stof in het slib
- afbreekbaarheid van de organische stof
- aanwezigheid van voedingsstoffen
- aanwezigheid van toxische stoffen

In figuur 17 wordt het verband weergegeven tussen de gasontwikkeling en de gistingstijd en -temperatuur zoals dit gevonden is met behulp van laboratoriumproeven[5].

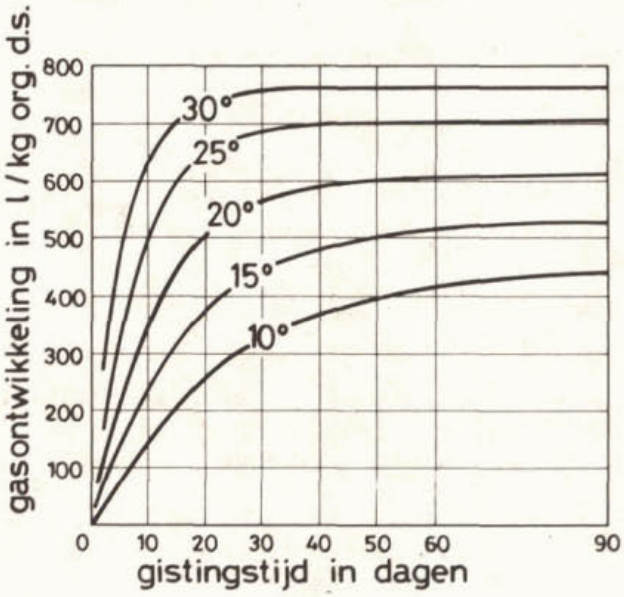

Fig. 17. Gasontwikkeling per kg organische drogestof[5].

Bovenstaand verband geldt echter voor een bepaalde slibsoort. Factoren zoals afbreekbaarheid van het materiaal en aanwezigheid van toxische stoffen zijn hierbij niet verwerkt. Bovendien zijn de prak-

tijkomstandigheden vaak minder ideaal dan de omstandigheden tijdens de laboratoriumproeven (homogene temperatuur - volledige menging). In de praktijk worden daarom ook minder goede resultaten verkregen.

Om diverse invloeden op het verloop van het gistingsproces uit te schakelen kan de gasproduktie worden uitgedrukt in liters per kg afgebroken organische stof. Wil men de gasproduktie echter gaan vergelijken met de energiebehoeften dan zullen alle waarden moeten worden uitgedrukt per inwoner equivalent (i.e).

Bij deze studie zullen de berekeningen worden verricht voor slechts één gistingsproces, namelijk de ééntrapsgisting die wordt uitgevoerd in een goed gemengde tank bij een temperatuur van 306 K (33°C) en een gistingstijd van ca. 20 dagen. Deze condities worden op dit moment gezien als de meest gebruikelijke procesomstandigheden.

1.2 Gasproduktie per kg afgebroken organische droge stof

Bij een stabiel verlopend gistingsproces is de gasproduktie per kg afgebroken organische stof slechts afhankelijk van de samenstelling van het organisch materiaal. Van de drie belangrijkste groepen van organische verbindingen in slib, die goed afbreekbaar zijn, namelijk koolhydraten, eiwitten en vetten, geven de koolhydraten en eiwitten een aanzienlijk lagere gasproduktie dan de vetten. De CH_4/CO_2-verhouding is voor de koolhydraten ongunstiger dan voor eiwitten en vetten (zie tabel 16).

	gasproduktie (l/kg o.d.s. afgebroken	% CH_4	% CO_2
zetmeel, koolhydraten	790	50	50
eiwitten	700	71	29
vetten	1250	68	32

Tabel 16. Produktie en samenstelling van het gistingsgas bij anaërobe afbraak[1].

Dit kan worden verklaard uit de verschillende koolstofgehalten per kg organische stof[1]. Roediger[18] vermeldt bovendien dat het afbraakpercentage niet gelijk is voor de verschillende stoffen. In tabel 17 wordt dit weergegeven.

	koolstofgehalte organische stof	afbraakpercentage
koolhydraten	40 - 44%	70 - 80%
eiwitten	ca. 53%	ca. 50%
vetten	69 - 78%	60 - 70%

Tabel 17. Koolstofgehalte en afbraakpercentage van organische verbingen.

Vetrijk slib zal dus meer energie produceren dan vetarm slib.

De samenstelling van industrieel afvalwater en de eet- en leefgewoonten van de bevolking spelen een belangrijke rol bij de gasproduktie. Het vetrijke slib in de Verenigde Staten levert een hogere gasproduktie op dan het vetarmere slib in Duitsland.

Uit de vele bedrijfsresultaten die door Roediger[18] worden genoemd, kunnen voor de gasproduktie in het ééntraps gemengde en verwarmde gistingsproces de volgende waarden worden aangenomen:

- gasproduktie vetarm slib 800 - 1000 l/kg o.d.s. afgebroken
- gasproduktie vetrijk slib 1000 - 1200 l/kg o.d.s. afgebroken

Ook andere onderzoekers vermelden waarden die hiermee overeenstemmen.

- Amerikaanse literatuur:
  - Eckenfelder[3] 1060 - 1250 l/kg o.d.s. afgebroken
  - Brooks[2] 940 l/kg o.d.s. afgebroken
  - Fair, Geyer and Okun[6] 1170 l/kg o.d.s. afgebroken
  - Hobson e.a.[10] 750 - 1000 l/kg o.d.s. afgebroken
  - Haug[9] 1060 l/kg o.d.s. afgebroken
- Duitse literatuur:
  - Triebel[19] 750 l/kg o.d.s. afgebroken
  - Pöpel[17] 900 - 1000 l/kg o.d.s. afgebroken

Vergelijkbare waarden (900 - 1100 l/kg o.d.s. afgebroken) worden gevonden bij de gisting van groenresten, huisvuil, stalmest, e.d.[18],[16].

Voor Nederlandse omstandigheden kunnen hieruit de volgende waarden voor de gasproduktie worden aangenomen:

gemiddelde gasproduktie : $\bar{x}_1$ = 1000 l/kg o.d.s. afgebroken

verdeling : normaal

grenswaarden gasproduktie: $800 < x_1 < 1200$ (95% van de gevallen)

standaardafwijking : $\sigma_1 = \frac{\bar{x}_1 - x_1\ (95\%)}{1,96} = 102$ l/kg o.d.s. afgebroken

variantiecoëfficiënt : $V_1 = \frac{\sigma_1}{\bar{x}_1} = 0,102$

1.3 Afbraak organische stof

De afbreekbaarheid van de diverse organische verbindingen is zeer verschillend. Vetten worden vollediger en sneller afgebroken dan eiwitten en koolhydraten. Andere organische verbindingen breken slechts in zeer geringe mate af, bv. lignine[18].

De samenstelling van het organisch materiaal bepaalt dus de hoeveelheid stof die wordt afgebroken. Een grote verscheidenheid aan orga-

nische stoffen is in het algemeen gunstig voor de afbreekbaarheid. Een komponent in een vrij eenzijdig samengesteld industrieel slib zal minder ver afbreken dan dezelfde komponent in een zeer gevarieerd slib[14].
Vanwege de uiteenlopende samenstelling van het slib kan ruwweg worden geschat dat er een variantie van circa 10% in de gasproduktie mogelijk is.

1.3.1 *gistingstemperatuur*

Door o.a. Fair en Moore[5] is bepaald dat de gistingssnelheid sterk afhankelijk is van de gistingstemperatuur.
Voor de mesofiele bacteriën ligt de optimale gistingstemperatuur tussen 306 en 313 K (33 - 40°C) (zie figuur 18).

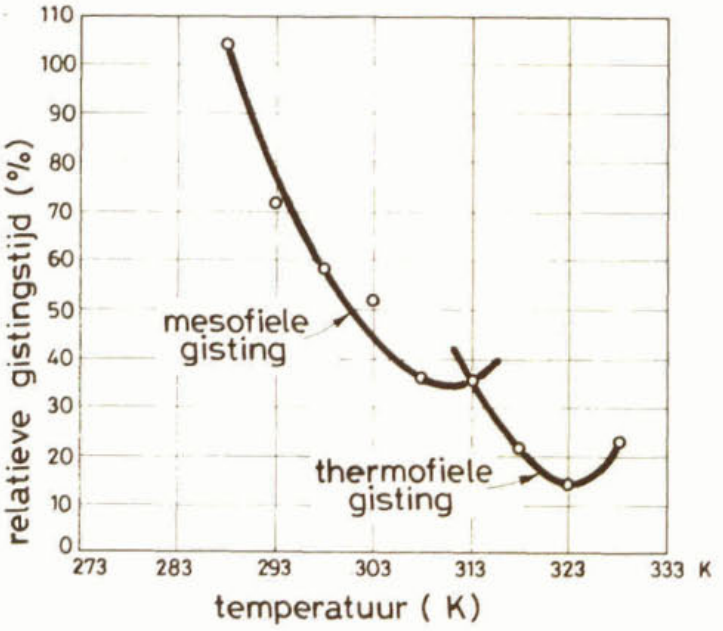

Fig. 18. Gistingsgas als functie van de temperatuur

In Nederland wordt ernaar gestreefd de gisting te doen plaatsvinden bij 306 K (33°C). Bij een zodanige constructie van de gistingstank dat een homogene en constante temperatuur in de gistingstank kan worden gehandhaafd (goede warmte-overdracht in de slibverwarmingsapparatuur) en bij een goede bedrijfsvoering van het proces (continue controle en regeling van de temperatuur, regelmatige slibtoevoer om temperatuurschommelingen te voorkomen), zal in de gistingstank altijd een redelijk optimale temperatuur heersen (temperatuurschommelingen < 2 K).
Behalve bij onvoorziene omstandigheden zal de gasproduktie dus niet worden beïnvloed door eventuele temperatuurverschillen.

1.3.2 *gistingstijd*

Zoals uit figuur 17 blijkt is de benodigde gistingstijd afhankelijk van de temperatuur. Wordt een temperatuur van 306 K (33°C) aangehouden dan zal bij een gistingstijd van 20 dagen een stabiel produkt worden verkregen en zal de maximale afbraak van de organische stof nagenoeg zijn bereikt.
In de praktijk kan echter onder- of overbelasting voorkomen. Onderbelasting levert slechts een geringe verhoging van de afbraak op volgens figuur 19. Bij overbelasting, vaak veroorzaakt door een slechte indikgraad van het vers slib, komen in de praktijk wel verblijftijden van 12 - 14 dagen voor. De afbraak zal hierdoor ongeveer 8% minder kunnen zijn dan de gemiddelde waarde.
(De relatie gasproduktie - gistingstijd behoeft echter nog toetsing aan de praktijk).

De invloed van de gistingstijd op de afbraak zal groter zijn naarmate het vetgehalte van het slib hoger is, omdat de vetafbraak gevoeliger is voor kortere verblijftijden dan het overige organische materiaal (zie figuur 19)[15].

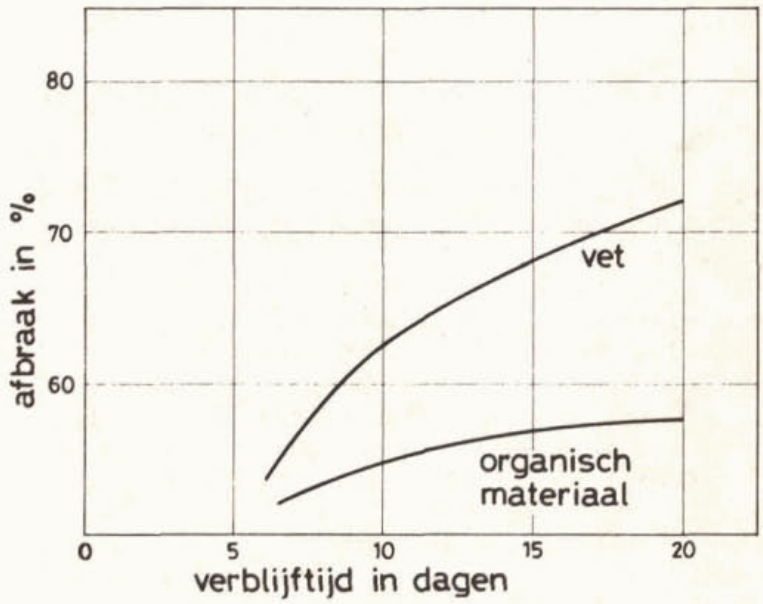

Fig. 19. Afbraakpercentages van de organische stof bij verschillende verblijftijden[15].

1.3.3 *pH, alkaliniteit, vluchtige vetzuren.*

Aan de hand van factoren als pH, alkaliniteit, gehalte aan vluchtige vetzuren en CO_2-gehalte van het gistingsgas kan het verloop van het gistingsproces worden bepaald. Bij een goed verlopende gisting zal er een evenwicht bestaan tussen de zuurvormende en de methaanvormende fasen.
Een verstoring van dit evenwicht kan de zuurvormende fase doen versnellen. De pH en de alkaliniteit zullen dan afnemen terwijl het gehalte aan vluchtige vetzuren en het CO_2-gehalte in het gistingsgas zullen toenemen.
Deze veranderingen zullen weer een remmende werking hebben op de methaanvormende fase. Het proces wordt dan nog verder verstoord. Wanneer geen maatregelen worden genomen, zoals toevoeging van kalk en een lagere belasting van de gistingstank , kan de methaanvorming geheel stilvallen.
Een voortdurende controle van het proces met behulp van bovengenoemde bepalingen zal dan ook noodzakelijk zijn, zodat direct kan worden ingegrepen bij eventuele veranderingen.

Bij een goed werkend gistingsproces zullen de pH, de alkaliniteit en het gehalte aan vluchtige vetzuren in het slib en het CO_2-gehalte in het gistingsgas optimaal kunnen worden gehouden. De gasproduktie zal dan ook niet afhankelijk zijn van deze factoren.

1.3.4 *aanwezigheid toxische stoffen*

Toxische stoffen remmen de activiteit van de bacteriën. Het afbraakpercentage en de gasproduktie zullen dan afnemen.

In tabel 18 zijn de belangrijkste toxische stoffen voor het gistingsproces vermeld met de concentratie waarbij stagnatie van de gasontwikkeling wordt geconstateerd[11].
Zijn de verschillende stoffen tegelijkertijd aanwezig dan kan het toxisch effect worden versterkt zodat reeds bij veel lagere concentraties een afname van de gasproduktie wordt verkregen[14].

Voor een aantal stoffen geldt dat er een redelijke acclimatisatie optreedt zodat bij langzame toename van de concentratie hogere concentraties worden getolereerd dan in tabel 18 zijn vermeld.

De aanwezigheid van sulfide kan de toxische werking van zware metalen aanzienlijk verminderen door de vorming van onoplosbare sulfiden[13].

In slib kunnen hoge concentraties aan zware metalen voorkomen door uitvlokking van de opgeloste metaalionen in de voorbezinktanks. Hierdoor kunnen de gehalten aan zware metalen in het slib het 200-voudige zijn van de concentratie in de afvalwaterstroom[11].

Om de invloed van de toxische stoffen op het gistingsproces te voorkomen zullen strenge eisen moeten worden gesteld aan industriële lozingen van deze stoffen.

toxische stof	concentratie in g/kg ds.		
	inactief of stimulerend	stagnatie gasontwikkeling	toxiciteit gisting stopt
NH_4-N	1 - 5	40 - 75	> 75
Na	2,5 - 5	90 - 140	> 200
K	5 - 10	60 - 110	> 300
Mg	2 - 4	25 - 40	> 75
Ca	2,5 - 5	60 - 110	> 200
Cu	< 2,5	4 - 6	> 7,5
Zn	< 1,5	~ 4	> 6
Ni	< 1,5	2,5 - 7,5	> 12,5
Cr (VI)	-	~ 2,5	> 5
Cr (III)	1,5	2,5 - 7,5	> 12,5
Fe (III)	2,5	4 - 7,5	> 12,5
Fe (II)	2,5	7,5 - 12,5	> 25
CN	0,03	0,05 - 0,1	> 0,15
Sulfide oplosbaar	-	~ 1	> 1,5
Sulfide alkalisch	1,5	~ 2,5	> 5
detergentia	2,5	4 - 7,5	> 12,5
Phenol	1,5	2,5	> 4
CH_3Cl	-	0,03 - 0,05	>

Tabel 18. Remmende en toxische werking van anorganische en organische stoffen op de slibgisting[11, 13].

Voor deze studie wordt aangenomen dat in de toekomst zodanige lozingseisen zullen gelden dat bij normaal bedrijf geen afname van de gasproduktie zal optreden ten gevolge van de aanwezigheid van toxische stoffen. Indien giflozingen in bepaalde gevallen toch niet kunnen worden voorkomen, zal hiermee bij het ontwerp van de zuiveringsinrichting rekening moeten worden gehouden, vooral bij toepassing van eigen energie-opwekking.

In alle gevallen zal wel rekening moeten worden gehouden met het mogelijk voorkomen van stootbelastingen van toxische stoffen bij calamiteiten, zodat het gistingsproces voor korte of langere tijd volledig stil ligt en er geen gasproduktie is.

1.3.5 *menging in de gistingstank*

Door een intensieve menging van de inhoud van de gistingstank kunnen gelijke omstandigheden in de gehele tank worden gehandhaafd. Controle en sturing van het proces is dan eenvoudiger dan van een niet gemengd

systeem.
Andere voordelen van een goede menging zijn:

- het goede contact tussen het afbreekbaar materiaal en de organismen, waardoor een hogere afbraaksnelheid wordt verkregen;

- de snelle afvoer van de gasvormige eindprodukten. Opdrijven en uitspoelen van het slib en schuimvorming worden tegengegaan. Door de snelle afvoer van CO_2 is de kans op verzuring geringer;

- door directe menging van het (koude) toegevoerde slib met de tankinhoud kunnen temperatuurschokken in de gistingstank worden voorkomen.

Een optimale gasproduktie wordt slechts verkregen bij goede menging van de inhoud van de gistingstank. Aangenomen kan worden dat voor alle toekomstige gistingsprocessen voldoende slibmenging wordt toegepast, zodat er geen afwijkende gasproduktie bij verschillende processen zal optreden.

1.3.6 *aanwezigheid voedingsstoffen*

Voor de opbouw van nieuw celmateriaal zijn voedingsstoffen nodig zoals stikstof, fosfor, kalium en spore-elementen.
De produktie van nieuw celmateriaal is bij de anaërobe afbraak echter zeer gering. De opbrengstfactor is: Y = 0,04 - 0,06 kg celmateriaal/kg afgebroken materiaal tegen Y = 0,6 - 1,0 kg droge stof/kg verwijderd BZV voor de aërobe afbraak[13].
De hoeveelheid voedingsstoffen die nodig zijn voor de anaërobe afbraak zijn daarom ook vrij gering en vrijwel altijd in voldoende mate aanwezig in het versslib.

1.3.7 *afbraakpercentage*

Goed uitgegist slib heeft in het algemeen een organisch-stofgehalte van 40 - 45%. De fractie organische stof in het uitgegiste slib is nauwelijks afhankelijk van de fractie organische stof in het versslib[19]. Alleen de gistingstijd en de afbreekbaarheid van het materiaal is van invloed op het eindprodukt.

Volgens Roediger[18] is het doel van de gisting niet meer zoals in de begintijd van de gistingstechniek, om een zover mogelijke afbraak van het organisch materiaal te verkrijgen, maar om een zodanige afbraak te krijgen dat het eindprodukt gemakkelijk ontwaterbaar is en geen stank meer veroorzaakt. Bij het eindpunt van het proces zijn de kolloïdale eigenschappen van het slib zodanig vernietigd dat een groot deel van het gebonden water gemakkelijk wordt afgegeven. Bovendien is het gemakkelijk afbreekbare deel van de organische stof zover omgezet dat het slib nadien niet meer overgaat in een stinkende zure gisting (rotting).

Wanneer men een verdergaande afbraak wil, zijn aanzienlijk grotere gistingstanks nodig, terwijl de gasproduktie slechts weinig groter is

en het eindprodukt vaak slechtere kwalitatieve eigenschappen heeft, zoals lagere mestwaarde en slechtere ontwateringseigenschappen.
Ook door Roediger is gevonden dat een optimale gisting wordt verkregen wanneer het eindprodukt nog ca. 45% organische stof bevat.

Het afbraakpercentage van het slib wordt bepaald uit het organische stofgehalte van het versslib en dat van het uitgegist slib. Het organische stofgehalte van het eindprodukt wordt bepaald door de gistingstijd en de afbreekbaarheid van het slib.

Het gemiddelde organische stofgehalte van het eindprodukt ($\bar{x}_2$) is bij een goedverlopend gistingsproces 45% ofwel

$$\bar{x}_2 = 0{,}045 \text{ kg o.d.s./kg d.s.}$$

Vanwege variaties in de gistingstijd en de afbreekbaarheid van het slib kunnen standaardafwijkingen worden geschat van respectievelijk 8% en ca. 10% in het organische stofgehalte van het eindprodukt.

De variantiecoëfficiënt (V_2) kan met behulp van de volgende vergelijking worden berekend:

$$V_2^{\,2} = V_a^{\,2} + V_b^{\,2} + V_a^{\,2}\, V_b^{\,2}$$

$$V_2 = \sqrt{0{,}08^2 + 0{,}10^2 + 0{,}08^2 \times 0{,}10^2} = 0{,}128$$

De standaardafwijking is dan $\sigma_2 = \bar{x}_2 \times V_2 = 0{,}0576.$ kg o.d.s/kg d.s.

De samenstelling van het versslib kan voor de specifieke Nederlandse situatie worden bepaald uit de resultaten van de gloeirestbepalingen die vermeld zijn in de jaarverslagen van diverse beheerders van rwzi's.
De samenstelling van het versslib is afhankelijk van het verloop van het biologische zuiveringssysteem.

Voor het organische stofgehalte van het versslib van 20 Nederlandse rioolwaterzuiveringsinrichtingen (13 actief-slibinstallaties en 7 oxydatiebedden met slibgisting) is gevonden:

gemiddelde o.d.s. gehalte : $\bar{x}_3 = 0{,}690$ kg o.d.s./kg d.s.

standaardafwijking : $\sigma_3 = 0{,}0690$ kg o.d.s./kg d.s.

variantiecoëfficiënt : $V_3 = 0{,}100$

Het verband tussen het afbraakpercentage (x_4) en de organische stofgehalten van het versslib (x_3) en uitgegist slib (x_2) kan worden weergegeven door:

$$x_4 = \frac{x_3 - x_2}{x_3\,(1-x_2)}$$

In figuur 20 wordt dit verband grafisch weergegeven. In deze figuur zijn tevens enige praktijkresultaten weergegeven van een aantal gistingsprocessen in de Verenigde Staten[18]. Hoewel mag worden aangenomen dat het slib in de Verenigde Staten in het algemeen rijker aan vetten is dan het Nederlandse slib, waardoor de afbreekbaarheid van het organisch materiaal beter is, lijkt de aanname redelijk dat door gisting het organische stofgehalte in de praktijk tot 45% wordt gereduceerd in een goed verlopend gistingsproces.

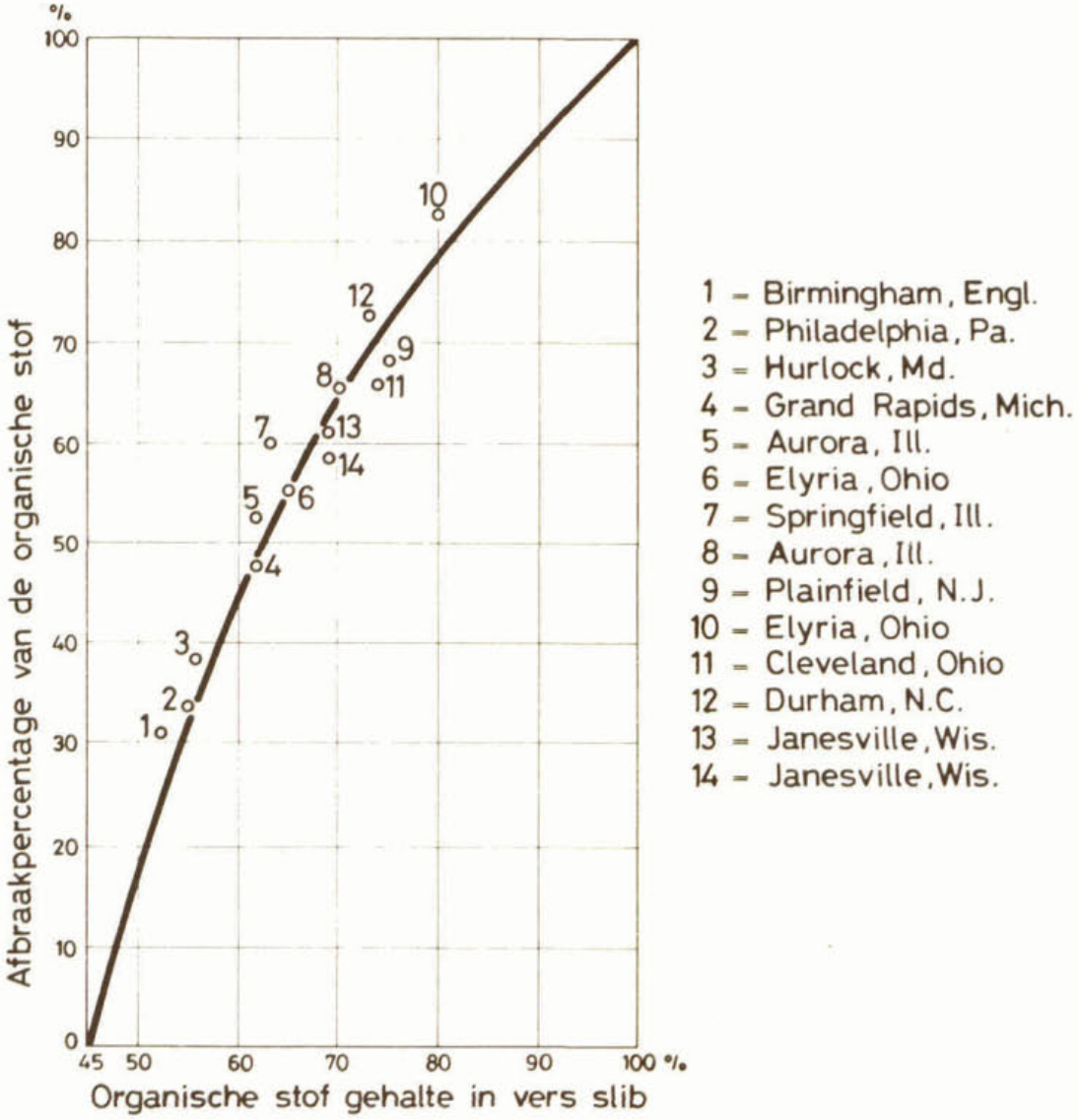

Fig. 20. Afbraakpercentage organische stof als functie van het organische stofgehalte in versslib[18]

Hieruit volgt het gemiddelde afbraakpercentage, $\bar{x}_4$

$$\bar{x}_4 = \frac{0,690 - 0,45}{0,690\ (1-0,45)} = 0,632 \text{ kg o.d.s. afgebroken/kg o.d.s.}$$

De standaardafwijking wordt als volgt bepaald:

$$\sigma_4^{\ 2} = (\frac{\partial x_4}{\partial x_2})^2\ \sigma_2^{\ 2} + (\frac{\partial x_4}{\partial x_3})^2\ \sigma_3^{\ 2}$$

$$\sigma_4 = 0,146 \text{ kg o.d.s. afgebroken/kg o.d.s.}$$

$$V_4 = \frac{\sigma_4}{\bar{x}_4} = 0,231$$

1.4 Gasproduktie per kg organische stof optimaal

De gemiddelde gasproduktie per kg organische drogestof $\bar{x}_5$, is nu:

$$\bar{x}_5 = \bar{x}_1 \times \bar{x}_4 = 1000 \times 0,632 = 632 \text{ l/kg o.d.s.}$$

en de variantiecoëfficiënt:

$$V_5 = \sqrt{V_1^{\ 2} + V_4^{\ 2} + V_1^{\ 2}\ V_4^{\ 2}} = 0,254$$

$$\sigma_5 = V_5 \times \bar{x}_5 = 160 \text{ l/kg o.d.s.}$$

1.5 Gasproduktie per kg organische stof, huidige praktijk

De aannamen van de afbraak van de organische stof kunnen worden getoetst aan de resultaten van een aantal Nederlandse rioolwaterzuiveringsinrichtingen.
Uit de jaarverslagen van een aantal Nederlandse zuiveringsinrichtingen zijn de waarden voor het organische stofgehalte berekend zoals weergegeven in tabel 19.

	organisch stofgehalte uitgegist slib		
	aantal	gemiddeld waarde kg o.d.s/kg d.s.	variantie-coëfficiënt
mechanische zuivering	8	0,552	0,111
oxydatiebedden	14	0,579	0,089
actief-slibinstallaties	9	0,544	0,122

Tabel 19. Organische stofgehalten uitgegist slib in Nederland.

Uit tabel 19 blijkt dat de afbraak van de organische stof in de praktijk minder vergaand is dan in de berekeningen is aangenomen. Het afbraakpercentage dat hieruit kan worden berekend is circa 40-45%, terwijl 60-65% mogelijk lijkt te zijn.
Bij de bovenstaande berekening van de gasproduktie is er van uitgegaan dat het gistingsproces optimaal verloopt, terwijl dat in de praktijk niet altijd het geval zal zijn. Wil men het geproduceerde gistingsgas optimaal gaan benutten, dan zullen hoge eisen moeten worden gesteld aan de uitvoeringsvorm, de regelbaarheid en de bedrijfsvoering van het gistingsproces.

Wordt uitgegaan van de huidige praktijkomstandigheden, dan kan de gasproduktie als volgt worden berekend:

organische stofgehalte vers slib	$\bar{x}_3$ = 0,690 kg o.d.s./kg d.s.	V_3 = 0,100
organische stofgehalte uitgegist slib	$\bar{x}_2$ = 0,562 kg o.d.s./kg d.s.	V_2 = 0,105
afbraakpercentage	$\bar{x}_4$ = 0,424	V_4 = 0,546
gasproduktie per kg o.d.s. afgebroken	$\bar{x}_1$ = 1.000 l/kg o.d.s. afgebroken	V_1 = 0,102
gasproduktie per kg o.d.s.	$\bar{x}_5$ = 424 l/kg o.d.s.	V_5 = 0,558

Hieruit zien we dat de huidige gasproduktie gemiddeld circa 33% lager ligt dan onder optimale omstandigheden mogelijk lijkt. De variaties in de huidige gasproduktie zijn bovendien aanzienlijk door het sterk wisselend afbraakpercentage.

1.6 Gasproduktie per kg droge stof

De gasproduktie per kg droge stof, x_6, kan worden bepaald uit x_3 en x_5. Hierbij wordt uitgegaan van de gasproduktie per kg o.d.s. onder optimale omstandigheden en bij de huidige omstandigheden.

	optimale omstandigheden	huidige omstandigheden
gemiddelde gasproduktie	$\bar{x}_6 = \bar{x}_3 \times \bar{x}_5$ = 436 l/kg d.s.	293 l/kg d.s.
variantiecoëfficiënt	V_6 = 0,274	0,570
standaardafwijking	σ_6 = 120 l/kg d.s.	167 l/kg d.s.

1.7 Gasproduktie per i.e.

Voor de vergelijking van de energieproduktie en de -behoefte zullen beide factoren moeten worden uitgedrukt in gelijke eenheden. De eenheid die hiervoor gebruikt kan worden is de inwonerequivalent.

De versslibproduktie per inwonerequivalent is afhankelijk van het zuiveringssysteem. In de praktijk is gebleken dat oxydatiebedden een lagere slibproduktie geven dan actiefslibinstallaties.

Uit de praktijkresultaten van een aantal zuiveringsinstallaties kunnen de gemiddelde waarden en de spreidingen in de resultaten worden bepaald voor de versslibproduktie (zie tabel 20).

	oxydatiebedden	actief-slibinstallatie
aantal	10	11
gemiddelde slibproduktie (g/i.e.d)	42,2	57,9
standaardafwijking (g/i.e.d)	16,4	20,4
variantiecoëfficiënt	0,389	0,353

Tabel 20. Versslibproduktie per i.e. per dag in Nederland

De gasproduktie per i.e. kan berekend worden uit x_6 en de gegevens uit tabel 20; zie tabel 21.

	oxydatiebedden		actief-slibinstallatie	
	optimaal	huidig	optimaal	huidig
gemiddelde gasproduktie $\bar{x}_7$ (l/i.e.d)	18,4	12,4	25,2	17,0
standaardafwijking σ_7 (l/i.e.d)	9,0	9,0	11,5	11,9
variantiecoëfficiënt V_7	0,488	0,725	0,457	0,700

Tabel 21. Gasproduktie per i.e.

Voornamelijk theoretische relaties en laboratoriumonderzoeken, die door de verschillende onderzoekers aan de praktijkomstandigheden zijn getoetst, hebben als basis gediend voor de berekeningen van de gasproduktie.
Op enkele plaatsen is gebruik gemaakt van Nederlandse bedrijfsresultaten (slibproduktie, samenstelling versslib), omdat hier voor Nederland specifieke waarden gelden.

Bovendien zijn de gebruikte praktijkresultaten onafhankelijk van de werking van het gistingsproces, en alleen afhankelijk van het mechanische en biologische zuiveringsproces. De werking van het gistingsproces is sterk afhankelijk van de praktijkomstandigheden; deze zijn volgens de huidige inzichten, mede ten aanzien van de praktische haalbaarheid, optimaal.

De huidige gasproduktie zoals deze kan worden berekend uit de afbraak van de organische stof is echter gemiddeld ca. 33% lager dan onder optimale omstandigheden. De spreiding in de resultaten kan bovendien aanzienlijk zijn.

Voor een controle van de hier gebruikte berekeningsmethode is het belangrijk dat er een toetsing plaatsvindt aan de Nederlandse praktijk door middel van een vergelijking van de berekende gasproduktie en de op de rwzi's gemeten gasproduktie.

De gasproduktie per i.e., zoals deze is gemeten op de beschouwde rwzi's, is vermeld in tabel 22.

	oxydatiebedden	actief-slibinstallaties
aantal	10	12
gemiddelde gasproduktie (l/i.e.d)	10,4	14,4
variantiecoëfficiënt	0,458	0,348

Tabel 22. Gasproduktie per i.e. in de praktijk

Uit tabel 22 blijkt, dat de gasproduktie op de bestaande zuiveringen redelijk overeenkomt met de berekende waarden (tabel 21). De spreiding in de werkelijke gasproduktie is, hoewel nog vrij hoog, toch aanzienlijk lager dan bij de berekeningen statistisch mogelijk wordt geacht.

Er is echter gebruik gemaakt van een voor statistische begrippen vrij gering aantal waarnemingen. In de praktijk blijken deze waarden toch een redelijke indruk te geven.

Uit de gemeten en berekende waarden blijkt dat de huidige gasproduktie mogelijk aanzienlijk verhoogd kan worden door betere kondities te creëren voor de afbraak van de organische stof.

1.8 Energieproduktie per i.e.

Het geproduceerde gistingsgas bestaat in hoofdzaak (98-100%) uit methaangas en koolstofdioxyde.

Daarnaast komen kleine hoeveelheden waterstofsulfide, stikstof en waterstof voor.
De produktie van primaire energie uit het gistingsgas is afhankelijk van het methaangehalte van het gasmengsel en van de verbrandingswarmte van methaangas.

Bij het ééntraps verwarmd en gemengd gistingsproces is het methaangehalte in het algemeen erg constant. Een daling van het methaangehalte wijst duidelijk op een verstoring van het proces. In de praktijk is het methaangehalte gemiddeld 67% terwijl de spreiding geschat kan worden op circa 3% (methaangehalte 65-69%). Ook in de literatuur komt men deze waarden veelal tegen. In andere typen gistingsprocessen komen geheel andere CH_4-CO_2-verhoudingen voor. Tweetrapssystemen kunnen gistingsgas met 70-80% methaan produceren. Het methaangehalte zal bij lagere temperaturen toenemen door de hogere oplosbaarheid van CO_2 bij lagere temperaturen. Methaan is ten opzichte van koolstofdioxyde nauwelijks oplosbaar in water of slib[18].

De onderste verbrandingswaarde van methaan is 8550 kcal/Nm^3= 35830 kJ/Nm^3. De onderste verbrandingswaarde kan worden toegepast omdat aangenomen mag worden dat er geen gebruik wordt gemaakt van de in de verbrandingsgassen aanwezige latente warmte.

De energieproduktie is dus: 0,67 x 35830 kJ/Nm^3

= 24000 kJ/Nm^3 variantiecoëfficiënt 0,03

De druk van het gas is nagenoeg gelijk aan de druk in de gashouder (250-300 mm Wk overdruk). De temperatuur zal ongeveer de buitentemperatuur bedragen (gemiddeld 9,5 ^oC). Met de algemene gaswet volgt hieruit dat het aantal Nm^3 gemiddeld slechts zeer weinig zal afwijken van het aantal m^3 onder werkomstandigheden, zodat geldt voor de verbrandingswaarde van het gistingsgas: 24000 kJ/m^3.

De energieproduktie per inwonerequivalent per dag is hieruit berekend (zie tabel 23). Er wordt hierbij weer uitgegaan van optimale en van de huidige omstandigheden.

	oxydatiebedden		actief-slibinstallaties	
	optimaal	huidig	optimaal	huidig
energieproduktie (kJ/i.e.d)				
. gemiddeld	442	298	605	405
. variantiecoëfficiënt	0,489	0,726	0,458	0,701

Tabel 23. Energieproduktie per inwonerequivalent per dag.

2 INVENTARISATIE ENERGIEBEHOEFTE

2.1 Inleiding

De energiebehoefte van zuiveringsinrichtingen kan worden verdeeld in:

- krachtbehoefte
- warmtebehoefte

Bij actief-slibinstallaties wordt de belangrijkste krachtbehoefte gevormd door het beluchtingssysteem en de warmtebehoefte voor de slibgisting. Bij oxydatiebedden is voor de luchttoevoer geen energie nodig.

Het overige energieverbruik is afhankelijk van het gekozen zuiverings- en slibverwerkingssysteem, van het aanvoerpeil van het influent en het peil van de effluentlozing en van andere voorzieningen zoals voor stankbestrijding, veiligheid, etc.
Overig energieverbruik :

kracht	*warmte*
transport van water of slib d.m.v. pompen of vijzels	verwarming bedrijfsgebouwen
meet- en regelsystemen	thermische slibbehandeling
verlichting terrein en bedrijfsgebouwen	. pasteurisatie . conditionering . droging, verbranding
flotatie, voorbeluchting, ruimers	
compressoren gasinblazing	
diverse ventilatoren bv. voor stankbestrijding	
slibbehandeling	

De energiebehoefte voor de beluchting en de gisting is vooral afhankelijk van de biologische en hydraulische belastingen van deze systemen en de werking van de apparatuur, zoals voorindikker, zuurstoftoevoervermogen, rendement verwarmingsinstallatie, enz.

De overige energieverbruikers zijn sterk afhankelijk van de specifieke omstandigheden. In het algemeen wordt na de slibgisting geen slibbehandeling meer toegepast of slechts natuurlijke ontwatering. Mechasche ontwatering met chemische conditionering zal het energieverbruik slechts weinig doen toenemen. Grote energieverbruikers, zoals flotatie, voorbeluchting en thermische slibbehandeling worden slechts zeer beperkt toegepast.

2.2 Verwarming gistingstanks

De warmtebehoefte van de gistingstanks wordt bepaald door:

- warmte nodig voor het opwarmen van het inkomende slib tot gistingstemperatuur;
- compensatie van verliezen door warmteoverdracht.

2.2.1 *opwarming slib*

De temperatuur van het gistingsproces wordt gesteld op 306 K (33°C) en kan in het algemeen op ongeveer 1 K nauwkeurig worden geregeld. De temperatuur van het inkomend slib is sterk afhankelijk van seizoeninvloeden. Een ruwe schatting van de temperatuur van het verssslib in de maanden januari/februari is 28 K (8°C) ± 3 K is en in juli/augustus 288 K (15°C) ± 3 K.

De benodigde warmte voor de opwarming van het inkomende slib per inwoner equivalent per dag kan als volgt in formule worden uitgedrukt:

$$W = C_s \times Q_s \times \Delta T_s$$

waarin:

W = warmtebehoefte per i.e.(kJ/i.e.d)

C_s = soortelijke warmte van het slib.
Het slib bevat ongeveer 94-97% water, zodat aangenomen kan worden dat $C_s = C_{water} = 4200$ kJ/m³.K.

ΔT = temperatuurverschil tussen gistingstank en inkomend slib.
Hiervoor geldt:

	zomer	winter
gemiddelde waarde (K)	18	25
variantiecoëfficiënt	0,176	0,126

Q_s = volume van het geproduceerde slib per i.e. per dag. (m³/i.e.d).
Deze hoeveelheid is afhankelijk van de slibproduktie in g/i.e.d en de bereikte indikkingsgraad in de voorindikker.

De verssslibproduktie in Nederland is bepaald uit praktijkresultaten, vermeld in de jaarverslagen van diverse zuiveringsbeheerders (Regge en Dinkel 1974-1976, West Overijssel 1976, Oost Brabant 1974-1976, Uitw. Sluizen 1976). De indikkingsgraad kan eveneens worden bepaald uit de praktijkresultaten. De resultaten hiervan zijn weergegeven in tabel 24.

	slibproduktie (g/i.e.d)	indikkingsgraad (g/l)	slibvolume produktie (l/i.e.d)
oxydatiebedden			
gemiddelde waarde	42,2	45,2	0,934
variantiecoëfficiënt	0,389	0,193	0,441
actief-slibinstallaties			
gemiddelde waarde	57,9	38,7	1,496
variantiecoëfficiënt	0,353	0,180	0,401

Tabel 24. Slibvolumeproduktie per i.e. in Nederland.

De benodigde warmte kan nu worden berekend en is weergegeven in tabel 25. Deze en volgende berekeningen zijn verricht volgens de in de statistiek gebruikelijke methoden. Aangenomen is dat alle verdelingen normaal zijn.

Voor eenvoudige vermenigvuldigingen geldt dan:

variantiecoëfficiënt: $V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_1^2 V_2^2}$

standaardafwijking: $\sigma = V.\bar{x}$

Voor optellen en aftrekken geldt:

standaardafwijking: $\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}$

variantiecoëfficiënt: $V = \frac{\bar{x}}{\sigma}$

Voor complexere formules geldt de benadering:

standaardafwijking: $\sigma^2 = \sqrt{(\frac{\delta x}{\delta x_1})^2 \sigma_1^2 + (\frac{\delta x}{\delta x_2})^2 \sigma_2^2 \ldots\ldots\ldots\ldots}$

variantiecoëfficiënt: $V = \frac{\bar{x}}{\sigma}$

	oxydatiebedden		actief-slibinstallaties	
	zomer	winter	zomer	winter
warmte voor slibverwarming (kJ/i.e.d)				
. gemiddelde waarde	70,6	98,1	113,1	157,1
. variantiecoëfficiënt	0,481	0,462	0,444	0,423

Tabel 25. Energie voor slibverwarming (zonder transmissieverliezen).

2.2.2 *transmissieverliezen*

De warmteverliezen door transmissie zijn afhankelijk van:

- gistingstemperatuur (T_g)
- buitentemperatuur (T_b)
- oppervlak gistingstanks en leidingen (O)
- warmte doorgangscoëfficiënt (k)

In formule:

$$W_T = k \times (T_g - T_b) \times O$$

waarin:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma \frac{\delta n}{\lambda n} + \frac{1}{\alpha_2}} \text{ kJ/m}^2\text{.d.K.}$$

α_1 = warmte-overdrachtscoëfficiënt slib-wand

α_2 = warmte-overdrachtscoëfficiënt wand-buitenlucht

δ_n = dikte wand, isolatiemateriaal, enz.

λ_n = warmtegeleidingscoëfficiënt wand, isolatiemateriaal, enz.

De warmteverliezen zijn dus afhankelijk van de inhoud en de vorm van de gistingstank, het constructiemateriaal en de dikte hiervan.

De huidige gistingstanks zijn vervaardigd uit beton of staal dat van een laag isolatiemateriaal is voorzien.
De dikte hiervan is zodanig dat voor k in het algemeen een waarde van ca. 0,5 kcal/m^2.h.^{o}C = 50,4 kJ/m^2.d. K wordt gebruikt, terwijl een spreiding van ca. 20% kan worden aangenomen. De buitentemperatuur in de winter (januari/februari) kan worden geschat op T_b = (277 $\pm$ 7)K en in de zomer op T_b = (291 $\pm$ 7)K. (juli/augustus).

Het temperatuurverschil is dus in de winter:

$$T_g - T_b = 29 \text{ K} \pm 25\%$$

en in de zomer:

$$T_g - T_b = 15 \text{ K} \pm 60\%$$

Het oppervlak van de gistingstanks hangt af van de inhoud en de vorm van de tank.
Het oppervlak kan grofweg geschat worden op 0,010 m^2/i.e.$\pm$ 30% voor oxydatiebedden en 0,016 m^2/i.e.$\pm$ 30% voor actief-slibinstallaties.

Het warmteverlies door transmissie kan nu worden berekend (tabel 26).

	oxydatiebedden		actief-slibinstallaties	
	zomer	winter	zomer	winter
warmteverlies door transmissie (kJ/i.e.d)				
. gemiddelde waarde	7,56	14,62	12,10	23,39
. variantiecoëfficiënt	0,74	0,45	0,74	0,45

Tabel 26. Warmteverlies door transmissie

2.2.3 *totale warmtebehoefte.*

De hoeveelheid netto-warmte die peri.e. aan de gistingstank moet worden toegevoegd is de som van de warmte voor de slibverwarming en het warmteverlies door transmissie (zie tabel 27).

	oxydatiebedden		actief-slibinstallaties	
	zomer	winter	zomer	winter
totale warmtebehoefte gistinkstank				
. gemiddelde waarde (kJ/i.e.d)	78,2	112,7	125,2	180,5
. variantiecoëfficiënt	0,440	0,406	0,407	0,373

Tabel 27. Totale warmtebehoefte gistingstank.

2.3 Krachtverbruik beluchting

Het krachtverbruik van het beluchtingssysteem is afhankelijk van de zuurstofbehoefte van het actiefslib, het zuurstoftoevoerrendement van het beluchtingssysteem en het zuurstofgehalte van de beluchtingstank.

De berekening van de krachtbehoefte voor de beluchting is als volgt[20]:
De totale zuurstofbehoefte van het actiefslib (OV_T) kan worden opgesplitst in het zuurstofverbruik voor de volgende processen:
. BZV-verwijdering (OV_1)
. endogene ademhaling (OV_2)
. stikstofverwijdering (OV_3)

2.3.1 *BZV-verwijdering.*

Het zuurstofverbruik voor de BZV-verwijdering is evenredig met de hoeveelheid afgebroken BZV.

$$OV_1 = d \times \eta_{BZV} \times B$$

waarin: B = BZV-belasting in kg BZV/i.e.d

η_{BZV} = rendement BZV-afbraak

d = zuurstof-BZV-coëfficiënt in kg O_2/kg BZV

Het aantal inwonerequivalenten dat per dag naar de zuiveringsinrichting wordt gevoerd wordt berekend met behulp van de relatie 1 i.e.= 0,054 kg BZV/dag. Door verschillen in de leefgewoonten kan de vervuiling per inwoner aanzienlijk variëren (stedelijke en plattelandsgebieden, oude en nieuwe woonwijken, enz.).
Door de huidige centralisatie van de waterzuivering zullen deze verschillen weer in bepaalde mate uitgemiddeld worden.
Na bezinking van de vaste deeltjes in het afvalwater bevindt zich nog ca. 0,035 kg BZV/ i.e.d in het water.
Wanneer het afvalwater een grotere of kleinere fractie bezinkbaar materiaal bevat (bv. industrieel afvalwater) of bij een meer of minder goede werking van de voorbezinking, kan de BZV-belasting van de beluchtingstank afwijken van de verwachte waarde.

gemiddelde waarde	$\bar{B}$ = 0,035 kg BZV/i.e.d
geschatte standaardafwijking	σ_B = 0,005 kg BZV/i.e.d
variantiecoëfficiënt	V_B = 0,143

Voor het rendement van de BZV-verwijdering wordt een onderscheid tussen hoogbelaste (slibbelasting 0,3-0,4 kg BZV/kg d.s.d) en laagbelaste (slibbelasting 0,10-0,20 kg BZV/kg d.s.d) actief-slibinstallaties gemaakt (zie tabel 28).

	rendement BZV-verwijdering (%)	
	laagbelast	hoogbelast
gemiddelde waarde $\bar{\eta}_{BZV}$	97%	94%
standaardafwijking $\sigma_{\eta_{BZV}}$	2%	4%
variantiecoëff. $V_{\eta_{BZV}}$	0,021	0,043

Tabel 28. Rendement BZV-verwijdering.

Voor de zuurstof-BZV-coëfficiënt kunnen de volgende waarden worden opgegeven.

gemiddelde waarde	$\bar{d}$ = 0,5 kg O_2/kg BZV
standaardafwijking	T_d = 0,15 kg O_2/kg BZV
variantiecoëfficiënt	V_d = 0,300

Hieruit volgt dan het zuurstofverbruik voor BZV-verwijdering, OV_1 (zie tabel 29).

	hoogbelast	laagbelast
$\overline{OV}_1$	$16,45 \times 10^{-3}$ kg O_2/i.e.d	$16,98 \times 10^{-3}$ kg O_2/i.e.d
σ_{OV_1}	$5,52 \times 10^{-3}$ "	$5,74 \times 10^{-3}$ "
V_{OV_1}	0,336	0,338

Tabel 29. Zuurstofverbruik voor BZV-verwijdering.

2.3.2 *endogene ademhaling*

De endogene ademhaling is afhankelijk van de hoeveelheid actiefslib in de beluchtingstank.

Per i.e.geldt: $OV_2 = e \times G_a \times V$

waarin:

G_a = slibgehalte beluchtingstank (kg d.s./m^3)

V = volume beluchtingstank per i.e. (m^3/i.e.)

e = endogene ademhalingscoëfficiënt (kg O_2/kg d.s.d)

Voor hoog- en laagbelaste actief-slibinstallaties zijn deze parameters geschat en verwerkt (zie tabel 30).

	G_A kg/m^3	V m^3/i.e.	e kg O_2/kg d.s.d	OV_2 kg O_2/i.e.d
hoogbelast				
gem. waarde	3,0	0,033	0,10	$10,0 \times 10^{-3}$
standaardafwijking	0,032		0,02	$3,84 \times 10^{-3}$
variantiecoëff.	0,322		0,200	0,384
laagbelast				
gem. waarde	3,5	0,067	0,09	$21,0 \times 10^{-3}$
standaardafwijking	0,085		0,02	$9,15 \times 10^{-3}$
variantiecoëff.	0,366		0,222	0,436

Tabel 30. Zuurstofverbruik voor endogene ademhaling.

2.3.3 *stikstofverwijdering*

De zuurstofbehoefte voor de stikstofverwijdering hangt af van de mate waarin de nitrificatie- en denitrificatieprocessen zich voltrekken. Bij nitrificatie wordt zuurstof verbruikt (4,57 kg O_2/kg N-Kj); bij de denitrificatie komt zuurstof vrij (2,86 kg O_2/kg $N\text{-}NO_3$).

Wanneer wordt aangenomen dat het influent geen nitraat bevat, geldt:

$$OV_3 = 4{,}57 \times (N\text{-}NO_3)_e \times Q + (4{,}57 - 2{,}86) \times N\text{-}Den$$

waarin:

$(N\text{-}NO_3)_e$ = nitraatgehalte effluent (kg N/m^3)

Q = hoeveelheid afvalwater per i.e. per dag (m^3/i.e.d)

N-Den = hoeveelheid Kjeldahl-stikstof die volledig is gedenitrificeerd per i.e. per dag (kg N/i.e.d)

Voor de stikstofbalans geldt:

$$(N\text{-}Kj)_i \times Q = (N\text{-}Kj)_e \times Q + (N\text{-}NO_3)_e \times Q + N\text{-}Den + N\text{-}Ass$$

waarin:

$(N\text{-}Kj)_{i,\,e}$ = Kjeldahl stikstof in influent en effluent (kg N/m^3)

N-Ass = stikstof gebonden aan celmateriaal (kg N/i.e.d)

$$N\text{-}Ass = h \times G_{SA} = h \times (f \times \eta_{BZV} \times B - g \times V \times G_A)$$

waarin:

G_{SA} = surplusslibproduktie per i.e. (kg d.s./i.e.)

h = stikstofgehalte surplusslib (kg N/kg d.s.)

$\eta_{BZV} \times B$ = hoeveelheid BZV afgebroken per i.e. per dag (kg BZV/i.e.d)

G_A = slibgehalte beluchtingstanks (kg/m^3)

f, g = evenredigheidsfactoren slibproduktie

V = inhoud beluchtingsfactoren per i.e. (m^3/i.e.)

Voor de zuurstofbehoefte voor stikstof-verwijdering geldt nu:

$$OV_3 = 2{,}86 \times (N - NO_3)_e \times Q + 1{,}71 \times Q \times \{(N_Kj)_i - (N\text{-}Kj)_e\} - 1{,}71 \times h \times (f \times \eta_{BZV} \times B - g \times V \times G_A)$$

Voor een schatting van OV_3 worden diverse aannamen gedaan. Deze zijn in tabel 31 vermeld. Hieruit volgt dan de geschatte waarde van OV_3.

	hoogbelaste inst.		laagbelaste inst.	
	gem. waarde	varian-tiecoëff.	gem. waarde	varian-tiecoëff.
Q	0,100	0,15	0,100	0,15
$(N\text{-}NO_3)_e$	0	0	0,030	0,33
$(N\text{-}Kj)_i$	0,080		0,080	0,25
$(N\text{-}Kj)_i\text{-}(N\text{-}Kj)_e$	0,030	0,33	0,075	0,27
$(N\text{-}Kj)_e$	0,050		0,005	1,00
h	0,025	0,20	0,025	0,20
f	1,1	0,18	1,1	0,18
g	0,04	0,25	0,04	0,25
η_{BZV}	94%	0,043	97%	0,021
B	0,035	0,143	0,035	0,143
$V \times G_A$	0,1	0,322	0,233	0,366
OV_3	$3,75 \times 10^{-3}$	0,520	$20,21 \times 10^{-3}$	0,253

Tabel 31. Berekening zuurstofverbruik voor stikstofverwijdering.

2.3.4 *totale zuurstofbehoefte.*

	OV_1 kg O_2/i.e.d	OV_2 kg O_2/i.e.d	OV_3 kg O_2/i.e.d	OV_T kg O_2/i.e.d
hoogbelast				
gem. waarde	$16,45 \times 10^{-3}$	$10,0 \times 10^{-3}$	$3,75 \times 10^{-3}$	$30,2 \times 10^{-3}$
standaardafw.	$5,52 \times 10^{-3}$	$3,84 \times 10^{-3}$	$1,95 \times 10^{-3}$	$7,00 \times 10^{-3}$
variantiecoëff.	0,336	0,384	0,520	0,232
laagbelast				
gem. waarde	$16,98 \times 10^{-3}$	$21,0 \times 10^{-3}$	$20,21 \times 10^{-3}$	$58,2 \times 10^{-3}$
standaardafw.	$5,74 \times 10^{-3}$	$9,15 \times 10^{-3}$	$5,11 \times 10^{-3}$	$11,95 \times 10^{-3}$
variantiecoëff.	0,338	0,436	0,253	0,205

Tabel 32. Zuurstofverbruik actief-slibinstallaties.

2.3.5 *zuurstoftoevoerrendement.*

Het zuurstoftoevoerrendement van de beluchtingssystemen is de hoeveelheid zuurstof die in de beluchtingstank kan worden gebracht per kWh in zuurstofloos water.
Het rendement is afhankelijk van de belastingsgraad van het beluchtingssysteem. Voor bellenbeluchting geldt dat het rendement enigszins afneemt bij hogere belastingen doordat grotere luchtbellen ontstaan. Het totale contactoppervlak lucht - water wordt relatief kleiner en de stijgsnelheid van de bellen groter. Bij puntbeluchting zal de indompeldiepte groter zijn bij hogere belasting. In dit geval zal het rendement enigszins toenemen bij hogere belastingen.

In het algemeen mag worden gesteld dat het zuurstoftoevoerrendement in actiefslib voor oppervlaktebeluchters gemiddeld 1,7 kg O_2/kWh is, met een standaardafwijking van 0,2 kg O_2/kWh en voor bellenbeluchting 2,3 kg O_2/kWh, standaardafwijking 0,3 kg O_2/kWh.
Dit rendement geldt voor zuurstofloos water.

In werkelijkheid is het zuurstofgehalte, C, in de beluchtingstank 1 á 2 mg/l ofwel:

gemiddelde zuurstofgehalte = 0,15 Cs mg/l

standaardafwijking = 0,10 Cs mg/l

waarin Cs de zuurstof verzadigingswaarde in mg/l.

De drijvende kracht voor zuurstofoverdracht vermindert dus met een factor C/C_s, ofwel het zuurstoftoevoerrendement bij zuurstofgehalte C mg/l wordt

$$\eta_C = \frac{C_s - C}{C_s} \times \eta_0$$

Het zuurstoftoevoerrendement in praktijkomstandigheden, η_c, is nu:

	oppervlakte-beluchting	bellen-beluchting
gemiddelde waarde	1,45 kg O_2/kWh	1,96 kg O_2/kWh
standaardafwijking	0,24 "	0,346 "
variantiecoëfficiënt	0,167	0,176

2.3.6 *energieverbruik.*

Uit het totale zuurstofverbruik (OV_T) en het zuurstoftoevoerrendement is de krachtbehoefte voor de diverse beluchtingssystemen te berekenen (zie tabel 33).

Met behulp van jaarverslagen is voor het krachtverbruik voor de beluchting een gemiddelde waarde gevonden van 123,5 kJ/i.e.d met een variantiecoëfficiënt van 0,29. Nagenoeg alle zuiveringsinrichtingen die in de jaarverslagen zijn vermeld hebben oppervlaktebeluchting, terwijl het in het algemeen laagbelaste actief-slibinstallaties betreft. De praktijkresultaten blijken dus goed overeen te komen met de berekende waarde voor de krachtbehoefte.

	krachtverbruik kJ/i.e.d	
	gemiddelde waarde	variantie-coëfficiënt
hoogbelast		
oppervlaktebeluchting	75,0	0,288
bellenbeluchting	55,5	0,294
laagbelast		
oppervlaktebeluchting	144,5	0,267
bellenbeluchting	106,9	0,273

Tabel 33. Energieverbruik beluchtingssystemen.

actiefslibinstallaties betreft. De praktijkresultaten blijken dus goed overeen te komen met de berekende waarde voor de krachtbehoefte.

2.4 Overig krachtverbruik

Het overig krachtverbruik kan, doordat het afhankelijk is van vele specifieke omstandigheden, niet theoretisch worden afgeleid of berekend. Uit de jaarverslagen kan evenwel een goede indruk worden verkregen van het overige krachtverbruik. Hierbij kan geen onderscheid worden gemaakt tussen de verschillende actiefslibinstallaties.
Bij geen van deze installaties werd thermische slibontwatering of droging toegepast.
Voor oxydatiebedden is er geen krachtverbruik voor de beluchting, zodat het overig krachtverbruik gelijk is aan het totale krachtverbruik.
Het overig krachtverbruik in de praktijk is vermeld in tabel 34.

	actiefslibinstallaties	oxydatiebedden
gemiddeld (kJ/i.e.d)	56,2	66,2
variantiecoëfficiënt	0,43	0,35

Tabel 34. Overig krachtverbruik.

3 ENERGIEBESPARING BIJ TOEPASSING EIGEN ENERGIEOPWEKKING

Bij conventionele installaties wordt het verbruik aan primaire energie allereerst bepaald door het verbruik aan warmte (Q) en kracht (K_T). Tevens door de energetische rendementen van de verwarmingsketel (η_{vk}) en dat van de krachtopwekking in de elektriciteitscentrale (η_{ec}).
Voor het totaal rendement (η_T) van de conventionele installatie kan worden afgeleid:

$$\eta_T = \frac{\text{kracht + warmteverbruik}}{\text{verbruik primaire energie}} = \frac{\eta_{ec} + \eta_{vk}\ (1 + C)}{\eta_{vk} + \eta_{ec}\ .\ C}$$

waarin $C = Q/K_T$

Voor het volledige TE-systeem kan ook het totaal rendement worden berekend.

Indien warmtebehoefte (Q) kleiner is dan de warmteproduktie (Q_w) van de gasmotor ($Q < Q_w$) geldt:

$$\eta_T = \eta_k\ (1 + C)$$

Wanneer $Q>Q_w$ dan is: $\eta_T = \dfrac{\eta_k\ .\ (1 + C)}{\eta_{ec} + \eta_k\ .\ C - \eta_w}$

waarin: η_k, η_w = resp. kracht- en warmterendement van de eigen energieopwekkingsinstallatie

Voor het PE-systeem en het gedeeltelijke TE-systeem, waarbij de eigen energieopwekking alleen ten behoeve van de beluchting wordt toegepast worden de volgende rendementen bepaald.

Voor $Q<Q_w$, $\eta_T = \dfrac{\eta_{ec}\ .\ \eta_k\ .\ (1+C)\ K_T}{\eta_k\ .\ K_{ov}\ \ \eta_{ec}\ .\ K_b}$

Voor $Q>Q_w$, $\eta_T = \dfrac{\eta_{ec}\ .\ \eta_k\ .\ \eta_{vk}\ (1+C)\ .\ K_T}{\eta_{ec}\ .\ \eta_k\ .\ \{K_T+\eta_{vk}\ (\eta_k\ K_{ov} + \eta_{ec}\ K_b)\}-\eta_w\ \eta_{ec}\ K_b}$

Waarin: K_T, K_b en K_{ov} = resp. krachtverbruik totaal, beluchting en overige onderdelen.

Ook blijkt dat bij lage C-waarden PE-systemen en ook gedeeltelijke TE-systemen meer besparingen aan primaire energie opleveren dan TE-systemen. Dit komt door het hoge krachtrendement van de PE-installaties.
Gedeeltelijke TE-systemen hebben een krachtrendement dat tussen dat van de volledige TE-systemen en dat van de elektriciteitscentrale ligt.

Een voorbeeld van de verkregen besparingen door toepassing van eigen energieopwekking, afhankelijk van de verhouding warmte en krachtbehoefte, wordt in figuur 21 gegeven.

Hierbij is gebruik gemaakt van bovenstaande formules en de volgende aannamen:

- beluchting vraagt ± 60% van de totale krachtbehoefte (K_b = 0,6 K_T)
- rendement van de krachtopwekking in elektriciteitscentrale η_{ec} = 34%
- rendement verwarmingsketel η_{vk} = 75%
- rendement krachtopwekking in TE-systeem 29%
- rendement krachtopwekking in PE-systeem 33%
- rendement warmteopwekking in gasmotor uit koelwater 35%
  uit rookgassen 15%

Het knikpunt in de grafieken van figuur 21 geeft de waarde aan waarbij juist alle geproduceerde warmte kan worden benut. Links van het knikpunt is er een overschot aan warmte, rechts is er een tekort en moet worden bijgestookt met een verwarmingsketel.

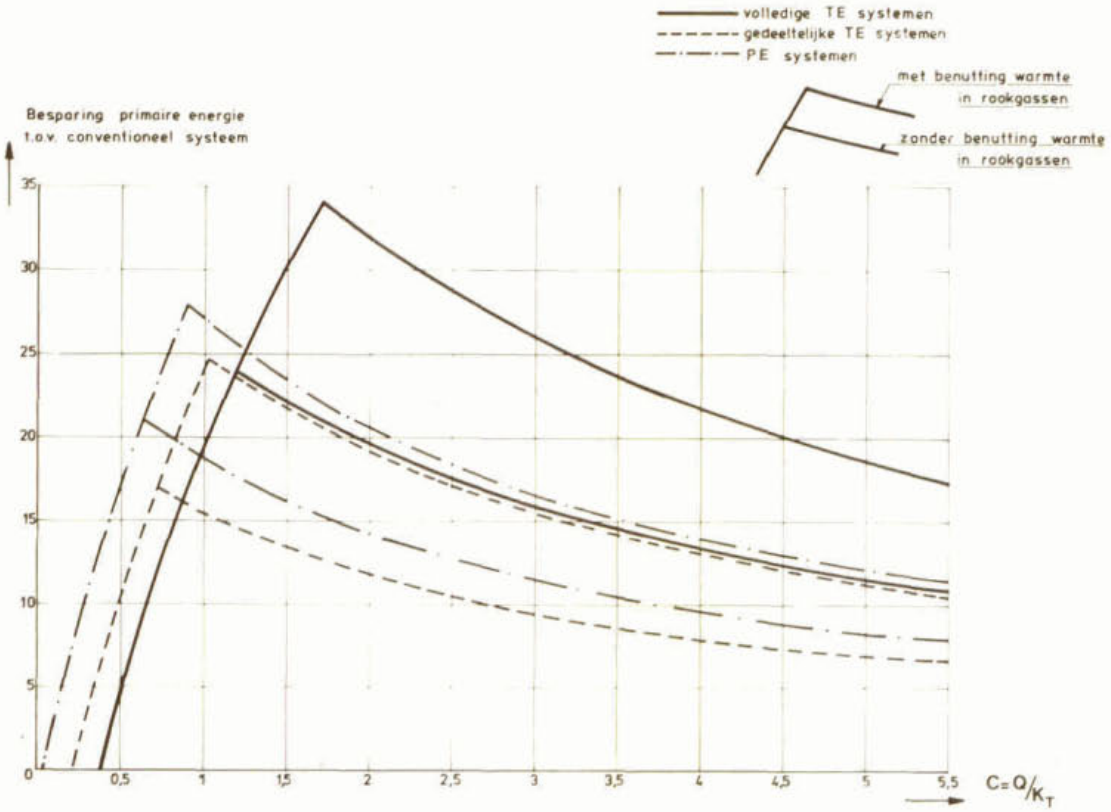

Fig. 21. Besparingen aan primaire energie ten opzichte van conventioneel systeem als functie van warmte/krachtverhouding.

Uit de grafieken blijkt tevens dat warmteterugwinning uit de rookgassen pas aantrekkelijk wordt wanneer de warmte-krachtverhouding groter is dan circa 1,2 voor volledige TE-systemen en groter dan circa 0,7 bij PE en gedeeltelijke TE-systemen.

De besparing aan primaire energie kan nu berekend worden uit de rendementen voor en na invoering van eigen energieopwekking.

$$\eta_{bpi} = \frac{\eta_{Te} - \eta_{Tc}}{\eta_{Te}}$$

waarin η_{bpi} = relatieve besparing aan primaire energie

η_{Tc} en η_{Te} = het totaal rendement van de conventionele installatie en na invoering van eigen energieopwekking.

Bij bovenstaande beschouwingen is de eigen gistingsgasproduktie niet in de berekeningen verwerkt.

4 GEVOELIGHEIDSANALYSES ENERGIEMODEL

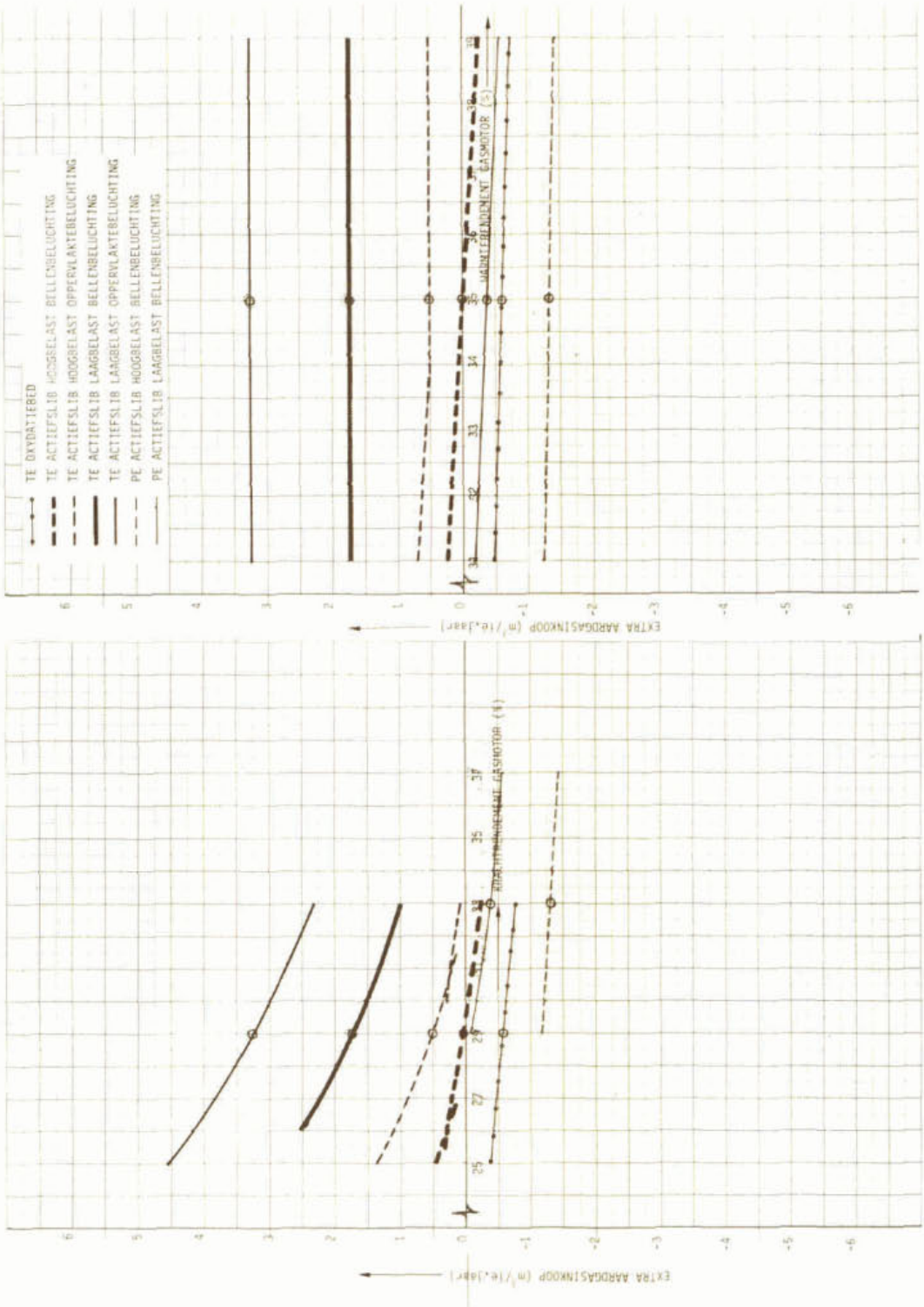

Fig.22. Energiemodel: gevoeligheid kracht- en warmterendement

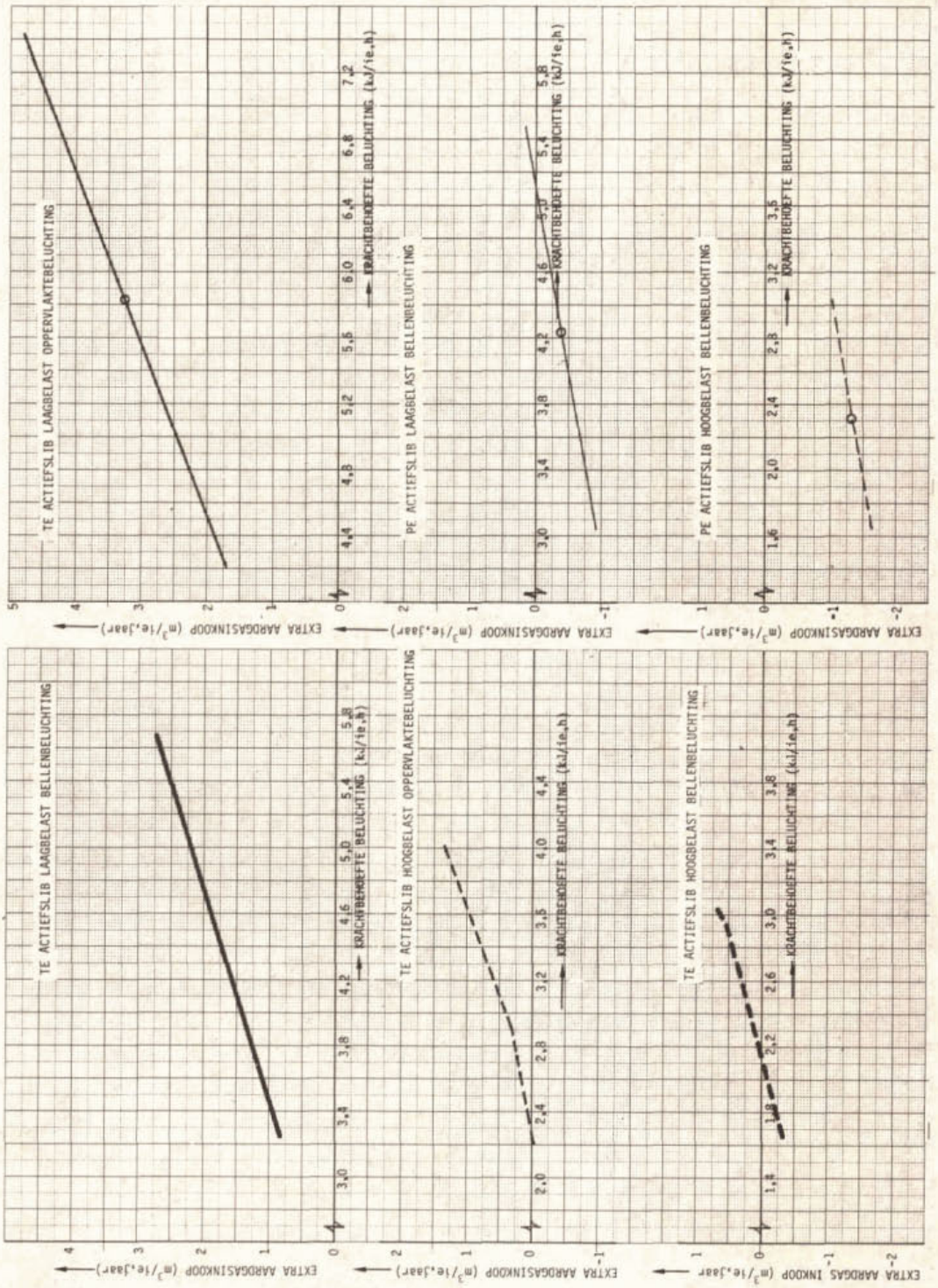

Fig.23. Energiemodel: gevoeligheid krachtbehoefte beluchting

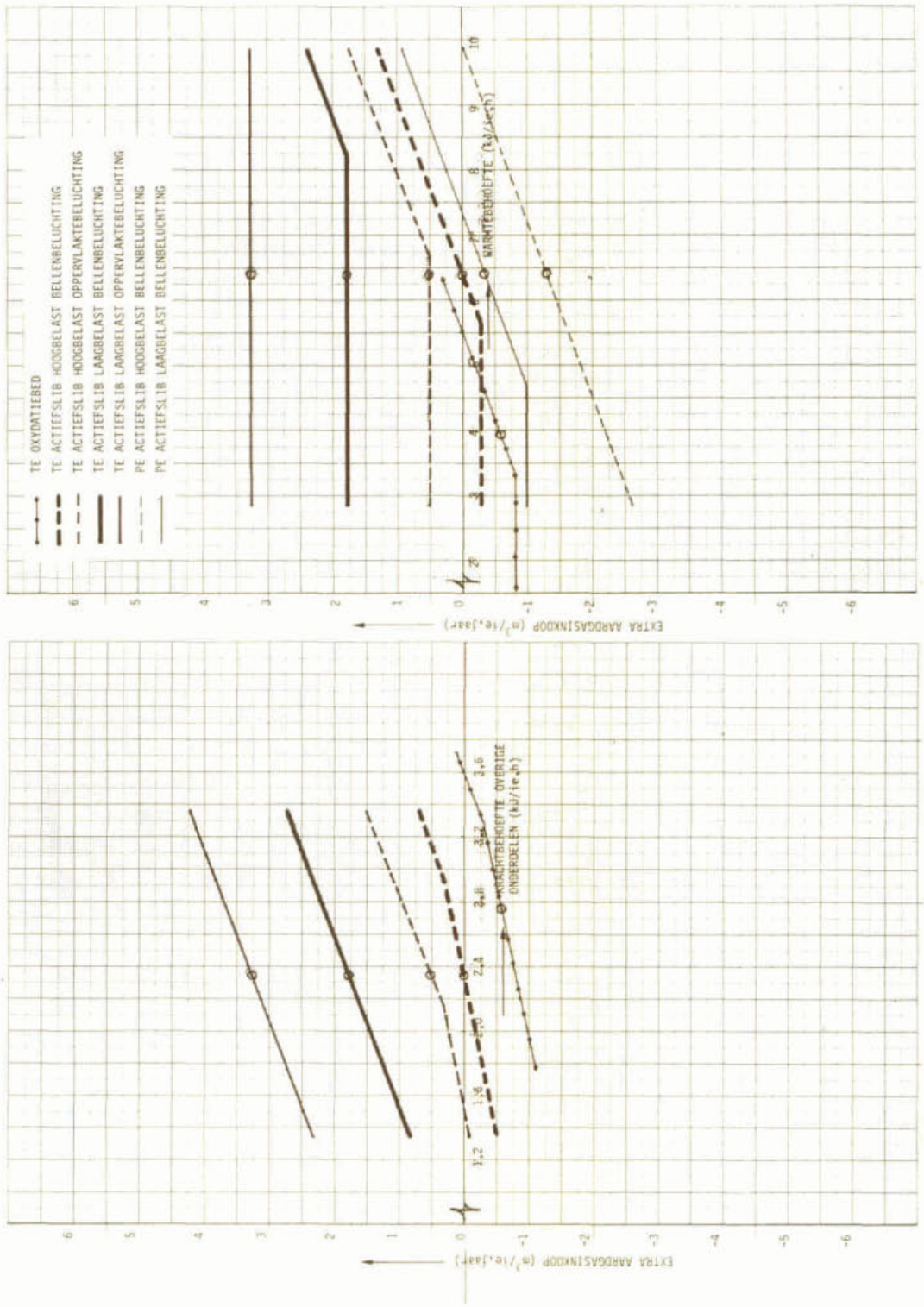

Fig.24. Energiemodel: gevoeligheid krachtbehoefte overige onderdelen en warmtebehoefte

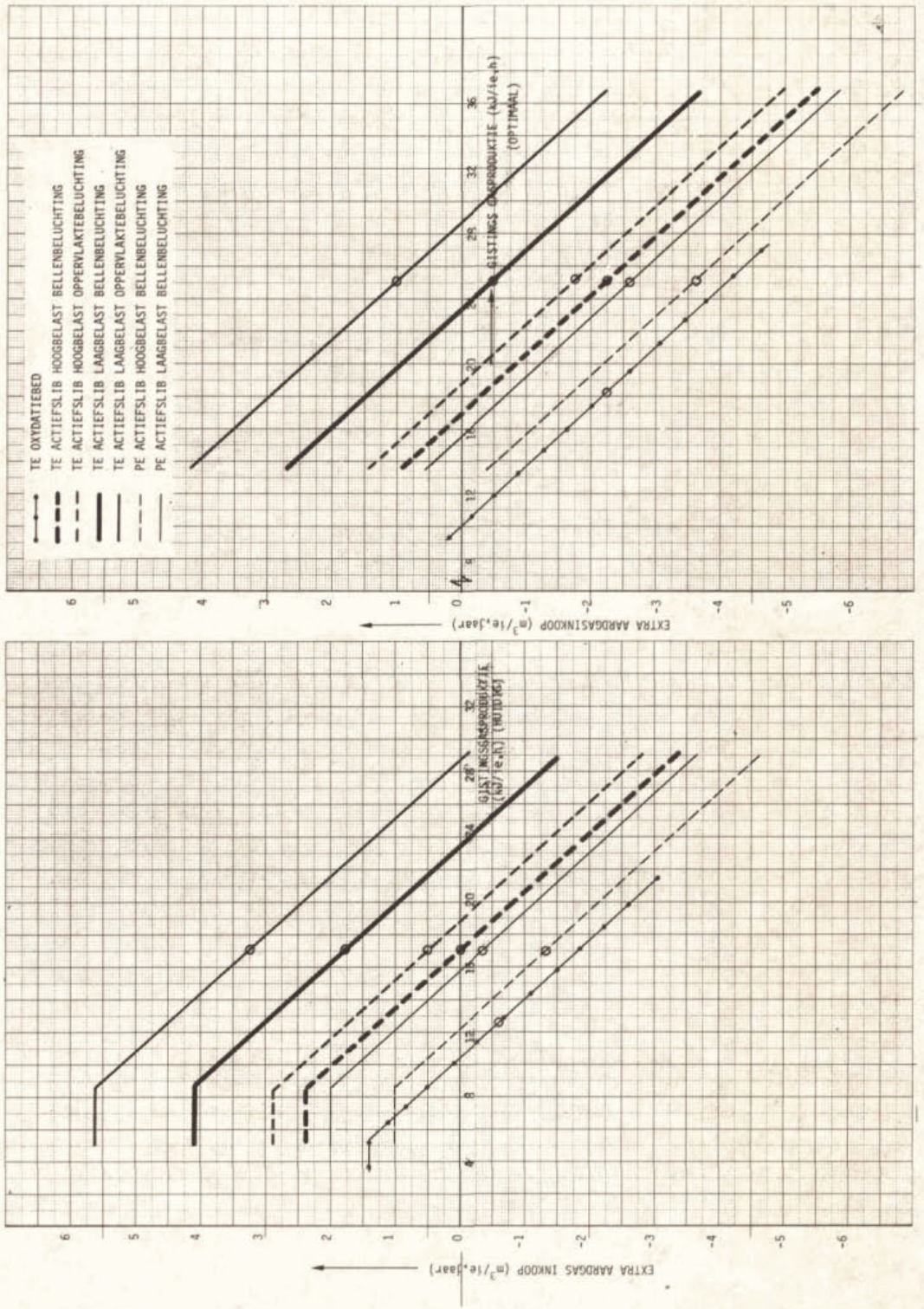

Fig.25. Energiemodel: gevoeligheid gistingsgasproduktie onder huidige en optimale omstandigheden

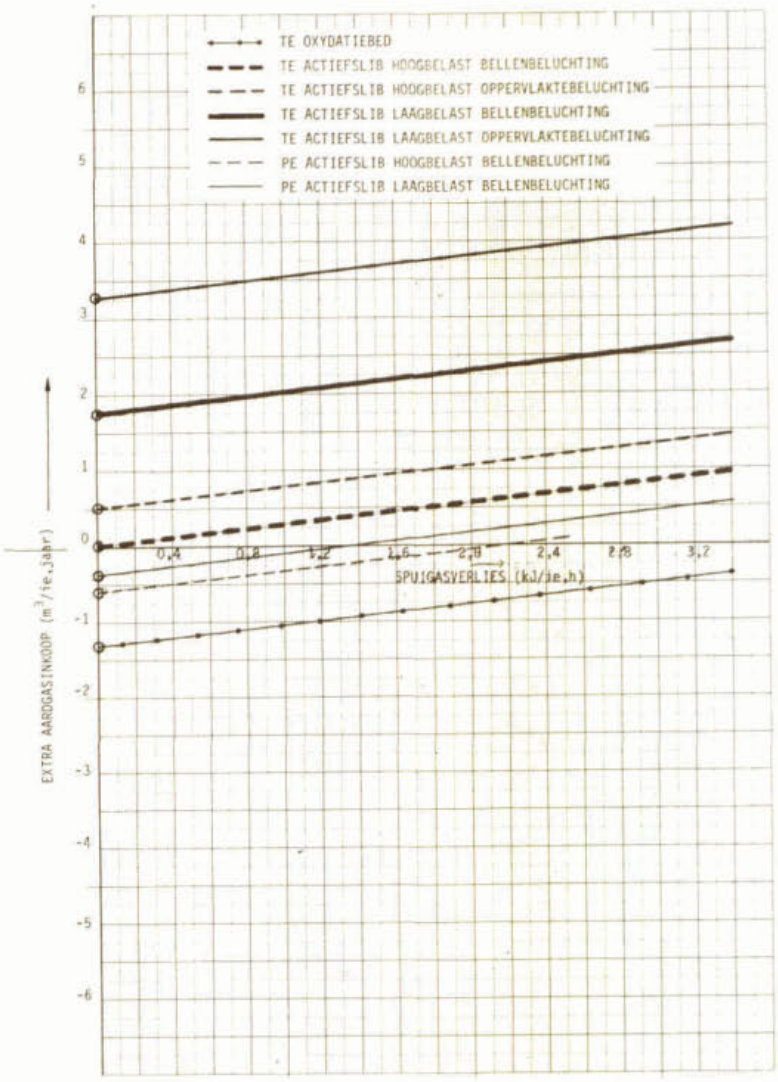

Fig. 26. Energiemodel: gevoeligheid spuigasverlies

5 GEVOELIGHEIDSANALYSES KOSTENMODEL

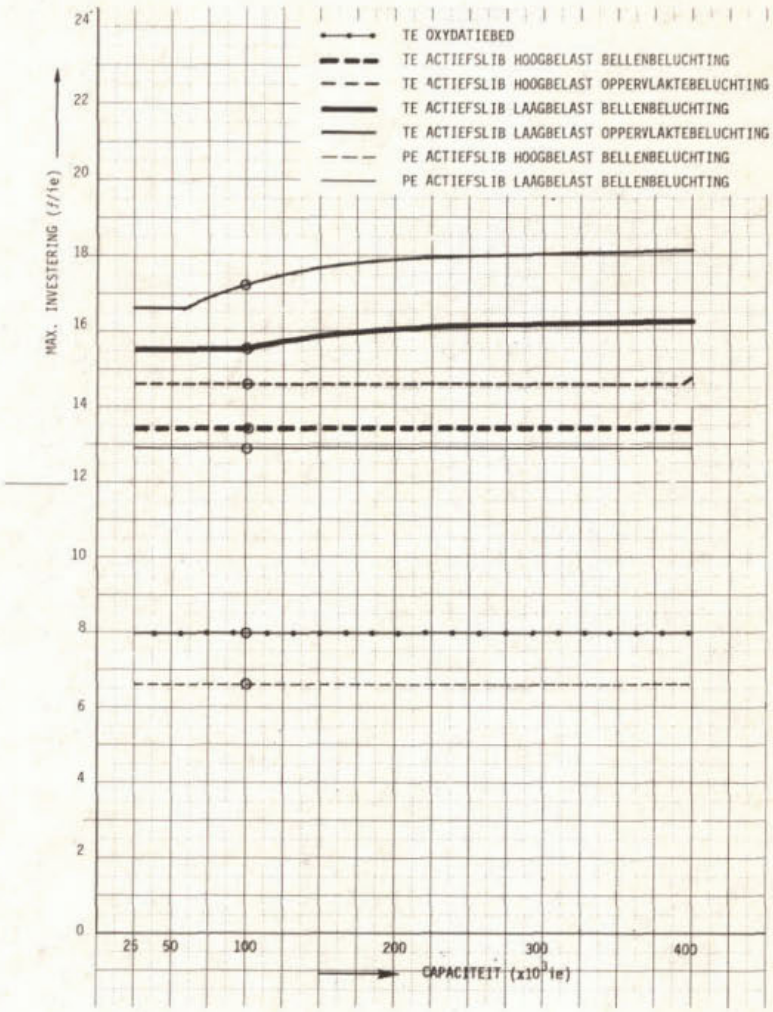

Fig. 27. Kostenmodel: gevoeligheid capaciteit rwzi.

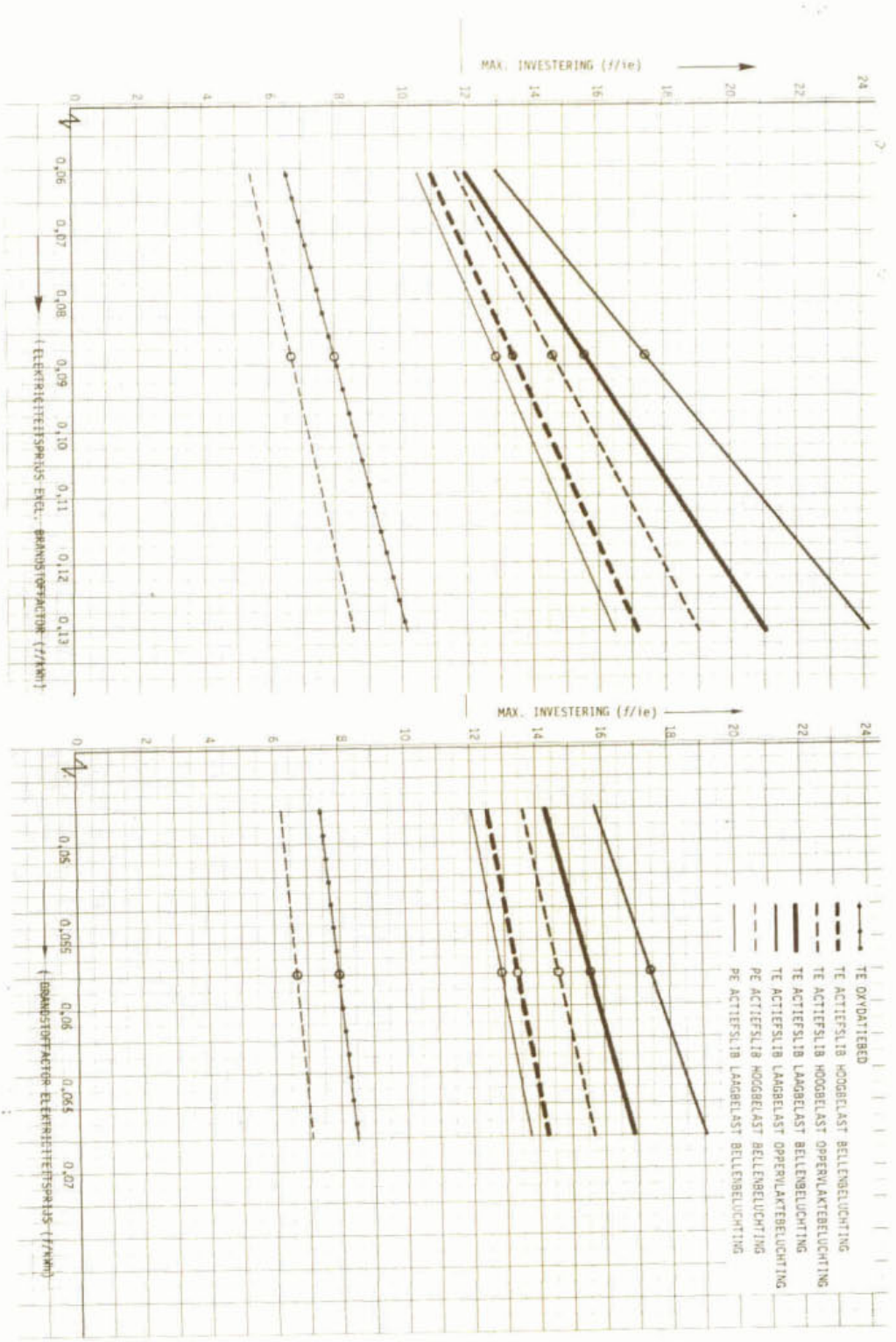

Fig.28. Kostenmodel: gevoeligheid electriciteitsprijs

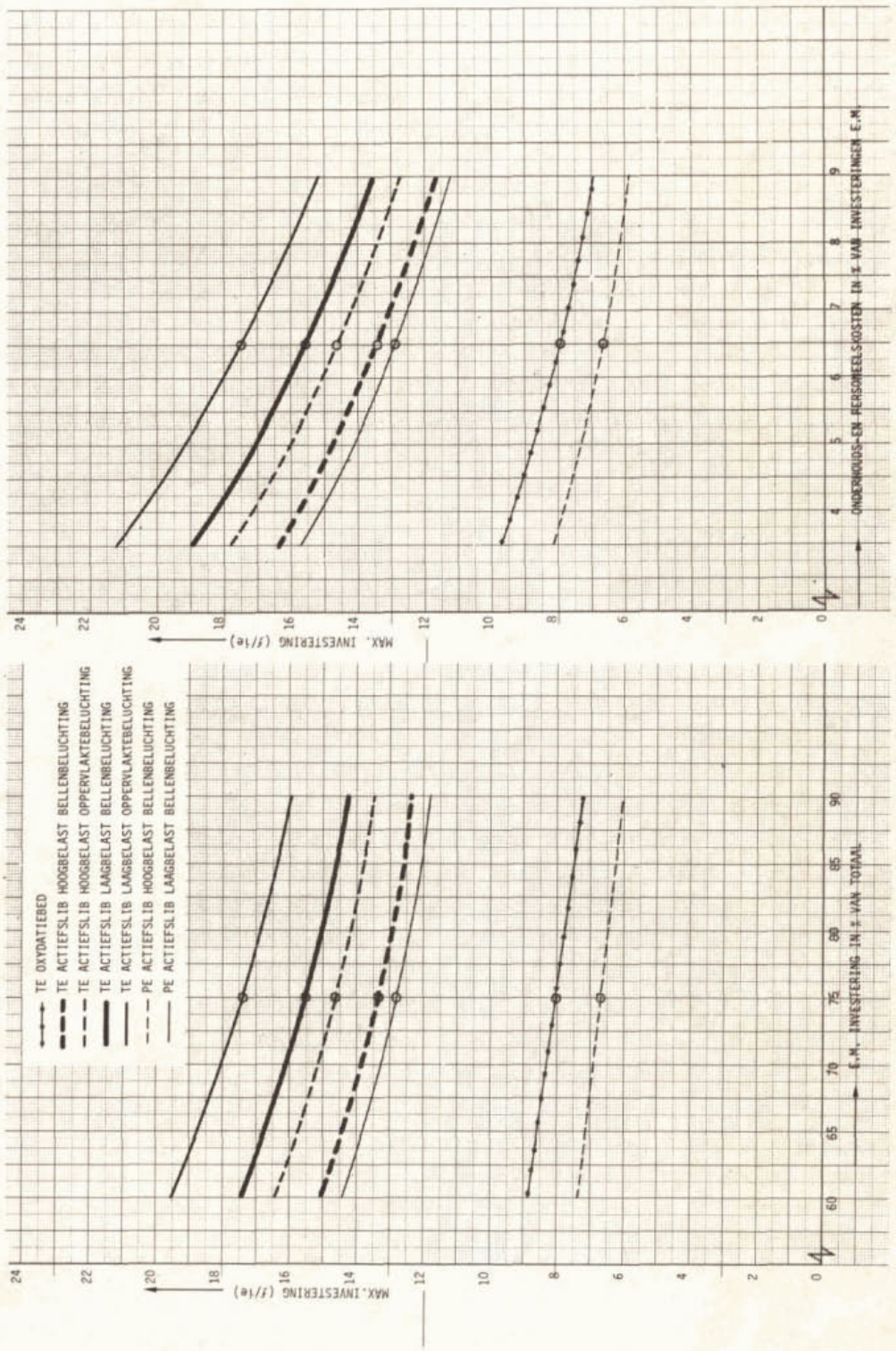

Fig.29. Kostenmodel: gevoeligheid % E.M. investeringen en onderhouds- en personeelskosten

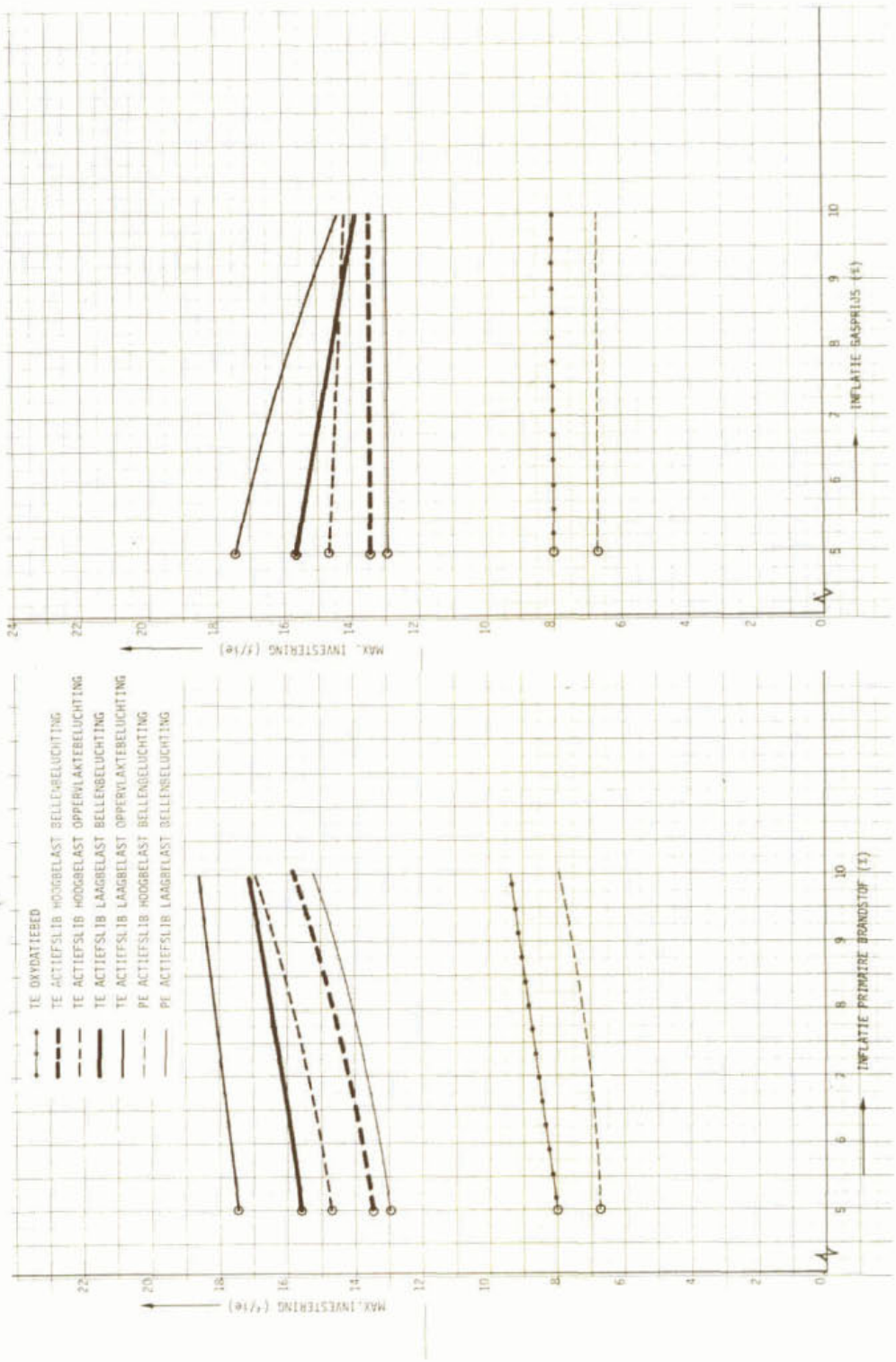

Fig.30. Kostenmodel: gevoeligheid inflatie primaire brandstof (brandstoftoeslag electriciteit en aardgas) en inflatie aardgas.

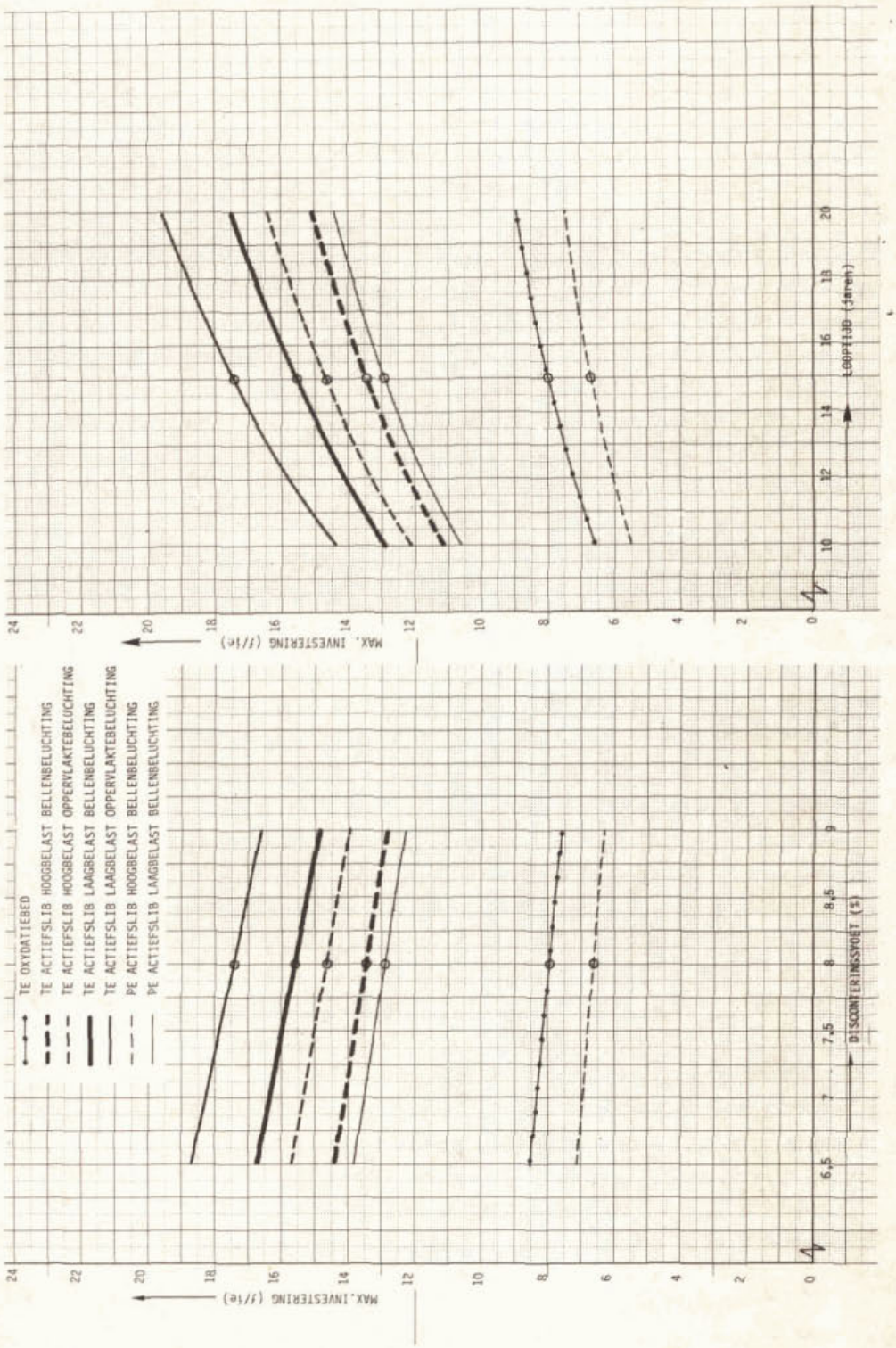

Fig.31. Kostenmodel: gevoeligheid disconteringsvoet en looptijd

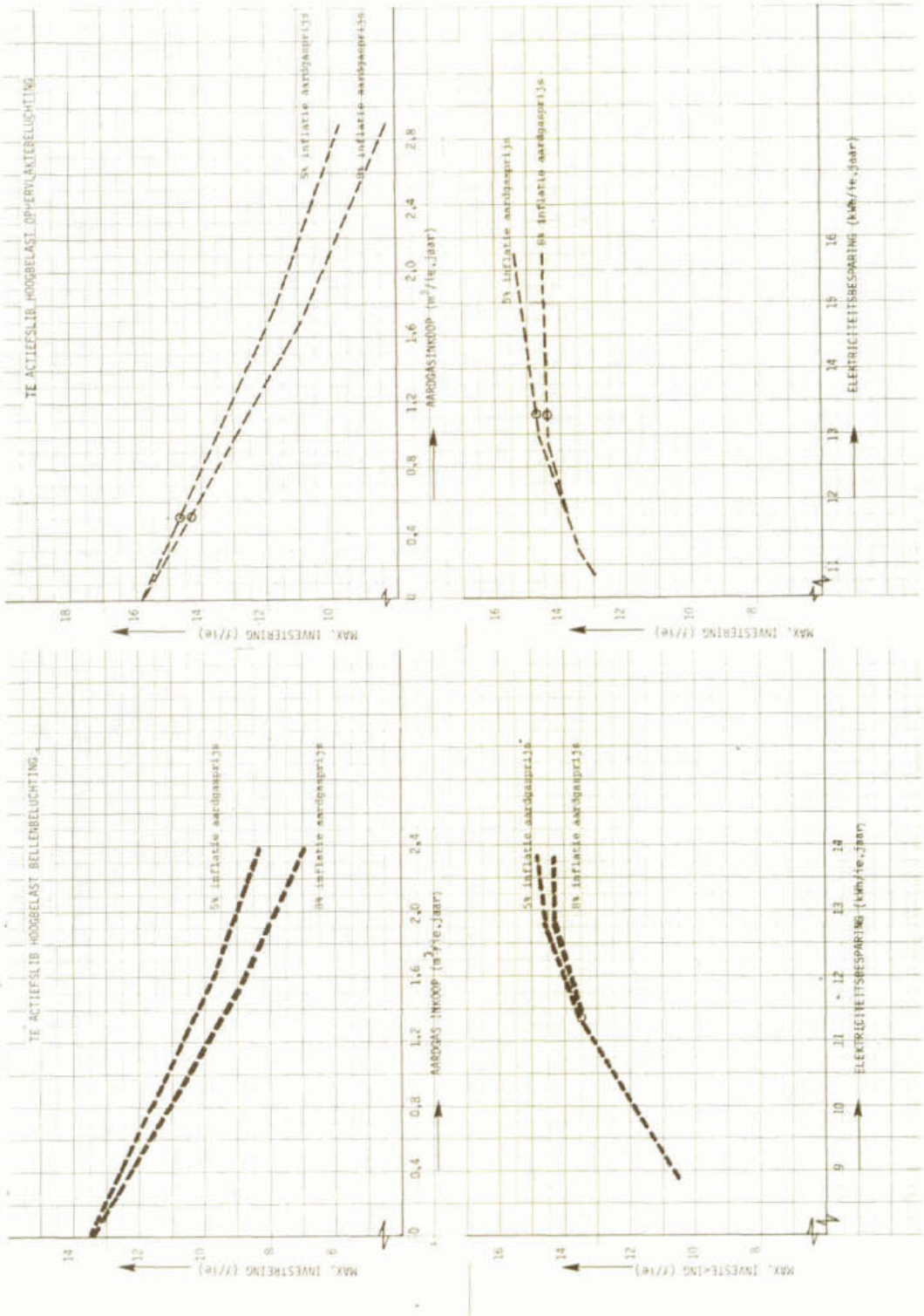

Fig.32. Kostenmodel: gevoeligheid aardgasinkoop en electriciteitsbesparing

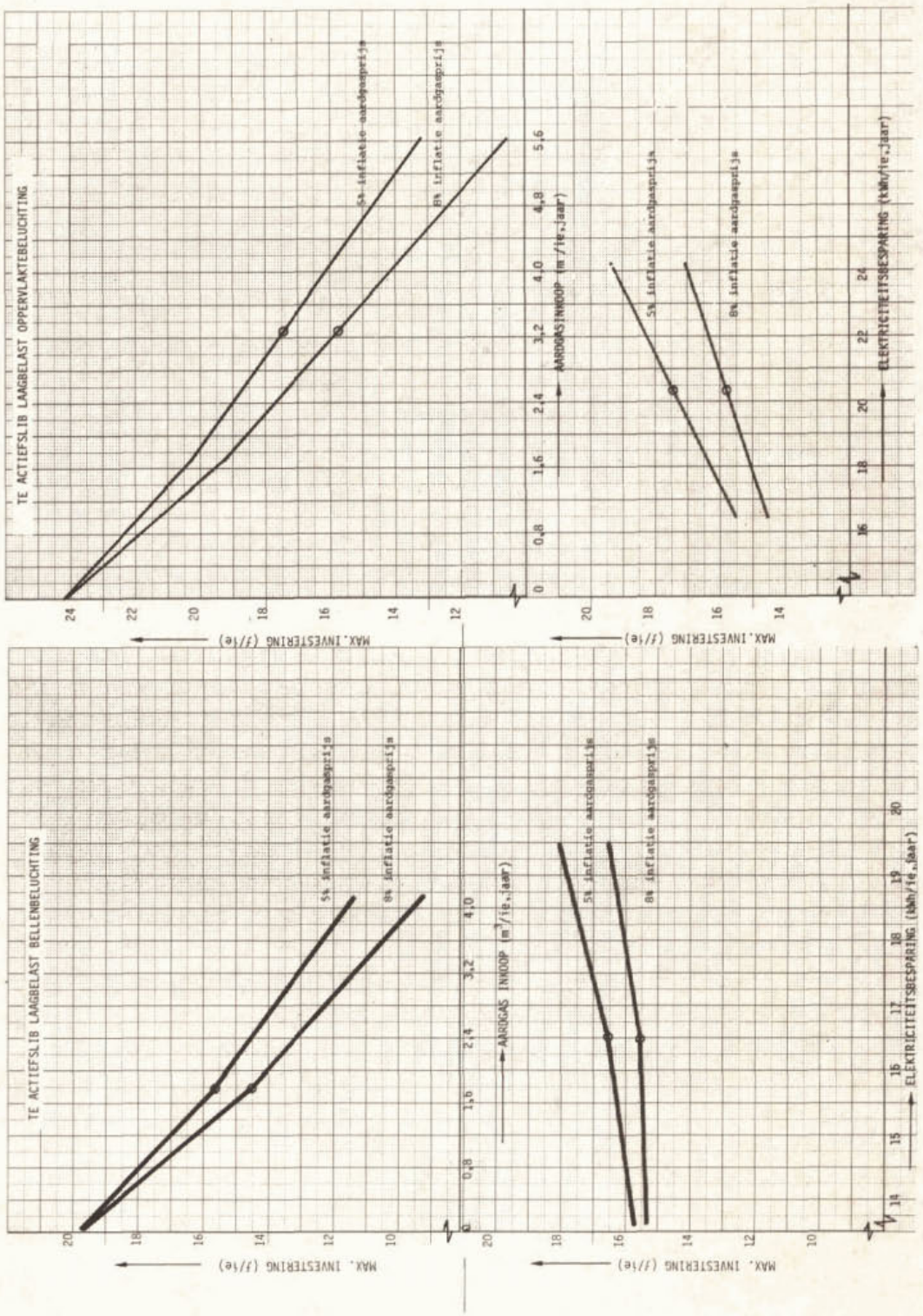

Fig.33. Kostenmodel: gevoeligheid aardgasinkoop en electriciteitsbesparing

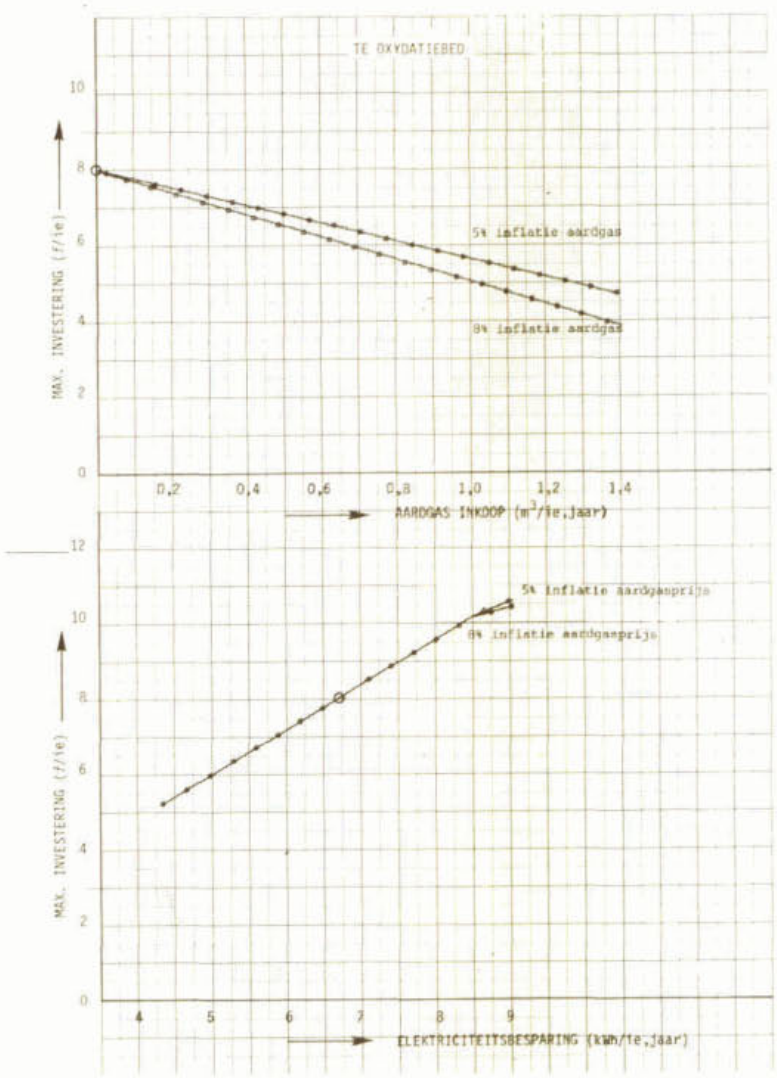

Fig. 34. Kostenmodel: gevoeligheid aardgasinkoop en electriciteitsbesparing

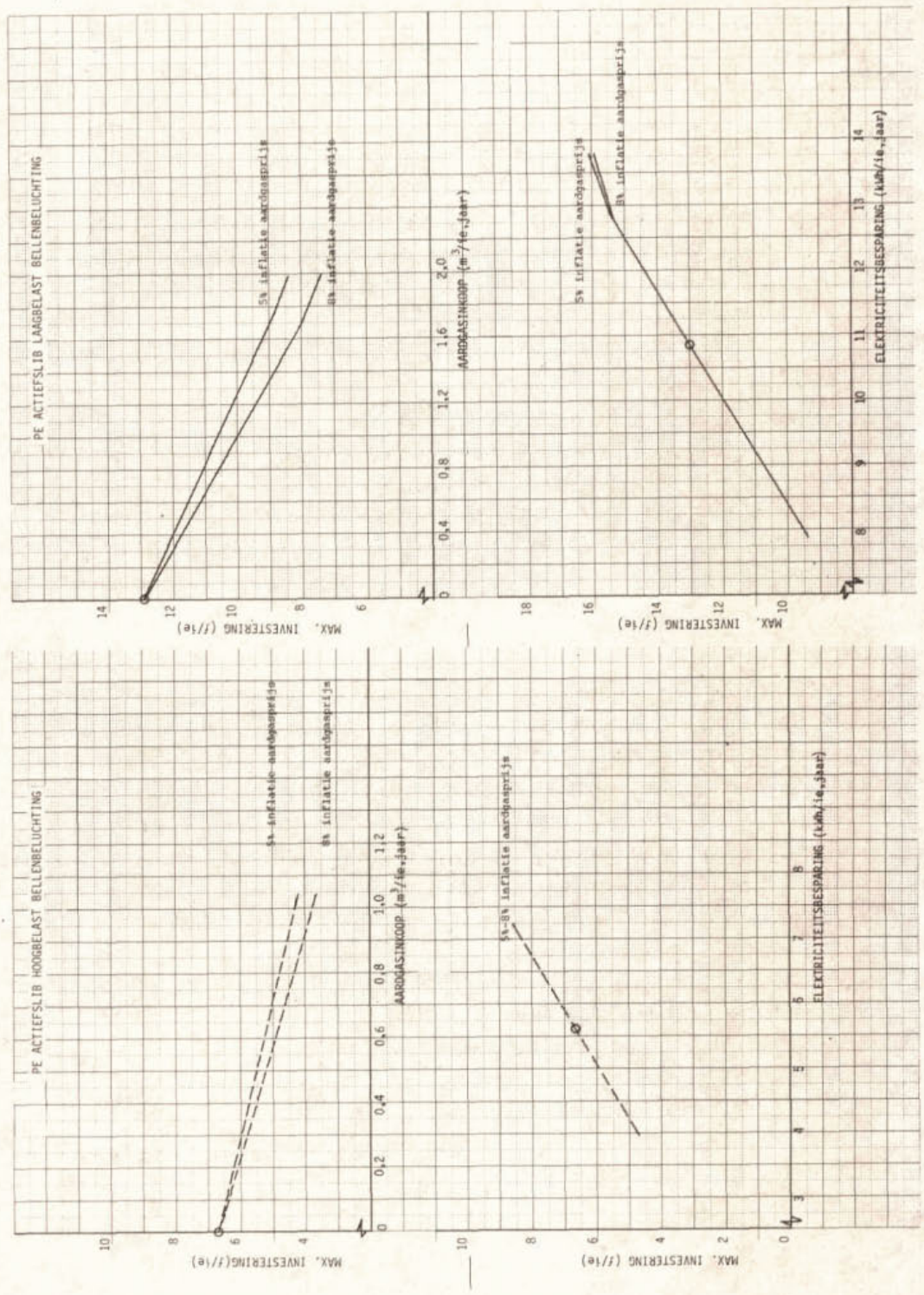

Fig.35. Kostenmodel: gevoeligheid aardgasinkoop en electriciteits-besparing

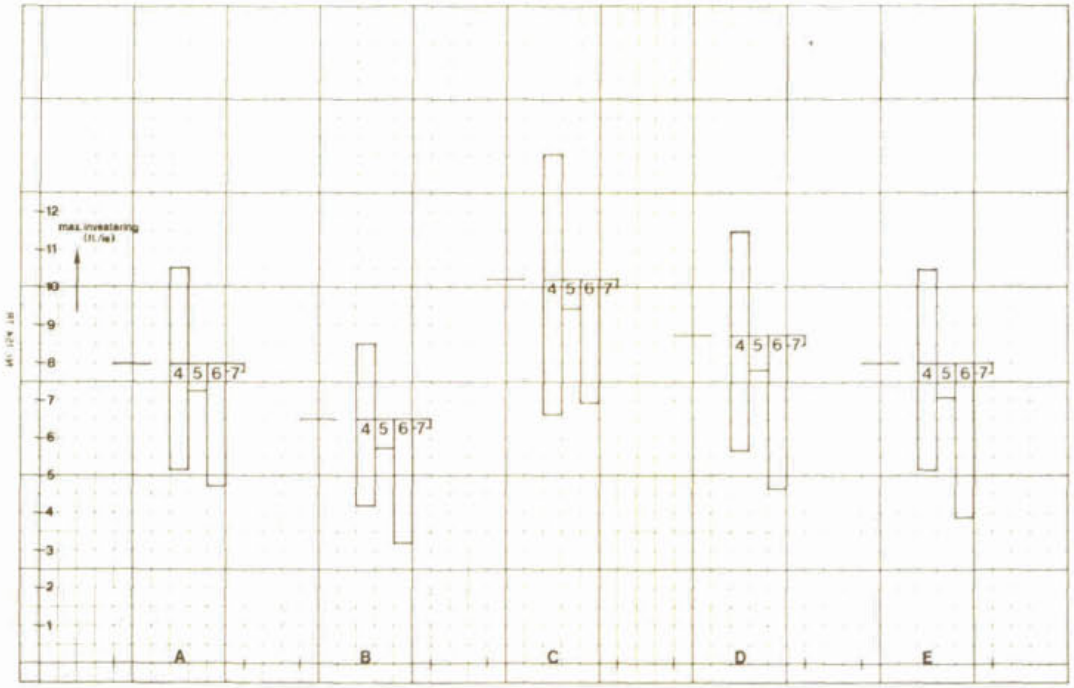

Fig. 36. Kostenmodel: overzicht gevoeligheidsanalyses; TE oxydatie-bed

Verklaring:

	A	B	C	D	E
elektr.prijs excl. brandstofverg. (ct)	9,3	6,5	13,5	9,3	9,3
inflatie algemeen (%)	5	5	5	5	5
inflatie brandstofprijs (%)	5	5	5	8	5
inflatie aardgasprijs (%)	5	5	5	8	8

1. krachtrendement gasmotor
2. warmterendement gasmotor
3. krachtbehoefte beluchting
4. krachtbehoefte over onderd.
5. warmtebehoefte
6. gistingsgasproduktie
7. spuigasverlies.

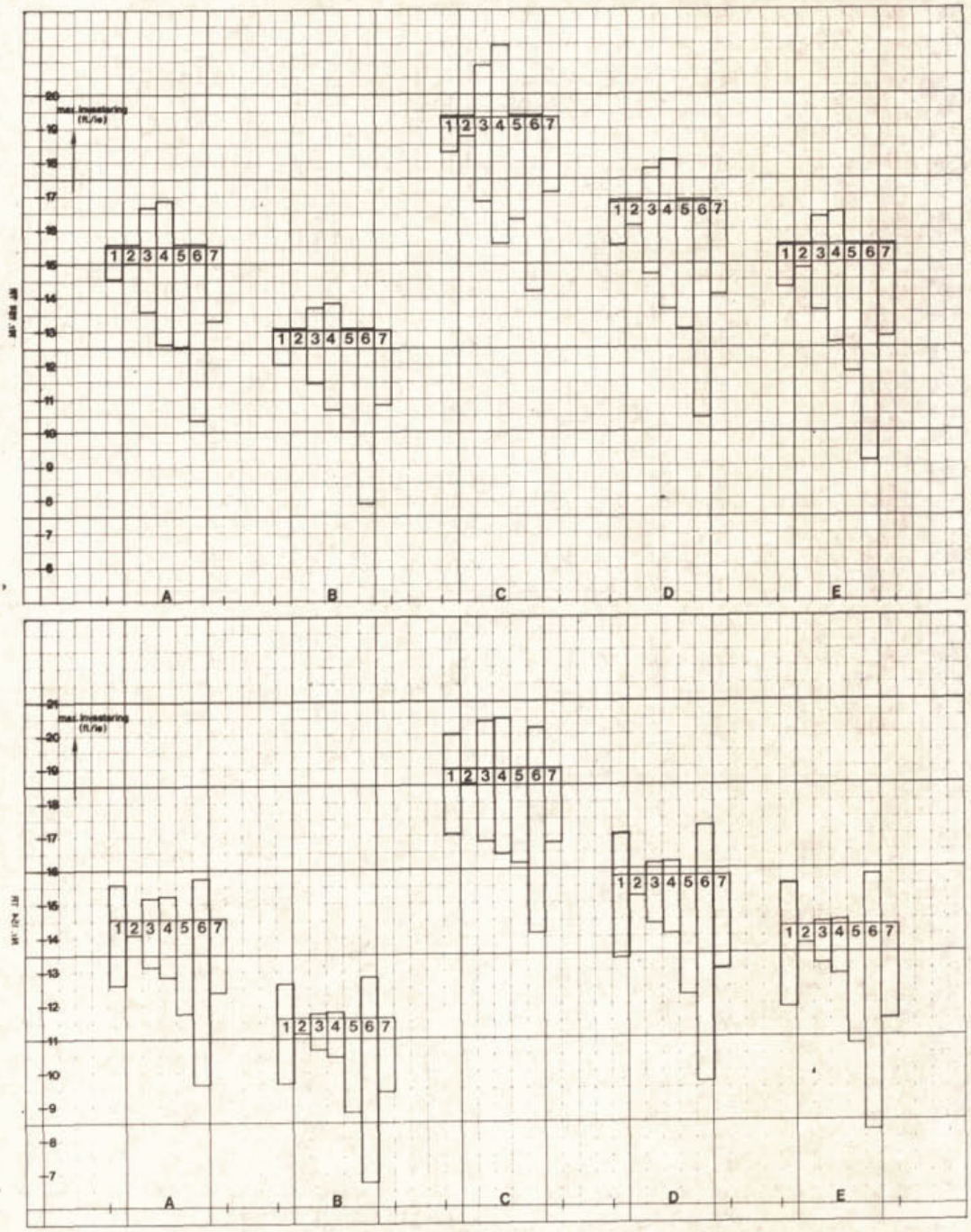

Fig.37. Kostenmodel: overzicht gevoeligheidsanalyses; TE actiefslib hoogbelast bellen- (boven) en oppervlaktebeluchting (onder)

Verklaring:

	A	B	C	D	E
elektr.prijs excl. brandstofverg. (ct)	9,3	6,5	13,5	9,3	9,3
inflatie algemeen (%)	5	5	5	5	5
inflatie brandstofprijs (%)	5	5	5	8	5
inflatie aardgasprijs (%)	5	5	5	8	8

1. krachtrendement gasmotor
2. warmterendement gasmotor
3. krachtbehoefte beluchting
4. krachtbehoefte over onderd.
5. warmtebehoefte
6. gistingsgasproduktie
7. spuigasverlies.

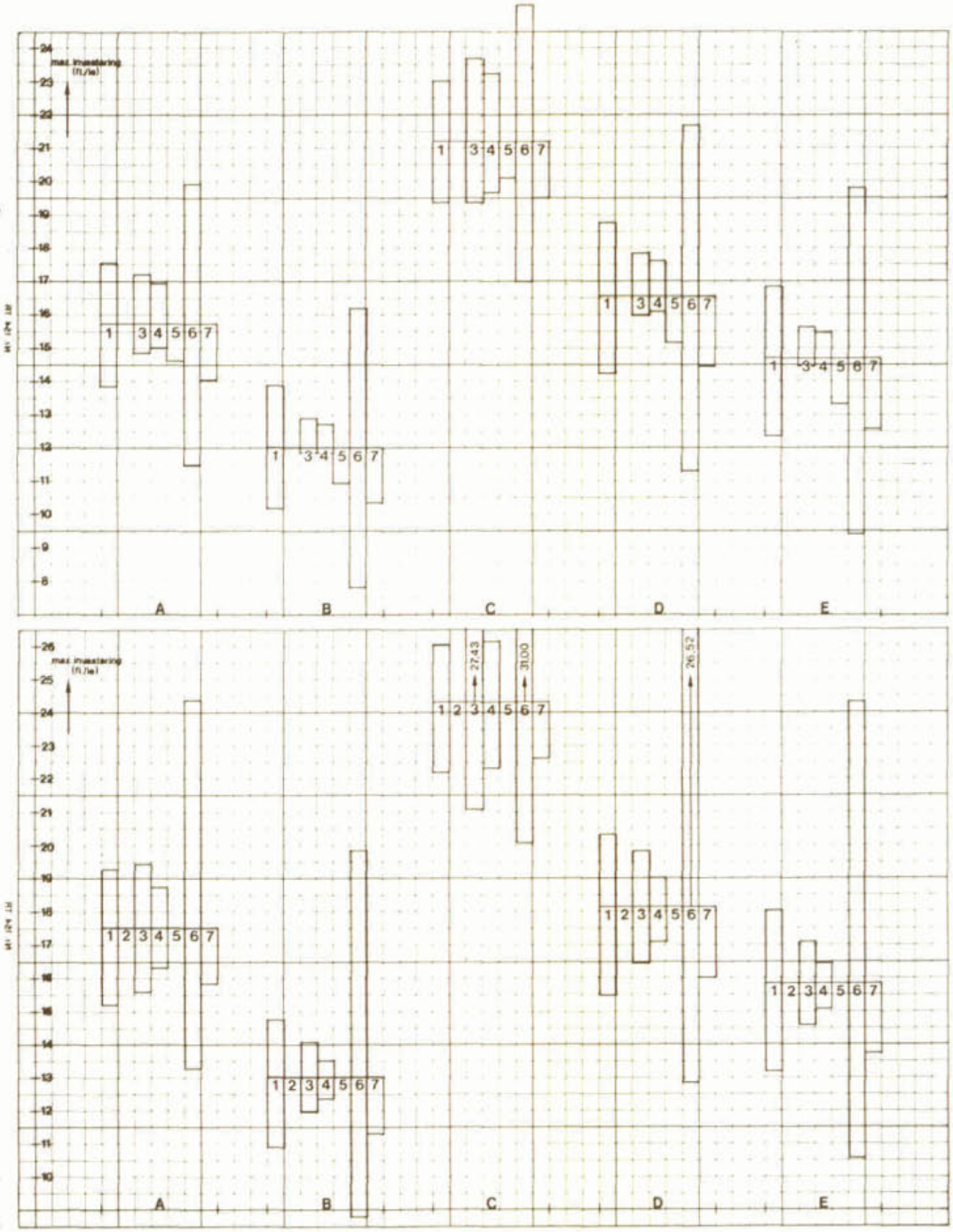

Fig.38. Kostenmodel: overzicht gevoeligheidsanalyses; TE actiefslib laagbelast bellen- (boven) en oppervlaktebeluchting (onder)

Verklaring:

	A	B	C	D	E
elektr.prijs excl. brandstofverg. (ct)	9,3	6,5	13,5	9,3	9,3
inflatie algemeen (%)	5	5	5	5	5
inflatie brandstofprijs (%)	5	5	5	8	5
inflatie aardgasprijs (%)	5	5	5	8	8

1. krachtrendement gasmotor
2. warmterendement gasmotor
3. krachtbehoefte beluchting
4. krachtbehoefte over onderd.
5. warmtebehoefte
6. gistingsgasproduktie
7. spuigasverlies.

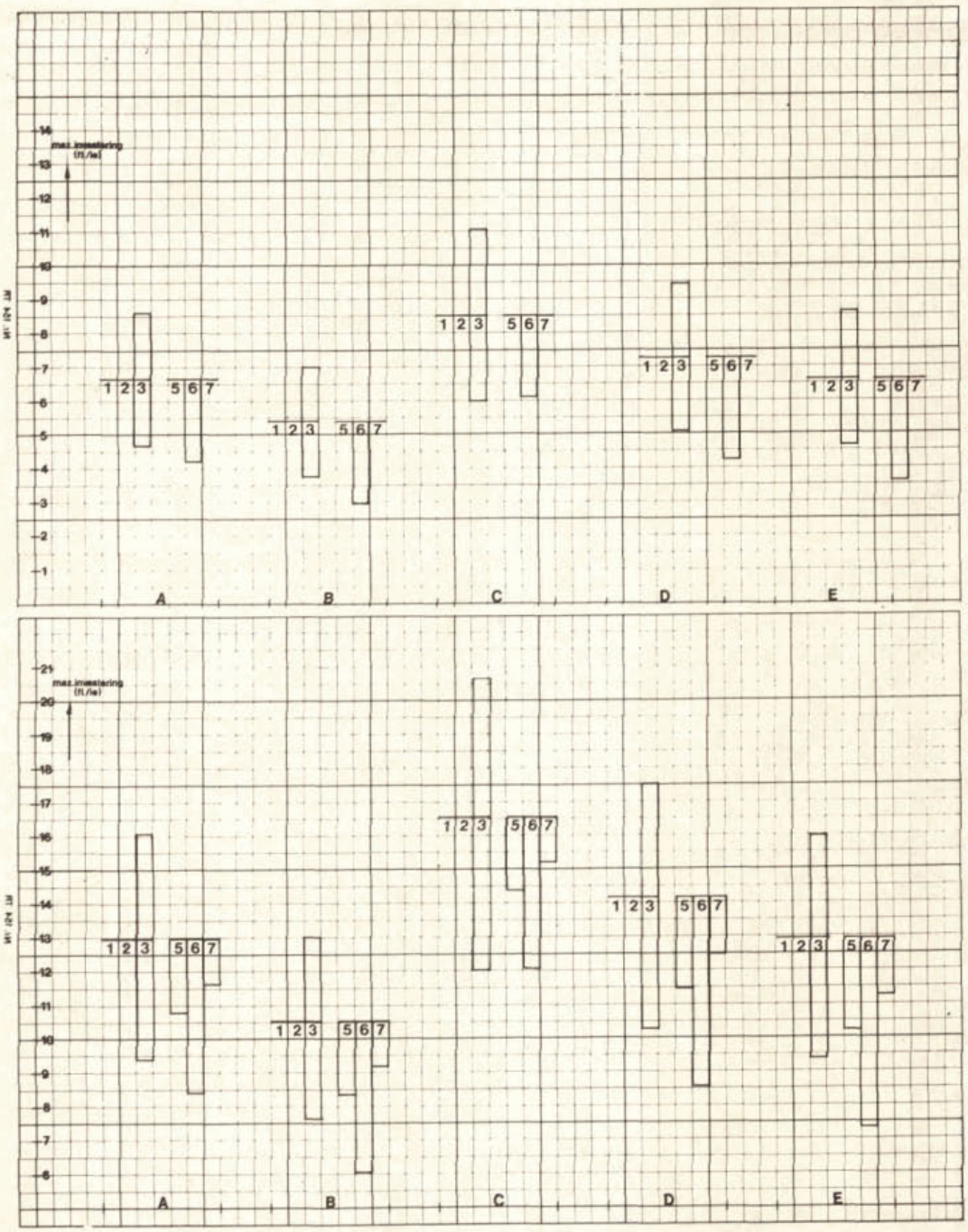

Fig.39. Kostenmodel: overzicht gevoeligheidsanalyses; PE actiefslib hoog- (boven) en laagbelast (onder) bellenbeluchting

Verklaring:

	A	B	C	D	E
elektr.prijs excl. brandstofverg. (ct)	9,3	6,5	13,5	9,3	9,3
inflatie algemeen (%)	5	5	5	5	5
inflatie brandstofprijs (%)	5	5	5	8	5
inflatie aardgasprijs (%)	5	5	5	8	8

1. krachtrendement gasmotor
2. warmterendement gasmotor
3. krachtbehoefte beluchting
4. krachtbehoefte over onderd.
5. warmtebehoefte
6. gistingsgasproduktie
7. spuigasverlies.