

1985-02_optimalisatie-gistingsgasproduktie

stora

Optimalisatie van de gistingsgasproduktie

85-2

stora

postbus 80200, 2508 GE den haag

☎ 070-512710

stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

Optimalisatie van de gistingsgasproduktie

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

Inhoud	I	- II
Ten geleide		III
1 SAMENVATTING	1	- 4
2 INLEIDING	5	- 6
3 HET SLIBGISTINGSPROCES	7	- 11
3.1 De ontwikkeling van het slibgistingproces		7
3.2 Het verloop van het afbraakproces	8	- 9
3.3 De snelheidsbepalende stap van het gistingproces	9	- 10
3.4 De afbreekbaarheid van zuiveringslib	10	- 11
4 INVLOED VAN PROCESFACTOREN EN BEDRIJFSVOERING OP DE GASPRODUKTIE	12	- 27
4.1 Invloed van de verblijftijd	12	- 16
4.2 Invloed van de temperatuur	16	- 17
4.3 Invloed van de mengintensiteit	18	- 19
4.4 Invloed van de indikkingsgraad	19	- 20
4.5 Beschikbaarheid van voedingsstoffen		20
4.6 Invloed van zuurgraad en alkaliteit	20	- 21
4.7 Invloed van toxische stoffen	21	- 23
4.8 Eentrapsgisting of tweetrapsgisting		23
4.9 Sturing en controle van het gistingproces	24	- 25
4.10 Beoordeling van het gistingrendement	25	- 26
4.11 Gistingsexperimenten	26	- 27
4.12 Vergisting van andere substraten dan zuiveringslib		27
5 DE TOEPASSING VAN NIEUWE TECHNIEKEN IN DE SLIBGISTING	28	- 34
5.1 Toepassing van enzymen	28	- 29
5.2 Voorbehandeling van het verse slib	29	- 31
5.2.1 pasteurisatie		29
5.2.2 thermische voorbehandeling bij meer dan 100°C	29	- 30
5.2.3 thermofiele aërobe voorbehandeling	30	- 31
5.3 Thermofiele slibgisting	31	- 32
5.4 Anaërobe processen met biomassaretentie		32
5.5 Tweefasen-gisting	32	- 34
6 INVENTARISATIE VAN NEDERLANDSE SLIBGISTINGSGEGEVENS	35	- 44
6.1 Methodiek		35
6.2 Resultaten van de inventarisatie	35	- 36
6.3 Bespreking van de gegevens uit het totaalbestand	37	- 38
6.4 Verschillen tussen de zuiveringsprocessen	38	- 39
6.5 Regressieanalyse van de bedrijfsgegevens	39	- 43
6.5.1 invloeden op de verslibproductie		39
6.5.2 relatie tussen verblijftijd en specifieke gas- productie	39	- 42
6.5.3 regressieanalyse van overige parameters	42	- 43
6.6 Invloed van niet-kwantificeerbare factoren op het gistingproces	43	- 44

7	ENERGETISCHE EN FINANCIËLE EVALUATIE VAN DE ONDERZOCHE GISTINGSTECHNIEKEN	45 - 60
7.1	Uitgangspunten van de evaluatie	45
7.2	Variatie van procesfactoren in het conventionele gistingsproces	46 - 53
7.2.1	de optimale verblijftijd	46 - 48
7.2.2	aanpassing van de gistingstemperatuur	48 - 49
7.2.3	intensieve voorindikking	49 - 51
7.2.4	parallel- en seriebedrijf bij toepassing van meerdere gistingsreactoren	52 - 53
7.3	Toepassing van alternatieve processen	53 - 60
7.3.1	thermische voorbehandeling	53 - 55
7.3.2	aërobe voorbehandeling	55 - 56
7.3.3	tweefasen gisting	56 - 57
7.3.4	thermofiele anaërobe gisting	57 - 60
8	CONCLUSIES	61 - 62
9	AANBEVELINGEN	63
10	LITERATUURLIJST	64 - 67
Bijlagen		
1.	Methoden voor de berekening van de afgebroken fractie organische stof	69
2.	Geïnterpreteerde kenmerken van de Nederlandse gistingsinrichtingen	71 - 72
3.	Bedrijfsgegevens van de Nederlandse gistings- inrichtingen gerangschikt per zuiveringsproces en gistingssysteem	73
4.	Frequentieverdeling van de onderzochte parameters in het totale bestand gistinginstallaties (alle procestypen)	75 - 85
5.	Regressieanalyse van gistingsrendement en verblijftijd volgens eerste-orde reactiekinetiek	87 - 88
6.	Berekening warmtebehoefte van het gistingsproces	89 - 90
7.	Grondslagen van de energetische en financiële evaluatie	91 - 93

Ten geleide

In dit rapport wordt een overzicht gegeven van de stand der techniek bij de anaërobe vergisting van zuiveringsslib.

De nadruk daarbij ligt op mogelijkheden tot verhoging van de afbraak van de organische stof, ter vergroting van de gasopbrengst en ter besparing op de inkoop van energie.

Bij het in Nederland meest gangbare proces - hoogbelaste mesofiele gisting met ladingsgewijze slibtoevoer en volledige menging - blijkt nog enige winst mogelijk door aanpassing van bedrijfsvoering en procesparameters.

Van de nieuwe processen blijkt - na globale technisch/economische evaluatie - thermofiele vergisting met warmteterugwinning financieel gunstig.

Het onderzoek werd door het algemeen bestuur van de STORA op advies van de OAC* opgedragen aan Witteveen + Bos Raadgevend Ingenieursbureau, dat namens de STORA begeleid werd door een commissie bestaande uit: ir. J. Boschloo (voorzitter), ir. A.H. Dirkzwager, prof.dr. P.G. Fohr en ir. A. Kiestra.

Rijswijk, augustus 1985.

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
prof.dr. P.G. Fohr, ir. R. Karper, drs. S.P. Klapwijk, ir. A.A. van der Koppel, dr. E.J.M.
Kobus, ir. C.H. Kuggeleijn, ir. J.S. Kuyper, ir. Tj. Meijer, ir. H.M.J. Scheltinga,
dr.ir. D.W. Scholte Ubing, ir. J. van Selm, drs. A.A. Wismeijer (leden)

1 SAMENVATTING

Bij de reiniging van afvalwater in rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) ontstaat zuiverings-slib als bijproduct. Voorafgaande aan afzet of verdere behandeling kan het slib in een gistingsproces worden gestabiliseerd. Bij dit proces ontstaat gistingsgas dat als brandstof kan worden gebruikt. In dit onderzoek is nagegaan op welke wijze het gistingsproces kan worden bedreven en welke variaties op het gistingsproces mogelijk zijn om te komen tot een zo groot mogelijke gasopbrengst bij minimale kosten.

Procesvoering en gasproductie (literatuur)

Stabiele slibgisting vergt tenminste 5 à 10 dagen verblijftijd. Tot circa 10 dagen neemt de gasopbrengst sterk toe, daarboven niet veel meer. Verschillende referenties melden een extra gasopbrengst van 5-25% bij toename van de verblijftijd van 20 tot 40 à 60 dagen. Over de relatie gasproductie - verblijftijd bij meer dan 20 dagen is weinig informatie beschikbaar. De gistingstemperatuur heeft optima bij 33-35°C en circa 55°C voor respectievelijk het mesofiele en thermofiele gebied. In de buurt van deze optima is de gasproductie weinig temperatuurafhankelijk. Voor de mesofiele gisting betekent dit dat de gebruikelijke gistingstemperatuur van 33°C optimaal is en dat kleine afwijkingen van deze waarde weinig effect hebben. Temperatuurschommelingen hebben minder effect dan vroeger werd aangenomen.

De optimale pH voor slibgisting bedraagt 6,5-7,5. Een buffercapaciteit van 70 meq CaCO_3 /l, of een molaire verhouding tussen bicarbonaat en vetzuren van minimaal 1:0,7 is wenselijk voor een goede stabiliteit. De gisting kan geremd worden door toxische stoffen, zoals met name gehalogeneerde koolwaterstoffen; voor rwzi's die overwegend huishoudelijk afvalwater verwerken is een dergelijke remming van de slibgisting niet te verwachten.

Menging is essentieel om de hele reactorinhoud gelijkmatig te benutten, om plaatselijke verstoringen van het proces te voorkomen en om optimaal contact tussen biomassa en substraat te garanderen. Algemeen geldende richtlijnen voor systeemkeuze, dimensionering en bedrijfsvoering van de menginrichting, die optimale gasproductie garanderen, zijn niet gevonden. Het verdient aanbeveling de menging te controleren door op verschillende diepten de reactorinhoud te analyseren.

Optimalisering van de voorindikking reduceert het slibvolume, waardoor de verblijftijd in de gistingsreactor kan worden verlengd, of een gelijke verblijftijd kan worden bereikt in een kleinere reactor. Er is in het gebied tot circa 10% d.s. geen nadelig effect van de verhoogde concentratiedroge stof op het afbraakrendement in de slibgisting. De verblijftijd is dus maatgevend en niet de drogestofbelasting (kg d.s. toevoer/m³ reactorvolume per dag). Tweetraps-gistingsinrichtingen met een onverwarmde, niet gemengde tweede trap worden in nieuwe rwzi's niet meer toegepast, omdat de beoogde naginging en indikking niet goed kunnen worden gecombineerd. Wanneer de gistingsruimte verdeeld is over meerdere reactoren, is bij een zelfde volume en totale verblijftijd door serieschakeling van de

reactoren een hoger rendement haalbaar dan bij parallelbedrijf. Voorwaarde is dat de verblijftijd in met name de eerste trap lang genoeg is voor stabiele gisting.

Voor bepaling van het omzettingsrendement, berekend als specifieke gasproductie of afbraakpercentage van de organische stof, is debietmeting en bemonstering van de inkomende en uitgaande slibstroom nodig. Met name de bemonstering van vers slib is moeilijk uitvoerbaar. Wanneer optimalisatie van de gasproductie wordt nagestreefd is kennis van het gistingsrendement essentieel, zodat in veel gevallen aanpassing van het bemonsteringsprogramma nodig zal zijn. Als basis voor de berekening van het gistingsrendement heeft het chemisch zuurstofverbruik (CZV) voordelen boven het organische stofgehalte (gloeiverlies) van het slib.

Eenvoudige gistingsproeven kunnen bruikbare informatie geven over de maximale gasproductie die uit een gegeven slib kan worden verkregen. Vergelijking met de actuele gasproductie kan aanwijzingen geven over het functioneren van de gistingsinrichting.

Toevoeging aan de slibgisting van andere substraten dan zuiverings-slib kan een extra bijdrage leveren aan de gasproductie. Vergisting is het meest aantrekkelijk voor substraten die anders aëroob zouden moeten worden afgebroken ten koste van een verhoogd zuurstofverbruik.

Analyse van Nederlandse gegevens

Om een beeld te krijgen van de gistingsgasproductie in Nederland en van relaties tussen bedrijfsvoering en gasopbrengst, is een inventarisatie uitgevoerd van de rwzi's met slibgisting. Hiertoe zijn jaargemiddelden uit de periode 1979-1983 gebruikt, aangevuld met ontwerpgegevens en informatie van de waterkwaliteitsbeheerders. De inventarisatie heeft 99 rwzi's opgeleverd met verwarmde slibgisting. De beschikbaarheid van betrouwbare technologische gegevens loopt sterk uiteen. De resultaten vertonen een aanzienlijke spreiding, die het noodzakelijk heeft gemaakt selectie toe te passen op grond van de relatie tussen gasproductie en afbraak van organische stof.

De gistingstemperatuur ligt in vrijwel alle rwzi's dicht bij 33°C. De specifieke gasproductie bedraagt in Nederland gemiddeld 0,44 m³ per kg toegevoerde organische stof. Invloeden van het type zuiveringsproces, het gistingsproces (ééntraps/tweetraps) en van de omvang van de rwzi op de specifieke gasproductie zijn niet waargenomen. Door de grotere verslibproductie per inwonerequivalent van actief-slibsystemen (gemiddeld 63 g d.s./i.e.d) in vergelijking met oxydatiebedden (54 g d.s./i.e.d), leveren actief-slibinrichtingen per i.e. gemiddeld meer gas, namelijk 20 l/i.e.d tegenover 14 l/i.e.d. De afbraak van organische stof bedraagt gemiddeld 43%. Recente gegevens van Westduitse rwzi's vermelden vrijwel hetzelfde gistingsrendement. Deze waarnemingen geven aan dat aanzienlijk hogere waarden, die in veelvuldig gehanteerde handboeken worden genoemd, niet met de realiteit overeenstemmen.

Regressieanalyse van de Nederlandse gegevens levert een relatie tussen verblijftijd en specifieke gasproductie met correlatie coëfficiënt $r=0,73$. Volgens deze relatie zou de bruto gasproductie bij 30 dagen gisting 13%, bij 40 dagen 20% en bij 60 dagen 28% hoger zijn dan bij 20 dagen verblijftijd.

Nieuwe technieken in de slibgisting

Continue dosering van enzympreparaten heeft in gistingssproeven geen duidelijk positief effect opgeleverd. Eenmalige toepassing kan zin hebben voor het verkorten van de inwerktijd in systemen met nog onvoldoende ontwikkelde of gestoorde bacteriepopulaties.

Pasteurisatie bij 70°C is in langdurig Zwitsers praktijkonderzoek niet in staat gebleken de afbreekbaarheid van zuiveringsslib te vergroten. Hittebehandeling bij meer dan 100°C kan de afbreekbaarheid van secundair slib vergroten, waarschijnlijk door het openbreken van intacte bacteriecellen. Bij 175°C is 70% meeropbrengst waargenomen.

Aërobe thermofiele voorbehandeling gevolgd door mesofiele gisting heeft als voordelen grote processtabiliteit, verbetering van de ontwaterbaarheid en pasteurisatie van het slib. Over de invloed van de aërobe trap op de gasproductie variëren de gegevens van sterk afgenomen gasopbrengst tot circa 8% verhoging.

Bij thermofiele gisting zijn de snelheid en volledigheid van de afbraak hoger dan bij mesofiele gisting. Het uitgegiste slib is vrij van ziektekiemen en goed ontwaterbaar. Voor opwarming van het verse slib is veel warmte nodig en het proces is minder stabiel dan mesofiele gisting. Toepassing in de praktijk vindt momenteel slechts in enkele buitenlandse rwzi's plaats.

Tweefasengisting is ontwikkeld vanuit de gedachte dat verzuring en methaanvorming zo verschillend van aard zijn dat zij het beste kunnen worden uitgevoerd in aparte reactoren, elk aangepast aan het betrokken proces. Beide fasen worden gescheiden door de verblijftijd in de verzuringsreactor te beperken tot maximaal twee dagen, waardoor groei van methaanbacteriën onmogelijk wordt gemaakt. Deze korte verblijftijd maakt echter volledige hydrolyse in de eerste trap onmogelijk, zodat de fasenscheiding onvolledig is en een deel van de hydrolyse toch in de methaanreactor moet plaatsvinden. De eerste experimenten met tweefasengisting wijzen op circa 25% snellere omzetting dan bij eentrapsgisting. Praktijkgegevens zijn echter nog niet beschikbaar.

Energetische en financiële evaluatie

Om de verzamelde informatie te evalueren en verschillende technieken met elkaar te vergelijken, zijn voor een hypothetische rwzi de energetische en financiële consequenties van een aantal gistingssystemen uitgerekend. Uitgangspunt vormt een actief-slibinrichting van 80.000 i.e. met energieopwekking uit gistingsgas en een conventionele eentrapsgisting in combinatie met een voorindikker. Voor deze installatie is nagegaan welke invloed variatie van de belangrijkste parameters heeft op de gasproductie en de economie van het systeem. Tevens is toepassing van andere stabilisatieprocessen vergeleken met de uitgangssituatie. Voor enkele belangrijke varianten is het schaaleffect onderzocht door de berekening tevens uit te voeren voor een capaciteit van 200.000 i.e.

De gunstigste combinatie van energieopbrengst en exploitatiekosten voor de uitgangssituatie wordt gevonden bij verblijftijden rond 25

dagen. Bij kortere verblijftijden is de besparing op de bouwkosten gering in vergelijking met de lagere electriciteitsopbrengst en de noodzaak aardgas in te kopen. Langere verblijftijden voegen slechts weinig toe aan de gasopbrengst. Uit de berekeningen volgt dat in koude winterperioden verlaging van de gistingstemperatuur tot 25°C gunstig kan zijn omdat de aardgasbesparing opweegt tegen de verminderde electriciteitsproductie uit gistingsgas.

Doorgerekend is of gescheiden indikking van primair slib door gravitatie en secundair slib door flotatie voordeel oplevert ten opzichte van de gebruikelijke gezamenlijke gravitatieindikking. Voor 80.000 i.e. zijn de extra exploitatiekosten van deze intensieve indikking aanzienlijk hoger dan de besparingen. Bij 200.000 i.e. is gescheiden indikking met flotatie van secundair slib financieel iets minder gunstig dan conventionele indikking.

Thermische voorbehandeling bij 175°C heeft een grote warmtebehoefte die niet wordt gecompenseerd door de extra gasopbrengst. De hoge exploitatiekosten maken het proces nog onvoordeliger. Aërobe voorbehandeling geeft in de gunstigste gevallen 8-10% verhoging van de gasopbrengst. Deze extra gasproductie weegt niet op tegen het hoge electriciteitsverbruik van de aërobe reactor.

Twefasengisting kan volgens de eerste onderzoeksgegevens de verblijftijd verkorten van 20 dagen tot 2 + 12 dagen. Bij een zuiveringscapaciteit van 80.000 i.e. lijkt de besparing door het kleinere totale reactorvolume echter niet op te wegen tegen de kosten van een aparte verzuringsreactor.

Thermofiele gisting zonder warmteterugwinning uit uitgegist slib is financieel ongunstig door het hoge aardgasverbruik. Wanneer de opwarming van vers slib voor de helft door terugwinning van warmte uit het uitgegiste slib kan worden verkregen, is de warmteproductie van de gasmotoren voldoende om in de resterende warmtebehoefte te voorzien. Thermofiele gisting zou dan door de lagere investeringskosten en de grotere electriciteitsproductie financieel gunstiger zijn dan mesofiele gisting.

Tijdens de reiniging van afvalwater in rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's) ontstaat zuiveringsslib als bijproduct. Dit slib bevat de vaste bestanddelen die in verschillende fasen van het zuiveringsproces van het water zijn afgescheiden. Vers slib is moeilijk ontwaterbaar en bij berging in de open lucht treedt stankbezwaar op. De onaangename eigenschappen van zuiveringsslib kunnen grotendeels worden weggenomen door biologische afbraak van de organische bestanddelen. Dit afbraakproces wordt stabilisatie genoemd. Een veel toegepaste vorm van slibstabilisatie is de anaërobe stabilisatie of slibgisting. Door dit proces wordt de organische stof bij afwezigheid van zuurstof grotendeels omgezet in methaan en kooldioxide. Het geproduceerde gistingsgas, dat voor 60 à 70% uit methaan bestaat, wordt in de regel benut om de gistingstanks te verwarmen tot de voor het afbraakproces gunstige temperatuur van 30-37°C; een eventueel gasoverschot wordt afgefakkeld.

Door de gestegen energieprijzen is de laatste tien jaar sterke belangstelling ontstaan voor de bouw van installaties voor warmtekrachtkoppeling, die gistingsgas als brandstof gebruiken. Door efficiënt gebruik te maken van de energieinhoud van het gistingsgas, kunnen deze installaties voorzien in een groot deel van de warmte- en krachtbehoefte van de rwzi's, zodat een aanzienlijke besparing op de energieinkoop kan worden bereikt. De technische en economische aspecten van warmte-krachtkoppeling op rwzi's zijn onderzocht in studies die in eerdere delen van deze reeks beschreven zijn^{40,41}.

In deze studies kwam naar voren dat het niveau van de gasproductie grote invloed heeft op de economische haalbaarheid van warmtekrachtinstallaties. Een vergelijking van literatuurgegevens en een beperkt aantal praktijkwaarden van Nederlandse gistingsinrichtingen leverde aanwijzingen dat de gasproductie in Nederland lager zou zijn dan in het buitenland⁴¹. De bevindingen uit de genoemde studies zijn aanleiding geweest tot een nader onderzoek naar de gasproductie die momenteel in Nederland en daarbuiten wordt bereikt en naar de mogelijkheden tot verhoging van de gasproductie.

In het kader van dit onderzoek wordt een verkenning gemaakt van de stand der techniek en van nieuwe ontwikkelingen in het gistingproces. Op basis van literatuurgegevens wordt nagegaan welke factoren de gasproductie beïnvloeden en op welke wijze sturing van deze factoren de gasopbrengst kan bevorderen. De gasproductie in relatie tot de bedrijfsvoering van de slibgisting en de afvalwaterbehandeling wordt onderzocht in een inventarisatie van de Nederlandse rwzi's. De aldus verkregen gegevens worden tenslotte vergeleken in een energetische en financiële evaluatie, waarin voor een hypothetische rwzi toepassing van een aantal gistingstechnieken wordt doorgerekend.

Het onderzoek is in eerste instantie gericht op optimalisatie van de factoren die een rol spelen in het conventionele gistingproces. Daarnaast wordt nagegaan welke mogelijkheden er zijn om door voorbehandeling van het slib of door toepassing van andere gistingstechnieken een hogere gasopbrengst of een economischer bedrijfsvoering te bereiken dan in het conventionele proces mogelijk is.

Omdat het onderzoek zich primair richt op de gasproductie, zal het effect van de beschouwde factoren op de slibstabilisatie slechts beperkt worden behandeld. Hierbij speelt tevens een rol dat er nog geen overeenstemming is over een eenduidige maat voor de stabilisatiegraad. Om deze redenen worden de eigenschappen van het vergiste

slib niet betrokken bij de financiële vergelijkingen van de verschillende procesvormen.

3 HET SLIBGISTINGSPROCES

3.1 De ontwikkeling van het slibgistingproces

Het gistingproces wordt sinds de twintiger jaren gebruikt voor de stabilisatie van zuiveringsslib. De oorspronkelijke vorm, nog wel toegepast als zogenaamde laagbelaste slibgisting, bestaat uit langdurig verblijf in een onverwarmde tank met minimale menging en gescheiden onttrekking van slibwater en gestabiliseerde droge stof. Stabilisatie werd opgevat als een rijpings- en ontwateringsproces, dat zo rustig mogelijk dient te verlopen.

Uit de ontdekking dat de afbraakprocessen versneld verlopen bij hogere temperatuur en intensieve menging, is de zogenaamde hoogbelaste gisting voortgekomen. Dit is een proces met vrijwel tegengestelde benadering: verwarming, volledige menging en kortere verblijftijden. Deze hoogbelaste gisting bleek in het algemeen betrouwbaarder en economischer dan het oude stabilisatieproces, zodat men al snel is overgegaan tot intensivering van de slibgisting.

Inmiddels wordt op vrijwel alle rwzi's met anaërobe stabilisatie het hoogbelaste mesofiele proces toegepast bij temperaturen tussen 30° en 37°C, met menging door rondpompen, roerders of gasinblazing. Met het gevormde methaangas wordt de gisting verwarmd; het overschot wordt gebruikt voor verwarming van de bedrijfsgebouwen en/of afgefakkeld. Dikwijls is na de hoogbelaste eerste trap een onverwarmde consolideringstank zonder roerwerk geplaatst. Hieruit worden water en slib gescheiden afgetapt, zoals in het laagbelaste systeem.

De ontwikkeling van de gistingstechniek heeft geleid tot per land verschillende tradities van reactorbouw en bedrijfsvoering.

In Engeland worden veel tanks toegepast met drijvende daken ten behoeve van de gasopvang. Door het variabele vloeistofniveau kunnen toevoer en afvoer van slib onafhankelijk gestuurd worden. De tanks zijn meestal cilindrisch van vorm met een geringe hoogte/diameter verhouding. Nagisting vindt plaats in zeer grote consolidatietanks. Reactoren in de West-Duitsland kenmerken zich door toepassing van ovale vormen in tanks groter dan 2.500 m³. Kleinere reactoren zijn cilindrisch, voorzien van een conische bodem of een vlakke bodem met schrapers. Menging vindt plaats door roeren en/of rondpompen. Hoewel gasinblazing door Duitse firma's wordt aangeboden als mengsysteem, wordt deze methode vrijwel niet toegepast. Het slibwater wordt zoveel mogelijk al in de gistingstanks afgescheiden. Dit houdt in dat de menging dikwijls (tijdelijk) beperkt is. Sinds kort begint men echter deze techniek te verlaten en de gisting te bedrijven als volledig gemengd proces.

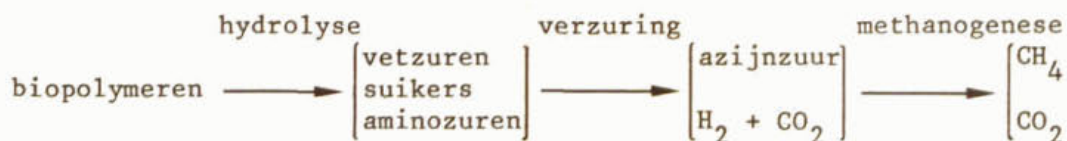
In de V.S. worden veelal kortere verblijftijden toegepast dan in West-Europa (circa 15 dagen). De gisting vindt plaats in lage cilindrische tanks met drijvend dak, voorzien van gasinblazing.

In Nederland is de algemene opzet die van een volledig gemengde reactor met regelmatige ladingswijze slibtoevoer. De afvoer geschiedt via een overstortbak, zodat de reactor met constante inhoud wordt bedreven. Menging vindt in het merendeel van de installaties plaats door gasinblazing. Ongeveer de helft van de installaties is voorzien van een onverwarmde tweede trap. Nadere gegevens over Nederlandse gistinginrichtingen volgen in hoofdstuk 6.

3.2 Het verloop van het afbraakproces

Anaërobe gisting van zuiveringsslib is een complex biochemisch proces waaraan sterk uiteenlopende groepen micro-organismen deelnemen. Het procesverloop wordt beïnvloed door vele fysische en chemische factoren, zoals temperatuur, verblijftijd, menging, substraataanbod, pH, alkaliteit en de aanwezigheid van voedingsstoffen en toxische stoffen.

De organische bestanddelen van het zuiveringsslib zijn merendeels hoogmoleculaire stoffen van biologische oorsprong. De afbraak van deze stoffen verloopt via een aantal opeenvolgende stappen die elk door specifieke bacteriesoorten worden uitgevoerd.



De grote moleculen van de eiwitten, vetten en koolhydraten in het slib kunnen niet door de bacteriecelwand binnendringen. Daarom worden ze eerst door uitgescheiden hydrolytische enzymen afgebroken tot brokstukken die in de bacteriecel worden opgenomen. Deze worden via een aantal stapsgewijze afbraakprocessen omgezet in azijnzuur, CO_2 , H_2 en enkele afvalstoffen zoals NH_3 en H_2S .

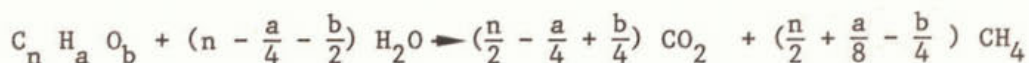
De hydrolyse en afbraak tot azijnzuur, tesamen de gemengd zure gisting genoemd, worden uitgevoerd door een heterogene groep facultatief- en obligaat anaërobe organismen. De energie die per omgezette hoeveelheid substraat voor deze bacteriën beschikbaar komt, is vrij groot, zodat de bacteriën op opgelost substraat snel kunnen groeien (delingstijd enkele uren). De buiten de cellen plaatsvindende hydrolyse van hoogmoleculaire verbindingen is echter een langzaam proces.

De laatste stap van de afbraak, de vorming van CH_4 uit CO_2 en H_2 door de splitsing van azijnzuur, wordt uitgevoerd door de strikt anaërobe methaanbacteriën. Deze organismen zijn gevoelig voor milieu-omstandigheden zoals pH, oxydatiepotentiaal, temperatuur en de aanwezigheid van toxische stoffen. De vorming van methaan levert de bacteriën netto zeer weinig energie op, zodat de opbrengstfactor, de groei per omgezette hoeveelheid substraat en de groeisnelheid laag zijn (delingstijd enkele dagen).

In het gistingssysteem leven de methaanbacteriën in een hechte symbiose met de verzuurders, waarbij stofwisselingsprodukten direkt worden doorgegeven en de intermediairconcentraties laag blijven. Hierdoor wordt voorkomen dat remming optreedt door de ophoping van stofwisselingsprodukten (produktterugkoppeling).

Door ongunstige procesomstandigheden zoals stootbelastingen, temperatuurfluctuaties en toxische stoffen kan het echter voorkomen dat de methaanbacteriën niet in staat zijn de aangeboden vetzuren volledig om te zetten in methaan. Hierdoor stijgen de vetzuurconcentraties. In ernstige gevallen kunnen vetzuurgehalten worden bereikt die in combinatie met de lage pH toxisch zijn voor de methaanbacteriën, zodat de methaanvorming geheel tot stilstand komt. Men spreekt dan van een verzuurde gisting.

De relatie tussen de hoeveelheid afgebroken organische stof en het geproduceerde gistingsgas wordt geheel bepaald door de samenstelling van de organische stof. Deze relatie is vastgelegd in de formule van Buswell:



Op grond van de gemiddelde samenstelling van vetten, eiwitten en koolhydraten volgt uit de formule van Buswell de volgende gasopbrengst:

	gasproductie (l/kg afgebroken organische stof)	% CH ₄	% CO ₂
koolhydraten	790	50	50
eiwitten	700	71	29
vetten	1250	68	32

Omdat een gedeelte van het gevormde CO₂ opgelost en als HCO₃⁻ in de vloeistof blijft, is het CO₂-aandeel in de gasopbrengst iets lager dan berekend. Omdat zuiveringsslib altijd uit een mengsel van de genoemde bestanddelen bestaat, bedraagt de gasproductie in de praktijk circa 900-1100 l/kg afgebroken organische stof, met ongeveer 70% CH₄.

De relatie tussen gasproductie en afbraak van organische stof kan ook worden berekend op basis van CZV. Omdat aan het gistingssysteem geen oxyderende of reducerende stoffen worden toegevoegd, correspondeert de afname van de slib-CZV met de CZV van het gevormde methaan. Bij 33°C en atmosferische druk bedraagt de verhouding 2,55 g CZV-afname per liter geproduceerd methaan.

3.3 De snelheidsbepalende stap van het gistingproces

De lage groeisnelheid en de grote gevoeligheid van de methaanbacteriën in vergelijking met de verzuurders hebben geleid tot de veronderstelling dat methaanvorming de limiterende reactiestap in de gisting is. Bij vergisting van opgelost substraat, dat niet gehydrolyseerd hoeft te worden, is dit juist. In een slibgisting zonder remmende reactie-omstandigheden of extreem korte verblijftijd (minimaal 10 dagen) is de methanogene capaciteit echter ruim voldoende om de gevormde vetzuren om te zetten in methaan en vormt de hydrolyse van moeilijk afbreekbare verbindingen de belemmerende factor voor verdere omzetting. Dit blijkt ondermeer uit de volgende gegevens:

- bij verkorting van de verblijftijd daalt het rendement waarmee organische stof wordt omgezet in gistingsgas. Bij verblijftijden van minimaal 7 dagen gaat deze verminderde gasopbrengst echter niet samen met ophoping van vetzuren. Dit betekent dat niet de methaanvorming maar de hydrolyse (met name die van vetten) beperkend is voor het rendement van de omzetting (zie 4.1);
- in een normaal verlopend slibgistingproces met 40% omzetting van organische stof in gas en een effluent-vetzuurgehalte van enkele honderden mg/l, is op basis van CZV slechts enkele procenten van de

hydrolyseprodukten als vetzuur in het effluent aanwezig. Dit betekent dat de omzetting van vetzuren in methaan aanzienlijk meer volledig is dan de hydrolyse van organisch materiaal, namelijk meer dan 90% tegenover ongeveer 40%;

- in een slibgistingsexperiment werd door toevoeging van een hoeveelheid azijnzuur verviervoudiging van de gasproductie bereikt². Dit betekent dat in de uitgangssituatie de methaanbacteriën een ruime overcapaciteit hadden.

Uiteraard stellen de trage deling en de gevoeligheid van de methaanbacteriën eisen aan de gistingssomstandigheden. Toch wordt de afbraak van organische stof in zuiveringsslib beperkt door onvolledige hydrolyse van macromoleculaire stoffen en niet door ophoping van de gevormde vetzuren, zodat verhoging van de gasopbrengst meestal zal moeten verlopen via verdergaande hydrolyse.

Door de opbouw van het slibgistingsproces uit vele onderling afhankelijke deelprocessen is een exacte mathematische beschrijving vrijwel onmogelijk. Een sterke vereenvoudiging wordt verkregen door aan te nemen dat de totale omzettingssnelheid slechts afhangt van de langzaamste, snelheidsbepalende stap, namelijk de hydrolyse van macromoleculaire verbindingen. In een onderzoek naar de verzuringsfase van de slibgisting bleek de omzetting goed te worden beschreven door een eerste orde reactiemechanisme⁸. Volgens de gevonden relatie is de afbraaksnelheid evenredig met de concentratie afbreekbare organische stof. Deze relatie zal als model worden gehanteerd in de berekeningen van de hoofdstukken 6 en 7.

3.4 De afbreekbaarheid van zuiveringsslib

Primair slib levert bij vergisting de minste moeilijkheden. Het laat zich vrij gemakkelijk indikken en is sneller afbreekbaar dan secundair slib. Primair slib bevat verschillende componenten die in hun onderlinge verhouding kunnen variëren met de aard van het afvalwater en het toegepaste rioolstelsel. De volgende cijfers geven een globale indruk van de samenstelling¹⁵: lipiden 14 - 34%, proteïne 19 - 27%, vezelbestanddelen 12 - 40%. Naast deze hoofdgroepen komen talloze biochemische afbraakprodukten voor, onder andere de praktisch niet afbreekbare humusverbindingen en looizuren.

De lipiden of vetten zijn in principe een voedingsstof met hoge energie-inhoud. De afbraak van vet is een langzaam proces, zodat bij korte verblijftijden vaak een hoog vetgehalte in het slib wordt waargenomen als teken van onvolledige hydrolyse. De aanwezigheid van traag dispergerende vetklompen en drijfslagen kan de afbraaksnelheid negatief beïnvloeden.

Gegevens over de afbraak van proteïne lopen uiteen. In principe vormen ook eiwitten een zeer algemene, goed afbreekbare voedingsstof, die door protease-enzymen gesplitst kan worden in aminozuren. Er zijn echter ook minder volledige omzettingcijfers gevonden, bijvoorbeeld 20% in een Engels onderzoek¹³. Waarschijnlijk zijn niet alle vormen van eiwit even makkelijk door proteases af te breken.

Plantevezels bestaan uit een netwerk van celluloseketens die kunnen zijn ingebed in was-en/of ligninelagen. De afbraak van de celluloseketens is afhankelijk van de mate waarin ze toegankelijk zijn. Vrije cellulose, bijvoorbeeld papier, is goed afbreekbaar; de afbraak van sterk verhout materiaal, dat rijk is aan het zeer resistente lignine, verloopt echter langzaam.

De hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal in het primaire slib hangt ondermeer af van de huishoudelijke gewoonten van de bevolking en van de mate waarin het slib tijdens verblijf in het riool gemineraliseerd is. Tijdens afbraak in het riool zullen de makkelijk afbreekbare stoffen het eerst verwijderd worden. Hierdoor zal bij rioolstelsels met een lange verblijftijd niet alleen de hoeveelheid slib, maar ook de afbreekbare fractie geringer zijn dan bij kleine stelsels met een geringe bergingscapaciteit. Hoewel de invloed van deze factoren voor zover bekend niet stelselmatig is onderzocht, is het wel aannemelijk dat zij een deel veroorzaken van de verschillen in gasopbrengst die ondanks gelijke procesvoering op verschillende rwzi's kunnen optreden.

Secundair slib is slechter ontwaterbaar en moeilijker af te breken dan primair slib. Als surplus- of humusslib van het aërobe reinigingsproces bestaat het grotendeels uit bacterievlokken met enige ingesloten vaste stof en veel levende en dode micro-organismen. Het is aannemelijk dat de afbreekbare fractie in het surpluslib, die waarschijnlijk afkomstig is van de slijmkapsels, celinhoud en reservestoffen, toeneemt met het aantal levende cellen in het bacterieslib en met de voedingstoestand van de cellen. Beide nemen toe met de slibbelasting, zodat men mag verwachten dat uit een hoogbelast slib per gram organisch materiaal meer gas wordt geproduceerd dan in een systeem met vergaande mineralisatie, waar het slib grotendeels uit gestorven en verteerd materiaal bestaat. De celwanden van actief-slibbacteriën zijn in anaëroob milieu waarschijnlijk niet afbreekbaar.

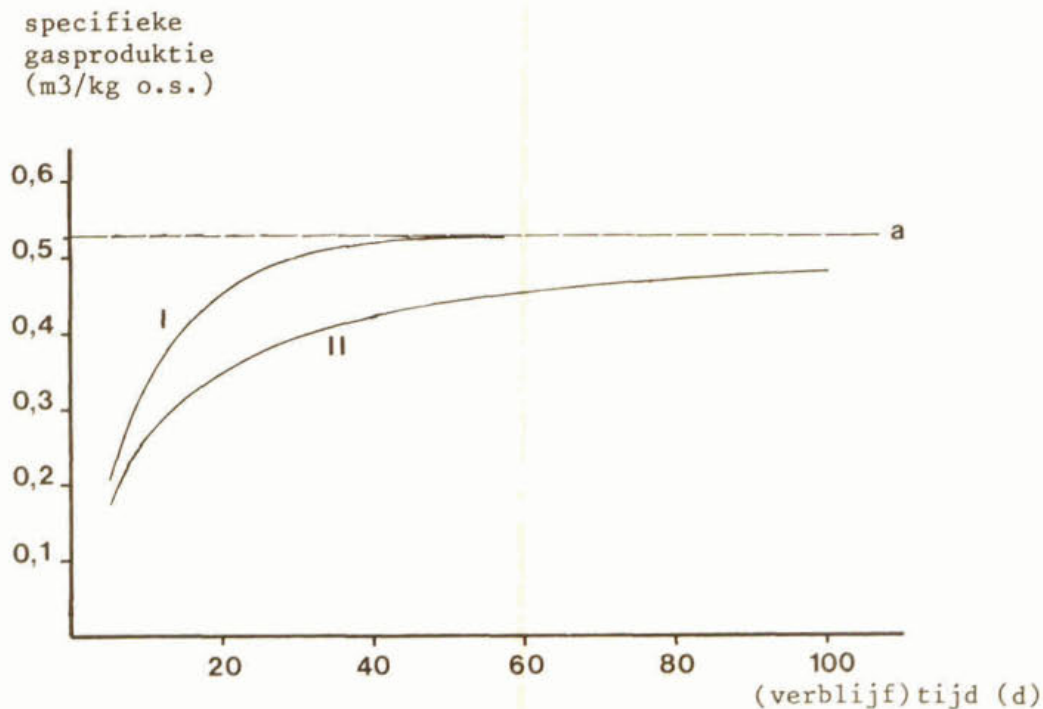
Uit deze gegevens volgt dat er geen universeel geldige maat kan bestaan voor de afbreekbare fractie in zuiveringsslib, omdat teveel factoren een rol spelen die per land, per zuiveringstype en per rwzi uiteenlopen. De vraag of de slibafbraak in een bepaalde installatie optimaal is, kan niet goed worden beantwoord zonder kennis van deze factoren. Voorzichtigheid is dus geboden bij het doen van aannamen over de afbreekbaarheid en bij het toepassen van vuistregels uit handboeken. Gistingstoeven op kleine schaal kunnen een beeld geven van de maximale hoeveelheid gas die bij vergisting van een bepaald slib kan worden verkregen.

4 INVLOED VAN PROCESFACTOREN OP DE GASPRODUKTIE

In dit hoofdstuk wordt aan de hand van literatuurgegevens nagegaan wat de invloed is van de diverse procesfactoren op de gistingsgasproduktie. Daarbij wordt vooral ingegaan op de mogelijkheden om in het conventionele gistingsproces door wijziging van procesparameters een hogere gasproduktie te bereiken. Een energetische en financiële vergelijking van de belangrijkste aspecten zal worden beschreven in hoofdstuk 7.

4.1 Invloed van de verblijftijd

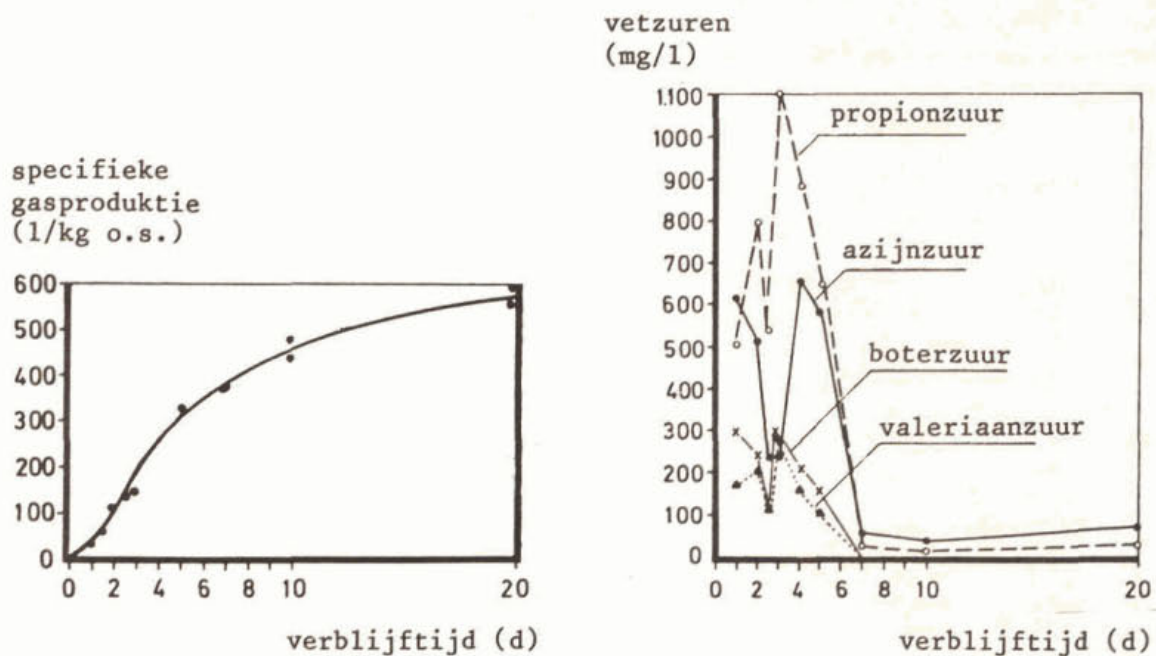
De invloed van de verblijftijd op het afbraakrendement is vooral op laboratoriumschaal onderzocht. Bij deze experimenten moet onderscheid worden gemaakt tussen het verloop van de gasproduktie met de tijd na voeding van een batchreactor en de relatie tussen steady state gasproduktie en verblijftijd in een continu gevoede reactor. In figuur 1 wordt de organische stofafbraak van beide systemen vergeleken uitgaande van eerste orde reactiekinetiek. De curve van de batchreactor nadert sneller de maximale waarde dan die van het continu gevoede systeem.



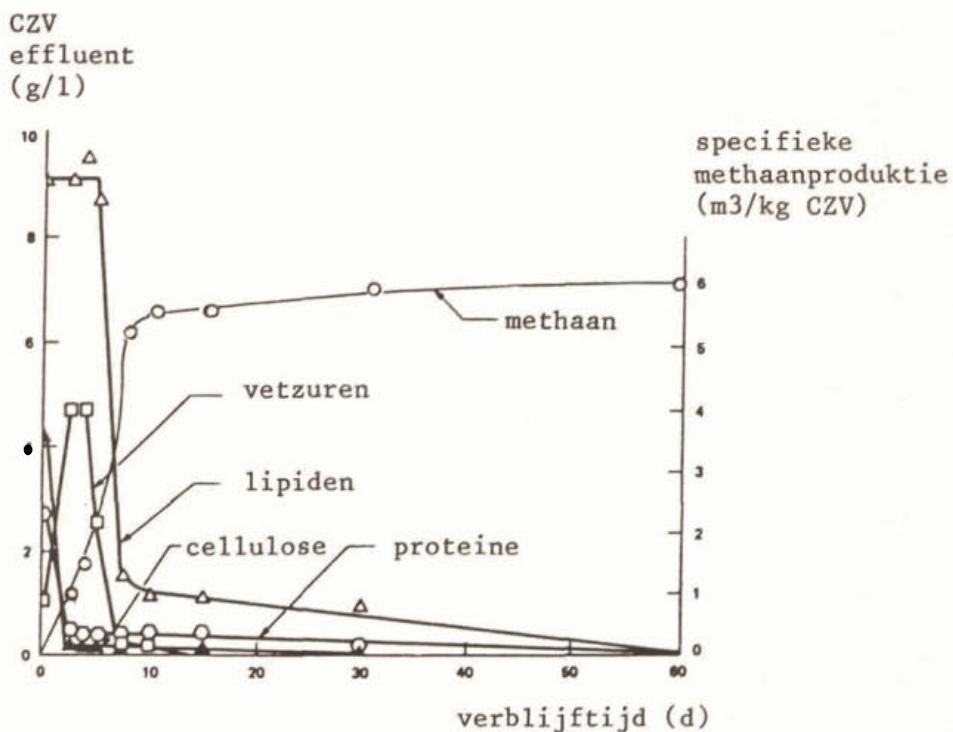
Figuur 1. Gasproduktie als functie van tijd c.q. verblijftijd in batchproces en continu proces, op basis van eerste orde reactiekinetiek ($a = 0,53$ m³/kg o.s. en $k_1 = 0,10$ d)

$$\text{I batch verloop: spec. gasprod.} = a (1 - e^{-k_1 t})$$

$$\text{II steady state: spec. gasprod.} = a (1 + (k_1 \cdot t_h)^{-1})^{-1}$$

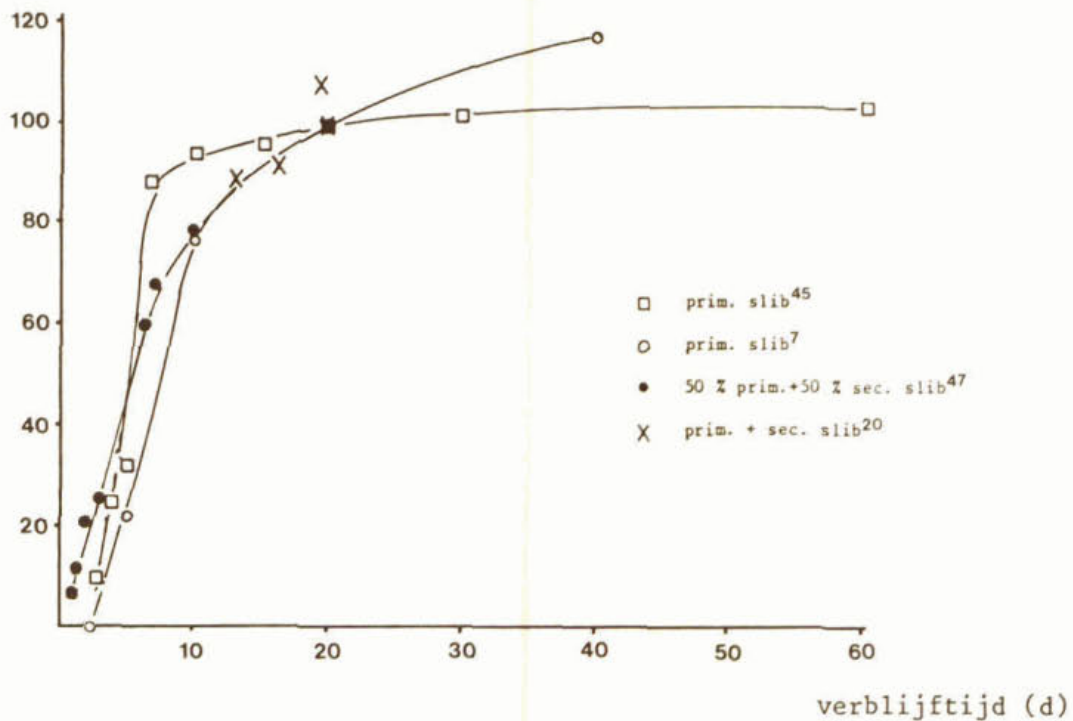


Figuur 2. Specifieke gasproductie en vetzuurgehalten als functie van de verblijftijd ⁴⁷



Figuur 3. Specifieke gasproductie en gehalten van organische stof-fracties als functie van de verblijftijd ⁴⁵

relatieve gasopbrengst
t.o.v. $t_h = 20$ d
(%)

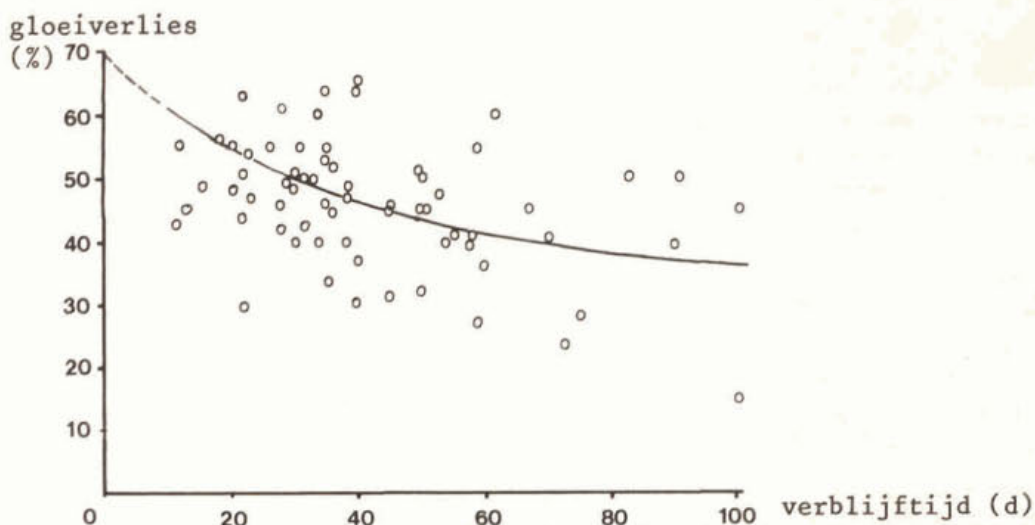


Figuur 4. Invloed van de verblijftijd op de specifieke gasproductie in verschillende experimenten op laboratorium- en semi-technische schaal ^{7,20,45,47}

De relatie tussen verblijftijd en gasproductie in continu gevoede reactoren op laboratorium- en semitechnische schaal is weergegeven in de figuren 2, 3 en 4. Al deze experimenten leveren het volgende beeld: ^{7,20,45,47}

- verblijftijden korter dan 5 dagen zijn onvoldoende voor stabiele gisting; vetzuurgehalten lopen op door uitspoeling van methaanbacteriën;
- 5-8 dagen: vetzuurgehalten zijn nog vrij hoog; afbraak, vooral van vetten is onvolledig;
- 8-10 dagen: stabiele gisting, vetzuurgehalten zijn laag, vetafbraak komt op gang;
- meer dan 10 dagen: helling van de afbraakcurve neemt af, alle slibcomponenten worden in aanzienlijke mate omgezet.

De relatie tussen gasproductie en verblijftijd is minder goed gedocumenteerd bij tijden langer dan 20 dagen, omdat de meeste onderzoeken zich gericht hebben op toepassing van zo kort mogelijke gistingstijden. De in figuur 4 weergegeven curves wijzen op toenames van 5% tot 15% bij toepassing van langere verblijftijden dan 20 dagen ^{7,45}.



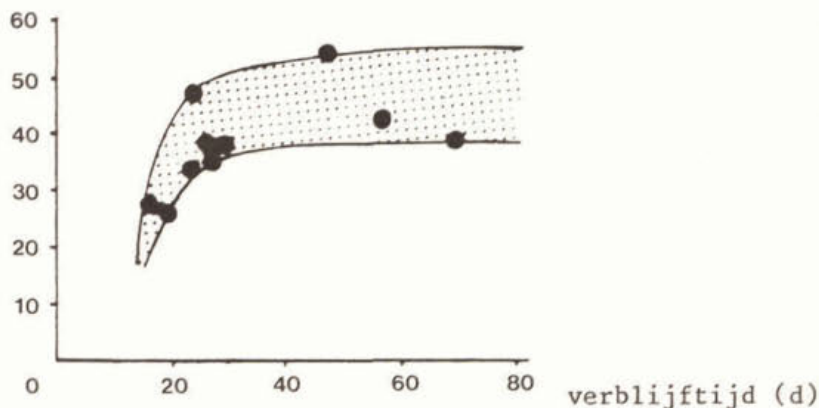
Figuur 5. Gloeiverlies van uitgegist slib als functie van de verblijftijd op rwzi's in Beieren⁴⁹

Figuur 5 toont het verband tussen het organische stofgehalte van uitgegist slib in relatie tot de verblijftijd van rwzi's in Beieren⁴⁹. De organische fractie vertoont een dalende tendens bij toenemende gistingstijd. Neemt men aan dat het gloeiverlies van vers slib 70% bedraagt, dan volgt uit figuur 5 voor de afbraak van organische stof volgens de van Kleeck formule 45% bij 20 dagen en 53% bij 60 dagen, een relatief verschil van 25%. Deze cijfers hebben slechts indicatieve waarde, omdat de aanname van het (niet gemeten) organische stofgehalte in vers slib grote invloed heeft op de uitkomst van de berekening.

In een Westduitse enquête over 93 rwzi's met een eigen energieopwekking is geen relatie gevonden tussen verblijftijd en gasproductie²⁸.

In een onderzoek naar eigen energieopwekking in Nederlandse rwzi's werd het in figuur 6 weergegeven verband tussen verblijftijd en afbraak gevonden⁴¹.

afbraak
org.stof
(%)



Figuur 6. Afbraak van organische stof in relatie tot verblijftijd in 10 Nederlandse gistinginrichtingen⁴¹

Figuur 6 geeft aan dat verblijftijden korter dan 20 dagen een sterke invloed hebben op het afbraakrendement. Boven 20 dagen daarentegen heeft verlenging van de gistingstijd weinig effect. Bij deze gegevens moet worden opgemerkt dat ze zijn ontleend aan slechts 10 rwzi's, zodat de algemene geldigheid beperkt is. In hoofdstuk 6 zal een uitgebreider inventarisatie van Nederlandse gegevens worden besproken.

Resumerend:

- bij verblijftijden korter dan 5 dagen is de slibgisting zeer onstabiel;
- bij 5 tot 10 dagen wordt het proces stabiel maar de afbraak is nog onvolledig;
- bij meer dan 10 dagen verblijftijd kan het gistingsproces stabiel verlopen; de curve van de gasproduktie tegen de verblijftijd verloopt steeds vlakker.

Door het ontbreken van voldoende proeven op kleine schaal en door de onnauwkeurigheid of onvolledigheid van gegevens uit de praktijk is relatief weinig bekend over de relatie tussen verblijftijd en gasproduktie bij langere verblijftijden dan 20 dagen.

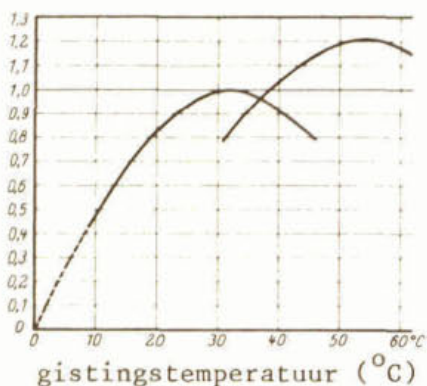
4.2 Invloed van de temperatuur

Het gistingsproces kan zich in principe afspelen bij alle temperaturen tussen 0 en 65°C. Binnen dit traject worden echter twee gebieden onderscheiden waarin verschillende groepen bacteriën werkzaam zijn, die ieder binnen hun gebied een temperatuuroptimum hebben:

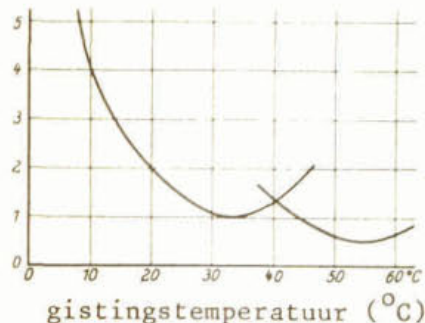
- mesofiele zone 20 - 40°C, optimum 33 - 35°C;
- thermofiele zone 40 - 65°C, optimum 55°C;

Deze verdeling wordt geïllustreerd door figuur 7 waarin de resultaten zijn samengevat van een groot aantal onderzoeken naar de invloed van de temperatuur op het gistingsproces.

relatieve
gasopbrengst
t.o.v. 30°C



benodigde
verblijftijd
t.o.v. 30°C



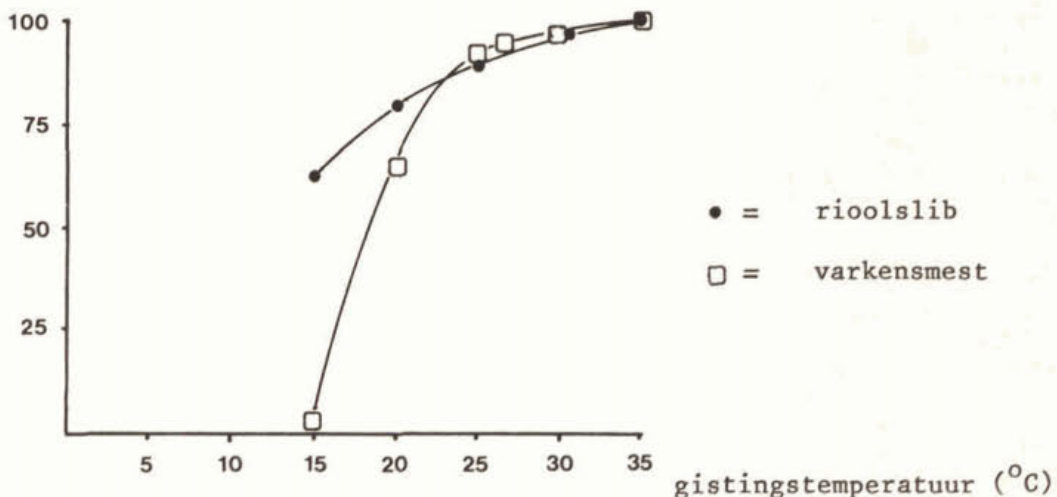
Figuur 7. Relatieve gasopbrengst en benodigde gistingstijd als functie van de temperatuur in vergelijking met het mesofiele temperatuuroptimum ³⁶

De thermofiele gisting, die volgens figuur 7 een grotere omzetting-capaciteit heeft dan het mesofiele proces, zal in hoofdstuk 5 aan de orde komen. Deze paragraaf zal zich verder beperken tot het mesofiele gistingsproces.

Figuur 7 geeft aan dat zowel de snelheid als de volledigheid waarmee organische stof in gas wordt omgezet, aanvankelijk sterk met de temperatuur toenemen. Boven 25°C vlt de curve echter af om tussen 30°C en 35°C een optimum te bereiken. Verschillende onderzoeken bevestigen dit verloop:

- Hawkes¹² vond bij vergelijking van verschillende bronnen steeds de in figuur 8 weergegeven curve met een zeer zwakke helling bij temperaturen boven 30°C;
- in de gistingproeven van O'Rourke⁴⁵ beïnvloedde de temperatuur zowel de snelheid als de volledigheid van de organische stofafbraak; deze invloed is het sterkst tussen 15° en 20°C;
- de temperatuurafhankelijkheid bij de vergisting van varkensmest⁴⁶, een proces dat veel overeenkomsten heeft met slibgisting, toont een sterke stijging tot 25°C, gevolgd door een vlak verloop tussen 25°C en 35°C (figuur 8).

relatieve
gasopbrengst (%)



Figuur 8. Relatieve gasopbrengst als functie van de temperatuur bij vergisting van rioolslib¹² en varkensmest⁴⁶

Bovenstaande gegevens geven aan dat rond 33°C, de meest toegepaste gistingstemperatuur in Nederland een lichte verhoging of verlaging van de temperatuur het omzettingsrendement met slechts enkele procenten doet stijgen of dalen.

In het verleden werd aangenomen dat anaërobe systemen zeer gevoelig zijn voor temperatuurschommelingen. Deze vrees lijkt echter ongegrond. Bij een plotselinge daling van de temperatuur neemt de gasproductie onmiddellijk af tot het niveau dat met de lagere temperatuur overeenstemt. Bij terugkeer naar de oorspronkelijke temperatuur herstelt de gasproductie zich echter snel⁴⁶. Mits extreme waarden worden vermeden, lijken kortdurende fluctuaties van de temperatuur geen blijvende schade aan het gistingssysteem toe te brengen.

4.3 Invloed van de mengintensiteit

Voorheen werd anaërobe slibstabilisatie vooral gezien als een proces van ongestoorde rijping en ontwatering waarbij de vaste en vloeibare fase zoveel mogelijk werden gescheiden. Tegenwoordig is intensieve menging algemeen geaccepteerd als essentieel onderdeel van het hoogbelaste slibgistingsproces.

Intensieve menging zorgt voor:

- uniforme verdeling van biomassa en substraat over de hele tank, zodat het volledige volume effectief wordt gebruikt;
- intensief contact tussen slib en bacteriën, zodat de afbraaksnelheid optimaal is;
- het verhinderen van lokale ophopingen van vers slib, toxische stoffen, afbraakprodukten en temperatuurverschillen, waardoor plaatselijk minder goede procesomstandigheden zouden optreden;
- het verhinderen van volumereductie door zandophoping;
- het tegengaan van schuimvorming en drijfvlagen boven in de reactor.

Men kan onderscheid maken tussen macro- en micromenging.

Macromenging omvat het egaliseren van concentratieverschillen over de reactorinhoud, het verhinderen van kortsluitstromen en van stationaire zones die onvolledig aan het gistingsproces deelnemen. Een indruk van de mate van macromenging kan worden verkregen uit tracerexperimenten en de meting van temperatuur- of drogestofprofielen in de reactorruimte.

Micromenging verzorgt de toevoer van substraat en de afvoer van uitscheidingsprodukten in de directe omgeving van de bacteriecel. De turbulentie is hierbij de drijvende kracht. De turbulentie neemt toe met de snelheidsgradiënt, maar is omgekeerd evenredig met de slibviscositeit.

Menging van de reactorinhoud wordt voor een groot deel veroorzaakt door het opstijgen van gasbellen die ontstaan in de gistende massa. In een Engels traceronderzoek bleek in een aantal installaties de bijdrage van deze natuurlijke menging via de volumebelasting en de hoogte/breedte verhouding van de reactor een sterker effect te hebben op de totale mengintensiteit dan het mechanisch vermogen van het roersysteem³. Natuurlijke menging kan bij dikke slibsoorten zelfs voldoende zijn voor volledige menging van de reactorinhoud^{1,5}. De bijdrage van de natuurlijke menging kan worden versterkt door het slib voor vergisting in te dikken en door toepassing van reactoren met een grote hoogte/diameter verhouding.

Een bijzondere vorm van natuurlijke menging vindt plaats in een nieuw type gistingsreactor dat in Oostenrijk is ontwikkeld en in Nederland voor het eerst wordt toegepast in de uitbreiding van de rwzi Veendam. In dit systeem wordt door de overdruk van het ontwikkelde gistingsgas een deel van de reactorinhoud verdrongen naar een hoger gelegen compartiment. Periodiek vindt menging plaats door de verdrongen vloeistof te laten terugstorten. Voor een beoordeling van het gistingsrendement van dit systeem in vergelijking met conventionele systemen zijn nog geen gegevens beschikbaar.

De relatie tussen mengintensiteit en slibafbraak is niet exact vast te leggen. De oorzaak is enerzijds dat menging op verschillende wijzen het gistingsproces beïnvloedt, zoals hiervoor is beschreven. Anderzijds is de mengintensiteit niet eenduidig te kwantificeren.

In de praktijk worden verschillende criteria gehanteerd voor de vereiste mengcapaciteit. In Duitse publicaties wordt een rondpompcapaciteit van 6 tot 9 maal de reactorinhoud per etmaal genoemd^{17,48}. Een zeer hoge intensiteit wordt nagestreefd in een nieuwe Engelse installatie met als doel volledige doormenging van inkomend slib binnen een uur en stroomsnelheden van 1,5 m/s met het oog op turbulentie⁴³. Bij gasinblazing wordt veelal uitgegaan van een minimum geïnstalleerd vermogen van 5 tot 10 W/m³ reactorinhoud⁴⁵.

Over de effectiviteit van de verschillende mengsystemen lopen de meningen per land uiteen: in Engeland, Nederland en de V.S. wordt gasinblazing als beste methode beschouwd, terwijl men in Duitsland meent dat roerwerken effectiever zijn. Vergelijkend onderzoek van verschillende mengmethoden heeft niet tot duidelijke conclusies geleid.

Onafhankelijk van het gekozen systeem geldt dat de menginrichting in staat moet zijn alle delen van de reactorinhoud in beweging te brengen. Vooral de onderste zone kan problemen opleveren door afzetting van zand en ophoping van relatief koud vers slib, met name wanneer te korte inblaaslansen worden gebruikt.

Naast het geïnstalleerde mengsysteem speelt ook de procesvoering een rol. Bij het gebruikelijke intermitterende mengen moeten de niet geroerde perioden zo kort zijn dat geen ontmenging van de reactorinhoud optreedt. Bij toevoer van vers slib moet worden gezorgd voor een snelle vermenging met de reactorinhoud. Hiervoor is een goede synchronisatie nodig van de pompcyclus en de mengcyclus. Bij regelmatige toevoer van kleine hoeveelheden vers slib is het risico van slechte doormenging kleiner dan bij voeding met enkele grote ladingen.

Wanneer de reactor is voorzien van aftappunten kan belangrijke informatie over het functioneren van de menging relatief gemakkelijk worden verkregen door bemonstering op verschillende diepten. De verdeling van de temperatuur, het drogestofgehalte en de gloeirest kunnen aangeven of de reactorinhoud voldoende homogeen is en of zich ongewenste afzettingen van zand of ophopingen van koud slib onder in de reactor bevinden. Momentopnamen verspreid over de mengcyclus kunnen aangeven of de capaciteit van de menginrichting voldoende is en of bij de toegepaste loop- en wachttijden ontmenging van de reactorinhoud optreedt.

Een iets gecompliceerder methode is het traceronderzoek. Hiermee kan berekend worden welk deel van de reactor effectief wordt doorstroomd en hoe snel een binnenkomende hoeveelheid vloeistof homogeen over de reactorinhoud wordt verdeeld.

Omdat de beschikbare informatie niet toelaat algemene uitspraken te doen over de effectiviteit van de diverse mengsystemen, is de boven beschreven controle per gistingsinrichting zeer aan te bevelen. Onderzoek naar de menging in praktijkreactoren kan meer gerichte informatie opleveren over de meest effectieve mengmethode, de gewenste dimensionering en de gunstigste bedrijfsvoering.

4.4 Invloed van de indikkingsgraad

Uitgaande van een gegeven produktie van droge stof, bepaald door het type afvalwater en het zuiveringsproces, is het te vergisten volume slib omgekeerd evenredig met de concentratie droge stof. Omdat de

verblijftijd bij de dimensionering en bedrijfsvoering van het gistingsproces een belangrijke rol speelt, is reductie van het slibvolume door indikking een interessante mogelijkheid om het gistingsproces te beïnvloeden.

Voordelen van een kleiner vers-slibvolume door voorindikking zijn (bij gelijke verblijftijd in de gistingsreactor):

- kapitaal- en energiebesparing door kleiner reactorvolume;
- minder opwarmenergie voor het verse slib nodig;
- transportbesparing bij natte afzet van het uitgiste slib zonder toepassing van na-indikkers.

Een voordeel van het hogere drogestofgehalte is de reeds genoemde intensievere menging door de produktie van gistingsgas.

Hiertegenover staan potentiële nadelen van de hogere drogestofconcentraties:

- minder turbulentie en grotere pompverliezen door toegenomen viscositeit;
- mogelijke remming door hogere concentraties afbraakprodukten bijv. ammoniak en vetzuren.

Toepassing van een voorindikker brengt uiteraard kapitaals- en bedrijfskosten met zich mee en kan bovendien tot stankproblemen leiden.

In experimenten met ingedikt slib werd pas bij drogestofgehalten groter dan 9% in combinatie met verblijftijden korter dan 15 dagen een negatieve invloed van de indikkingsgraad op het afbraakrendement gevonden³⁰. Een andere onderzoeker vond in het geheel geen invloed van de indikkingsgraad op het rendement van de organische stofafbraak¹⁸. Deze experimenten werden uitgevoerd met drogestofgehalten tot 13% en verblijftijden 3 - 56 dagen.

Bij gescheiden verwerking van primair en secundair slib en toepassing van geavanceerde indikkingsmethoden zoals flotatie en centrifugeren kan het verse slib in de praktijk ingedikt worden tot maximaal 5 - 10% d.s. Bij deze gehalten is nog geen remming van het afbraakrendement waargenomen. Hieruit volgt dat ook bij toepassing van intensieve voorindikking de verblijftijd de beslissende dimensioneringsparameter is en niet de organische volumebelasting van de gisting (kg o.s./m³.d).

In hoofdstuk 7 zullen de energetische- en kostenaspecten nader worden beschouwd.

4.5 Beschikbaarheid van voedingsstoffen

Voor de opbouw van nieuw celmateriaal zijn voedingsstoffen nodig zoals stikstof, fosfor, kalium en spore-elementen. De netto produktie van nieuw celmateriaal is bij de anaërobe afbraak echter zeer gering door de lage opbrengstfactor. Men mag aannemen dat in vers slib afkomstig van de zuivering van huishoudelijk afvalwater ruim voldoende nutriënten voor de celaanwas aanwezig zijn.

4.6 Invloed van de zuurgraad en alkaliteit

De methaanbacteriën zijn de gevoeligste groep organismen in de levensgemeenschap van een gistingsinstallatie. Hun pH-optimum ligt

bij pH 6,5 - 7,5. Om deze zuurgraad bij wisselende omstandigheden te handhaven is voldoende buffercapaciteit in de vorm van bicarbonaat (HCO_3^-) en in mindere mate ammoniak (NH_3) noodzakelijk.

Een bicarbonaat-alkaliteit van ongeveer 70 meq CaCO_3 /l wordt voldoende geacht voor de opvang van kleine pH-variatië door schommelingen in de slibsamstelling en lichte plaatselijke verzuring van het slib bij niet-ideale menging. Een indicatie voor de buffering van het systeem vormt ook de verhouding tussen de alkaliteit van de vetzuren en van bicarbonaat. Een quotiënt kleiner dan 0,7 is een indicatie voor goede buffering.

Bij bepaling van de buffercapaciteit door titratie met zuur moet rekening worden gehouden met de schijnbare alkaliteit door protonering van geïoniseerde vetzuren. Zowel de bicarbonaatalkaliteit als het vetzuurgehalte kunnen eenvoudig in één titratiereeks bepaald worden door titratie tot pH 4 (= totale alkaliteit), aangezuurd uitblazen van CO_2 en terugtitratie pH 4 - pH 7 (= vetzuuralkaliteit).

4.7 Invloed van toxische stoffen

De aanwezigheid van toxische stoffen kan de gasproductie remmen en in ernstige gevallen zelfs leiden tot verzuring van de gisting en afsterven van de biomassa. Met het oog op optimalisering van de gasproductie dient men bedacht te zijn op gedeeltelijke remming door lage doses toxische stoffen; deze situatie wordt niet altijd als vergiftiging herkend.

De relatie tussen dosis en effect van een toxische stof kan zeer complex zijn. De toxische werking is in eerste instantie afhankelijk van de aard van de stof en van de concentratie. Daarnaast kunnen nog andere factoren een rol spelen:

- slechts indien een stof in opgeloste vorm aanwezig is, kan sprake zijn van toxiciteit; onopgeloste stoffen kunnen niet de cellen binnendringen;
- zwakke zuren en basen dringen in niet-geïoniseerde toestand het snelst door de celwand en hebben als zodanig de sterkste toxische werking. Hierdoor is de toxiciteit van ammoniak het sterkst bij hoge pH en die van vetzuren bij lage pH;
- door adaptatie kan de gevoeligheid voor lage concentraties van bepaalde toxische stoffen afnemen;
- de toxische werking van een bepaalde stof kan worden versterkt (synergisme) of verzwakt (antagonisme) door de aanwezigheid van een andere stof.

Tabel 1 geeft van een aantal belangrijke stoffen een indruk bij welke concentraties deze onschadelijk zijn, een reversibele afname van de gasproductie veroorzaken of leiden tot afsterven van de microorganismen.

De giftigheid van zware metalen wordt beperkt door de vorming van onoplosbare sulfiden. In Nederland komen in de regel hoge concentraties H_2S in het gistingsgas voor, wat wijst op een overmaat vrij sulfide in de reactorinhoud. Door deze overmaat zal het overgrote deel van de metalen gebonden zijn als onoplosbaar sulfide, zodat de toxiciteit laag is. In hoofdstuk 6 wordt nagegaan of er desondanks aanwijzingen zijn voor toxiciteit van zware metalen in Nederlandse slibgistingen.

toxische stof	concentratie in g/kg d.s.		
	inactief of stimulerend	stagnatie gasontwikkeling	lethaal
NH ₄ -N	1 - 5	40 - 75	75
Na ⁴	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	0,03 - 0,1	0,15
Sulfide oplosbaar	-	1	1,5
Sulfide alkalisch	1,5	2,5	5
detergentia	2,5	4 - 7,5	12,5
Fenol	1,5	2,5	4
CH ₃ Cl	-	0,03 - 0,05	

Tabel 1. Globale dosis-effect-relatie van een aantal anorganische en organische stoffen met toxische invloed op de slibgisting 21,25

Ook lichte metaalionen kunnen in hoge concentraties toxische werken. Enige gegevens hierover zijn vermeld in tabel 2. Hoge gehalten metaalionen kunnen een rol spelen bij de vergisting van slibsoorten afkomstig van fysisch-chemische waterbehandelingsprocessen zoals tertiaire zuivering of bij correctie van de zuurgraad. Binnen de groep van lichte metaalionen komen antagonistische relaties voor.

Kation	Stimulerend (mg/l)	Matig remmend (mg/l)	Sterk remmend (mg/l)
Calcium	100-200	2.500-4.500	8.000
Magnesium	75-150	1.000-1.500	3.000
Kalium	200-400	2.500-4.500	8.000

Tabel 2. Stimulerende en remmende concentraties van lichte metaalkationen 23,24

Gehalogeneerde koolwaterstoffen zoals chloroform en de freonen zijn al in zeer lage concentraties toxisch voor methaanbacteriën. Chloroform veroorzaakt bij gehalten rond 1 mg/l (ca. 0,03 g/kg d.s.) remming van de gasproductie. Kortgeleden is de slibgisting van rwzi Amsterdam-Noord verzuurd door toevoer van het freon CCl₃F in een concentratie van enkele mg/l²².

Bij de vergisting van drijfmest kan remming optreden door hoge concentraties ammoniak ten gevolge van het hoge stikstofgehalte in drijfmest. In niet overbelaste systemen treedt echter adaptatie op waardoor ammoniumgehalten van enkele grammen per liter gemakkelijk verdragen worden ⁴⁶. Bij de aanzienlijk lagere ammoniumgehalten die in slibgistingssystemen voorkomen is geen remming te verwachten. De toxiciteit van vetzuren is sterk afhankelijk van de pH, omdat vooral de ongedissocieerde vorm door de celwand kan binnendringen. Bij pH-waarden boven pH 6,8 verloopt de gisting goed, zelfs wanneer vluchtige vetzuren aanwezig zijn in concentraties tot 7.000 mg/l (als azijnzuur). Hieruit volgt dat onder normale omstandigheden vetzuren niet remmend zijn, maar dat bij verzuring van de gisting de effecten van stijgend vetzuurgehalte en dalende pH elkaar versterken.

De gegevens over toxiciteit geven aan dat in een normale praktijk-situatie met afvalwater van overwegend huishoudelijke oorsprong geen remming van de gisting te verwachten is. Voor bepaalde industriële lozingen moet echter worden gewaakt, wegens de hoge toxiciteit van een aantal stoffen (met name organische oplosmiddelen) die in de industrie veel worden toegepast. Wanneer de aanwezigheid van toxische stoffen niet te vermijden is, kan in het geval van zware metalen het effect beperkt worden door sulfaatdosering waardoor de sulfideconcentratie in de reactor wordt verhoogd. Hierdoor worden de metalen gebonden als onoplosbare sulfiden. Dosering van actieve kool kan baten bij overbelaste of door organische stoffen vergiftigde reactoren ³⁹.

4.8 Eentrapsgisting of tweetrapsgisting

In veel rwzi's bestaat de slibgisting uit een verwarmde, gemengde gistingstrap en een onverwarmde niet gemengde consolideringstrap. Het grootste deel van de gisting vindt plaats in de eerste trap; in de tweede trap kan enige nagisting optreden. Daarnaast wordt door aftappen van het bovenstaande water het slib in de tweede trap enigszins ingedikt. Gisting en ontwatering stellen echter tegenstrijdige eisen aan temperatuur en turbulentie, zodat beide processen in de tweede trap niet optimaal verlopen. Daarom is in vrijwel alle nieuwere rwzi's gekozen voor eentrapsgisting, dikwijls gevolgd door een naindikker met geforceerde koeling.

Bij eentrapsgisting met een volledig gemengde reactor treedt verblijftijdsspreiding op, zodat een deel van het slib met een kortere verblijftijd dan gemiddeld de reactor doorloopt. Hierdoor is de omzetting onvollediger dan in een propstroomstelsel met dezelfde gemiddelde verblijftijd. Wanneer het reactorvolume verdeeld is over meerdere compartimenten, wordt het propstroommodel dichter benaderd, zodat theoretisch een hogere omzettingsgraad kan worden verwacht. Hiervan zou gebruik kunnen worden gemaakt in gistingsinstallaties met meerdere parallel geschakelde reactoren, indien de mogelijkheid bestaat tegen redelijke kosten de reactoren in serie te schakelen. Voorwaarde is echter dat de verblijftijd per reactor niet zo kort wordt dat de eerste stap wordt overbelast. Toepassing is derhalve voorbehouden aan systemen die gedurende lange tijd beneden de ontwerp-capaciteit worden belast. In 7.2.4 zal aan de hand van gegevens uit de inventarisatie de gasproductie worden berekend bij serie- en parallelbedrijf in een rwzi met twee gistingsreactoren.

4.9 Sturing en controle van het gistingsproces

De volgende factoren zijn het meest belangrijk bij de regeling van het gistingsproces:

- voorindikking;
- voeding van de gistingsreactor;
- menging;
- temperatuurregeling.

Voorindikking, voeding van de gistingsreactor en menging hangen nauw met elkaar samen. Voorindikking reduceert het slibvolume en bevordert zodoende de verblijftijd in de gistingsreactor. Het verpompen van slib vanuit de slibkuil naar de gistingsreactor beïnvloedt het verloop van zowel de indikking als van de gisting. De menging speelt hierbij een rol om het toegevoerde slib snel over de reactorinhoud te verdelen.

In de meeste rwzi's, in het bijzonder in de oudere en kleinere, vindt voeding van de gistingsreactor twee- tot driemaal daags plaats, door ingrijpen van de klaarmeester. Door deze ladingsgewijze voeding kan de slibspiegel in de voorindikker of de slibkuil van de voorbezinktank sterk wisselen, waardoor de indikking niet altijd optimaal is. Ladingsgewijze voeding heeft in de gistingsreactor als nadeel dat bij onvoldoende mengcapaciteit het verse slib niet onmiddellijk door de reactor wordt verdeeld, waardoor een zone met koud slib op de bodem van de tank kan ontstaan. Een tweede nadeel van ladingsgewijze voeding is de sterk fluctuerende gasproductie. Deze vereist een grote capaciteit voor de behandeling en buffering van het gistingsgas.

Optimale sturing van de versslibtoevoer bestaat vooral uit een goede regeling van de voorindikking. Hierbij moet worden gestreefd naar een zoveel mogelijk constante slibspiegel en gelijkmatige onttrekking van ingedikt slib. Automatische sturing met behulp van slibspiegelometers is hiervoor gewenst. Omdat de meetapparatuur door vervuiling gestoord kan worden, is een goede controle en beveiliging noodzakelijk.

De schakelcycli van de slibpompen en van de menginrichting van de reactor dienen op elkaar afgestemd te zijn: de toevoer van dun slib mag de onttrekking van ingedikt slib uit de indikker niet verstoren en de menginrichting van de gistingsreactor moet in werking zijn bij de invoer van vers slib.

Een andere vorm van processturing kan worden toegepast op rwzi's die door middel van warmte-krachtkoppeling gistingsgas gebruiken als energiebron voor de beluchting. In plaats van gelijkmatige toevoer van ingedikt slib kan worden gestreefd naar afstemming van de gasproductie op de behoefte aan gas. Hiertoe wordt slib vanuit de indikker naar de gistingsreactor gepompt afhankelijk van de zuurstofbehoefte in de aëratietanks. Voorwaarde voor succesvolle toepassing van dit systeem is dat de voorindikker groot genoeg is om als buffer te functioneren en dat het verse slib niet snel tot rotting overgaat. In een rwzi van het Zuiveringschap West-Overijssel levert deze regeling een goede afstemming van de gasproductie op de gasbehoefte, zelfs bij fluctuaties door aanvoer van regenwater (mondelinge mededeling Zuiveringschap West-Overijssel).

De temperatuurregeling is in de regel afgestemd op een zo constant mogelijke gistingstemperatuur. Rond de gebruikelijke waarde van 33°C

heeft variatie van de temperatuur slechts geringe invloed op het gistingsrendement, zodat in beperkte mate aanpassing mogelijk is aan wisselingen in het warmte-aanbod.

In zeer koude perioden kan het voordelig zijn de gistingstemperatuur iets te verlagen, omdat de besparing op het stookverbruik opweegt tegen de afname van de gasopbrengst (zie 7.2.2).

De klaarmeester moet snel over informatie beschikken die hem in staat stelt het proces te sturen en bij storingen in te grijpen. De belangrijkste parameters die hiertoe worden gemeten zijn temperatuur, pH en gasproductie en minder frequent vetzuurgehalte, alkaliteit en gassamenstelling.

De gasproductie geeft de momentane gistingsactiviteit weer, zodat ernstige verstoringen van het proces onmiddellijk kunnen worden opgemerkt. Omdat de gasproductie in relatie staat tot de hoeveelheid toegevoerde organische stof, is meting van de gasproductie alleen onvoldoende om te beoordelen of de afbraak optimaal is.

De verhouding tussen pH, alkaliteit en vetzuurgehalte geeft aan of er sprake is van ongestoorde vetzuurafbraak door de methaanbacteriën en of er voldoende buffercapaciteit is om kleine pH-schommelingen op te vangen. Het CO_2 -gehalte in het gistingsgas is een maat voor de methaanvorming uit CO_2 en H_2 . Het CO_2 -gehalte is mede afhankelijk van zuur-base evenwichten. Hiermee moet bij de interpretatie van de gemeten concentraties rekening worden gehouden. Het H_2 -gehalte is een nauwkeuriger maat voor het functioneren van de methaanvorming. Op laboratoriumschaal werd een sublethale vergiftiging met chloroform reeds gesignaleerd door een verdubbeling van de waterstofconcentratie, zonder dat andere parameters merkbaar verstoord waren³⁸. Door het Engelse Water Research Centre wordt een H_2 -meettoestel ontwikkeld voor toepassing als controle-instrument in de slibgisting.

4.10 Beoordeling van het gistingsrendement

Het rendement van het gistingproces kan worden uitgedrukt in het percentage organische stofafbraak en in de specifieke gasproductie (m^3 gas geproduceerd per kg toegevoerde organische stof).

De fractie afgebroken organische stof kan op verschillende manieren worden berekend. De beste methode is in principe berekening van de volledige massabalans met als posten toevoer, accumulatie in de reactor, afbraak en afvoer. Omdat de accumulatie moeilijk te meten is, wordt in de praktijk de aangepaste massabalans bepaald. Deze methode berekent de afbraak over langere tijd uit toevoer en afvoer, aannemend dat de hoeveelheid substraat in de reactor in de beschouwde periode constant is. De massabalansmethoden vereisen nauwkeurige debietmeting en representatieve bemonstering van alle processtromen. Vooral door de wisselende samenstelling van vers slib en de dikwijls hoge drogestofgehalten in het slibwater, dat uit onverwarmde gistingstanks wordt afgetapt, wordt aan deze voorwaarden niet altijd voldaan. Een ander uitgangspunt wordt gehanteerd in de van Kleckmethode. Deze gaat er vanuit dat alleen de organische slibfractie aan afbraak blootstaat en dat het anorganische materiaal de reactor onveranderd passeert. Uit de fractie organisch materiaal (= gloei-verlies) in het verse en uitgegiste slib kan dan de afbraak worden berekend. Deze berekening is alleen toepasbaar indien geen accumu-

latie van organisch- en/of anorganisch materiaal in de reactor optreedt door bijvoorbeeld drijfslagvorming en zandafzetting. Daarentegen is de van Kleeck-methode ongevoelig voor onnauwkeurige meting van het debiet en het drogestofgehalte. Een variant op van Kleeck is de constante as-methode, die naast het gloeiverlies ook het drogestofgehalte in de berekening betreft.

De wijze van berekening voor de genoemde methoden is beschreven in bijlage 1. In hoofdstuk 6 wordt de bruikbaarheid van de aangepaste massabalans-en de van Kleeck-methode vergeleken op basis van Nederlandse praktijkgegevens.

De specifieke gasproductie is de belangrijkste maat voor het gistingsrendement. Deze parameter wordt berekend als quotiënt van het geproduceerde gasvolume en de hoeveelheid toegevoerde organische stof. Hiervoor is representatieve bemonstering en debietmeting van de slibstroom noodzakelijk. De gemiddelde samenstelling van vers slib is moeilijk te bepalen, omdat het verse slib afhankelijk van de produkties aan primair en secundair slib in samenstelling kan variëren. Bovendien is meting van het drogestofgehalte moeilijk, omdat tijdens een pompcyclus aanvankelijk dik slib diep uit de slibkuil, maar later dunner slib uit hogere zones wordt aangevoerd.

Het is raadzaam de berekende specifieke gasproductie te vergelijken met de afbraak van organische stof. Omdat de samenhang tussen beide parameters binnen bepaalde grenzen vastligt (zie 3.2), kan de gasproductie per kg afgebroken organische stof als controle worden gebruikt voor de berekende gistingsrendementen. Waarden kleiner dan 800 en groter dan 1.200 l/kg o.s.-afbraak wijzen hoogstwaarschijnlijk op onnauwkeurige metingen.

Berekening van het afbraakrendement op basis van CZV in plaats van gloeiverlies kan een betere overeenstemming met de gasproductie opleveren, omdat de CZV-afname van het slib direkt gekoppeld is aan de omzetting in methaan.

De procescontrole van de slibgisting is vooral gericht op het signaleren van storingen en op bewaking van de kwaliteit van het af te zetten slib. Wanneer gestreefd wordt naar optimalisatie van de gasproductie is meting van het gistingsrendement essentieel, om te kunnen vaststellen of verbetering van het rendement noodzakelijk is en om het effect van eventuele veranderingen te meten.

Hiertoe zal in veel gevallen vooral de bemonstering en analyse van vers en uitgesteid slib moeten worden aangepast.

4.11 Gistingsexperimenten

Zuiverings-slib dat aan een gistingsreactor wordt onttrokken, vertoont vrijwel altijd enige nagisting. Dit kan het gevolg zijn van onvolledige omzetting door te korte verblijftijd, of van verblijftijdsspreiding waardoor een deel van het slib korter dan de gemiddelde verblijftijd aan het afbraakproces heeft deelgenomen. Een schatting van de restgasproductie kan worden gemaakt door middel van eenvoudige gistingsproeven. Hiervoor kan gebruik worden gemaakt van gistingskolven geplaatst in een thermostaatbad, in combinatie met een opvangfles voor het geproduceerde gas. Een dergelijke opstelling kan ook worden gebruikt om de maximale gasproductie uit een bepaald slibmonster te bepalen. Door vergelijking van de gasproductie uit onverdunde en verdunde slibmonsters kan tevens worden bepaald of

toxische componenten in het slib een storende invloed hebben op de gasproductie.

Omdat gistingproeven kunnen worden uitgevoerd onder constante, goed controleerbare omstandigheden, kunnen ze informatie geven die in praktijkreactoren niet of slechts zeer moeizaam verkregen kan worden. Met name de maximale gasproductie uit verschillende slibsoorten en de restgasproductie van gistingsslib kunnen zo op relatief gemakkelijke wijze worden gemeten.

4.12 Vergisting van andere substraten dan zuiveringsslib

In de Nederlandse rwzi's worden de volgende substraten regelmatig of incidenteel aan de slibgisting toegevoegd: aëroob gestabiliseerd surplusslib, drijfslagen van de bezinkingstanks en in de vetvanger afgescheiden materiaal, industriële afvalvetten, afvalslibben uit de voedingsmiddelenindustrie, melasse, in beslag genomen illegale alcohol en alcoholhoudende afvalvloeistoffen.

In tweetraps zuiveringsinrichtingen met een laagbelaste aëratietank als tweede trap vindt vergaande aërobe mineralisatie van het actiefslib plaats, zodat het surplusslib in principe zonder verdere stabilisatie kan worden afgezet. In een aantal gevallen wordt het surplusslib tesamen met het primair- en humusslib vergist. Hoewel kwantitatieve gegevens ontbreken, wijzen de ervaringen van de beheerders op een gasopbrengst die vergelijkbaar is met die van hoger belast surplusslib. De ervaringen met de verwerking van drijfslagmateriaal en uit het rioolwater afgescheiden vet lopen uiteen. Bij sommige zuiveringsschappen worden deze zonder problemen vergist; in andere daarentegen worden ze gestort omdat bij vergisting verstopping van leidingen en vervuiling van de warmtewisselaars kan optreden.

Verwerking van industriële afvalstoffen vindt momenteel slechts plaatselijk en in de regel incidenteel plaats. Een uitzondering vormt de Gemeente Amsterdam, waar met enige regelmaat alcoholhoudende afvalvloeistoffen in de slibgisting worden verwerkt. Na een ernstige storing in het verleden door de aanwezigheid van halogeenkoolwaterstoffen in een batch afvalvloeistof³⁴, worden alle aangeboden substraten eerst door middel van gistingstests op toxische eigenschappen onderzocht.

Door het Hoogheemraadschap van Delfland is op kleine schaal de vergistbaarheid onderzocht van een slurry van doorgedraaide tomaten. Voorlopige resultaten van dit onderzoek wijzen op goede vergistbaarheid en een hoge specifieke gasopbrengst.

De keuze om een afvalproduct wel of niet in een slibgistingsreactor te verwerken hangt niet alleen af van de vraag of dit een verhoogde gasopbrengst oplevert. Uiteraard moet de benodigde overcapaciteit in de gistinginstallatie aanwezig zijn. Verder staan er tegenover de baten van een hogere gasopbrengst ook kosten in de vorm van verhoogd energieverbruik voor verwarming en pompen en extra belasting van de aëratie door slibwater, vooral wanneer dit veel stikstof bevat. Tevens neemt de af te zetten hoeveelheid gistingsslib toe. Controle op de samenstelling van het substraat is noodzakelijk om vergiftiging van de gisting en problemen bij de slibafzet te voorkomen.

Vergisting is het meest aantrekkelijk voor opgeloste substraten die slechts weinig slibaanwas opleveren, met name voor substraten die anders aëroob zouden moeten worden afgebroken ten koste van een verhoogde zuurstofbehoefte.

5 DE TOEPASSING VAN NIEUWE TECHNIEKEN IN DE SLIBGISTING

In het voorgaande is stilgestaan bij de ontwikkeling van de mesofiele anaërobe slibgisting en de mogelijkheden om binnen dit proces de gasproductie te verhogen. Dit hoofdstuk beschrijft een aantal andere gistingstechnieken en hun mogelijkheden om tot een hogere gasproductie te komen dan bij de conventionele slibgisting wordt bereikt.

Nieuwe gistingstechnieken kunnen worden ontwikkeld om een tweetal redenen:

- de behoefte aan een proces met geringere kosten en/of een beter energierendement;
- de noodzaak om te voldoen aan strengere eisen gesteld aan het gestabiliseerde produkt in verband met de afzet of conditionering.

Beide benaderingen kunnen leiden tot een proces met verhoogde gasopbrengst, zodat in dit overzicht ook processen voorkomen die niet in eerste instantie met dit doel ontwikkeld zijn.

De energetische en financiële aspecten van de beschreven processen zullen in hoofdstuk 7 nader worden beschouwd.

5.1 Toepassing van enzymen

In de waterzuivering worden mengsels van bacteriesporen en hydrolyse-enzymen gebruikt om in septictanks de activiteit van afbraakbacteriën op gang te brengen of te ondersteunen. Omdat hydrolyse van biopolymeren in de slibgisting de limiterende stap is, zou toevoeging van hydrolyse-enzymen aantrekkelijk kunnen zijn om het rendement van het gistingsproces te verbeteren.

Het Water Research Centre in Engeland en de afdeling voor toegepaste microbiologie van de universiteit te Gent hebben de werking van verscheidene enzympreparaten in gistingstests onderzocht. In deze proeven werd geen positief effect van enzymdosering op de gasproductie waargenomen (mondelijke mededelingen, resultaten niet gepubliceerd). Praktijkgegevens over enzymdosering in de slibgisting zijn bekend van één rwzi in Engeland. Tijdens 12 maanden dosering van het produkt Actizyme van Ubichem Ltd werd een circa 10% verhoogde gasproductie waargenomen. De gegevens over de omzetting van organische stof wijzen echter niet op efficiëntere afbraak, zodat de invloed van het enzym op de gasproductie niet geheel duidelijk is.

Bij de vergisting van zuiveringsslib worden eerst de gemakkelijk afbreekbare stoffen in gas omgezet. Na enige tijd zijn deze stoffen grotendeels afgebroken, zodat verhoging van de gasproductie vooral moet komen van moeilijker afbreekbare verbindingen. Voor deze afbraak zijn specifieke hydrolyse-enzymen nodig. Het is twijfelachtig of deze enzymen aanwezig zijn in commerciële preparaten die vooral gericht zijn op een breed, weinig specifiek werkterrein. Industriële preparaten worden immers gewonnen uit bacteriestammen die ondermeer geselecteerd zijn op grote enzymproductie, maar die niet geadapteerd zijn aan zuiveringsslib. In een gistingsreactor daarentegen vindt adaptatie aan het toegevoerde slib plaats, waardoor een bacterieflora ontstaat die optimaal is aangepast aan de af te breken verbindingen. Dit verschil in adaptatie kan verklaren waarom in goed functionerende gistingssystemen toevoeging van industriële enzymprepara-

raten weinig effect heeft op de gasproductie. Enzymdosering zou wel zinvol kunnen zijn op plaatsen waar (tijdelijk) geen goede biologische afbraak plaatsvindt, zoals in septictanks en bij het opstarten van gistingssystemen.

5.2 Voorbehandeling van het verse slib

5.2.1 pasteurisatie

In Zwitserland wordt slibpasteurisatie toegepast in de vorm van een half uur verhitting bij 70°C om te voldoen aan de strenge hygiënische eisen voor afzet in de landbouw. In tegenstelling tot veronderstellingen dat pasteurisatie voorafgaand aan vergisting de afbreekbaarheid van de organische stof bevordert, hebben langdurige proeven op praktijkschaal geen verhoogde gasproductie aangetoond^{4,19}.

Uit nader onderzoek is gebleken dat pasteurisatie gedeeltelijke hydrolyse van het slib bewerkstelligt, met als gevolg verhoogde concentraties BZV en opgelost CZV. Deze hydrolyse is echter beperkt tot de gemakkelijk afbreekbare fracties, zodat pasteurisatie van vers slib de gasproductie sneller op gang brengt, maar niet leidt tot een grotere gasopbrengst per kg organische stof⁴⁷.

In tegenstelling tot de Europese ervaringen met slibpasteurisatie is in een recent Japans onderzoek¹⁴ wel verhoging van de gasproductie waargenomen na voorbehandeling bij minder dan 100°C. Op laboratorium- en semitechnische schaal werd na 2 uur voorbehandeling bij 60°C en 80°C meer dan 30% verhoging van de gasproductie gevonden. In deze experimenten zijn echter sterk verschillende methoden toegepast bij de vergisting van het voorbehandelde slib en bij de controleproef, zodat het niet duidelijk is hoe betrouwbaar de uitkomsten zijn.

Voor de Nederlandse situatie lijken de uitgebreide Zwitserse praktijkervaringen het meest relevant te zijn. Op grond van deze ervaringen mag geen significante verhoging van de gasproductie worden verwacht door thermische voorbehandeling beneden 100°C.

5.2.2 thermische voorbehandeling bij meer dan 100°C

Vanuit twee benaderingen wordt onderzocht of energiewinst te berekenen is door voorafgaande aan vergisting het slib thermisch te behandelen bij meer dan 100°C:

- bij thermische conditionering kan hittebehandeling vóór in plaats van na vergisting energetisch voordeliger zijn door nuttig gebruik van de restwarmte in het gistingproces en door verhoging van het afbraakrendement;
- verhitting, eventueel met toevoeging van chemicaliën, kan de afbreekbare fractie vergroten bij vergisting van organisch afval en zuiveringslib.

Hittebehandeling van secundair slib leverde bij temperaturen tussen 100°C en 200°C verhoging van de gasproductie op met als hoogste waarde 70% meeropbrengst bij 175°C; bij 200°C en 225°C werden echter toxische of slecht afbreekbare verbindingen gevormd, zodat een lagere gasopbrengst werd verkregen¹¹. Alle hittebehandelingen in dit onderzoek hadden een positief effect op de slibontwatering. Bij 200°C en 225°C verliep de ontwatering echter aanzienlijk sneller dan bij 175°C. Ondanks de aantrekkelijke energetische aspecten was

hittebehandeling bij 175°C gevolgd door vergisting duidelijk minder goed als conditioneringsmethode dan verhitting tot hogere temperaturen.

In een ander experiment met voorbehandeling van zuiverings-slib bij 80°C en 150°C nam bij beide temperaturen het afbraakpercentage na 60 dagen batchgisting toe van 22% tot 50%. Na verhitting tot 220°C vond geen gisting meer plaats⁴⁰.

In een onderzoek gericht op gaswinning uit huisvuil bleek verhitting bij 175 tot 200°C in neutraal milieu 35% meer gas op te leveren. Toename met 73% en 100% werd bereikt bij combinaties van verhitting en dosering van respectievelijk zuur en loog, toegeschreven aan het oplossen van lignine²⁷.

Voorbehandeling van varkensmest gedurende 1 uur bij 100°C verhoogde de afbraak in neutraal milieu met 80% en bij pH 13 met 100%¹⁹. Thermische behandeling heeft voornamelijk invloed op de vergisting van het secundaire slib^{11,33}. Meebehandeling van primair slib kan bevorderlijk zijn vanwege gewenste ontsmetting of conditionering; meer gas is er echter niet door te verwachten.

Uit de onderzoeksgegevens blijkt dat hittebehandeling van het secundaire slib de bruto gasproductie kan verhogen. Hier staat tegenover dat de warmtebehoefte van het proces groot is en dat ingewikkelde en kostbare apparatuur nodig is. In hoofdstuk 7 zullen de energetische en financiële aspecten van hittebehandeling ter verhoging van de gasproductie nader worden uitgewerkt.

5.2.3 thermofiele aërobe voorbehandeling

Een methode voor slibstabilisatie die in de V.S. is ontworpen en sinds kort in Zwitserland en West-Duitsland vrij intensief wordt onderzocht, staat bekend als "dual stabilisation" ofwel "D.S.-proces". Het D.S.-systeem bestaat uit een aërobe thermofiele trap met korte verblijftijd, gevolgd door hoogbelaste mesofiele anaërobe gisting. In de eerste trap vindt gedurende circa 24 uur onder invloed van aëratie met zuivere zuurstof of lucht gedeeltelijke oxydatie plaats van de gemakkelijk afbreekbare slibfracties. Hierbij wordt zoveel warmte ontwikkeld dat bij autotherm bedrijf temperaturen tot 75°C kunnen optreden.

De bedrijfstemperatuur, die via de O₂-inbreng regelbaar is, bedraagt in de praktijk meestal 55°C. Geclaimde voordelen van het systeem ten opzichte van de conventionele gisting zijn:

- besparing op de bouwkosten wegens kortere verblijftijd;
- verbetering van de hygiënische kwaliteit van het slib door verhoogde temperatuur;
- hoge stabiliteit en flexibiliteit door regeling van de afbraak in de eerste trap door middel van zuurstofinbreng.

Hoewel door oxydatie van een deel van de organische stof theoretisch minder overblijft voor omzetting in methaan, hoeft dit niet nadelig te zijn voor de energiebalans. De verbrandingswarmte van het oxydatieproces komt namelijk volledig aan het slibmengsel ten goede. Bij goede isolatie kan deze warmteproductie extra verwarming van de gistingstank overbodig maken, waarvoor anders een deel van het methaan zou moeten worden verbrand. Voor de netto gasproductie is vooral bepalend of de gedeeltelijke oxydatie de afbreekbaarheid van de organische stof in de anaërobe fase beïnvloedt.

In een theoretische vergelijking ²⁹ tussen conventionele slibgisting bij 35°C en 22 dagen verblijftijd en het D.S.-proces met 1 dag aërobe fase bij 55°C en 8 dagen gisting, wordt gerekend op een gelijke totale afbraak van organische stof: 50%, respectievelijk 7,6% aëroob en 42,4% anaëroob. Het D.S.-proces zou door zijn veel kleinere omvang aanzienlijk voordeliger zijn. De haalbaarheid van de zeer korte voorgestelde verblijftijd is in Europese experimenten echter niet bevestigd.

Op de rwzi Alfeld wordt door aërobe voorbehandeling bij 37°C een onveranderde tot 8-10% verhoogde gasproductie verkregen (informatie van de fabrikant ³⁷).

Ervaringen op de Zwitserse rwzi Wartau wijzen op een ongeveer gelijke energieinhoud van het geproduceerde gas in vergelijking met het conventionele proces⁵⁰ .

In de proefinstallatie Köln-Stammheim bleek het D.S.-proces oneconomisch te zijn wegens lage gasopbrengst en hoge energiekosten voor menging en O₂-productie³⁸ .

Hoewel de eerste praktijkervaringen enigszins uiteenlopen, lijkt het D.S.-proces energetisch niet gunstiger te zijn dan de conventionele slibgisting. Tegenover de iets lagere tot vrijwel gelijk gebleven gasopbrengst staan hogere energiekosten voor aëratie en menging. Slechts in één geval zijn aanwijzingen gevonden voor verhoging van de gasproductie door aërobe voorbehandeling. Hierop wordt in 7.3.2 nader ingegaan.

5.3 Thermofiele slibgisting

Anaërobe stabilisatie in het thermofiele temperatuurgebied (50 - 60°C) heeft als potentiële voordelen ten opzichte van mesofiele gisting (30°C - 40°C):

- hogere omzettingssnelheid;
- vollediger afbraak;
- betere ontwaterbaarheid en hygiënische kwaliteit van het gestabiliseerde slib.

Potentiële nadelen zijn:

- groter energieverbruik voor verwarming;
- slechtere kwaliteit van het slibwater met betrekking tot geur, vetzuren, CZV;
- geringere processtabiliteit.

Met het oog op de gasproductie is de combinatie van snellere en meer volledige afbraak van organische stof interessant. Hiertegenover staat de grotere warmtebehoefte van het proces.

Toepassing van het thermofiele proces vindt slechts in enkele grote rwzi's plaats. Op de 1.000.000 i.e.-installatie van Moskou wordt het slib vergist bij 51°C. Door toepassing van deze hogere temperatuur kon de verblijftijd worden teruggebracht van 18 tot 9 dagen bij 4% lagere gasopbrengst. Belangrijkste reden om hier thermofiel te vergisten is de eliminatie van ziektekiemen ⁶ . Ook op de Hyperion installatie in Los Angeles wordt wegens ontsmetting en volumereductie van het slib thermofiel vergist, bij 49°C. Vergeleken met de voorafgaande mesofiele gisting (36°C) wordt circa 8% meer gas gevormd bij gelijke verblijftijd en is de ontwatering sterk verbe-

terd⁹. In Chicago is men wegens overbelasting van de gisting overgegaan van 17 dagen verblijftijd bij 34°C naar 11 dagen bij 53°C. Hierbij bleken afbraakrendement en specifieke gasproductie nog iets te stijgen. De netto gasopbrengst is door het veel hogere stookverbruik echter gehalveerd³⁵.

Wanneer de volledige warmtebehoefte moet worden geleverd door het verstoken van gistingsgas is thermofiele gisting energetisch ongunstiger dan mesofiele gisting. Wanneer echter zoveel warmte wordt teruggewonnen uit het vergiste slib dat de warmtebehoefte niet groter is dan bij mesofiel bedrijf, kan thermofiele gisting energetisch gunstiger zijn. Door de snellere en meer volledige afbraak is het benodigde reactorvolume kleiner en wordt iets meer gas geproduceerd. Daarnaast wordt een gepasteuriseerd en veelal beter ontwaterbaar slib verkregen. Tegenover deze voordelen staan het iets hogere vetzuurgehalte van het slibwater, de grotere gevoeligheid voor storingen en de geringere praktijkervaring met het proces in vergelijking met mesofiele gisting.

5.4 Anaërobe processen met biomassa-retentie

In de gebruikelijke slibgistingssystemen met volledig gemengde reactoren wordt steeds een deel van de biomassa tesamen met het uitgiste slib afgevoerd. Het gistingproces zou kunnen worden geïntensifieerd door de uitspoeling van bacteriën tegen te gaan, zodat een grotere biomassa in de reactor werkzaam is. In de anaërobe afvalwaterbehandeling wordt dit bereikt door terugvoer van retourslib (contactproces), instandhouding van een opwaarts doorstroomde slibdeken (U.A.S.B.)²⁵, of hechting van de bacteriën aan dragermateriaal (anaëroob filter, fixed film bed).

Het contactproces is alleen effectief wanneer het onafbreekbare residu wordt afgevoerd en een retourstroom met een hoge concentratie bacteriën naar de reactor wordt teruggevoerd. Omdat in zuiverings-slib het onverteerde organische materiaal en de gistingbacteriën niet scheidbaar zijn, is het niet te vermijden dat met het residu een deel van de biomassa als spuislib wordt afgevoerd.

Vasthouden van een actieve biomassa in de reactorinhoud (U.A.S.B., slib op drager materiaal) is alleen mogelijk wanneer in het reactorbed de bacteriën niet worden verdrongen door onverteerbaar ingevangen materiaal. Voor zuiverings-slib, dat een groot aandeel moeilijk afbreekbaar materiaal bevat, is dit systeem ongeschikt. Bij reactoren met vast dragermateriaal (anaërobe filters) zijn problemen te verwachten door verstopping van het filterbed.

Alle bekende methoden voor vergroting van de biomassa in de reactor zijn ongeschikt voor zuiverings-slib. De oorzaak hiervan is steeds het grote aandeel onverteerbaar materiaal in het slib. De gebruikelijke volledig gemengde slibgistingreactor is hiervoor minder geschikt.

5.5 Twefasen-gisting

Het feit dat anaërobe gisting bestaat uit twee opeenvolgende processtappen, de verzuring en methanogenese, uitgevoerd door sterk verschillende bacteriegroepen, heeft geleid tot de gedachte dat beide fasen het best zouden kunnen worden geoptimaliseerd door ze te laten plaatsvinden in gescheiden reactoren, elk aangepast aan de eisen van het betrokken proces.

Potentiële voordelen van een dergelijk systeem zijn:

- optimalisatie van beide processtappen, waardoor de omzetting vollediger zou kunnen zijn en een geringer totaalvolume benodigd is;
- stabilisering van het proces door de mogelijkheid het verzuurde slib te neutraliseren of tijdelijk op te slaan om dreigende overbelasting van de methaanfase te voorkomen.

Potentiële nadelen zijn:

- het verbreken van gunstige symbiotische relaties tussen zuurvormers en methaanbacteriën;
- hogere eisen aan de procescontrole;
- de noodzaak van pH-correctie of effluentrecirculatie over de tweede trap bij onvoldoende buffercapaciteit van het slib;
- gecompliceerde bouwwijze.

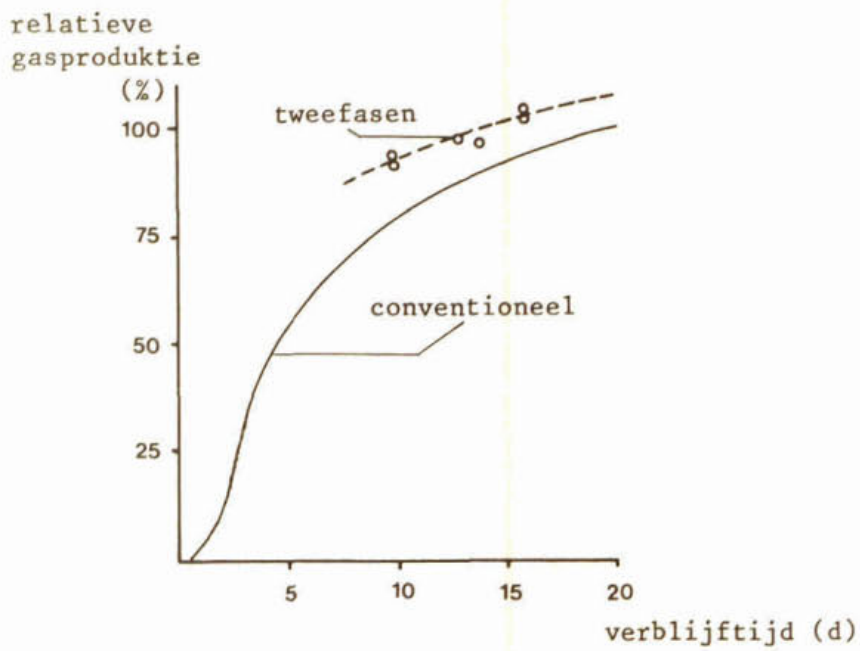
Scheiding van de zuurvormende en methaanvormende fasen is gebaseerd op het verschil in delingstijd van beide groepen, namelijk enkele uren voor de verzuurders en enkele dagen voor de methaanbacteriën. Door toepassing van maximaal twee dagen verblijftijd in de eerste fase wordt groei van methaanbacteriën daarin onmogelijk gemaakt. De verblijftijd in de tweede fase is afgestemd op de methaanvorming en bedraagt 5 dagen tot enkele weken.

Hydrolyse van primair slib in de verzuringsfase is onderzocht door Eastman en Ferguson⁸. In hun experimenten bleek de hydrolysesnelheid evenredig te zijn met de slibconcentratie. Koolhydraten werden voor 70% afgebroken, eiwitten voor 55%, vetafbraak vond binnen 72 uur niet plaats. Bij pH 6,7 verliep de hydrolyse sneller en vollediger dan bij pH 5,5, zodat in 72 uur de omzetting 15% hoger was. Dit zou betekenen dat de lagere pH in een verzuringsreactor ongunstiger is voor de hydrolyse dan de neutrale pH van een methaanreactor.

In experimenten met tweefasen-gisting van secundair slib werd bij verblijftijden van 0,5 - 1,2 d in de eerste en 6,5 d in de tweede fase 40% afbraak van de organische stof bereikt¹⁰. Dit resultaat wijst op een hoge omzettingssnelheid. Een parallelproef met een-trapsgisting ontbreekt echter. De publicatie maakt niet duidelijk hoe de hydrolyse is verdeeld over de eerste en de tweede fase.

In een ander onderzoek met 2 - 4 d verblijftijd in de eerste fase en 8 - 12 d in de tweede fase werd in het tweefasen-systeem bij gelijke verblijftijd een circa 25% hogere omzetting bereikt dan in een-trapsgisting⁴⁷ (figuur 9).

Omdat de traagheid van de hydrolyse-acties en de aanwijzingen voor een neutraal pH-optimum⁸ weinig effect doen verwachten van een korte voorverzuring, zijn bovenstaande resultaten opvallend. De publicaties maken echter niet geheel duidelijk welk aandeel de eerste en tweede trap hebben bij de hydrolyse in een tweefasen-systeem, zodat het mechanisme van een eventuele rendementverbetering nog onbekend is. Nader onderzoek onder praktijkomstandigheden met parallelbedrijf van conventionele en tweefasen-gisting moet worden afge wacht voor een goede vergelijking van beide systemen. Een dergelijk onderzoek is kort geleden gestart op de rwzi Buxtehude (West-Duitsland).



Figuur 9. Relatieve gasproductie als functie van de totale verblijftijd in tweefasen- en conventionele gisting⁴⁷

6 INVENTARISATIE VAN NEDERLANDSE SLIBGISTINGSGEGEVENS

Gegevens over de gasproductie en de procesvoering in Nederlandse slibgistinginrichtingen zijn geïnventariseerd om een goed beeld te verkrijgen van de gasproductie die op dit moment in Nederland bereikt wordt. Statistisch onderzoek van de gegevens is uitgevoerd om na te gaan of er relaties bestaan tussen slibeigenschappen, bedrijfsvoering en gasproductie. Dergelijke relaties kunnen aanwijzingen geven voor optimalisatie van het gistingproces.

6.1 Methodiek

De inventarisatie omvat in principe alle Nederlandse rwzi's met verwarmde slibgisting, en beslaat de periode 1979-1983. Als basisgegevens zijn jaargemiddelden gehanteerd afkomstig van jaarverslagen en technologische jaaroverzichten van de waterkwaliteitsbeheerders en cijfers uit 1981 en 1982 van de CBS enquête "bedrijfsgegevens van de R.W.Z.I." Gegevens over type en dimensionering van de inrichtingen zijn ontleend aan het CBS-bestand met ontwerpgegevens. De onderzochte parameters zijn beschreven in bijlage 2.

De basisgegevens zijn zoveel mogelijk gecorrigeerd en aangevuld met cijfermateriaal en mondelinge informatie van de waterkwaliteitsbeheerders. Afhankelijk van de beschikbaarheid en betrouwbaarheid van de cijfers is een selectie gemaakt uit de gegevens, zodat per rwzi een zoveel mogelijk representatief beeld wordt verkregen. De geselecteerde gegevens zijn als databestand ingevoerd in het geheugen van een computer.

Van de onderzochte parameters zijn gemiddelden, standaardafwijkingen en frequentieverdelingen berekend voor het totale bestand en voor inrichtingen met hetzelfde zuiveringsproces. Statistische analyse van de relaties tussen de verschillende parameters is uitgevoerd met behulp van een rekenprogramma voor enkelvoudige regressie-analyse. Dit programma berekent de best passende rechte lijn door een groep (x,y)-waarden en de correlatiecoëfficiënt, die de mate aangeeft waarin de puntenset met de gevonden lijn samenvalt. Omdat veel van de onderzochte parameters op lang niet alle rwzi's gemeten zijn, is het niet mogelijk een meervoudige regressieanalyse uit te voeren.

De relatie tussen verblijftijd en gistingrendement is onderzocht op basis van een verondersteld eerste orde reactiemechanisme. Hierbij is de beste benadering gezocht van de procesparameters op basis van een gelineariseerde vorm van de eerste orde formule (zie bijlage 5).

6.2 Resultaten van de inventarisatie

In totaal werden 99 rwzi's gevonden met verwarmde slibgisting. De gezamenlijke ontwerpcapaciteit van deze rwzi's bedraagt 9 miljoen i.e., 43% van de totale geïnstalleerde zuiveringscapaciteit in 1982. Na eliminatie van de installaties waarvan te weinig betrouwbare bedrijfsgegevens beschikbaar waren, bleven 77 installaties over waarvan tenminste de gasproductie per i.e. bekend was.

Hierbij zijn 34 actief-slibinstallaties, 32 installaties met oxydatiebedden, 8 inrichtingen met tweetraps oxydatiebed + actief-slibbedrijf, 1 inrichting met oxydatiebedden parallel aan aërietanks en 2 mechanische zuiveringen. Tweetrapsystemen waarvan beide delen volgens hetzelfde principe werken zijn niet als aparte groep be-

schouwd, maar in het bestand opgenomen als actiefslib of oxydatiebedinrichting. Van 35 rwzi's is bekend dat zij zijn voorzien van een enkeltraps verwarmd slibgistingssysteem, 37 inrichtingen hebben een tweetraps warme + koude gisting.

Het aantal beschikbare waarden van de onderzochte parameters loopt sterk uiteen. De verschillende waterkwaliteitsbeheerders hanteren bemonsterings- en analyseprogramma's die onderling uiteenlopen, vooral met betrekking tot gegevens over vers slib. Daarnaast speelt de grootte van de installaties een rol bij de bemonsteringsfrequentie. De nauwkeurigheid van de gegevens wordt vooral beperkt door de moeilijkheid om de veelal discontinue processtromen representatief te bemonsteren.

De gegevens van de verschillende parameters zijn (gerangschikt per proces) weergegeven in bijlage 3. Van de waterbehandelingssystemen zijn alleen oxydatiebed en actiefslib als groep vergeleken, omdat van de overige te weinig gegevens beschikbaar zijn. Omdat niet alle inrichtingen in procescategoriën kunnen worden ingedeeld, is de som van de verschillende categoriën niet altijd gelijk aan het totaal aantal onderzochte rwzi's. De karakteristieke waarden van de belangrijkste parameters zijn voor de gezamenlijke installaties samengevat in tabel 3. Frequentieverdelingen van deze gegevens zijn opgenomen in bijlage 4.

	gemiddelde	standaard deviatie	aantal rwzi's
<u>procesvoering waterbedrijf</u>			
ontwerpcapaciteit (i.e.)	90.700	111.000	99
influent belasting (i.e.-54)	61.100	63.100	79
aangesloten belasting (i.e.)	61.900	69.000	33
aandeel huishoudens (% van i.e.'s)	73	19	38
produktie primair slib (g/i.e.d)	36	13	17
produktie secundair slib (g/i.e.d)	24	9	17
totaal produktie slib (g/i.e.d)	60	21	58
<u>procesvoering slibgisting</u>			
hydraulische verblijftijd (d)	39	15	59
temperatuur (°C)	32,5	1,7	30
drogestof vers slib (%)	4,1	0,8	66
organische stof vers (% van d.s.)	71	6	60
organische stof gisting (% van d.s.)	59	6	61
<u>gistingrendement</u>			
o.s.-afbraak massabalans (%)	53	13	41
o.s.-afbraak van Kleeck (%)	43	6	52
gasproduktie per i.e. (l/i.e.d)	17	6	77
gas per kg d.s.-toevoer (m ³ /kg d.s.)	0,31	0,08	62
gas per kg o.s.-toevoer (m ³ /kg o.s.)	0,44	0,11	51
gas per kg o.s.-afbraak			
- volgens massabalans (m ³ /kg o.s.)	0,89	0,35	46
- volgens van Kleeck (m ³ /kg o.s.)	1,04	0,26	48

Tabel 3. Gemiddelden, standaarddeviaties en aantallen gegevens van de onderzochte parameters in het totaalbestand (alle rwzi's tesamen)

6.3 Bespreking van de gegevens uit het totaalbestand

Bedrijfsgegevens waterbehandeling

De belasting van de rwzi's op basis van de BZV-vracht van het influent is bij 79% van de inrichtingen kleiner dan de ontwerpcapaciteit (zie bijlage 4). De gemiddelde belasting van de waterlijn bedraagt 63% van de ontwerpcapaciteit.

De produktie van vers slib bedraagt gemiddeld 60 g d.s./i.e.d met een spreiding van 21 g d.s./i.e.d. Deze waarde is iets lager dan de 67 g d.s./i.e.d. die in 1980 in een West-Duitse enquête werd gevonden³⁴.

Bedrijfsgegevens slibgisting

De gemiddelde waarde van de verblijftijd (39 d) wijst op een vrij lage belasting van het gistingproces. Deze lage belasting hangt samen met de eerder genoemde onderbelasting van de waterlijn. De ontwerpcapaciteit van de gistinginstallaties is in de regel afgestemd op 20-30 dagen verblijftijd.

De belasting komt overeen met die van de Duitse installaties met gemiddelde verblijftijden van 36-39 d^{26, 28, 49}.

De gegevens over de temperatuur van de verwarmde gistingstanks, ontleend aan de C.B.S.-enquête liggen alle tussen 28° en 35°C. Deze temperaturen worden 's winters niet altijd bereikt, omdat de capaciteit van de verwarming te klein kan zijn, of omdat met het oog op gasbesparing de thermostaat wat lager wordt ingesteld. Bij tweetrapsinstallaties kan de temperatuur van de onverwarmde tank sterk uiteenlopen, afhankelijk van seizoen, isolatie, verblijftijd en eventuele geforceerde koeling.

Omzettingsparameters

Per kg toegevoerde organische stof wordt gemiddeld 0,44 m³ gas geproduceerd. Nederlandse praktijkgegevens vermeld in eerdere STORA-rapporten^{40, 41}, bedragen 0,40 en 0,42 m³/kg o.s. In een onderzoek naar 93 Duitse rwzi's met eigen energieopwekking werd als gemiddelde 0,48 m³/kg o.s. gevonden²⁸.

Deze cijfers geven aan dat de specifieke gasproduktie in Nederland vrijwel even groot is als in Duitsland.

De vermelde percentages van organische-stof-afbraak volgens beide berekeningsmethoden lopen enigszins uiteen. De berekening volgens de massabalansmethode levert een hoger gemiddelde en een grotere spreiding (53 ± 13%) dan de methode van Kleeck (43 ± 6%). Dit werkt door in de gasproduktie per kg afgebroken organische stof: 0,89 ± 0,35 m³/kg o.s. afgebroken volgens massabalans en 1,04 ± 0,26 m³/kg o.s. afgebroken volgens van Kleeck. De laatste waarde stemt het best overeen met de theoretische gasopbrengst van circa 1,0 m³/kg afgebroken o.s. De oorzaak is hoogstwaarschijnlijk een overschatting van de afbraak volgens de massabalansmethode wanneer een deel van het uitgegiste slib tijdens het indikkingsproces met de slibwaterstroom wordt afgevoerd. Dit slib wordt ten onrechte als afgebroken beschouwd. Het verschil is het grootste bij tweetrapsgistingen (zie bijlage 3), waar dikwijls de tweede trap als een matig functione-

rende indikker wordt bedreven. De massabalansmethode is bovendien gevoelig voor onjuiste drogestofgehalten ten gevolge van niet-representatieve bemonstering en onnauwkeurige meting van de pompdebieten. Daarentegen is de van Kleeckberekening afhankelijk van een nauwkeurige meting van het gloeiverlies en geldt de formule alleen als de anorganische fractie onveranderd de gisting doorloopt; debietmeting en representatieve bemonstering van het drogestofgehalte spelen hier echter geen rol.

Deze gegevens indiceren dat aan de berekende afbraak van organische stof volgens van Kleeck meer waarde moet worden gehecht dan aan de berekeningen volgens de massabalans.

De gasproductie per inwonerequivalent ($17,1 \pm 6,2$ l/i.e.d.) is vrijwel gelijk aan de waarden vermeld in de eerder genoemde STORA-rapporten^{40,41}. De gasproductie in Duitsland ligt op hetzelfde peil, namelijk 17,3 l/i.e.d. in 93 rwzi's met energie-opwekking uit gistingsgas²⁸ en 16,3 l/i.e.d. in alle gistingsinstallaties (enquêtegegevens²⁶ uit 1978). Van andere landen ontbreken uitgebreide gegevens. De overeenstemming tussen de situatie in Nederland en West-Duitsland geeft aan dat aanzienlijk hogere gasproductiecijfers van meer dan 25 l/i.e.d., die in veel gehanteerde handboeken^{16,32}, worden genoemd, niet reëel zijn. De veronderstelling dat de gasproductie in Nederland lager zou zijn dan in het buitenland^{40,41}, is gebaseerd op gegevens in handboeken die ook in de buitenlandse praktijk niet (meer) geldig blijken te zijn. Er is derhalve geen reden om bij voorbaat uit te gaan van suboptimale omstandigheden in de Nederlandse slibgistinginrichtingen.

6.4 Verschillen tussen de zuiveringsprocessen

In bijlage 3 zijn de gegevens van de onderzochte rwzi's samengevat, gerangschikt volgens twee onafhankelijke onderverdelingen:

- a. Type waterbehandeling (actiefslib, oxydatiebed).
- b. Type gistingsproces (eentraps-, tweetrapsgisting).

De waterbehandeling is bepalend voor de hoeveelheid te vergisten slib, het gistingsproces bepaalt de mate waarin het slib wordt omgezet in gas, zodat beide factoren moeten worden betrokken in de beoordeling van de gasproductie.

Uit de gegevens over ontwerpcapaciteit, gistingsvolume en belasting blijkt dat in grote installaties relatief meer aëratietanks worden toegepast dan oxydatiebedden.

De ontwaterbaarheid van het humusslib afkomstig van de oxydatiebedden is beter dan die van het surplusslib van het actief-slibproces. Hierdoor is het drogestofgehalte van het te vergisten slib (ondanks de frequentere toepassing van voorindikers) in actief-slibinstallaties gemiddeld lager dan bij oxydatiebedden, respectievelijk 3,6 en 4,4% d.s. De specifieke gasproducties zijn bij de vergisting van beide slibsoorten gelijk, zodat actief-slibinrichtingen tengevolge van de grotere slibproductie per inwonerequivalent gemiddeld meer gas produceren, namelijk 20 l/i.e.d. tegenover 14 l/i.e.d.

Vergelijking van het eentraps- en tweetrapsgistingsproces geeft een 19% kortere gemiddelde verblijftijd in de warme trap van de tweetrapsgisting te zien dan in de ééntrapsgisting. Dit is niet verwonderlijk omdat in het tweetrapsstelsel gelegenheid is voor nagisting in de onverwarmde tweede trap, die dikwijls maar enkele graden kou-

der is dan de eerste. De gemiddelde waarden van de specifieke gasproductie is in het tweetrapsproces iets hoger, maar het verschil is klein vergeleken met de spreiding: $0,45 \pm 0,14$ tegenover $0,43 \pm 0,08$ m³/kg o.s. toevoer.

6.5 Regressieanalyse van de bedrijfsgegevens

6.5.1 invloeden op de versslibproductie

Omdat de hoeveelheid vergistbaar materiaal bepalend is voor de maximaal haalbare gasopbrengst, is het van belang vast te stellen welke factoren de productie van versslib beïnvloeden. Van de volgende factoren is de invloed op de slibproductie per i.e. onderzocht:

- type installatie;
- aandeel huishoudens in de influent belasting;
- slibbelasting en volumebelasting in resp. aëratietanks en oxydatiebedden;
- grootte van de installatie.

De gemiddelde slibproductie is in actiefslibinrichtingen groter dan in rwzi's met oxydatiebedden; het actiefslibstelsel wordt relatief vaker dan het oxydatiebed toegepast in grotere rwzi's. Per installatietype bestaat echter geen relatie tussen grootte en slibproductie. De invloed van het percentage huishoudelijk afvalwater en de slibbelasting op de hoeveelheid vers slib zijn in enkele extreme gevallen aanwijsbaar, maar een bruikbare relatie ontbreekt door de grote spreiding en het geringe aantal gegevens.

Het is aannemelijk dat nog andere factoren de slibproductie beïnvloeden, bijvoorbeeld de samenstelling van het afvalwater, de wijze van inzameling en transport en het rendement van de voorbezinking. Van deze factoren zijn echter geen bruikbare gegevens gevonden.

6.5.2 relatie tussen verblijftijd en specifieke gasproductie

De relatie tussen de verblijftijd in de verwarmde gistingstrap en de specifieke gasproductie is onderzocht voor de verschillende zuiveringsprocessen en gistingssystemen. De best passende curve is gezocht voor een eerste orde reactieverloop en voor een lineair verband tussen verblijftijd en gasproductie. Hoewel de juistheid van het eerste orde-model voor de slibgisting niet is bewezen, is het aannemelijk dat het bruikbaar is als benadering van het procesverloop⁸ (zie ook 3.3). Aan de rechte lijn die ter vergelijking is weergegeven, moet minder waarde worden gehecht, omdat deze niet samenhangt met een functioneel verband tussen verblijftijd en gasproductie. De methode voor de berekening van de eerste orde reactiecoëfficiënten is beschreven in bijlage 5.

Om foutieve gegevens te kunnen uitsluiten is selectie toegepast gebruikmakend van de tamelijk vaste verhouding tussen de gasproductie en de hoeveelheid afgebroken organische stof. Hierbij is uitgegaan van $1,0 \pm 0,1$ m³ gas/kg o.s.-afspraak.

De resultaten van de regressieberekeningen zijn weergegeven in tabel 4 en 5 en figuur 10.

	a (m ³ /kg o.s.)	k (1/d)	corr. coëff.	aantal gegevens
0	0,50	0,15	0,33	51
I	0,53	0,10	0,73	16
0 alle rwzi's (totaalbestand)				
I alle rwzi's met 0,9 - 1,1 m ³ gasproductie/kg o.s.-afbraak				

regressiefunctie: spec. gasproduc. = $a (1 + k_1 \cdot t_h)^{-1}$

a = maximale gasopbrengst

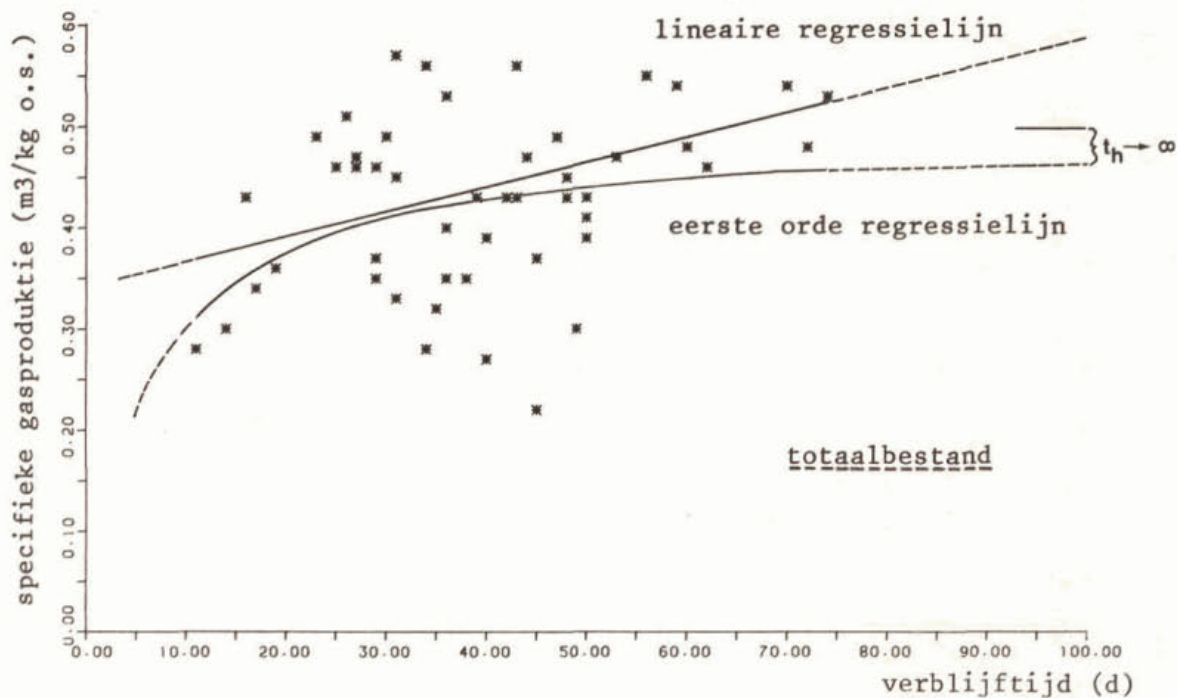
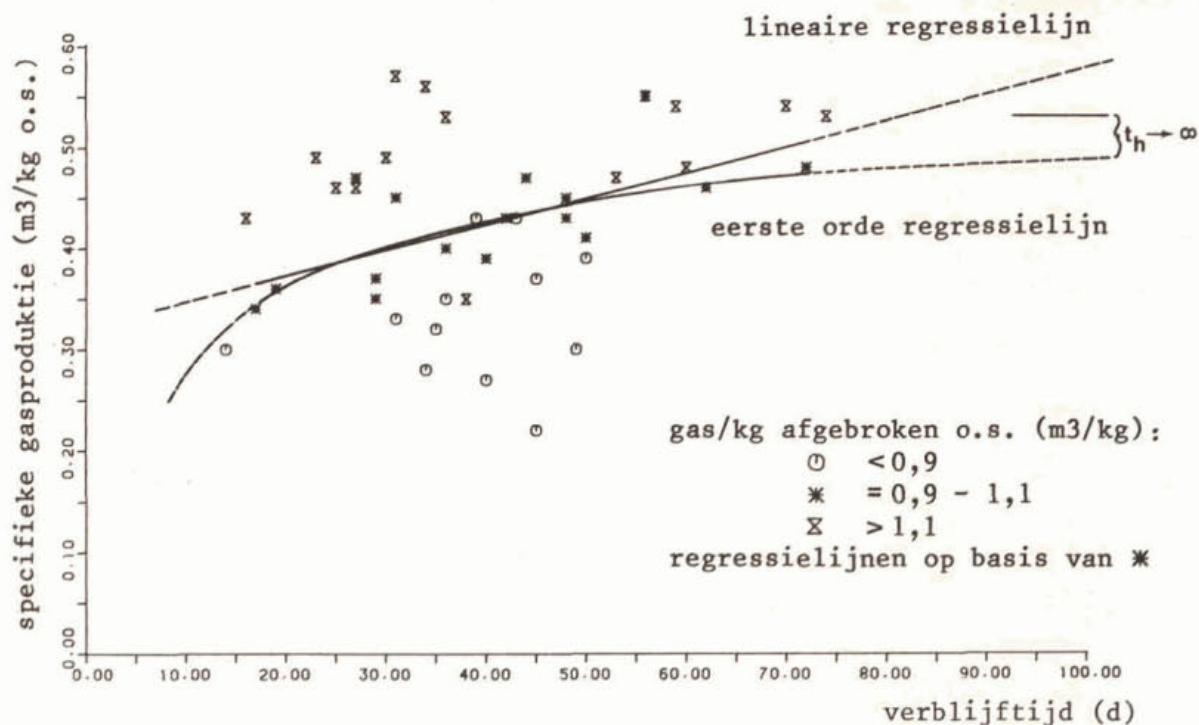
k = eerste orde reactieconstante

Tabel 4. Regressieanalyse van de relatie tussen verblijftijd en specifieke gasproductie op basis van eerste orde reactiekinetiek

	a ₀ (m ³ /kg o.s.)	a ₁ (10 ⁻² m ³ /kg o.s.d)	corr. coëff.	aantal gegevens
0	0,34	0,26	0,34	51
I	0,32	0,25	0,69	16
0 alle rwzi's (totaalbestand)				
I alle rwzi's met 0,9 - 1,1 m ³ gasproductie/kg o.s.-afbraak				

regressielijn: spec. gasprod. = a₀ + a₁ · verblijftijd

Tabel 5. Regressieanalyse van de relatie tussen verblijftijd en specifieke gasproductie op basis van een rechtlijnig verband



Figuur 10. Relatie tussen verblijftijd en specifieke gasproductie met en zonder selectie op basis van de verhouding gasproductie/o.s.-afbraak

Regressieanalyse van alle gegevens levert een matige correlatie tussen verblijftijd en specifieke gasproductie (correlatie coëfficiënt $r = 0,33$). De oorzaak hiervan is de relatief grote spreiding van de gegevens in verhouding tot de geringe helling van de curve.

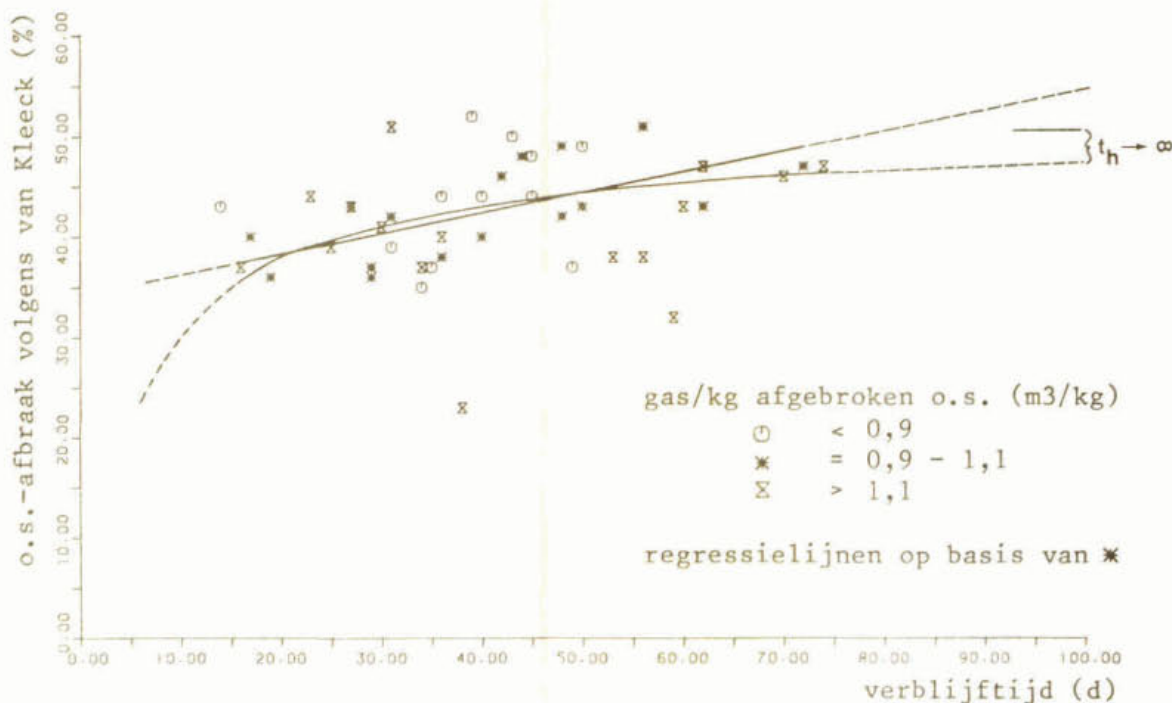
Selectie van de rwzi's die voldoen aan de theoretische gasopbrengst van $1,0 + 0,1$ m³ gas per kg afgebroken organische stof geeft een aanzienlijk betere correlatie : $r = 0,73$.

De regressieanalyse heeft geen duidelijke verschillen opgeleverd tussen actiefslib- en oxydatiebedinrichtingen, noch tussen eentrap- en tweetrapsgistingsinstallaties. Hiervoor is de spreiding van de meetwaarden te groot en is het aantal rwzi's dat per categorie voldoet aan het selectie criterium te klein. Voor de verblijftijden korter dan 25 dagen moet worden opgemerkt dat alle gegevens afkomstig zijn van tweetrapsgistingsinstallaties, waar nagisting in de onverwarmde tanks een extra bijdrage aan de gasproductie kan leveren. Dit betekent dat de algemene geldigheid van de gevonden relaties bij verblijftijden korter dan 25 dagen twijfelachtig is.

De resultaten van deze regressieanalyse vormen een belangrijke aanvulling van de beperkte kennis over het effect van de verblijftijd op de gasproductie. Met name over verblijftijden langer dan 20 dagen en over de relatie tussen verblijftijd en gasproductie op praktisch-schaal is in de literatuur weinig informatie beschikbaar. Volgens de eerste orde relatie neemt de gasproductie met 20% toe bij verlenging van de verblijftijd van 20 tot 40 dagen. Het verloop is iets minder steil dan een curve gebaseerd op gegevens van 10 rwzi's uit een eerder Nederlands onderzoek ⁴¹ (zie figuur 6).

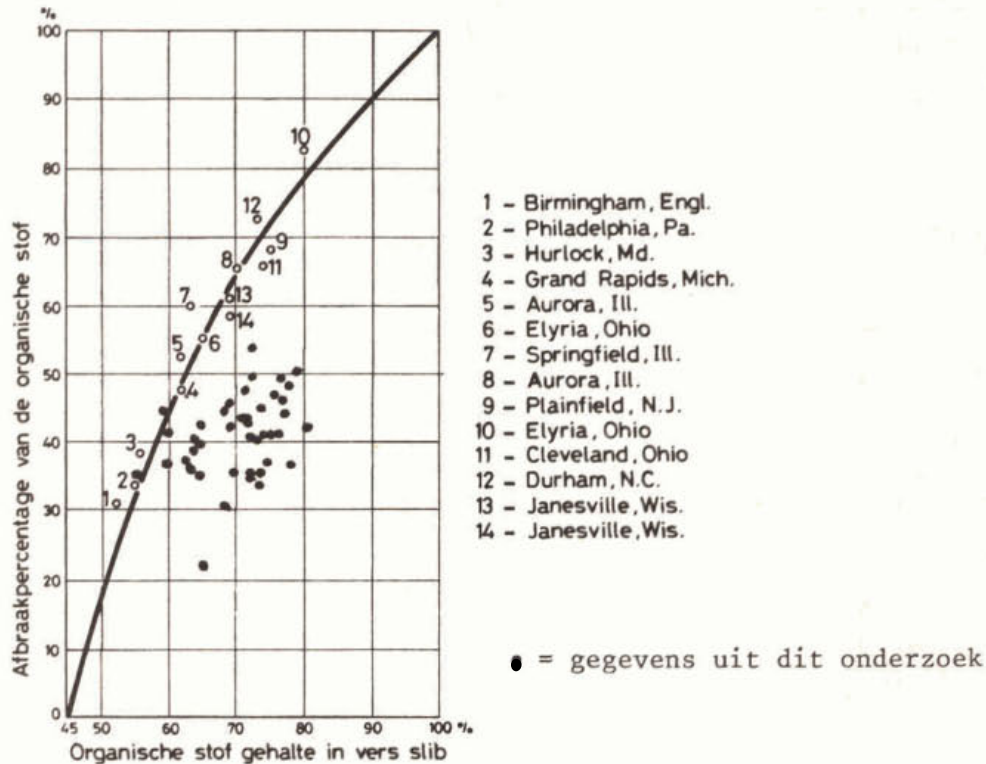
6.5.3 regressieanalyse van overige parameters

De relatie tussen verblijftijd en afbraak van organische stof (van Kleeck methode) levert vrijwel hetzelfde beeld als de specifieke gasproductie, zij het dat de helling van de regressielijnen iets minder steil is (figuur 11).



Figuur 11. Lineaire- en eerste orde regressielijnen van de relatie tussen verblijftijd en afbraak van organische stof

In de literatuur is een relatie beschreven tussen het gehalte organische stof in het verse slib en het afbraakpercentage bij vergisting van het slib ³⁶. Deze relatie is in dit onderzoek niet gevonden (zie figuur 12).



Figuur 12. Afbraakpercentage van organische stof als functie van het organische stofgehalte in versslib volgens literatuur ³⁶ en zoals gevonden in dit onderzoek

Omdat in een enquête van rwzi's in Beieren aanwijzingen werden gevonden voor minder vergaande afbraak van slib met verhoogde gehalten zware metalen ⁴⁹, is onderzocht of een dergelijke relatie in Nederland bestaat. Aanwijzingen hiervoor zijn echter niet gevonden.

6.6 De invloed van niet-kwantificeerbare factoren op het gistingproces

Een aantal factoren die de gasproductie kunnen beïnvloeden, kon niet (volledig) in de inventarisatie worden opgenomen. Op grond van vooral mondelinge informatie van de waterkwaliteitsbeheerders is geprobeerd de rol van deze factoren in de praktijk na te gaan.

Menging

Gegevens over de menging beperken zich grotendeels tot het type menginrichting. Van de 63 onderzochte installaties is 67% voorzien van gasinblazing, 22% van een roerwerk en bij 11% vindt menging uitsluitend plaats door recirculatie van de reactorinhoud. Gegevens over het geïnstalleerde vermogen ontbreken. Over de frequentie en de duur van het mengen zijn in een beperkt aantal gevallen gegevens beschikbaar. Bij installaties met gasinblazing wordt 2 uur tot 12 uur per etmaal gemengd, verdeeld in perioden van 0,5 tot 1 uur. Bij roerwerken en circulatiesystemen, die in de regel een lager geïn-

stalleerd vermogen hebben, komen langere mengperioden en continubedrijf voor. Incidenteel is geëxperimenteerd met vermindering van de mengintensiteit. Duidelijke effecten op de hoeveelheid geproduceerd gas werden hierbij niet gevonden.

Temperatuurstratificatie is geconstateerd in gistingstanks met te korte inblaaslansen. Op de bodem van deze tanks ontstond een koude laag vers slib die zich slecht met de overige tankinhoud vermengde. In een ander geval bleek de effectieve inhoud sterk gereduceerd te zijn door zandophoping in de reactor.

Invloed van de slibsamenstelling op de gasproductie

Hoewel de gasopbrengst afhangt van de biologische afbreekbaarheid van het slib en van de energie-inhoud van de afbreekbare bestanddelen, is over deze factoren geen praktijkinformatie gevonden. Rwzi's die qua specifieke gasproductie (in verhouding tot de verblijftijd) afwijken van het gemiddelde, onderscheiden zich ogenschijnlijk niet van de overige inrichtingen; verschillen tussen grote steden en buitengebieden of tussen verschillende delen van het land uiteten zich niet in de gasopbrengst. Verschillen in slibsamenstelling kunnen echter eenvoudig onopgemerkt blijven, omdat chemische analyse van de slibbestanddelen zelden wordt uitgevoerd. Overigens laat de slibsamenstelling zich niet eenvoudig beïnvloeden, zodat deze factor voor de optimalisatie van de gasproductie geen rol speelt.

7 ENERGETISCHE EN FINANCIËLE EVALUATIE VAN DE ONDERZOCHE GISTINGS- TECHNIEKEN

7.1 Uitgangspunten van de evaluatie

In de voorgaande hoofdstukken zijn diverse technieken beschreven die de gasproductie, de totale energiehuishouding en de kosten/baten van het slibgistingproces kunnen beïnvloeden. In dit hoofdstuk wordt de beschikbare informatie geëvalueerd door de energetische en financiële consequenties van de verschillende gistingstechnieken te berekenen voor een hypothetische rwzi met een capaciteit van 80.000 i.e. Om een indruk te krijgen van het schaafeffect zijn de belangrijkste berekeningen tevens uitgevoerd voor een zuiveringscapaciteit van 200.000 i.e. Als uitgangssituatie wordt een conventionele eentraps-gistingsreactor beschouwd, in combinatie met een voorindikker. Het gistingsgas wordt als brandstof gebruikt in een warmte-krachtinstallatie die electriciteit en warmte levert voor gebruik op de rwzi. In vergelijking met deze uitgangssituatie wordt nagegaan wat het effect is van variatie van de procesparameters. Tevens wordt de toepassing van alternatieve stabilisatieprocessen vergeleken met deze uitgangssituatie.

Bij de vergelijking van de diverse technieken komen ondermeer de volgende aspecten aan de orde:

- bruto gasproductie;
- netto electriciteitsproductie = geproduceerde electriciteit verminderd met het stroomverbruik ten behoeve van de slibstabilisatie (inclusief voorindikking);
- kosten/baten van de stabilisatie op grond van electriciteitsopbrengst, aardgasinkoop en de exploitatiekosten van de bouwkundige en electromechanische voorzieningen.

Bij de vergelijkingen wordt aangenomen dat de gehele gasproductie wordt toegevoerd aan de gasmotoren en dat de geproduceerde electriciteit volledig kan worden benut ter vervanging van ingekochte stroom. Het bruikbare deel van de warmteproductie van de motoren kan worden benut voor verwarming van de gistinginstallatie. Een eventueel warmtetekort wordt aangevuld door middel van een verwarmingsketel, gestookt met aardgas.

Ter vereenvoudiging van de berekeningen worden personeelskosten buiten beschouwing gelaten. Omdat de berekeningen slechts het verschil dienen aan te geven tussen verschillende procesvormen, zijn niet de kosten meegerekend die voor alle procesvormen gelijk zijn (bijvoorbeeld de exploitatie van de warmte-krachtinstallatie). Door deze en andere vereenvoudigingen geeft deze evaluatie niet zonder meer aan wat de absolute kosten en baten zijn. Wel toont de vergelijking op welke punten de processen verschillen en in welke orde van grootte men de verschillen mag verwachten.

In alle vergelijkingen wordt ervan uitgegaan dat de beschouwde installaties op hun ontwerp-capaciteit worden belast. De grondslagen van de berekeningen zijn beschreven in bijlage 7.

7.2 Variatie van procesfactoren in het conventionele gistingsproces

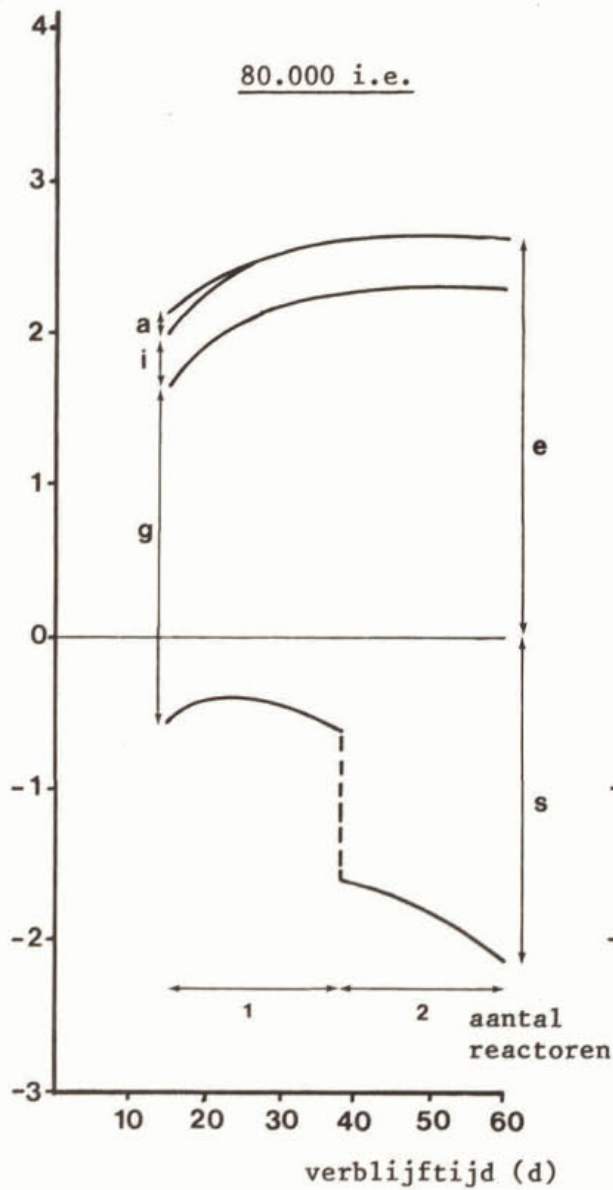
7.2.1 de optimale verblijftijd

De hydraulische verblijftijd beïnvloedt direct de specifieke gasproductie en indirect via het reactorvolume de warmtehuishouding, het energieverbruik voor menging en de kapitaalkosten. Deze factoren zijn berekend uitgaande van een eerste orde afbraakmechanisme en cilindrische reactorvorm met vaste hoogte/diameterverhouding. De relatie tussen gistingsvolume en investeringskosten is weergegeven in bijlage 7. De berekening van de warmtehuishouding is beschreven in bijlage 6.

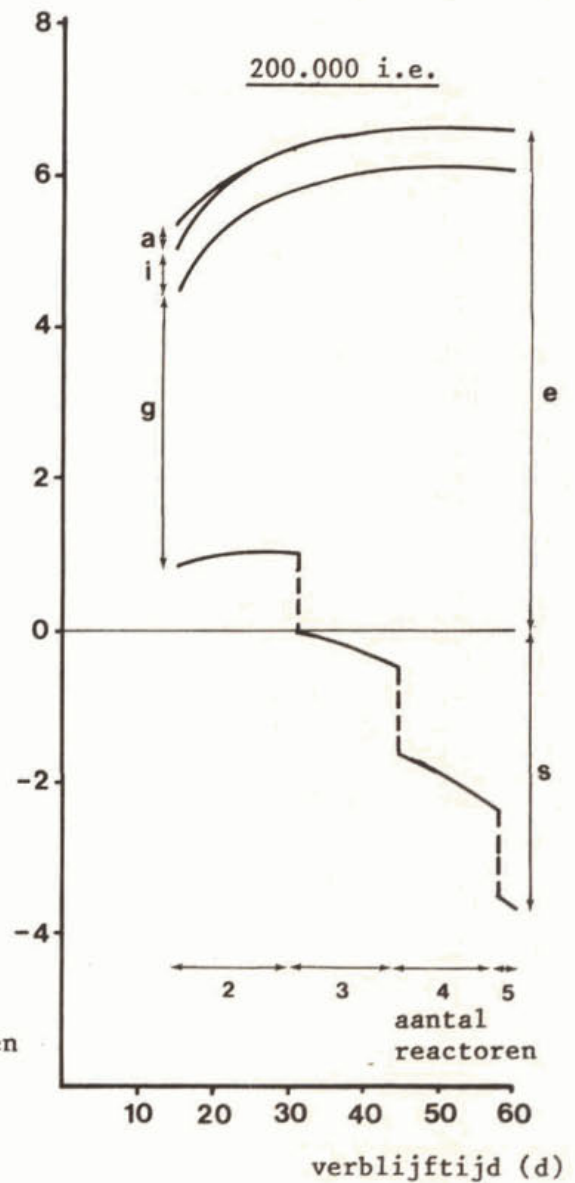
verblijftijd (d)	15	20	30	40	60
reaktorvolume (m ³)	2.160	2.880	4.320	5.760	8.640
santal tanks	1	1	1	2	2
energie-inhoud gistingsgas (10 ⁶ kJ/d)	28,1	31,2	35,1	37,4	40,1
electriciteitsproductie (10 ⁶ kJ/d)					
+ bruto	7,87	8,74	9,83	10,47	11,23
- verbruik indikking	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
- verbruik menging	0,55	0,75	1,12	1,49	2,24
= netto	7,21	7,89	8,61	8,88	8,89
warmtehuishouding (10 ⁶ kJ/d)					
+ productie W-K-installatie	12,6	14,0	15,8	16,8	18,0
- behoefte zomer/winter	10,1/15,1	10,3/15,3	10,6/15,7	10,8/16,0	11,3/16,6
= tekort zomer/winter	0/2,5	0/1,3	0/0	0/0	0/0
contante waarde (10 ⁶ gld)					
+ opbrengst electriciteit	2,13	2,34	2,54	2,63	2,63
- inkoop aardgas	0,14	0,07	0	0	0
- exploitatie voorindikker	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34
- exploitatie gisting					
bouwkundig	0,70	0,79	0,99	1,32	1,65
electromechanisch	1,16	1,19	1,26	1,99	2,10
onderhoud	0,35	0,37	0,41	0,62	0,68
totaal	2,21	2,35	2,66	3,93	4,43
= totaal	-0,56	-0,42	-0,46	-1,64	-2,14

Tabel 6. Energetische en financiële aspecten bij toepassing van verschillende verblijftijden (80.000 i.e.)

contante
waarde
(10^6 gld)



contante
waarde
(10^6 gld)



e = opbrengst electriciteit
a = inkoop aardgas
i = exploitatie indikking
g = exploitatie gisting
s = opbrengst - kosten

Figuur 13. Invloed van de verblijftijd op de kosten en baten van het slibgistingsproces

Conclusie:

De gunstigste combinatie van energieopbrengst en exploitatiekosten wordt voor de 80.000 i.e.-installatie gevonden tussen 20 en 25 dagen verblijftijd. Bij 200.000 i.e. is de kostencurve tussen 20 en 30 dagen vrijwel vlak. De curven zijn discontinu bij de overgangen naar een ander aantal gistingreactoren. Deze zijn noodzakelijk omdat de afmetingen van de tanks aan praktische grenzen zijn gebonden.

7.2.2 aanpassing van de gistingstemperatuur

Aangenomen wordt dat het temperatuurgebied rond 33°C optimaal is voor het mesofiele slibgistingproces. Wijziging van de gistingstemperatuur binnen de grenzen van het mesofiele gebied biedt dus geen mogelijkheid voor verhoging van de bruto gasproductie.

In koude perioden kan de restwarmte van de gasmotoren onvoldoende zijn om in de warmtebehoefte van de gisting te voorzien. Het kan dan voordelig zijn om bij iets lagere temperatuur te vergisten, indien de besparing op de aardgasinkoop groter is dan de daling van de electriciteitsproductie.

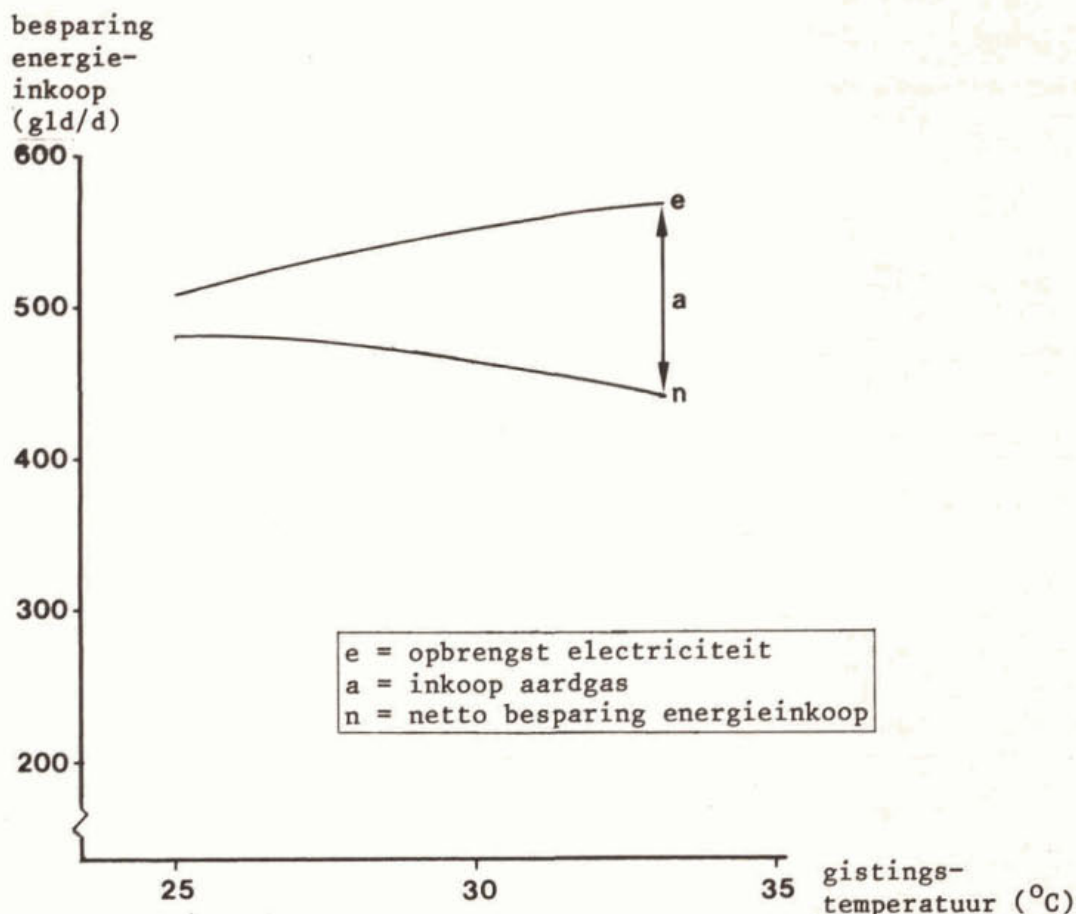
In het volgende rekenvoorbeeld is het effect berekend van lagere gistingstemperaturen in een korte winterse periode met lagere temperaturen dan gemiddeld.

Uitgangspunten:

- gistingstijd 20 d;
- buitentemperatuur 0°C; slibtemperatuur 4°C;
- temperatuurafhankelijkheid van de gasproductie volgens figuur 7: 100% gasproductie bij 33°C, 97% bij 30°C, 90% bij 25°C;
- overige uitgangspunten als in vorige paragrafen.

gistingstemperatuur (°C)	33	30	25
energie-inhoud gistingsgas (10 ⁶ kJ/d)	31,2	30,3	28,1
electriciteitsproductie (10 ⁶ kJ/d)			
+ bruto	8,7	8,5	7,9
- verbruik indikking	0,1	0,1	0,1
- verbruik menging	0,8	0,8	0,8
= netto	7,8	7,6	7,0
warmtehuishouding (10 ⁶ kJ/d)			
+ produktie w-k installatie	14,0	13,6	12,6
- behoefte	19,1	17,1	13,8
= tekort	5,1	3,5	1,2
besparing energie-inkoop (gld/d)			
+ opbrengst electriciteit	568	551	508
- inkoop aardgas	131	90	30
= verschil opbrengst-inkoop	437	461	478

Tabel 7. Energetische en financiële aspecten van het gistingproces op koude winterdagen bij verlaging van de gistingstemperatuur (80.000 i.e.)



Figuur 14. Besparing energie-inkoop op koude winterdagen afhankelijk van de gistingstemperatuur

Conclusie

Op koude winterdagen kan verlaging van de gistingstemperatuur voordelig zijn, omdat de besparing op de aardgasinkoop opweegt tegen de lagere electriciteitsopbrengst. Voorwaarde voor toepassing van temperatuurverlaging is uiteraard dat de stabilisatiegraad van het slib blijft voldoen aan de gestelde eisen.

7.2.3 intensieve voorindikking

Intensieve voorindikking met gescheiden behandeling van primair en secundair slib is vergeleken met gezamenlijke indikking in een gravitatieindikker. Bij gescheiden indikking wordt aangenomen dat primair slib door middel van gravitatie wordt ingedikt en secundair slib door flotatie.

Uitgangspunten:

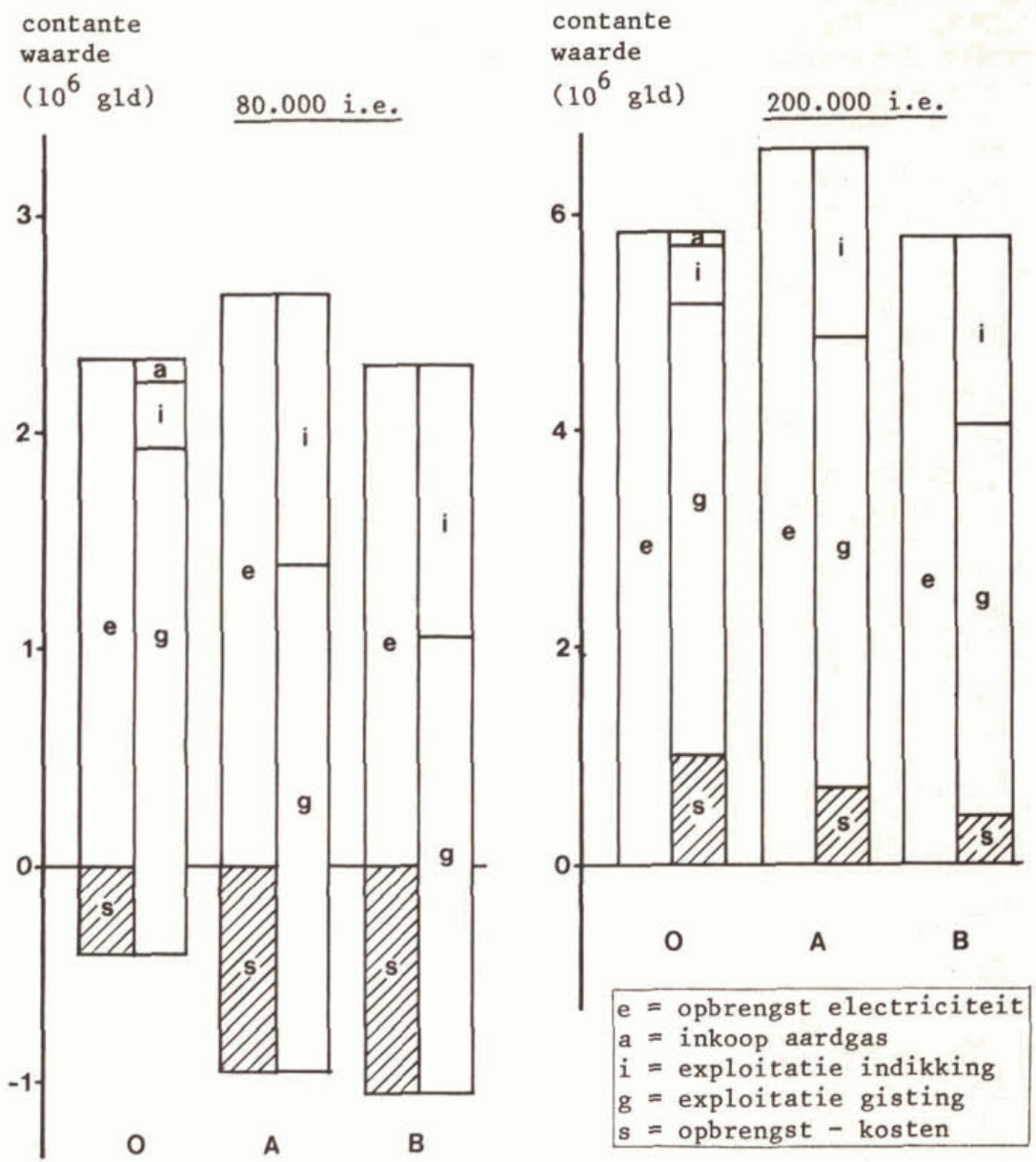
- conventionele indikking tot 3,5% drogestof;
- gescheiden indikking primair slib 7%, secundair slib tot 5%;
- energieverbruik gravitatie-indikking 0,2 kWh/m³ ingedikt slib, flotatie 3 kWh/m³ ingedikt slib;
- investering gravitatie-indikker evenredig met diameter, uitgaande van bijlage 7;
- investering flotatie-indikking voor secundair slib: voor 80.000 i.e. bouwkundig f 450.000,-, electromechanisch f 600.000,-; voor 200.000 i.e. bouwkundig f 700.000,-, electromechanisch f 750.000,-.

Bij verkleining van het slibdebiet door intensieve indikking zijn twee situaties beschouwd:

- verlenging van de verblijftijd bij onveranderd reactorvolume (A);
- verkleining van het reactorvolume bij gelijke verblijftijd (B).

	0	A	B
reactorvolume (m ³)	2880	2880	1670
slibdebiet (m ³ /d)	144	84	84
verblijftijd (d)	20	35	20
energie-inhoud gistingsgas (10 ⁶ kJ/d)	31,2	36,2	31,2
electriciteitsproductie (10 ⁶ kJ/d)			
+ bruto	8,74	10,16	8,74
- verbruik indikking	0,10	0,47	0,47
- verbruik menging	0,75	0,75	0,43
= netto	7,89	8,94	7,84
warmtehuishouding (10 ⁶ kJ/d)			
+ produktie	14,0	16,3	14,0
- behoefte winter	15,3	9,4	9,0
= tekort winter	1,3	0	0
contante waarde (10 ⁶ gld)			
+ opbrengst electriciteit	2,34	2,64	2,31
- inkoop aardgas	0,07	0	0
- exploitatie indikking			
gravitatie	0,34	0,26	0,26
flotatie	0	0,99	0,99
- exploitatie gisting	2,35	2,35	2,11
= totaal	-0,42	-0,96	-1,05
0 = uitgangssituatie			
A = intensieve indikking + gelijkgebleven gistingsvolume			
B = intensieve indikking + gelijkgebleven verblijftijd			

Tabel 8. Energetische en financiële gevolgen van intensieve slib-indikking (80.000 i.e.)



0 = uitgangssituatie
 A = intensieve indikking + gelijkgebleven gistingsvolume
 B = intensieve indikking + gelijkgebleven verblijftijd

Figuur 15. Financiële aspecten van vergaande indikking in vergelijking met conventionele slibindikking

Conclusie
 Door intensieve indikking van vers slib kan bij gelijkblijvende gistingcapaciteit een hogere gasproductie worden bereikt, of een gelijke gasproductie bij verkleining van de gistingsreactor. Bij 80.000 i.e. is de besparing echter kleiner dan de extra kosten van een flotatie-eenheid naast een (kleinere) gravitatieindikker. Bij 200.000 i.e. spelen de exploitatiekosten van de flotatieinrichting een minder grote rol. Toch wordt nog geen financieel voordeel behaald in vergelijking met conventionele indikking.

7.2.4 parallel- en seriebedrijf bij toepassing van meerdere gistingsreactoren

In onderstaande berekening wordt de specifieke gasproduktie vergeleken van parallel- en seriebedrijf bij een slibgistingssysteem bestaande uit twee identieke reactoren. Aangenomen wordt dat bij seriebedrijf geen extreem korte verblijftijden worden toegepast, zodat geen scheiding plaatsvindt van verzuring en methaanvorming en het procesverloop in de eerste stap niet door overbelasting wordt geremd. De berekeningen gaan uit van een eerste orde reactiemechanisme en volledige menging. De uitkomsten zijn opgenomen in figuur 17.

Parallelbedrijf

spec.gasproduktie = $B \cdot a$ (m³/kg o.s.)

$$\text{waarin } B = \frac{t_h}{k \cdot t_h + 1}$$

a = max. gasproduktie = 0,53 m³/kg o.s.

k = reactieconstante = 0,10 d⁻¹

t_h = verblijftijd

Seriebedrijf (met verblijftijd $2 \cdot 0,5 t_h$)

spec.gasprod. = $(2B^{\frac{1}{2}} - B^{\frac{2}{2}}) \cdot a$ (m³/kg o.s.)

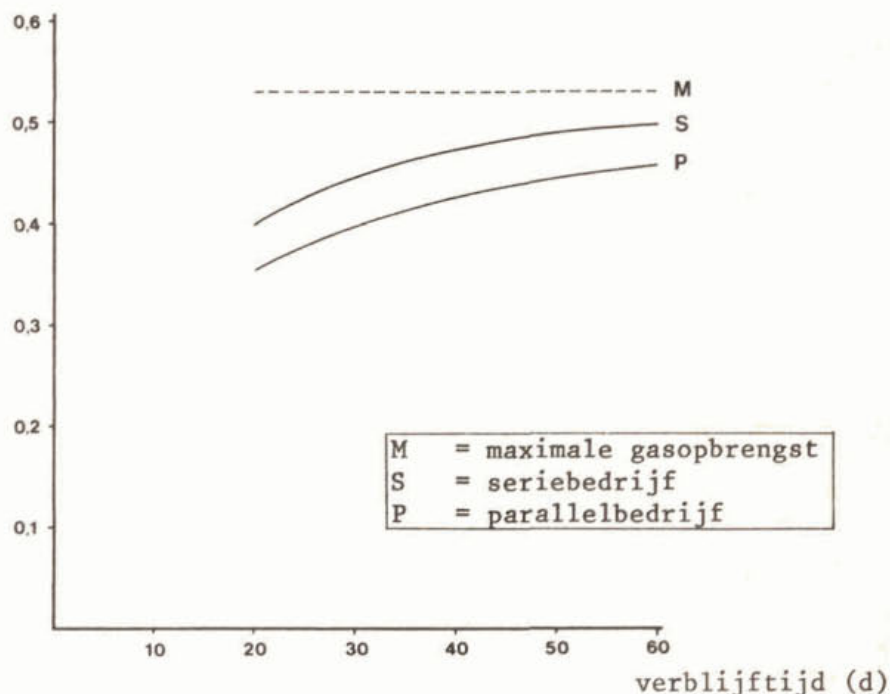
$$\text{waarin } B^{\frac{1}{2}} = \frac{\frac{1}{2} t_h}{\frac{1}{2} \cdot k \cdot t_h + 1}$$

Conclusie:

Volgens de procestheorie is 10-12% verhoogde gasproduktie te bereiken door toepassing van twee trappen in serie in plaats van enkeltraps- of parallelbedrijf.

Voorbehoud moet worden gemaakt voor de beperkte betrouwbaarheid van de gehanteerde eerste orde relatie bij zeer korte reactorverblijftijden. Hierdoor blijft de toepassing beperkt tot laag belaste gistingsystemen met een totale verblijftijd van minimaal 30-40 dagen, indien deze de mogelijkheid hebben zonder veel extra kosten om te schakelen van parallel- naar seriebedrijf.

specifieke
gasproductie
(m³/kg o.s.)



Figuur 16. Vergelijking specifieke gasproductie van parallel- en seriebedrijf met twee identieke reactoren

7.3 Toepassing van alternatieve processen

7.3.1 thermische voorbehandeling

Hittebehandeling van vers slib bij temperaturen beneden 100°C, zoals toegepast bij prepasteurisatie, geeft volgens Zwitserse praktijkervaringen geen verhoogde gasopbrengst. Verhitting onder druk tot 100-200°C verhoogt de gasopbrengst uit secundair slib, met als optimale waarde 70% meeropbrengst na een half uur voorbehandeling bij 175°C. De energetische en financiële aspecten van een dergelijke voorbehandeling worden vergeleken met de uitgangssituatie.

Uitgangspunten:

Situatie 0:

- vergisting van onbehandeld slib.

Situatie A:

- thermische voorbehandeling van de gehele slibstroom.

Situatie B:

- gescheiden indikking van primair en secundair slib (zie 7.2.3) en thermische voorbehandeling secundair slib.

Overige aannamen:

- de specifieke gasproductie uit de primaire en secundaire fractie

- in onbehandeld slib is gelijk; na thermische behandeling ontstaat 70% meer gas uit secundair slib, uit primair slib blijft de gasproductie onveranderd;
- energieverbruik van de hittebehandeling is vergelijkbaar met thermische conditionering zonder luchttoevoer (Porteous- of Farrer-proces); de warmtebehoefte is $250 \cdot 10^3$ kJ/m³, electr. verbruik 2,6 kWh/m³;
 - de warmtebehoefte van de thermische behandeling wordt geleverd door verbranding van gistingsgas; de resterende gasproductie gaat naar de W-K-installatie;
 - de restwarmte van het thermisch proces is voldoende voor de verwarming van de gisting.

Financiële vergelijking:

- de constructiekosten voor thermische behandeling zijn vergelijkbaar met thermische conditionering. Er zijn hiervan slechts beperkte gegevens beschikbaar, omdat installaties voor thermische conditionering weinig meer worden gebouwd en meestal bij grotere slibstromen worden toegepast. De kosten zijn geschat op basis van EPA-gegevens ⁴⁴ : constructiekosten situatie A f 3,5 miljoen, situatie B f 2,3 miljoen.
- Aangenomen wordt dat 60% van de investeringen bestaat uit electro-mechanische kosten.

	O	A	B
reactorvolume (m ³)	2880	2880	1670
slibdebiet (m ³ /d)	144	144	83,5
verblijftijd (d)	20	20	20
specifieke gasproductie (m ³ /kg o.s.)			
primair slib	0,35	0,35	0,35
secundair slib	0,35	0,60	0,60
60/40 mengslib	0,35	0,45	0,45
energie-inhoud gistingsgas (10 ⁶ kJ/d)			
+ productie	31,2	39,9	39,9
- verbruik hittebehandeling	0	36,0	10,0
= naar W-K-installatie	31,2	3,9	29,5
electriciteitsproductie (10 ⁶ kJ/d)			
+ bruto	8,74	1,09	8,26
- verbruik indikking	0,10	0,10	0,47
- verbruik hittebehandeling	0	1,35	0,40
- verbruik menging	0,75	0,75	0,43
= netto	7,9	-1,1	7,0
gemiddeld warmtetekort (10 ⁶ kJ/d)	0,65	0	0
contante waarde (10 ⁶ gld)			
+ opbrengst electriciteit	2,34	-0,33	2,07
- inkoop aardgas	0,07	0	0
- exploitatie indikking	0,34	0,34	1,25
- exploitatie hittebehandeling	0	3,21	2,15
- exploitatie gisting	2,35	2,35	2,11
= totaal	-0,42	-6,23	-3,44
O = geen voorbehandeling A = thermische behandeling gehele slibstroom na gravitatie-indikking B = thermische behandeling secundair slib na flotatie-indikking			

Tabel 9. Energetische en financiële aspecten van thermische voorbehandeling van het secundaire slib en van de totale slibstroom

Conclusie:

De verhoging van de gasproductie is onvoldoende om het energieverbruik van het proces te compenseren. De exploitatiekosten van de thermische reactor zijn zeer hoog, zodat geen voordeel wordt verkregen uit het vergrote gistingsrendement.

7.3.2 aërobe voorbehandeling

Van de uiteenlopende gegevens over aërobe voorbehandeling wordt als gunstigste waarde 8% verhoging van de gasproductie genoemd (zie par. 5.2.3). Deze situatie wordt hier vergeleken met conventionele slibgisting.

Uitgangspunten:

uitgangssituatie:

anaërobe conventionele reactor, temperatuur 33°C, $t_h = 20$ d.

alternatieve methode:

aërobe voorbehandeling gevolgd door vergisting als in de uitgangssituatie.

aërobe reactor:

- verblijftijd 12 uur, temperatuur 37°C;
- aëratie door tegenstroom luchtinblazing;
- energieverbruik 5,5 kWh/m³;
- gasproductie 8% groter dan in uitgangssituatie.

	anaërobe gisting	aërobe + anaërobe gisting
reaktorvolume (m ³)	2880	72 + 2880
energie-inhoud gistingsgas (10 ⁶ kJ/d)	31,2	33,7
electriciteitsproductie (10 ⁶ kJ/d)		
+ bruto	8,74	9,44
- verbruik indikking	0,10	0,10
- verbruik aërobe fase	0	2,90
- verbruik anaërobe fase	0,75	0,75
= netto productie	7,9	5,7
gem. warmtetekort (10 ⁶ kJ/d)	0,65	0
Contante waarde (10 ⁶ gld)		
+ opbrengst electriciteit	2,34	1,78
- inkoop aardgas	0,07	0
- exploitatie indikking	0,34	0,34
- exploitatie aërobe fase	0	p.m.
- exploitatie anaërobe fase	2,35	2,35
= totaal (excl. exploit. aërobe fase)	-0,42	-0,91

Tabel 10. Energetische en financiële aspecten van aërobe voorbehandeling in vergelijking met conventionele slibgisting

Conclusie:

Zelfs wanneer door aërobe voorbehandeling de gasproductie met 8% zou toenemen, is de netto energie-opbrengst kleiner dan in het conventionele proces door het hoge electriciteitsverbruik van de aërobe reactor.

7.3.3 twiefasen-gisting

Volgens Wechs ⁴⁷ wordt bij toepassing van gescheiden reactoren voor verzuring en methaanvorming de totaal benodigde verblijftijd met ruim 25% bekort. In een twiefasen-systeem zou bij 2 + 12 dagen

verblijftijd dezelfde omzettingsgraad worden bereikt als in 20 dagen conventionele gisting. In onderstaande berekening is uitgegaan van gelijk electriciteitsverbruik in vergelijking met het conventionele proces. De kosten van de verzuringsreactor zijn geschat op f 2.000/m³, gelijk verdeeld over bouwkundige en electromechanische voorzieningen. Nauwkeurige specificaties ontbreken echter.

	conventionele gisting	twefasengisting
Exploitatie gisting (10 ⁶ gld)		
1 ^e fase		
bouwkundig		0,29
electromechanisch		0,58
onderhoud		0,17
totaal	-	1,04
2 ^e fase		
bouwkundig	0,79	0,64
electromechanisch	1,19	1,10
onderhoud	0,37	0,33
totaal	2,35	2,07
totaal 1 ^e + 2 ^e fase	2,35	3,11

Tabel 11. Contante waarde van de exploitatiekosten van twefasengisting in vergelijking met conventionele slibgisting (80.000 ie.)

Conclusie:

Een globale schatting geeft aan dat de exploitatie van een twefasensysteem ondanks het geringere reactorvolume niet voordeliger is dan conventionele gisting. De kosten van de verzuringsreactor vormen een onzekere factor door het ontbreken van specificaties. Door de meer gecompliceerde bouwwijze is het echter niet te verwachten dat een 25% kleiner twefasensysteem voordeliger zal zijn dan een conventionele slibgisting.

7.3.4 thermofiele anaërobe gisting

Mesofiele en thermofiele slibgisting zijn vergeleken op een rwzi in Chicago. Toegepaste temperaturen en verblijftijden bedroegen respectievelijk 34,4/52,7 °C en 17/11 dagen, met specifieke gasproducties 0,32/0,40 m³/kg o.s. De gasproductie in het mesofiele proces is vergelijkbaar met Nederlandse gegevens (0,33 m³/kg o.s. bij 17 dagen verblijftijd volgens de eerder beschreven eerste orde relatie).

Onderstaande berekening geeft een vergelijking van mesofiele gisting bij 33°C en $t_h = 20$ d met thermofiele gisting zoals bedreven in Chicago. De warmtehuishouding is berekend naar Nederlandse omstandigheden.

Uitgangspunten:

- mesofiele gisting als in voorgaande berekeningen;
- intensievere menging in thermofiele gisting zodat het electriciteitsverbruik ondanks kleiner volume gelijk is aan mesofiele gisting;

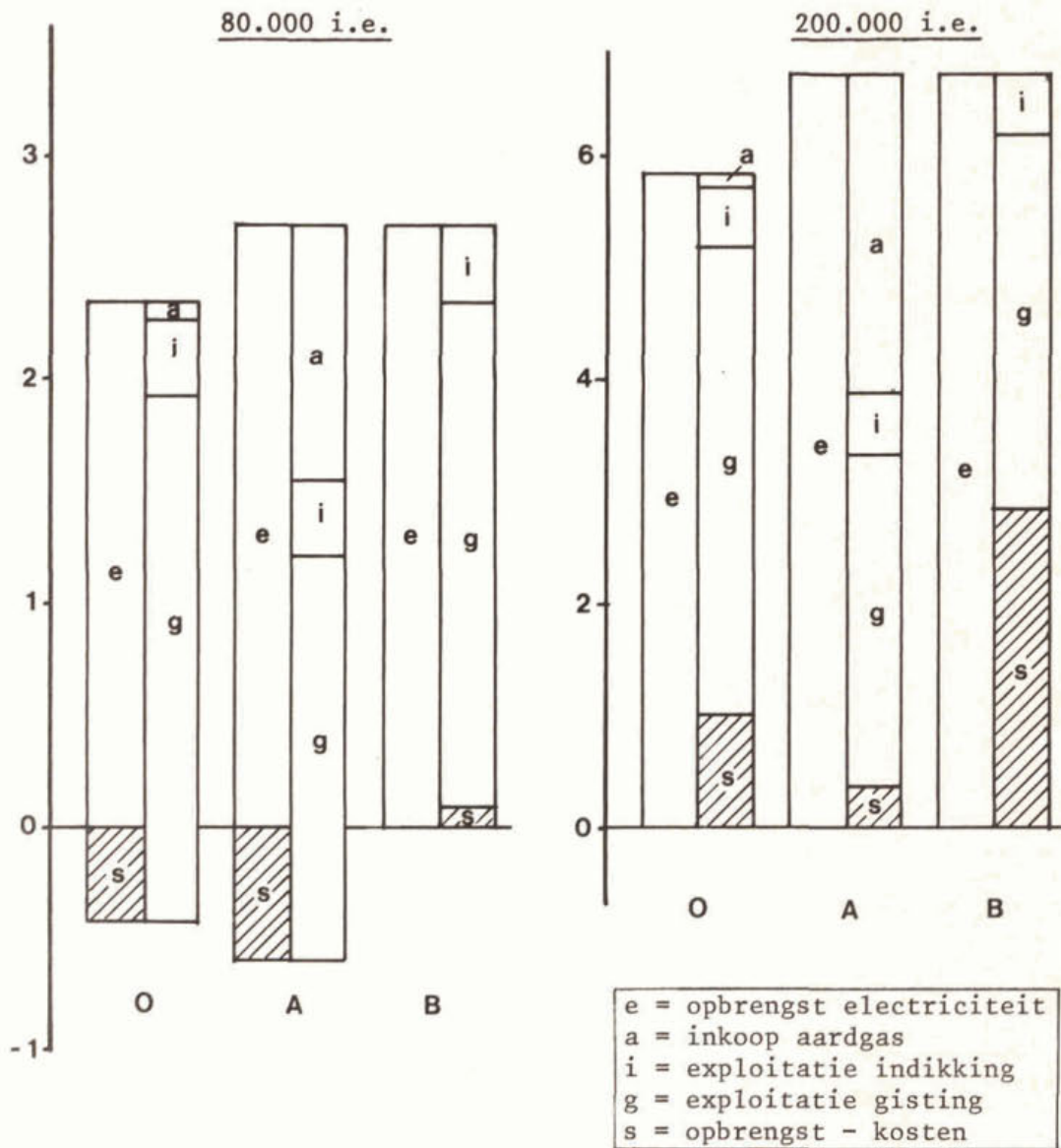
- bouwkosten voor thermofiele gisting 15% hoger door aanpassing aan hogere temperaturen;
- electromechanische kosten voor thermofiele gisting 25% hoger door het grotere stookvermogen en 50% verhoogd als bovendien warmte wordt teruggewonnen uit uitgest slib.

	mesofiel	thermofiel zonder warmte terugwinning	thermofiel 50% warmte terugwinning
temperatuur (°C)	33	53	53
verblijftijd (d)	20	11	11
reaktorvolume (m ³)	2880	1584	1584
specifieke gasproduktie (m ³ /kg o.s.)	0,35	0,40	0,40
energie-inhoud gistingsgas (10 ⁶ kJ/d)	31,2	35,3	35,3
electriciteit (10 ⁶ kJ/d)			
+ bruto produktie	8,74	9,88	9,88
- verbruik indikking	0,10	0,10	0,10
- verbruik menging	0,75	0,75	0,75
= netto produktie	7,9	9,0	9,0
warmte (10 ⁶ kJ/d)			
+ produktie	14,0	15,9	15,9
- behoefte zomer/winter	10,3/15,3	24,1/28,8	12,6/15,1
= tekort zomer/winter	0/1,3	8,2/12,9	0/0
Contante waarde (10 ⁶ gld)			
+ opbrengst electriciteit	2,34	2,69	2,69
- inkoop aardgas	0,07	1,14	0
- exploitatie indikking	0,34	0,34	0,34
- exploitatie gisting			
bouwkundig	0,80	0,68	0,68
electromech.	1,18	0,88	1,32
onderhoud	0,37	0,24	0,34
= totaal	-0,42	-0,59	0,01

Tabel 12. Energetische aspecten van thermofiele gisting met en zonder warmteterugwinning uit uitgest slib in vergelijking met conventionele mesofiele slibgisting (80.000 i.e.)

contante
waarde
(10^6 gld)

contante
waarde
(10^6 gld)



0 = mesofiele gisting, $T = 33^{\circ}\text{C}$, $t_h = 20\text{d}$
 A = thermofiele gisting, $T = 55^{\circ}\text{C}$, $t_h = 11\text{d}$,
 geen warmteterugwinning
 B = thermofiele gisting, $T = 55^{\circ}\text{C}$, $t_h = 1\text{d}$,
 terugwinning 50% opwarmenergie

Figuur 17. Financiële aspecten van thermofiele gisting in vergelijking met mesofiele gisting

Conclusie:

Indien geen warmteterugwinning uit het vergiste slib wordt toegepast, is thermofiele gisting ondanks de hogere gasopbrengst energetisch en economisch ongunstig, omdat veel aardgas moet worden bijgestookt. Wanneer echter de helft van de opwarmenergie uit het uitgeste slib kan worden teruggewonnen, zou het warmtetekort van het anaërobe proces kunnen worden opgeheven. In dat geval is thermofiele gisting door de iets grotere gasopbrengst voordeliger dan mesofiele gisting.

8 CONCLUSIES

1. Aanwijzingen dat de gistingsgasproduktie in Nederland beneden het haalbare niveau zou liggen, zijn in dit onderzoek niet bevestigd. De gistingsgasproduktie in Nederland is vrijwel gelijk aan de Westduitse. Hogere gasopbrengsten die in bepaalde handboeken worden genoemd zijn in Westeuropa waarschijnlijk niet reëel.
2. De berekening van het afbraakrendement is veelal onnauwkeurig omdat van de inkomende en uitgaande slibstroom de hoeveelheid en samenstelling dikwijls niet nauwkeurig bekend zijn. Bovendien zijn er sterke aanwijzingen dat de slibwaterstroom in de massabalans dikwijls ten onrechte wordt verwaarloosd.
3. De specifieke gasproduktie in Nederlandse rwzi's is een functie van de verblijftijd die redelijk kan worden beschreven door een eerste orde relatie. Het zuiveringsproces, het gistingstype (eentraps of tweetraps) en de grootte van de rwzi hebben geen aantoonbare invloed op de specifieke gasproduktie. De gasproduktie per inwoner equivalent is in actief-slibinrichtingen door de grotere slibproduktie hoger dan in rwzi's met oxydatiebedden.
4. In een bestaande inrichting kan de verblijftijd in de gistingreactor verlengd worden door een goede bedrijfsvoering van de indikking. Geautomatiseerde voeding van de gisting met sturing op de slibspiegel in de indikker kan hiertoe bijdragen. Bedrijf van de menginrichting tijdens de toevoer van vers slib is gewenst om het slib zo snel mogelijk over de reactorinhoud te verdelen. Toepassing van gescheiden indikking met flotatie van surplusslib lijkt geen direct financieel voordeel op te leveren door de hoge exploitatiekosten van de flotatieinrichting.
5. Bij energieopwekking uit gistingsgas geven verblijftijden rond 25 dagen de meest gunstige verhouding tussen electriciteitsopbrengst en exploitatiekosten. Verhoging van de temperatuur boven de gebruikelijke 33°C geeft binnen het mesofiele gebied weinig of geen extra gasproduktie. In perioden met zeer lage temperaturen kan verlaging van de gistingstemperatuur tot 25°C financieel gunstig zijn.
6. Remming door toxische stoffen is onder normale omstandigheden niet te verwachten. Wegens de sterke toxiciteit van met name gehalogeneerde koolwaterstoffen kunnen bij bepaalde industriële lozingen problemen optreden. Bij Nederlandse rwzi's met hoge gehalten zware metalen in het gistingsslib is geen verlaagde gasproduktie waargenomen.
7. Wanneer het gistingsvolume wordt verdeeld over twee in serie geschakelde reactoren, wordt in vergelijking met een volledig gemengd eentrapsysteem een hogere omzettingsgraad bereikt door beperking van de verblijftijdsspreiding. Volgens de reactortheorie is 10% verhoging van de gasproduktie mogelijk door in bestaande matig belaste gistingsinrichtingen met meerdere reactoren over te gaan van parallel- op seriebedrijf. De gebruikelijke tweetrapsgisting voldoet in dit opzicht niet, omdat de tweede trap meer als indikker dan als gistingreactor wordt bedreven.

8. Bij beschikbaarheid van goed afbreekbare afvalstoffen met hoge energieinhoud kan een extra bijdrage aan de gasproductie worden geleverd door deze aan de slibgisting toe te voegen. Het voordeel is het grootst bij substraten die anders aëroob zouden moeten worden afgebroken.
9. Dosering van enzympreparaten kan zinvol zijn om het opstartproces te versnellen in nieuwe of tijdelijk verstoorde gistingssystemen. Continue dosering ter verhoging van het afbraakrendement in een goed functionerend systeem is niet rendabel.
10. Thermische voorbehandeling bij minder dan 100°C, heeft geen invloed op de gasproductie. Boven 100°C wordt de afbreekbare fractie van surplusslib maximaal 70% vergroot. De warmtebehoefte van het thermische proces is echter groter dan de extra gasopbrengst en de exploitatiekosten zijn zeer hoog, zodat geen financieel voordeel mag worden verwacht.
11. Aërobe voorbehandeling gevolgd door anaërobe gisting levert in het gunstigste geval een lichte verhoging van de gasopbrengst ; het voordeel wordt echter teniet gedaan door het hoge energieverbruik van de aërobe reactor.
12. Door het grote aandeel slecht afbreekbaar materiaal in het te vergisten slib is biomassaretentie in de slibgisting niet uitvoerbaar. Hierdoor kunnen het UASB-proces en soortgelijke systemen niet in de slibgisting worden toegepast.
13. Thermofiele gisting is in de gebruikelijke uitvoering onrendabel door de grote warmtebehoefte voor verwarming van het slib. Bij terugwinning van de restwarmte van het uitgegiste slib kan het warmtetekort waarschijnlijk worden opgeheven. Dit maakt het proces door zijn iets grotere gasproductie en kleinere reactorvolume economischer dan mesofiele gisting. Hier tegenover staan de geringere stabiliteit, het sterker vervuilde slibwater en de relatieve onbekendheid van het proces door het geringe aantal (buitenlandse) praktijktoepassingen.

1. Voor een doelmatige optimalisatie van de gasproductie is nauwkeurige meting van het gistingsrendement noodzakelijk. Hiertoe zal in veel gevallen aanpassing van het bemonsteringsprogramma nodig zijn. Vooral de bemonstering van vers slib verdient aandacht. De berekening van het afbraakrendement gebaseerd op de massabalans dient met name bij tweetrapsgistingen gecorrigeerd te worden voor de afvoer via het slibwater. Wanneer gegevens hierover ontbreken of wanneer het drogestofgehalte van het vers slib niet goed gemeten kan worden, geeft de van Kleck methode een betere benadering van het afbraakrendement dan de massabalans. Vergelijking van de gasproductie en de hoeveelheid afgebroken organische stof maakt controle van de metingen mogelijk, omdat deze parameters binnen zekere grenzen aan elkaar gekoppeld zijn.
Meting van het CZV in plaats van het gloeiverlies als basis van de rendementsberekening kan een betere koppeling geven tussen slibafbraak en methaanproductie.
2. Eenvoudige gistingsproeven kunnen waardevolle informatie geven over de maximale gasopbrengst bij vergisting van verschillende slibsoorten en over de mogelijk restgasproductie van uitgestist slib.
3. Het verdient aanbeveling de werking van de menginrichting en het effect van de toegepaste mengfrequentie te controleren. Dit kan eenvoudig worden uitgevoerd door bemonstering van de reactorinhoud op verschillende diepten, zowel tijdens het mengen als in de niet-gemengde intervallen.
4. Praktijkonderzoek is gewenst om na te gaan of het mogelijk is door serie- in plaats van parallelbedrijf de gasproductie te vergroten in laagbelaste gistingsinrichtingen met meerdere reactoren.
5. Nader onderzoek is nodig om te kunnen beoordelen of in Nederland de potentiële voordelen van thermofiele slibgisting in de praktijk haalbaar zijn.

1. Anonym - Stratification and failure of gasification in sludge-digestion tanks. J.Inst. Sewage Purif. (1963) 590 - 593.
2. Baere,L. de & Verstraete,W.- Can the recent innovations in anaerobic digestion of wastewaters be implemented in anaerobic sludge digestion?
In "Recycling International - Recovery of energy and material from residues and waste". Verlag E. Freitag, Berlin, 1982.
3. Brade,C.E. & Noone,G.P. - Anaerobic sludge digestion - Need it be expensive? Making more of existing resources. Water Pollution Control (1981): 70 - 88.
4. Braun,H.J. & Kugel,G. & Zingler,E. - Simultaneous Pasteurization and Digestion of Sludge (SPD Process). in "Disinfection of Sewage sludge". Workshop Zürich, 1982.
5. Bruce,A.M. - New approaches to anaerobic sludge digestion. Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists 35 (1981): 215 -229.
6. Buhr,H.O. & Andrews,J.F. - The thermophilic anaerobic digestion process. Water Research 11 (1977): 129 - 143.
7. Dague,R.R. & McKinney,R.E. & Pfeffer,J.T. - Solids retention in anaerobic waste treatment systems. Journal WPCF 42 (1970): 29 - 46.
8. Eastman,J.A. & Ferguson,J.F. - Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. Journal WPCF 53 (1981): 353 -366.
9. Garber,W.F. - Operating experience with thermophilic anaerobic digestion. Journal WPCF 54 (1982): 1171 - 1175.
10. Ghosh,S. & Conrad,J.R. & Klass,D.L. - Anaerobic acidogenesis of wastewater sludge. Journal WPCF 47 (1975): 30 - 45.
11. Haug,R.T. - Effect of thermal pretreatment on digestibility and dewaterability of organic sludges. Journal WPCF 50 (1978): 73 - 85.
12. Hawkes,D.L. - Factors affecting net energy production from mesophilic anaerobic digestion.
Conference Proceedings "Anaerobic digestion", Travemünde, 1982.
13. Hemsley,J. & Latten,A. - Automation and uprating of anaerobic digesters.
Conference paper "Stabilisation and disinfection of sewage sludge", Manchester, 1983.
14. Hiraacka,M. & Takeda,N. & Yasuda,A. - Highly efficient anaerobic digestion with thermal pretreatment. Wat. Sci. Tech. 17 (1984): 529 -539.

15. Hobson, P.N. & Bousfield, S. & Summers, R. - Anaerobic digestion of organic matter. CRC Critical reviews in environmental control (1974): 131 - 191.
16. Imhoff, K. Taschenbuch der Stadtentwässerung. München, R. Oldenbourg Verlag, 1979.
17. Imhoff, K.R. - Design and operation of anaerobic sludge digesters in Germany. Conference paper "Stabilisation and disinfection of sewage sludge", Manchester 1983.
18. Kapp, H. - Mondelinge samenvatting van dissertatie, in druk als "Stuttgarter Berichte der Siedlungswasserwirtschaft", Nr. 86.
19. Keller, U. - Experiences and development of sludge pasteurization in Altenrhein, in "Disinfection of sewage sludge", Workshop Zürich, 1982.
20. Keller, U. & Berninger, I. - Aerob thermophile Schlammfermentation mit anschliessender Faulung - Vergleichende Pilotversuche in der ARA Altenrhein. Gaz - Eaux - Eaux usées 64 (1984): 215 - 224.
21. Köhler, R. - Schadewirkung auf den Schlammfaulungsprozess durch stagnierend und toxisch wirkende Stoffe. Wasser, Luft und Betrieb, 10 (1966): 6.
22. Kruize, R.R. & van den Bergen, V.W.J. & Hartjes, H. - Vergiftiging van de slibgisting op de R.W.Z.I. Amsterdam-Noord. H₂O 16 (1983): 100 - 114.
23. Kugelman, I.J. & McCarty, P.L. - Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment, J.W.P.C.F. 37 (1965): 97.
24. Kugelman, I.J. & McCarty, P.L. - Cation toxicity and stimulation in anaerobic waste treatment - daily feed studies, Proc. 19th Purdue Ind. Waste Conf., 1965.
25. Lettinga, G. Toepassing anaerobe slibgisting. Cursus verwerking van slib van rioolwaterzuiveringsinrichtingen 1978-1979. Stichting postacademiale vorming gezondheidstechniek.
26. Loll, U. - Dimensionierungs- und Betriebswerte von Abwasser - Schlamm Faulanlagen in der Bundesrepublik Deutschland. In "Zehn Jahre Oswald Schultze Stiftung", Eigenverlag Oswald Schultze Stiftung, Gladbeck, 1981.
27. McCarty, P.L. e.a. - Heat treatment for increasing methane yields from organic materials. In "Microbial energy conversion", Seminar Göttingen 1976. Pergamon Press Oxford, 1977.
28. Meyer, H. & Kaudelka, A. & Podewils, W. - Technisch Wirtschaftliche Aspekte der Klärgasverwertung auf Kläranlagen im Zusammenwirken von Abwasserreinigung und Energieautarkie. Mitteilungen der Oswald-Schultze-Stiftung, Heft 4, 1983.
29. Meyer, K.D. & Reimann, H. - Duale Schlammstabilisierung - Optimale Energierückgewinnung aus Klärschlamm. Korrespondenz Abwasser 29 (1982): 411 - 416.

30. Mosey, F.E. & Foulkes, M. - Control of the anaerobic digestion process. Conference paper "Stabilisation and disinfection of sewage sludge", Manchester 1983.
31. Ottengraf, S.P.P. & Oosterbroek, H.J.M. - The influence of thermal pretreatment on the digestion of sewage sludge and piggery waste (Poster), in "Anaerobic waste water treatment", conference Noordwijkerhout, 1983.
32. Pallasch, O & Triebel, W. - Lehr und Handbuch der Abwassertechnik, Band III. Berlin, Wilhelm Ernst und Sohn, 1975.
33. Pipyn, P. & Verstraete, W. - Waste classification for digestibility in anaerobic systems. In "Anaerobic digestion", conference Travemünde 1982.
34. Riegler, G. et. al. - Mengen und Inhaltstoffe von kommunalen Klärschlämmen in der Bundesrepublik Deutschland. Berichte zur Abwasser- und Abfalltechnik, ATV, 1982.
35. Rimkus, R.R. & Ryan, J.M. & Cook, E.J. - Full-scale thermophilic digestion at the West-Southwest sewage treatment works, Chicago, Illinois.
Journal WPCF 54 (1982): 1447 - 457.
36. Roediger, H. - Die anaerobe alkalische Schlammfäulung. GWF Schriftenreihe Wasser Abwasser Heft I, 3e Druck, 1967.
37. Friedrich Schrage GmbH & Co. KG, Hannover Produktionformatie "AIR reaktor".
38. Sixt, H. - Fortschritte und Entwicklung bei der Ausfäulung kommunaler Abwasserschlämme. Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie Band 36, 1983.
39. Spencer, R.R. - Enhancement of methane production in the anaerobic digestion of sewage sludges. Biotechnology & bioengineering Symp.No. 8 (1978): 257 - 268.
40. STORA - Gistinggas als energiebron op rioolwaterzuiveringsinrichtingen, Rijswijk, 1981.
41. STORA - Praktijkonderzoek eigen energieopwekking, Rijswijk, 1982.
42. Swanwick, J.D. & Shurben, D.G. & Jackson, S. - A survey of the performance of sewage sludge digesters in Great Britain. Journal of the Institute of Water Pollution Control 6 (1969): 1 - 24.
43. Thomson, J.L. & Michaelson, A.P. - Design aspects of the new anaerobic digesters at Bury. Conference paper "Stabilisation and disinfection of sewage sludge", Manchester 1983.
44. U.S. Environmental Protection Agency - Sludge treatment and disposal.
EPA - 625/4-78-012, 1978.

45. U.S. Environmental Protection Agency - Process design manual for sludge treatment and disposal. EPA 625/1-79-011, 1979.
46. Velsen, A.F.M. Van & Lettinga, G. - Effect of feed composition on digester performance. Conference proceedings "Anaerobic digestion", Travemünde, 1982.
47. Wechs, F. - Anaerobe Stabilisierung von pasteurisiertem Klärschlamm.
GWF Wasser Abwasser 125 (1984): 1 - 6.
48. Wiedemann, F. - Einrichtungen zur Umwälzung des Schlammes in Faulräumen. GWF Wasser/Abwasser 118 (1977): 278 - 284.
49. Wolf, P. - Erfahrungen mit der Anaeroben Schlammfäulung und Faulgasproduktion auf kommunalen Kläranlagen in Bayern. In "Anaerobe Abwasser- und Schlammbehandlung-Biogastechnologie", Münchener Beiträge zur Abwasser-, Fischerei- und Flussbiologie Band 36, 1983.
50. Zwiefelhofer, H.P. - Experience with aerobic, thermophilic disinfection of sewage sludge, at the Wartau Sewage Treatment Plant, and with prepasteurisation at the St. Gallen-Hofen Works, also in Switzerland.
In "Disinfection of sewage sludge", Workshop Zürich, 1982.

B I J L A G E N
= = = = =

Bijlage 1. Methoden voor de berekening van de afgebroken fractie organische stof

I Massabalans methoden:

Volledige massabalans:

$$f_{MB} = 1 - \frac{\Sigma \text{afvoer} + \text{accumulatie}}{\Sigma \text{toevoer}}$$

Aangepaste massabalans

$$f_{AB} = 1 - \frac{\Sigma \text{afvoer}}{\Sigma \text{toevoer}}$$

waarin:

$$\Sigma \text{ toevoer} = \Sigma (q_{in} \cdot d.s._{in} \cdot g.v._{in})$$

$$\Sigma \text{ afvoer} = \Sigma (q_{uit} \cdot d.s._{uit} \cdot g.v._{uit})$$

$$\text{accumulatie} = V_0 (d.s._{0,n} \cdot g.v._{0,n} - d.s._{0,1} \cdot g.v._{0,1})$$

II Methoden onder aanname dat de anorganische slibbestanddelen onveranderd de reactor passeren:

Constante as-methode

$$f_{CA} = 1 - d.s._{in} \left[\frac{g.v._{uit}}{1 - g.v._{uit}} \right] : d.s._{uit} \left[\frac{g.v._{in}}{1 - g.v._{in}} \right]$$

Van Kleeck methode

$$f_{VK} = 1 - \left[\frac{g.v._{uit}}{1 - g.v._{uit}} \right] : \left[\frac{g.v._{in}}{1 - g.v._{in}} \right]$$

Gebruikte symbolen:

- f = fractie afbraak van organische stof (kg/kg)
 Σ = som over de onderzocht periode
 q = slibdebiet (m³/d)
 V = reactorvolume (m³)
 d.s. = drogestofgehalte (kg/m³)
 g.v. = gloeiverlies (fractie van d.s.)

indices:

- in = toegevoegd (vers) slib
 uit = verwijderd (uitgelist) slib
 0 = reactorinhoud
 l = eerste dag onderzochte periode
 n = laatste dag onderzochte periode

Bijlage 2. Geïntervieweerde kenmerken van de Nederlandse gistingseinrichtungen

Ontwerpkenmerken

- jaar van ingebruikname
- type zuiveringsproces
 - . actiefslib
 - . oxydatiebed
 - . tweetraps oxydatiebed + actiefslib
 - . parallel oxydatiebed + actiefslib
 - . mechanisch
- ontwerpcapaciteit (i.e.)

Type slibstabilisatie

- eentraps of tweetraps gisting
- aanwezigheid voorindikker
- aanwezigheid naindikker
- mengsysteem:
 - . gasinblazing
 - . inwendige mechanische menging
 - . slibrecirculatie
- volume verwarmde gistingstrap

Bedrijfsgegevens waterbehandeling

- gemeten belasting (i.e.)
- aangesloten belasting (i.e.)
- aandeel huishoudelijk afvalwater (%)
- slibbelasting of volumebelasting (kg BZV/kg d.s.d; kg BZV/m³.d)
- produktie primair slib (kg d.s./i.e.d)
- produktie secundair slib (kg d.s./i.e.d)
- totale slibproduktie (kg d.s./i.e.d)

Bedrijfsgegevens slibgisting

- hydraulische verblijftijd (d)
- temperatuur in verwarmde trap (°C)
- drogestofgehalte vers slib (%)
- organische stofgehalte vers slib (% van d.s.)
- organische stofgehalte uitgest slib (% van d.s.)

Omzettingsparameters

- organische stofreductie volgens massabalans (%)
- organische stofreductie volgens van Kleeck-formule (%)
- gasproduktie per inwonerequivalent (l/i.e.d)
- specifieke gasproduktie op grond van toevoer drogestof (m³/kg d.s.)
- specifieke gasproduktie op grond van toevoer organische stof (m³/kg o.s.)
- gasproduktie per kg afgebroken organische stof volgens massabalans (m³/kg o.s.)
- gasproduktie per kg afgebroken organische stof volgens van Kleeck (m³/kg o.s.)

Gehalten zware metalen in uitgest slib (mg/kg d.s.)

- Zink
- Koper
- Chroom

- Lood
- Nikkel
- Cadmium
- Kwik
- Arseen

Opmerkingen

Ontwerpkenmerken:

- onder tweetrapsgisting wordt verstaan de combinatie van een verwarmde gemengde eerste trap gevolgd door een niet-verwarmde, niet-gemengde consolideringstrap;
- het reactorvolume heeft betrekking op het verwarmde en gemengde deel van het gistingsproces.

Bedrijfsgegevens waterbehandeling:

- de gemeten belasting is berekend uit de BZV-vracht van het influent op basis van 1 i.e. = 54 g BZV/d;
- de slibbelasting wordt gehanteerd bij actiefslibinstallaties, de volumebelasting bij oxydatiebedden.

Bedrijfsgegevens slibgisting:

- de hydraulische verblijftijd en organische stofbelasting hebben in tweetrapssystemen betrekking op de verwarmde en gemengde reactoren;
- organische stofgehalte (% van drogestof) = gloeiverlies (%) = 100-gloeirest (%);
- bij het ontbreken van gegevens over het uitgegiste slib is het o.s.-gehalte van het vloeibaar afgezette slib gehanteerd.

Omzettingsparameters:

- organische stofreductie volgens massabalans:

$$\text{o.s.-reductie} = 100 - \frac{\text{o.s.-vracht uitgegist slib}}{\text{o.s.-vracht vers slib}} \quad (\%)$$

- organische stofreductie volgens formule van Kleeck:

$$\text{o.s.-reductie} = \frac{\text{o.s.vers} - \text{o.s.gist}}{\text{o.s.vers} (100 - \text{o.s.gist})} \times 100 \quad (\%)$$

N.B. De o.s.-reductie volgens de massabalans is gebaseerd op de o.s.-vrachten van vers en uitgegist slib, zijnde het produkt van debiet (m³/d), drogestofgehalte (%) en organische stofgehalte (% van d.s.).

De van Kleeck formule maakt alleen gebruik van het organische stofgehalte = gloeiverlies (% van d.s.) van het verse en uitgegiste slib; debiet en d.s.-gehalte spelen geen rol (zie 4.10).

Bijlage 3. Bedrijfsgegevens van de Nederlandse gistingsinrichtingen gerangschikt per zuiveringsproces en gistingsstelsel

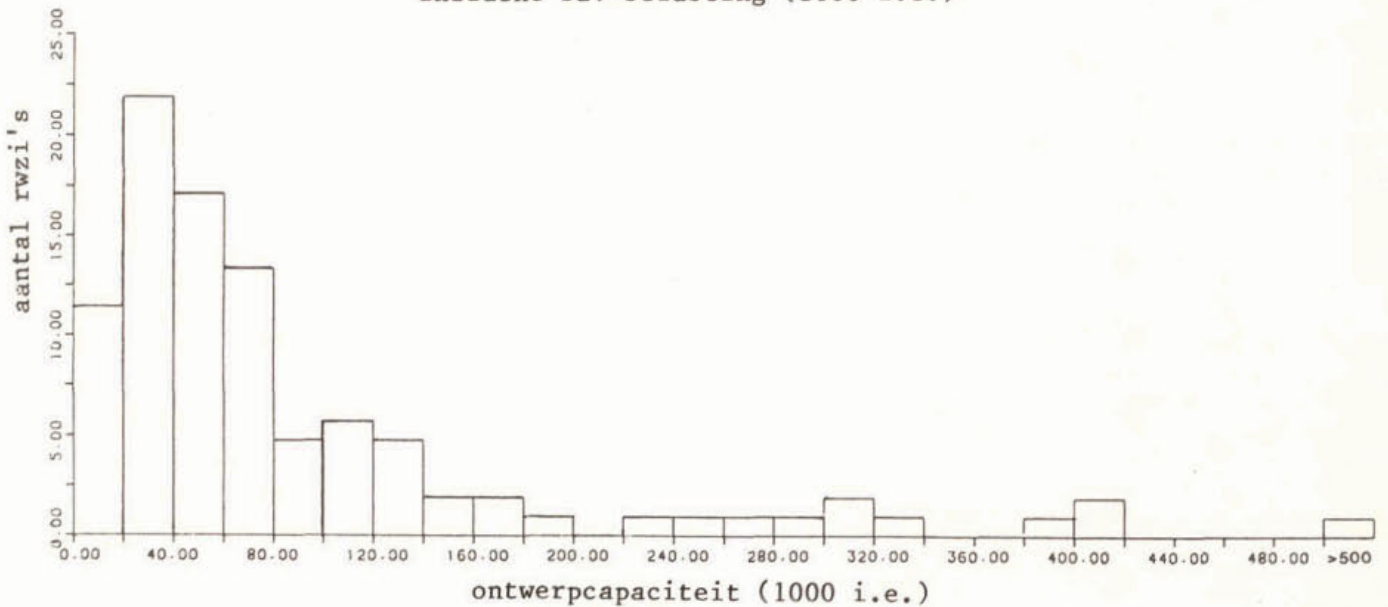
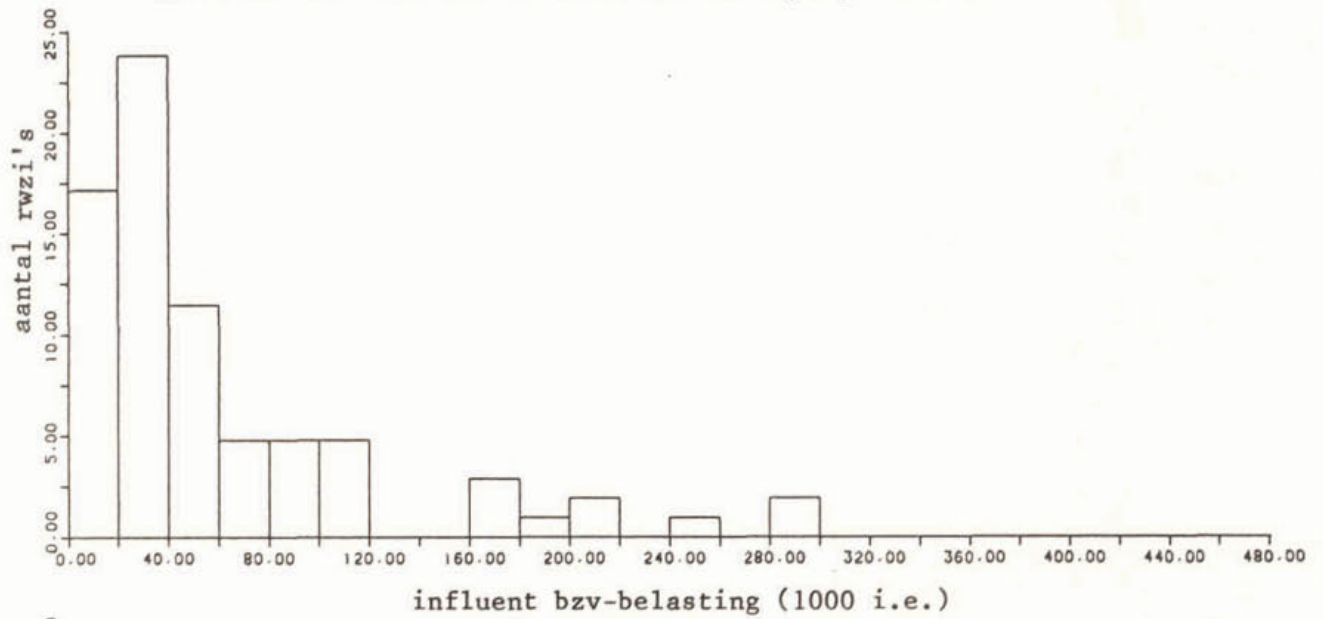
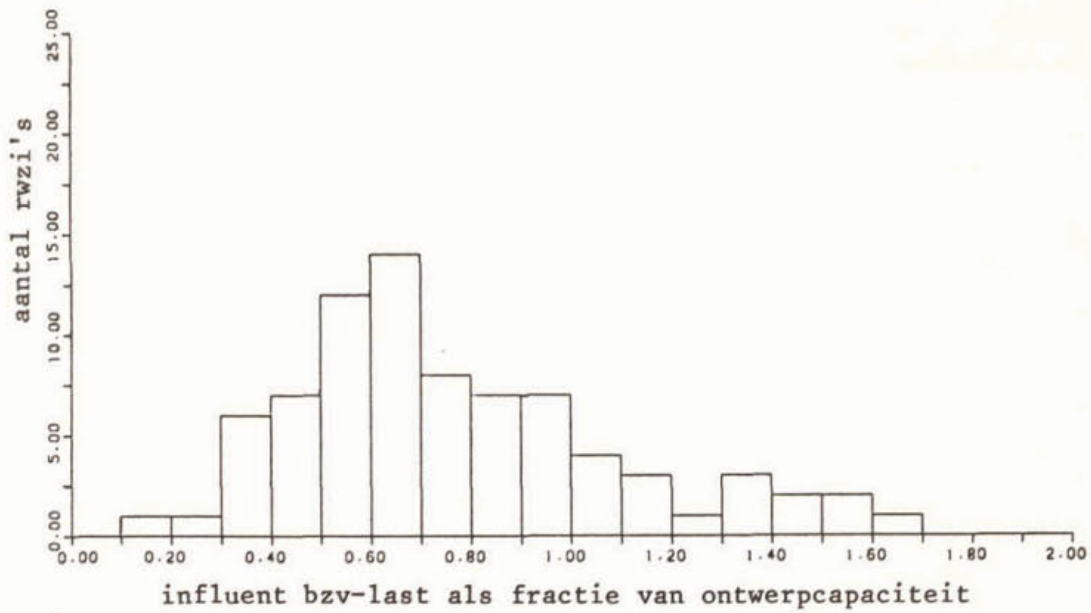
		zuiveringsproces					
		actief slib			oxydatiebed		
		gemidd.	stand. dev.	aantal	gemidd.	stand. dev.	aantal
<u>procesvoering waterbedrijf</u>							
ontwerpcapaciteit	(i.e.)	128.690	137.100	42	42.000	35.2000	40
gistingsvolume	(m3)	4.280	4.680	33	1.410	1.140	31
influentbelasting	(i.e.-54)	79.800	74.900	35	32.800	26.700	31
productie primair slib	(g/i.e.d)	36	13	17	-	-	-
productie secundair slib	(g/i.e.d)	25	10	17	-	-	-
totaal productie slib	(g/i.e.d)	63	15	29	54	23	20
<u>procesvoering slibgisting</u>							
hydraulische verblijftijd	(d)	36	13	30	43	16	21
temperatuur	(°C)	32,4	1,2	15	31,8	0,8	9
drogestof vers slib	(%)	3,6	0,5	31	4,4	0,8	25
organische stof vers	(% van d.s.)	72,6	4,8	28	70,0	0,6	23
organische stof gisting	(% van d.s.)	60,3	5,2	25	57,3	5,8	26
<u>gistingsrendement</u>							
o.s.-afbraak massabalans	(%)	48	13	19	54	13	14
o.s.-afbraak van Kleeck	(%)	41,0	6,1	22	43,2	4,6	21
gasproductie per i.e.	(l/i.e.d)	20,1	5,3	34	14,3	5,2	32
gas per kg d.s.-toevoer	(m3/kg d.s.)	0,33	0,07	30	0,31	0,09	22
gas per kg o.s.-toevoer	(m3/kg o.s.)	0,45	0,09	25	0,46	0,13	19
gas per kg o.s.-afbraak							
- volgens massabalans	(m3/kg o.s.)	0,98	0,30	22	0,86	0,42	16
- volgens van Kleeck	(m3/kg o.s.)	1,10	0,22	21	1,05	0,31	19

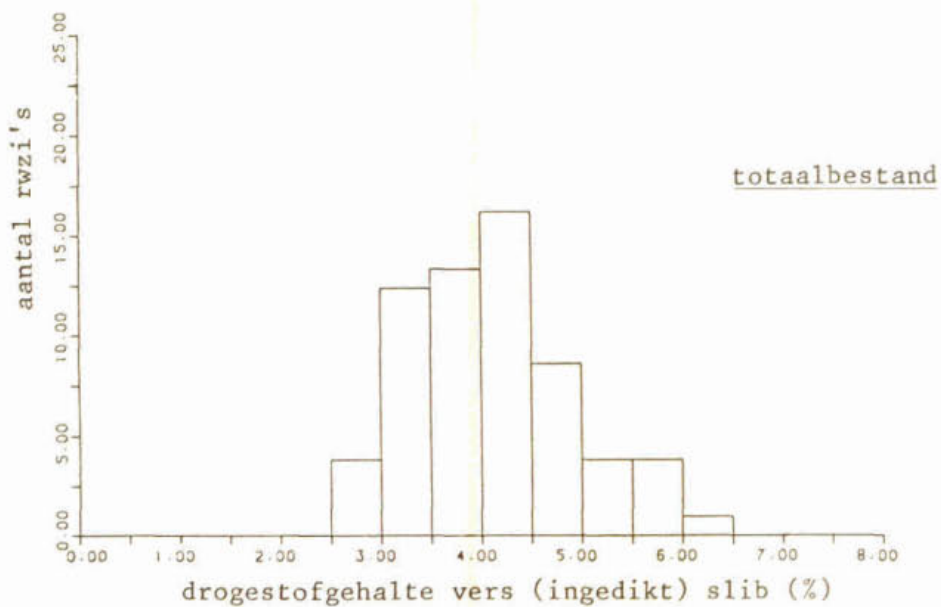
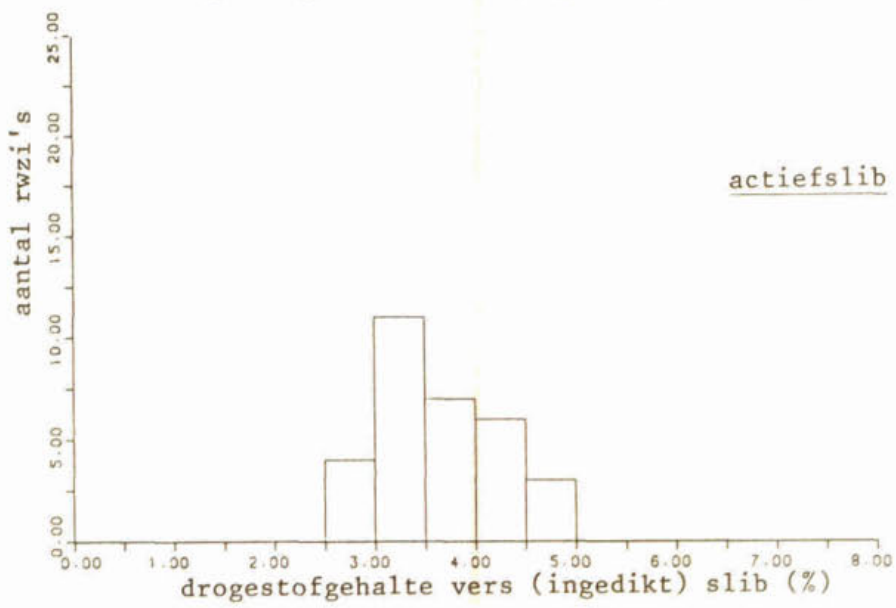
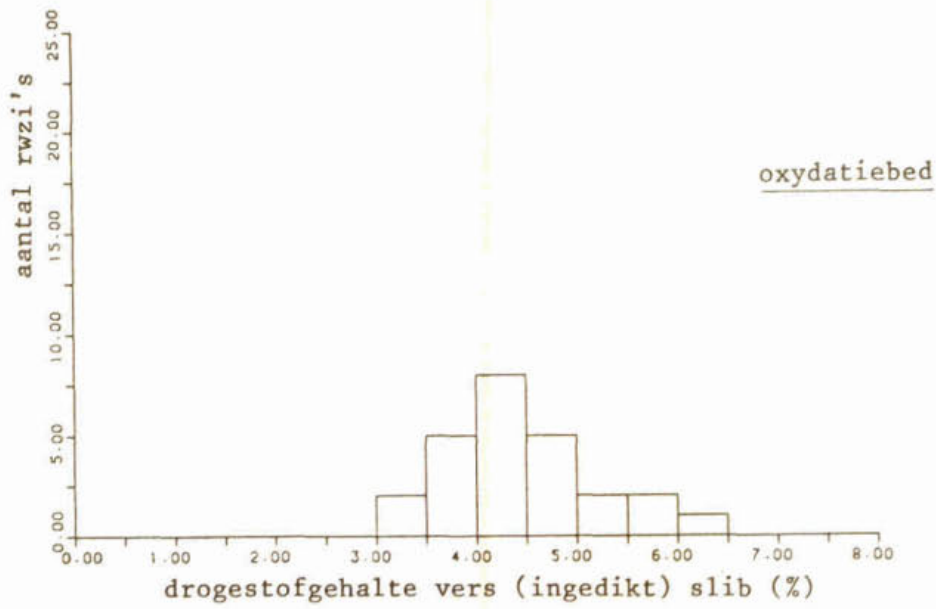
Tabel 13. Bedrijfsgegevens gerangschikt per zuiveringsproces

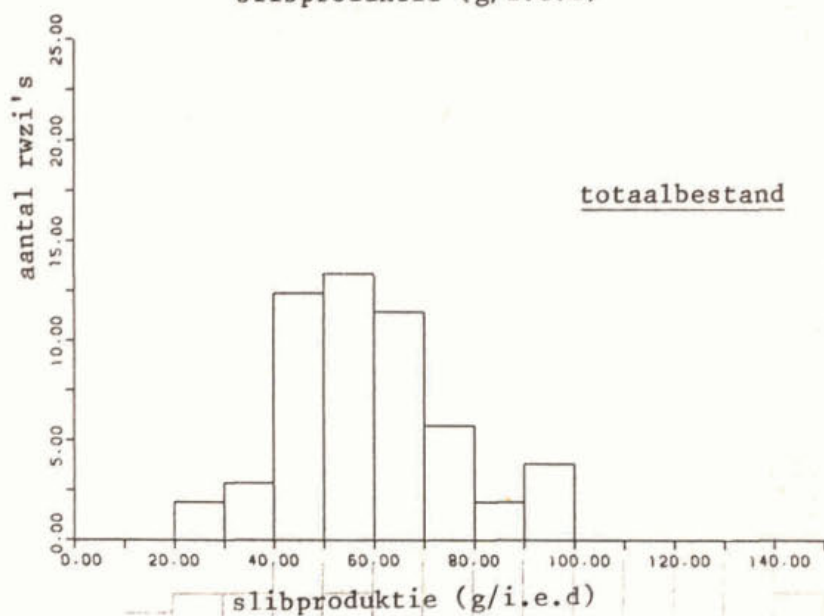
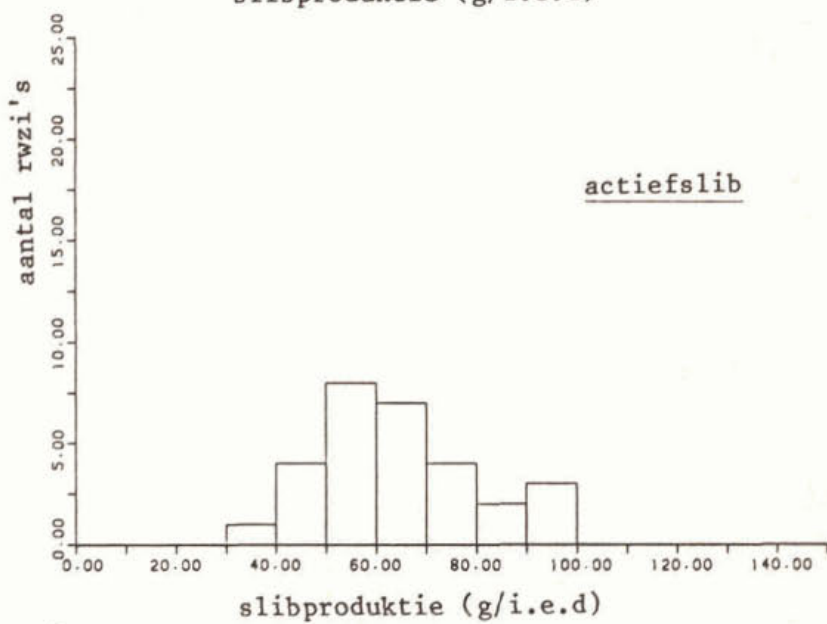
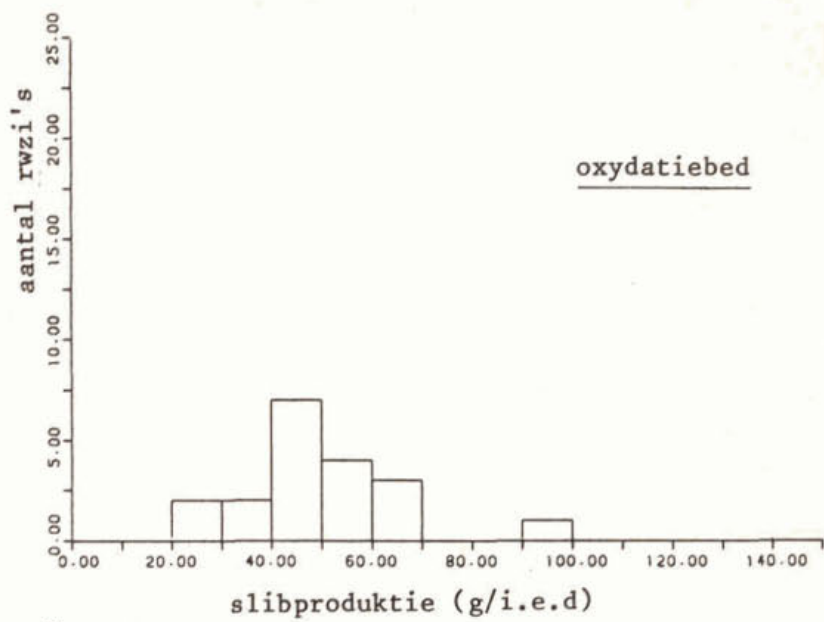
		gistingsproces					
		eentrap			tweetraps		
		gemidd.	stand. dev.	aantal	gemidd.	stand. dev.	aantal
<u>procesvoering waterbedrijf</u>							
ontwerpcapaciteit	(i.e.)	71.600	73.300	35	86.300	92.000	37
gistingsvolume	(m3)	3.280	4.450	35	2.900	3.660	36
influentbelasting	(i.e.-54)	44.300	44.500	31	61.400	58.100	33
totaal productie slib	(g/i.e.d)	62	21	25	61	24	25
<u>procesvoering slibgisting</u>							
hydraulische verblijftijd	(d)	43	11	26	35	15	26
temperatuur	(°C)	32,7	1,9	15	32,1	1,5	13
drogestof vers slib	(%)	4,1	0,9	26	4,0	0,7	26
organische stof vers	(% van d.s.)	68,5	5,3	24	73,8	4,4	22
organische stof gisting	(% van d.s.)	55,7	5,8	21	60,7	5,3	8
<u>gistingsrendement</u>							
o.s.-afbraak massabalans	(%)	48	12	19	60	12	15
o.s.-afbraak van Kleeck	(%)	41,4	4,6	21	43,8	4,9	20
gasproductie per i.e.	(l/i.e.d)	16,5	5,8	32	18,4	7,7	33
gas per kg d.s.-toevoer	(m3/kg d.s.)	0,30	0,06	27	0,33	0,10	26
gas per kg o.s.-toevoer	(m3/kg o.s.)	0,43	0,08	23	0,45	0,14	21
gas per kg o.s.-afbraak							
- volgens massabalans	(m3/kg o.s.)	0,99	0,31	19	0,78	0,37	20
- volgens van Kleeck	(m3/kg o.s.)	1,06	0,22	21	1,05	0,30	19

Tabel 14. Bedrijfsgegevens gerangschikt per gistingsproces

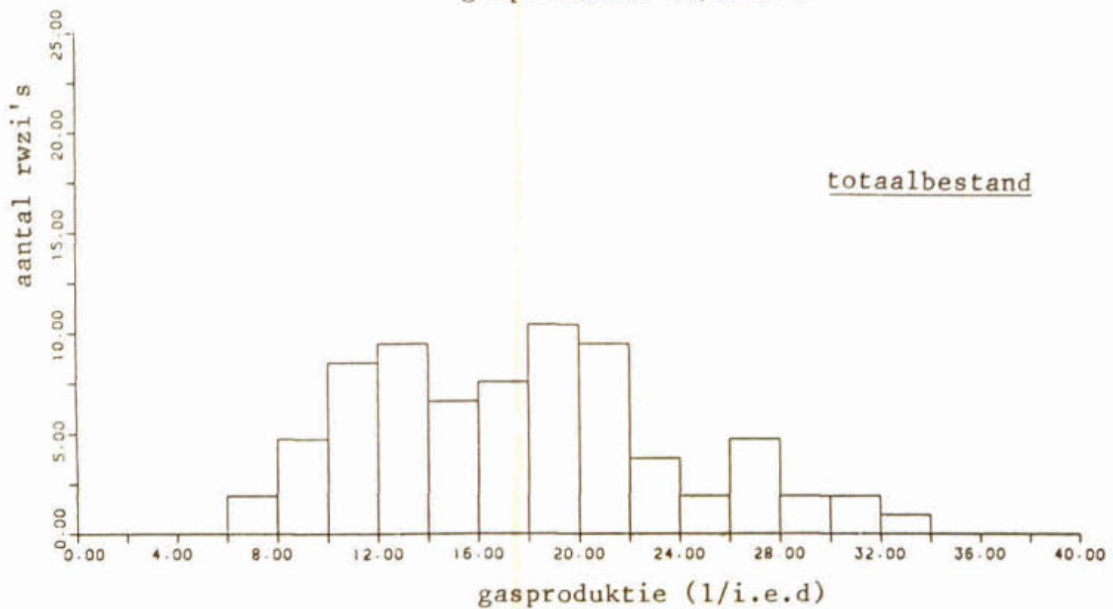
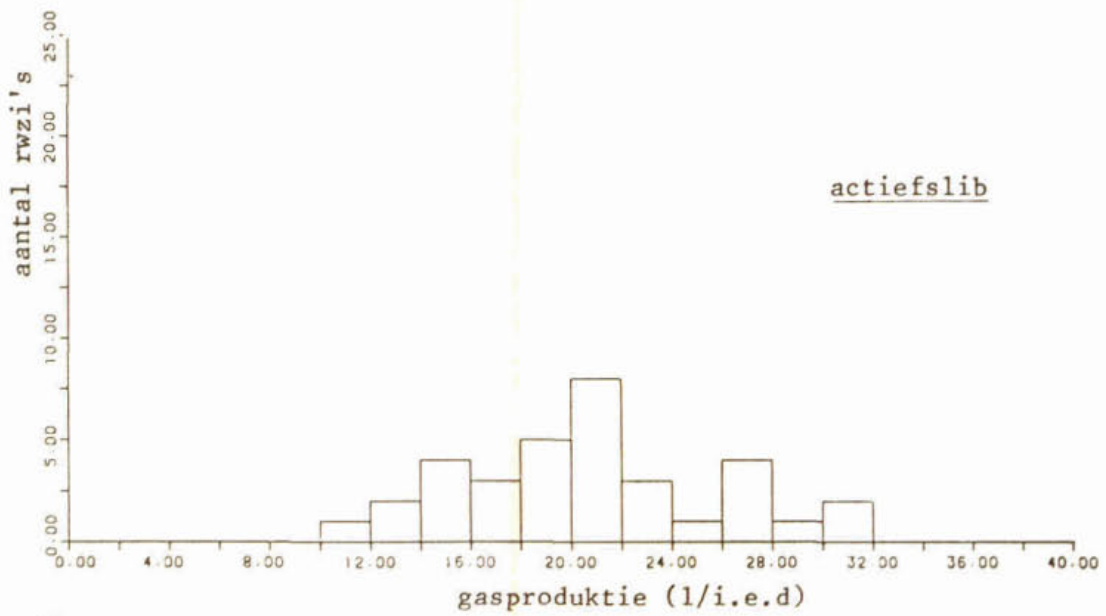
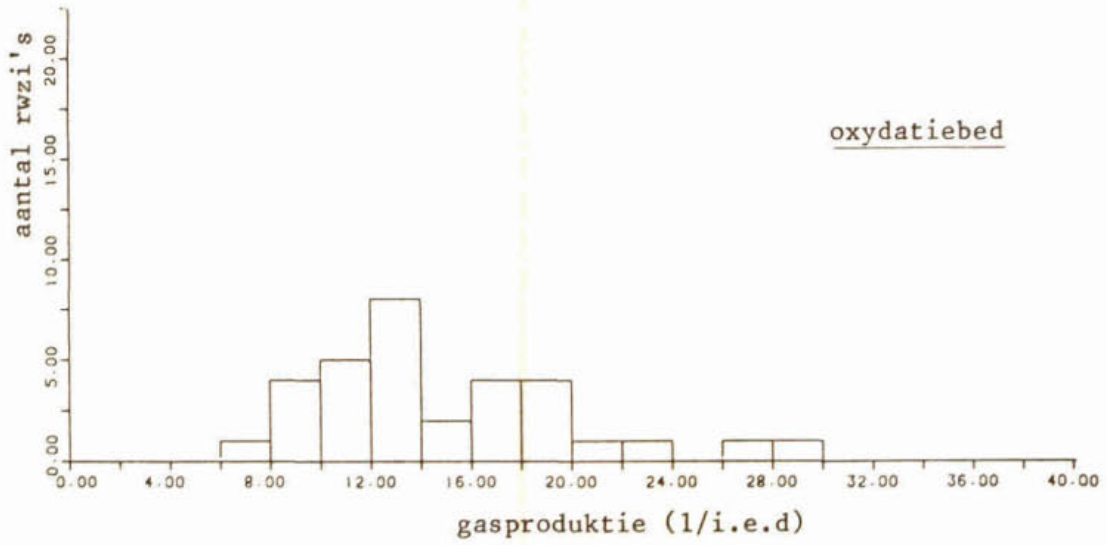
Frequentieverdeling van de onderzochte parameters in het
totale bestand gistingsinstallaties (alle procestypen)

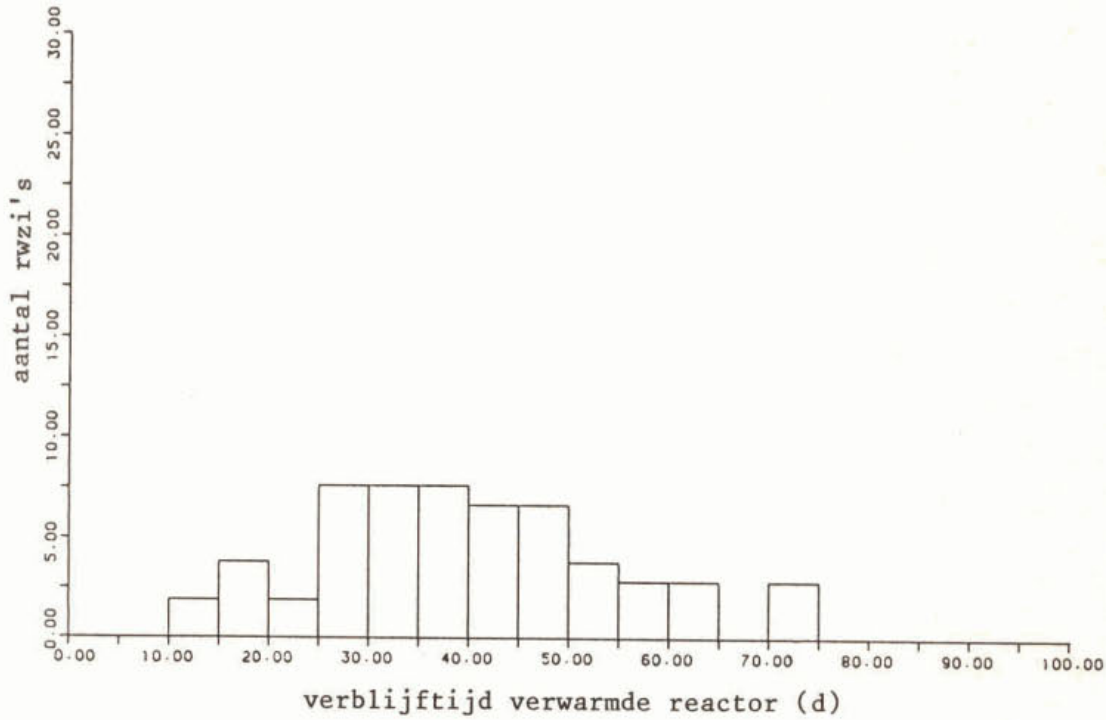
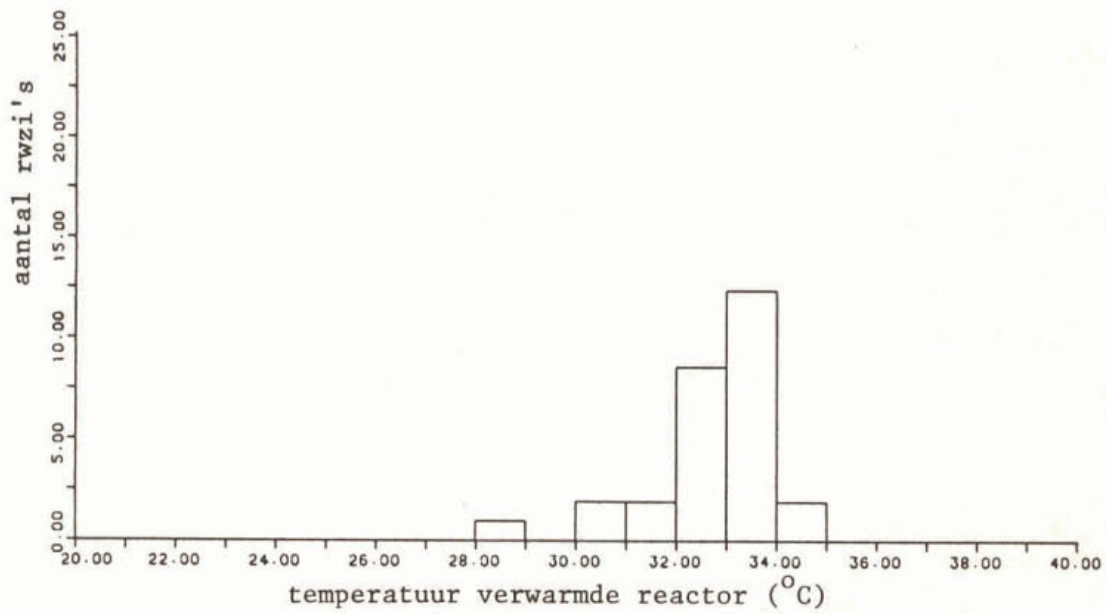


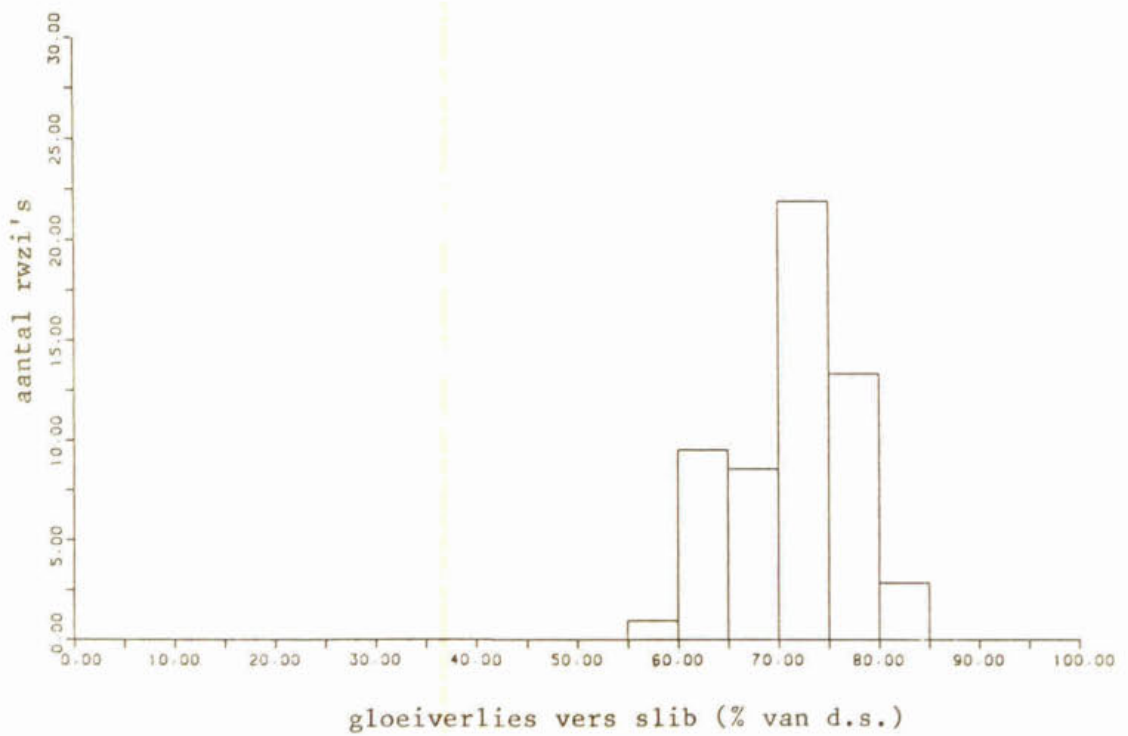
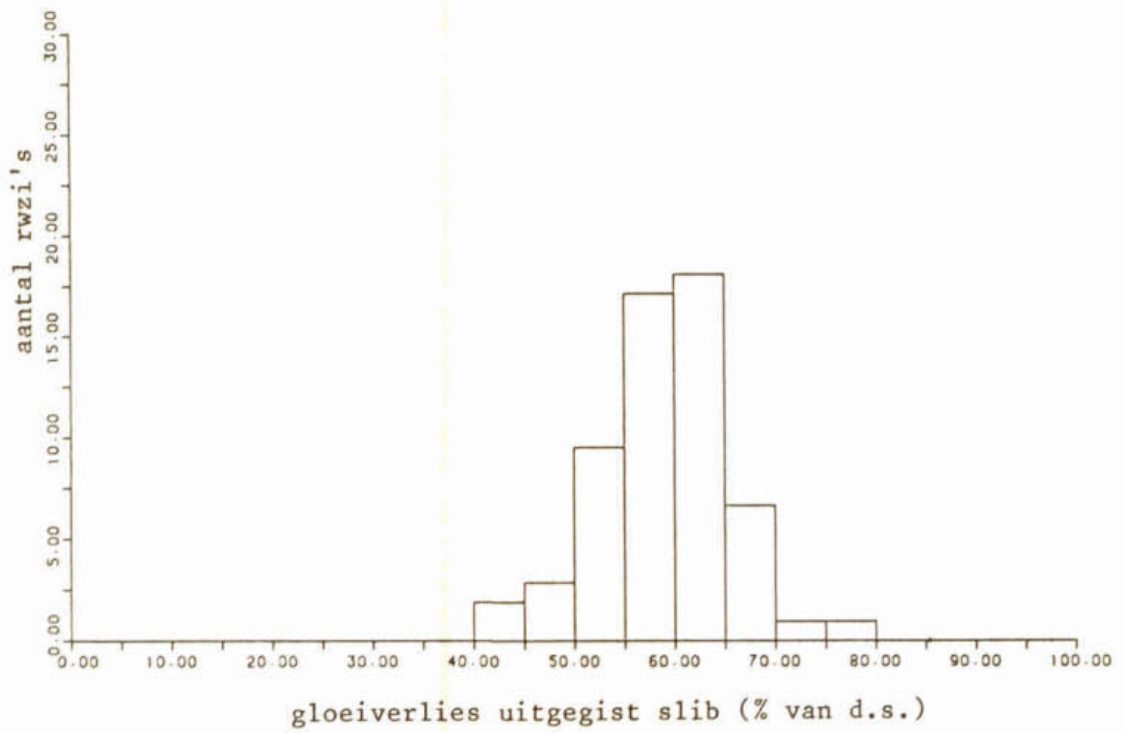


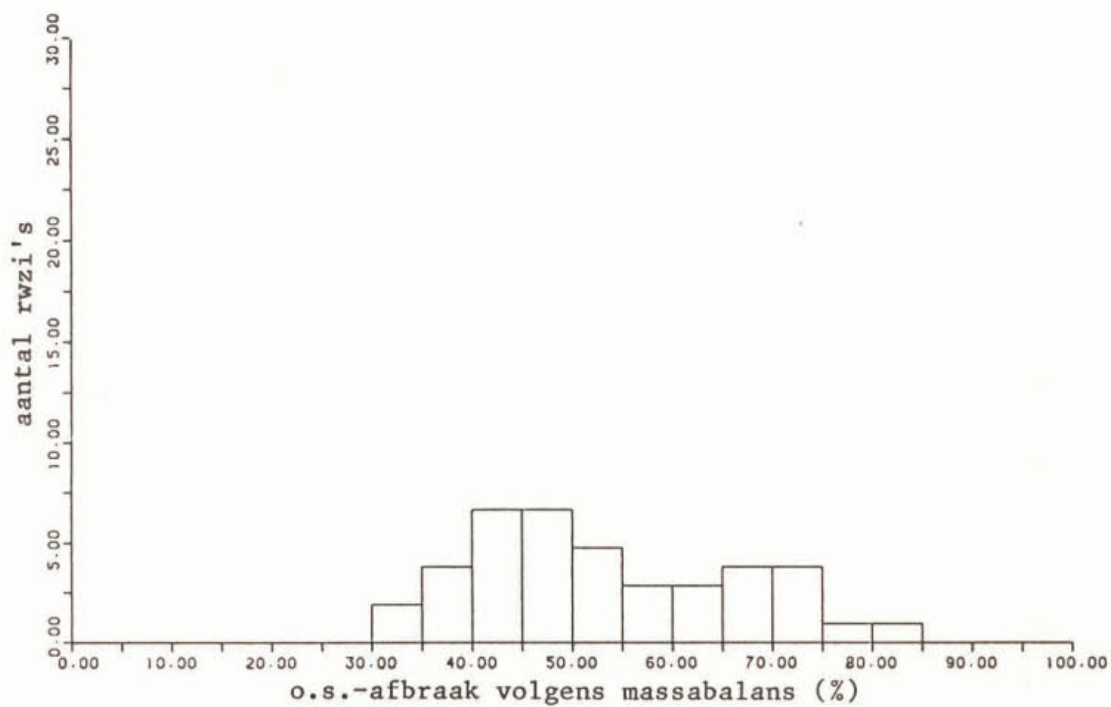
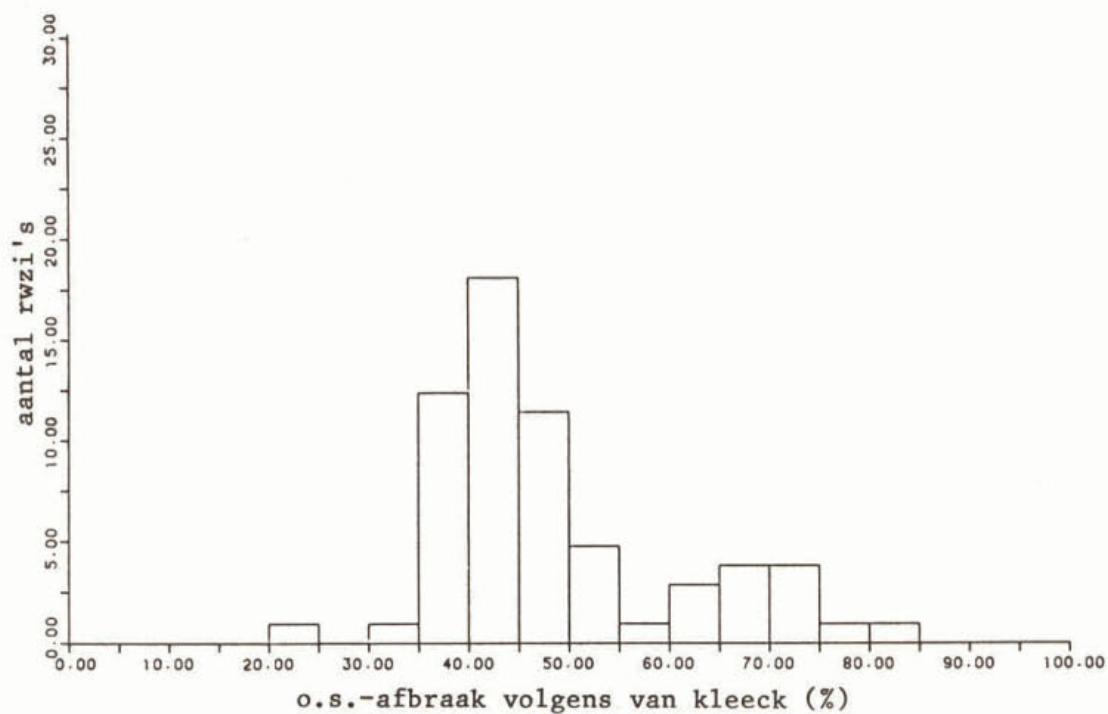


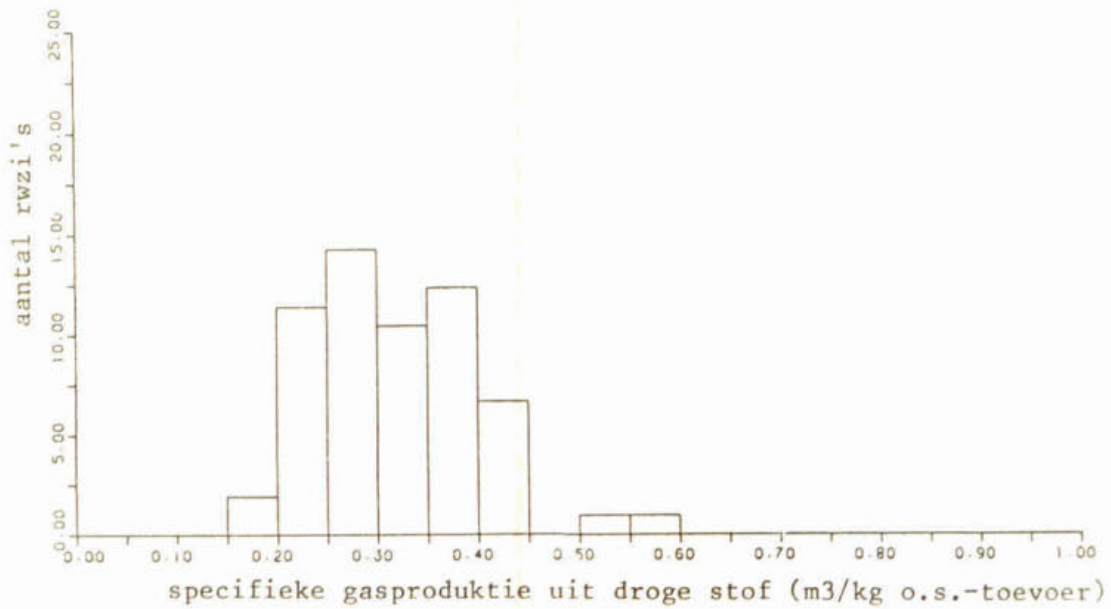
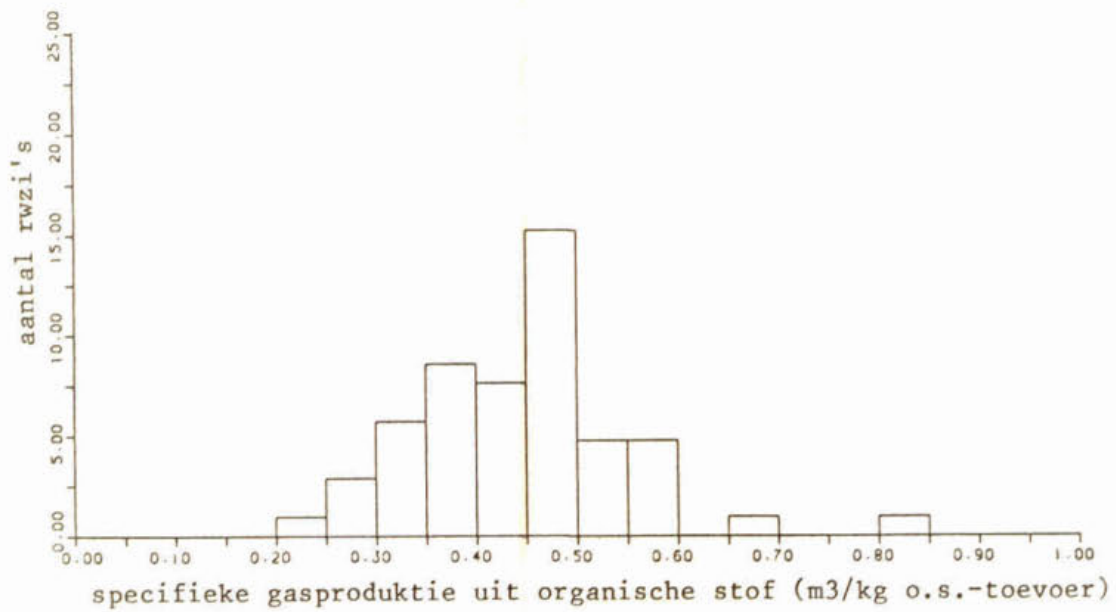
(b.e.i.) slibtoegang

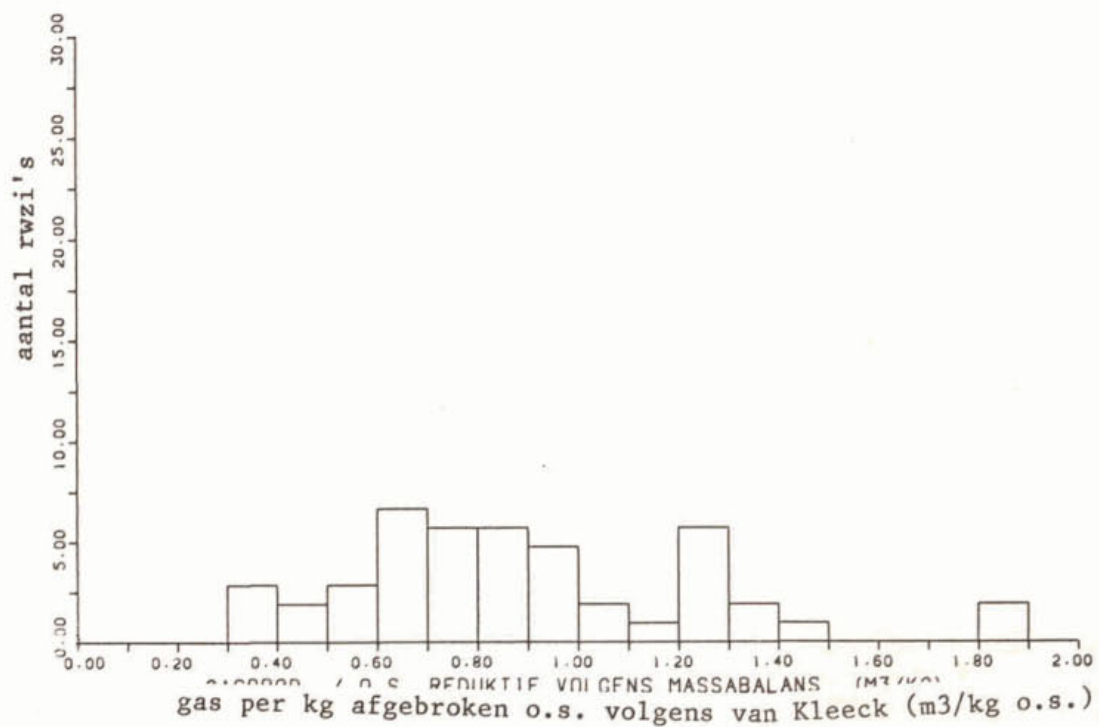
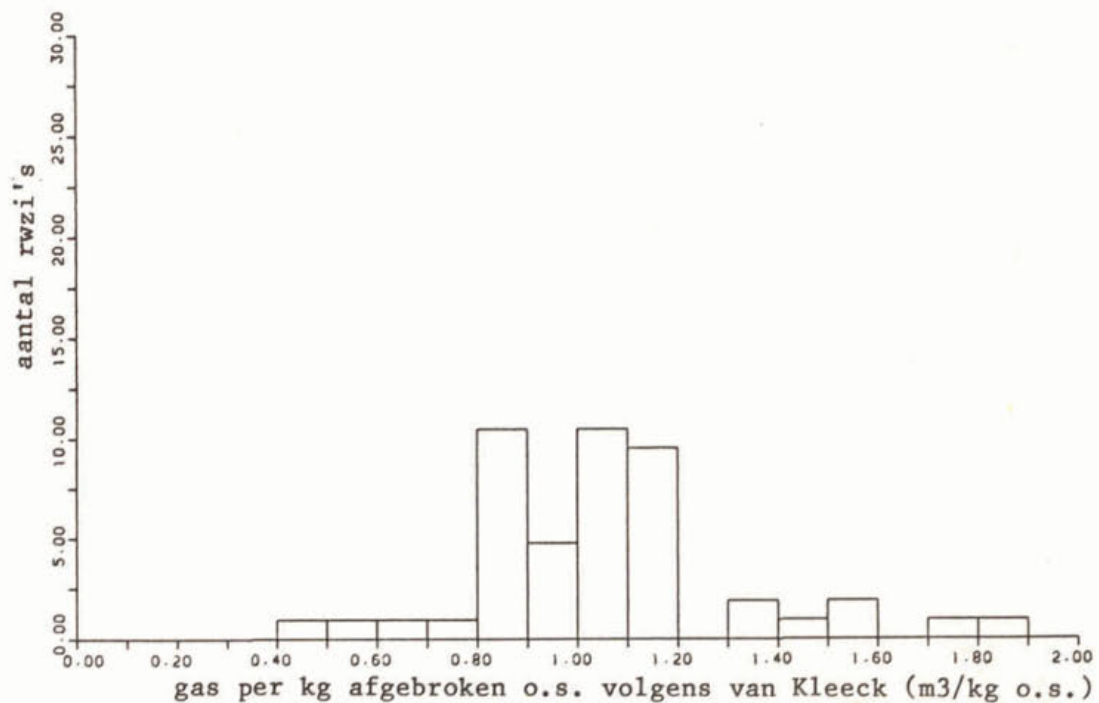












Bijlage 5. Regressieanalyse van gistingsrendement en verblijftijd volgens eerste-orde reactiekinetiek

Massabalans over de gistingsreactor:

$$\begin{aligned} \text{Toevoer -afvoer -afbraak} &= 0 \\ \Phi (F_o - F) - V \cdot k \cdot F &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Delen door Φ levert:

$$F_o - F = k \cdot t_h \cdot F \quad (2)$$

Uitgedrukt in F:

$$F = F_o \cdot (k \cdot t_h + 1)^{-1} \quad (3)$$

Afbreekbare fraktie organische stof:

$$F_o = a \cdot OS_o \quad (4)$$

Rendement op basis van o.s.-omzetting:

$$R = (OS_o - OS) / OS \quad (5)$$

Uit (4) en (5) volgt:

$$R = a \cdot (F_o - F) / F_o \quad (6)$$

Combineren van (2), (3) en (6) levert:

$$R = \frac{a}{1 + (k \cdot t_h)^{-1}} \quad (7)$$

Reciproke uitdrukking van (7):

$$1/R = 1/a + 1/(a \cdot k) \cdot 1/t_h \quad (8)$$

Uit het intercept en de helling van de grafiek $1/R$ tegen $1/t_h$ kunnen k en a worden berekend met behulp van uitdrukking (8). Hierbij wordt er van uitgegaan dat a , de afbreekbare fraktie van de organische stof, in de onderzochte installaties gelijk is.

In formule (5) is het gistingsrendement uitgedrukt in de relatieve afbraak van organische stof, bijvoorbeeld berekend met de van Kleeck-formule. Op vergelijkbare wijze kan men komen tot een uitdrukking voor de specifieke gasproductie, uitgaand van een vaste verhouding tussen de hoeveelheden geproduceerd gas en afgebroken organische stof.

$$SP = c \cdot R \quad (9)$$

Uit (8) en (9) volgt:

$$SP = \frac{c \cdot a}{1 + (k \cdot t_h)^{-1}} \quad (10)$$

Reciproke uitdrukking van (10):

$$c/SP = 1/a + 1/(a \cdot k) \cdot 1/t_h \quad (11)$$

GEBRUIKTE SYMBOLEN

- a = afbreekbare fraktie organische stof in influent (kg/kg)
c = volume gas geproduceerd per eenheid afgebroken organische stof (m³/kg)
F = concentratie afbreekbare organische stof in uitgaande stroom (kg/m³)
F_o = concentratie afbreekbare organische stof in inkomende stroom (kg/m³)
k = eerste orde reactieconstante (1/d)
OS = concentratie organische stof in uitgaande stroom (kg/m³)
OS_o = concentratie organische stof in inkomende stroom (kg/m³)
t_h = hydraulische verblijftijd (d)
V^h = reactorvolume (m³)
Φ = debiet (m³/d)
R = rendement afbraak organische stof (kg/kg)
SP = specifieke gasproductie (m³/kg o.s.-toevoer)

Bijlage 6. Berekening warmtebehoefte van het gistingsproces

A. Transmissieverliezen van de gistingsreaktor

Uitgangspunten:

- cilindrische reactorvorm met hoogte: diameter = 0,7 : 1,0;
- warmteverliezen alleen via dak en zijwand;
- overdrachtcoëfficiënt $k = 50,4 \text{ kJ/m}^2\text{.K.d}$;
- gemiddelde luchttemperatuur zomerhalfjaar $18 \text{ }^\circ\text{C}$, winterhalfjaar $4 \text{ }^\circ\text{C}$.

Warmteverlies:

$$W_t = k \cdot O \cdot \Delta T \text{ (kJ/d)} \quad (1)$$

k = overdrachtcoëfficiënt ($\text{kJ/m}^2\text{.K.d}$)

O = blootgesteld oppervlak dak en zijwand (m^2)

ΔT = warmteverschil reaktorinhoud buitenlucht (K)

Cylinder met $h/d = 0,7$ heeft zij- en bovenoppervlak:

$$O = 1,42 \cdot V^{2/3} \quad (2)$$

Uit (1) en (2) volgt:

$$W_t = 224 \cdot \Delta T \cdot V^{2/3} \text{ (kJ/d)} \quad (3)$$

B. Opwarming vers slib

Uitgangspunten:

- temperatuur slib⁴¹: 's zomers $17,5 \text{ }^\circ\text{C}$, 's winters $9,7 \text{ }^\circ\text{C}$;
- warmtecapaciteit slib gelijk aan die van water = $4200 \text{ kJ/m}^3\text{.K}$;
- indien niet nader vermeld geen warmteterugwinning uit uitgestist slib.

$$\text{Opwarmingsenergie : } W_{op} = C_s \cdot Q_s \cdot \Delta T \text{ (kJ/d)}$$

C_s = warmtecapaciteit slib ($\text{kJ/m}^3\text{.K}$)

ΔT = $T_{\text{reactor}} - T_{\text{versslib}}$ (K)

Q_s = debiet (m^3/d)

De resultaten van de berekeningen zijn opgenomen in tabel 15.

verblijftijd		warmtebehoefte gisting	
		(10 ⁶ kJ/d)	
		zomer gemiddelde	winter gemiddelde
15	W_t	0,75	1,02
	W_{op}	9,37	14,09
	W_{tot}	10,1	15,1
20	W_t	0,91	1,23
	W_{op}	9,37	14,09
	W_{tot}	10,3	15,3
30	W_t	1,20	1,61
	W_{op}	9,37	14,09
	W_{tot}	10,6	15,7
40	W_t	1,45	1,95
	W_{op}	9,37	14,09
	W_{tot}	10,8	16,0
60	W_t	1,90	2,55
	W_{op}	9,37	14,09
	W_{tot}	11,3	16,6

W_t = transmissieverlies
 W_{op} = opwarmenergie
 W_{tot} = $W_t + W_{op}$ = totale warmtebehoefte

Tabel 15. Gemiddelde warmtebehoefte afhankelijk van seizoen en verblijftijd (80.000 i.e.)

- 3 reactoren - relatieve stukprijs 0,77
- 4 reactoren - relatieve stukprijs 0,75
- 5 reactoren - relatieve stukprijs 0,73

De investeringskosten van de gistingsreactoren zijn in figuur 18 uitgezet tegen het totale reactorvolume.

onderhoud forfaitair:

- 0,5% per jaar van de bouwkundige investeringen;
- 2% per jaar van de electromechanische investeringen.

exploitatiekosten:

- in de vergelijkingen opgevat als de som van afschrijvingen en onderhoud.

energieinkoop:

- f 0,25 per kWh;
- f 0,65 per m³ aardgas.

niet in de vergelijking opgenomen zijn:

- kosten slibafzet;
- personeelskosten;
- kosten die voor alle varianten gelijk zijn.

kostenvergelijking:

- de kostenvergelijking wordt uitgevoerd met behulp van de methode van de contante waarde met een looptijd van 15 jaar; hierbij worden de kapitaal- en bedrijfskosten en de opbrengst van de electriciteitsopwekking over de looptijd gesommeerd en herleid tot de waarde in het eerste jaar.

De herleiding geschiedt met behulp van de disconteringsvoet en inflatie volgens:

$$A = A_k \cdot \frac{(1+i)^k}{(1+p)^k}$$

- waarin
- A = kosten of baten in het basisjaar
 - A_k = kosten of baten in jaar k
 - p^k = disconteringsvoet = rente (fractie per jaar)
 - i = inflatie (fractie per jaar)

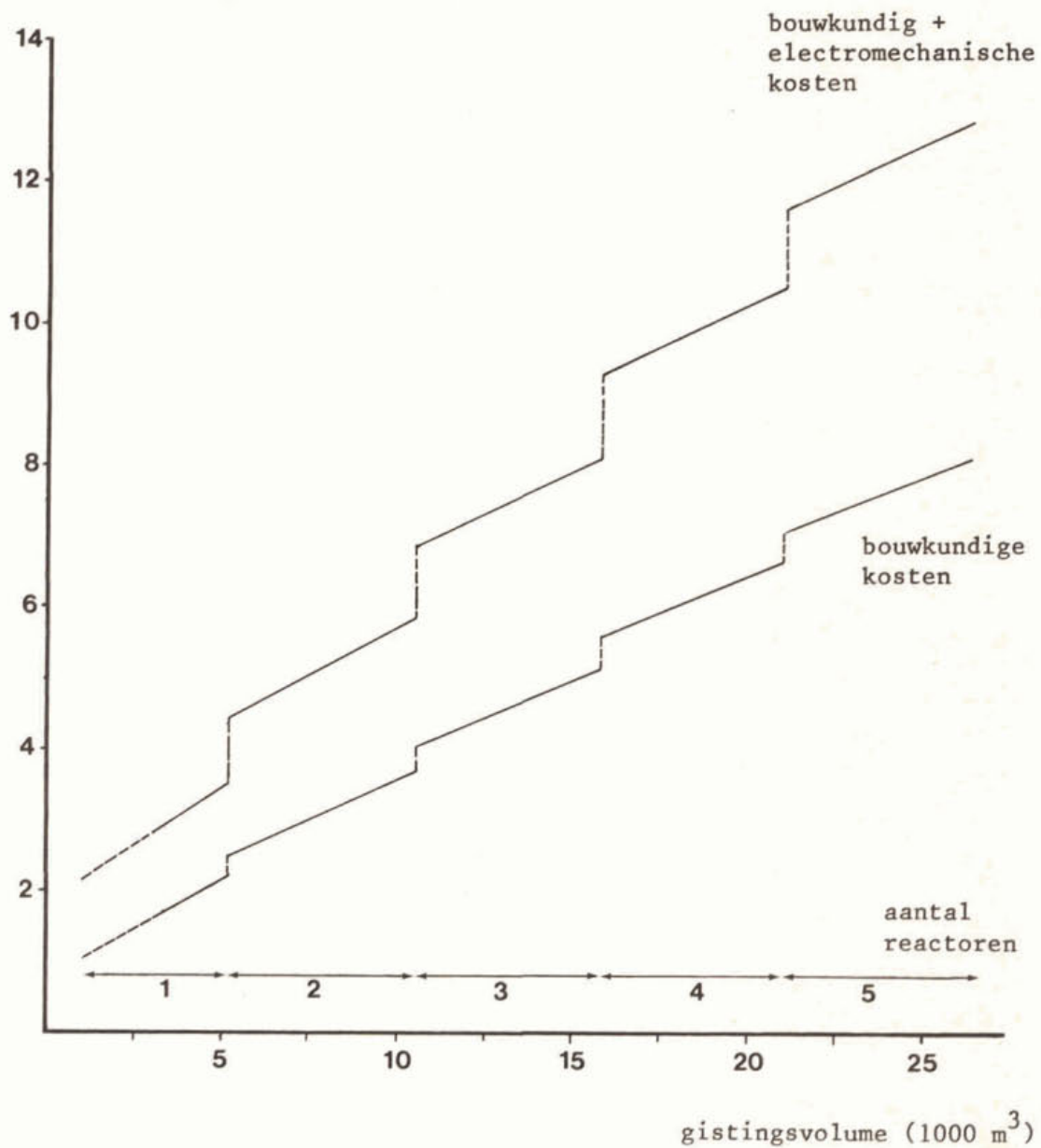
Aannemend dat de jaarlijkse rente 8,5% en de inflatie 5% bedragen, geldt voor de contante waarde van de bedrijfskosten en -baten in 15 jaar looptijd:

$$A_{cw} = 11,68 \cdot A_1$$

- waarin
- A_{cw} = contante waarde van de gesommeerde kosten of baten over de looptijd
 - A₁ = waarde van de kosten in het eerste jaar

Als contante waarde van de kapitaalskosten wordt bij afschrijving in 15 jaar (electromechanische onderdelen) de volledige investering opgevoerd en bij afschrijving in 30 jaar (bouwkundige constructies) de helft.

contante
waarde
(10⁶ gld)



Figuur 18. Investeringskosten gistingsreactoren afhankelijk van het gistingsvolume.

