

stowa

1979-05

BIBLIOTHEEK DE HAFF

Droevendaalsesteeg 3a

6708 PB Wageningen

Stank op rioolwaterzuiveringsinrichtingen

1. Bestrijding in transportleidingen

(STOWA rapport nr. 79-5)

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0945 3933

<u>Inhoud</u>	III - IV
Ten geleide	V
1 SAMENVATTING	1 - 2
2 INLEIDING	3 - 4
2.1 Algemeen	3 - 4
2.2 Doel van het onderzoek	4
2.3 Aanpak van het onderzoek	4
3 LITERATUUR	5 - 12
3.1 De ontwikkeling van stankstoffen in transportstelsels	5 - 8
3.1.1 <i>algemeen</i>	5 - 6
3.1.2 <i>sulfideontwikkeling in persleidingen</i>	6 - 7
3.1.3 <i>sulfideontwikkeling in vrij-vervalleidingen</i>	8
3.2 Stankemissie	8 - 9
3.3 Preventie van de vorming van stankstoffen in transportstelsels	9 - 11
3.4 Oxydatie van stankstoffen in transportstelsels	11 - 12
3.4.1 <i>zuurstofinjectie</i>	11
3.4.2 <i>waterstofperoxydoserings</i>	11 - 12
3.5 Conclusies	12
4 ONDERZOEKOBJECTEN	13 - 19
4.1 Selectie	13
4.2 Beschrijving	13 - 19
4.2.1 <i>algemeen</i>	13
4.2.2 <i>persleiding Vaassen - Apeldoorn</i>	13 - 14
4.2.3 <i>persleiding Makkinga - Oosterwolde</i>	14 - 15
4.2.4 <i>transportstelsel "Riool-Zuid" - Eindhoven</i>	15 - 17
4.2.5 <i>persleiding Assendelft - Beverwijk</i>	17 - 18
4.2.6 <i>persleiding Terborg - Doetinchem</i>	18 - 19
5 BEMONSTERING, METING EN ANALYSE	20 - 23
5.1 Algemeen	20 - 21
5.2 Metingen in het afvalwater	21
5.3 H ₂ S-metingen in de atmosfeer	22 - 23
6 SULFIDEVORMING IN AFVALWATERPERSLEIDINGEN	24 - 25
7 PREVENTIE VAN SULFIDEVORMING MET ZUIVERE ZUURSTOF	26 - 31

7.1	Materiaal en methoden	26	-	27
7.2	Resultaten en discussie	27	-	31
7.2.1	<i>effectiviteit</i>	27	-	30
7.2.2	<i>mechanisme van zuurstofoplossing en enkele randvoorwaarden voor zuurstofinjectie</i>	30	-	31
8	OXYDATIE VAN SULFIDE MET ZUIVERE ZUURSTOF	32	-	35
8.1	Materiaal en methoden	32	-	34
8.1.1	<i>laboratoriumproeven</i>			32
8.1.2	<i>praktijkproeven</i>	33	-	34
8.2	Resultaten en discussie	34	-	35
8.2.1	<i>effectiviteit</i>	34	-	35
8.2.2	<i>mechanisme van zuurstofoplossing</i>			35
9	OXYDATIE VAN SULFIDE MET WATERSTOFFEROXYDE	36	-	41
9.1	Materiaal en methoden	36	-	38
9.1.1	<i>laboratoriumproeven</i>			36
9.1.2	<i>praktijkproeven</i>	36	-	38
9.2	Resultaten en discussie	38	-	41
9.2.1	<i>effectiviteit</i>	38	-	40
9.2.2	<i>regeling van de waterstofperoxydedosering</i>	40	-	41
10	KOSTEN	42	-	46
10.1	Algemeen			42
10.2	Persleiding Vaassen - Apeldoorn	43	-	44
10.2.1	<i>preventie van sulfidevorming door zuurstofinjectie</i>			43
10.2.2	<i>oxydatie van sulfide door waterstofperoxydedosering</i>	43	-	44
10.3	Persleiding Terborg - Doetinchem			44
10.4	Persleiding Assendelft - Beverwijk	44	-	45
10.5	Discussie	45	-	46
11	CONCLUSIES EN SLOTOPMERKINGEN	47	-	48
12	LITERATUUR EN BRONNEN	49	-	50

Ten geleide

In onbehandeld afvalwater, dat door langdurig verblijf in transportleidingen zuurstofloos wordt, vormt zich zwavelwaterstof; waar dit in aanraking komt met de buitenlucht, ontsnapt zwavelwaterstofgas. Dit gas is, voaal 's-zomers, de voornaamste oorzaak van stankproblemen op en rondom zuiveringstechnische werken.

Op initiatief van de Onderzoekadviescommissie* van de STORA werd daarom in 1976 besloten tot onderzoek naar het voorkomen van zuurstofloosheid en naar de bestrijding van zwavelwaterstof in afvalwatertransportleidingen.

Dit initiatief werd uitgewerkt door dr.ir. H.J. Eggink, ir. R. Karper en ir. H.M.J. Scheltinga die daartoe het Water Research Centre in Engeland bezochten. De ervaringen van dit instituut gaven aanleiding om het onderzoek in Nederland te beperken tot zuivere zuurstof en waterstofperoxyde als bestrijdingsmiddelen.

Als proefobject koos de begeleidingscommissie de persleiding van Vaassen naar de rioolwaterzuiveringsinrichting Apeldoorn. De experimenten op dit object werden uitgevoerd door het Adviesbureau Bongaerts, Kuyper & Huiswaard, namens de STORA begeleid door dr.ir. H.J. Eggink, ir. A.E. van Giffen, ir. R. Karper, ir. H.M.J. Scheltinga en ir. J.H.A. van Walraven.

Het zuiveringsschap Veluwe, dat de persleiding ter beschikking van de STORA stelde, verleende eveneens technologische bijstand.

Ongeveer tegelijk met de proeven te Apeldoorn, begonnen vier STORA-deelnemers (de provincie Friesland, het zuiveringsschap Oostelijk-Gelderland, het hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland en de Gemeenschappelijke Technologische Dienst van de waterschappen in Oost-Brabant) met een bijdrage van de Stichting aan eigen onderzoek.

Het Adviesbureau verzorgde ook de coördinatie van deze experimenten via een afzonderlijke commissie, bestaande uit: ing. A.K. de Boer, drs. E.R. Dingemans, ir. G. Duysens, ir. A.E. van Giffen, ir. R. Karper, ir. A. Kiestra, ir. F. Laagland en ir. K. Visscher.

Zowel de begeleidingscommissie als de coördinatiecommissie werden voorgezeten door ir. R. Karper die, samen met het STORA-secretariaat, het Adviesbureau bij de eindredactie van het rapport heeft geassisteerd.

De leveranciers van zuivere zuurstof en waterstofperoxyde - de firma's Hoek Loos en Interox Chemie - verleenden met apparatuur en personeel aanzienlijke bijstand aan de proeven te Vaassen en Apeldoorn. Bovendien stelden zij hun product voor de duur van de experimenten tegen speciale prijs beschikbaar.

Rijswijk, 2 april 1979.

de directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff.

*prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en dr.ir. H.J. Eggink, ir. R. Karper, ir. C.H. Kuggeleijn, ir. M. van der Lugt, ir. Th.G. Martijn, ir. H.A. Meijer, jhr.dr. J.J. Quarles van Ufford, ir. H.M.J. Scheltinga, dr.ir. D.W. Scholte Ubing, ir. J. van Selm, ir. F.B. Veldkamp en ir. A.P. Vernimmen, M.Sc. (leden)

SAMENVATTING

In het kader van het onderzoekprogramma van de STORA voor 1977 is onderzoek verricht naar de toepassing van zuivere zuurstof (O_2) en waterstofperoxyde (H_2O_2) voor stankbestrijding in transportstelsels voor stedelijk afvalwater. Het onderzoek omvatte een literatuurstudie en een onderzoek op praktijkschaal.

Uit het *literatuuronderzoek* is gebleken, dat:

- zwavelwaterstof (H_2S) de belangrijkste stankbron is;
- in persleidingen in het algemeen meer zwavelwaterstof wordt gevormd dan in vrij-vervalleidingen;
- de vorming van zwavelwaterstof in afvalwater kan worden voorkomen met zuurstof;
- zwavelwaterstof in afvalwater kan worden geoxydeerd met zuurstof en met waterstofperoxyde.

In het *praktijkonderzoek* zijn de volgende methoden van stankbestrijding beproefd in een speciaal daartoe geselecteerde persleiding:

- het voorkomen van de vorming van zwavelwaterstof door zuurstofinjectie (gasvorming) in het begin van de leiding;
- het oxyderen van zwavelwaterstof door zuurstofinjectie nabij het eindpunt van de leiding;
- het oxyderen van zwavelwaterstof door waterstofperoxydedosering (vloeibaar) nabij het eindpunt van de leiding.

Tevens zijn een vijftal door waterkwaliteitsbeheerders zelf uitgevoerde experimenten in transportleidingen in het onderzoek betrokken. Bij vier van de zes experimenten is bovendien aandacht besteed aan de mate van sulfidevorming in persleidingen.

het voorkomen van H_2S -vorming door O_2 -injectie

Uit proeven met O_2 -injectie in het begin van drie persleidingen is gebleken, dat onder bepaalde omstandigheden H_2S -vorming kan worden voorkomen. Er zijn indicaties, dat voor een effectieve O_2 -injectie het Reynoldsgetal (maat voor turbulentie) groter moet zijn dan circa 300.000; eveneens mogen geen abrupte hoogteverschillen in de leiding voorkomen. Onder deze omstandigheden lost voldoende zuurstof op om H_2S -vorming te voorkomen en is de kans op insluiting van zuurstofrijke gasophoppingen in de leiding klein. Door deze insluitingen kan de pompopbrengst sterk afnemen.

De hoeveelheid zuurstof, nodig om H_2S -vorming in persleidingen volledig te voorkomen, bedraagt enkele tientallen milligrammen per liter afvalwater.

De kosten om de vorming van 1 kg H_2S te voorkomen zijn voor een persleiding met een jaarlijkse (180 dagen) H_2S -vracht van circa 700 kg geraamd op circa f 37,--; de totale jaarlijkse kosten op f 25.650,--

het oxyderen van H₂S door O₂-injectie

Uit proeven met O₂-injectie in een persleiding op circa 300 m vanaf het eindpunt is gebleken, dat circa 30% van het H₂S werd geoxydeerd. De benodigde hoeveelheid zuurstof voor een volledige H₂S-oxydatie werd op basis van laboratoriumproeven geschat op 20 mg/l afvalwater. Bij injectie van 20 mg/l en Reynoldsgetallen van respectievelijk 150.000 en 230.000 werd maximaal circa 5 mg O₂ opgelost per liter afvalwater; de overige zuurstof ontweek in de ontvangput. Deze methode is niet geschikt voor stankbestrijding.

het oxyderen van H₂S door H₂O₂-dosering

Uit proeven met H₂O₂-dosering enkele honderden meters voor het eindpunt van drie persleidingen is gebleken, dat H₂S kan worden geoxydeerd met H₂O₂. Het H₂O₂ werd in verdunde vorm (2 - 5 gew.%) gedoseerd; hierdoor werd een goede menging van het H₂O₂ met het afvalwater verkregen. Bij een dosering van 2 - 4 mg H₂O₂ per mg H₂S werd 80 - 95% van het H₂S geoxydeerd. De reactietijd varieerde van 0,5 tot 1,5 uur. Het gemiddelde H₂S-gehalte na dosering lag tussen 0,5 en 2 mg/l.

De kosten voor de oxydatie van 1 kg H₂S zijn voor drie persleidingen met een jaarlijkse (180 dagen) H₂S-vracht van respectievelijk 31.000, 10.100 en 700 kg geraamd op f 6,--, f 9,-- en f 32,--; de totale jaarlijkse kosten op respectievelijk f 171.850,--, f 75.600,-- en f 18.100,--.

sulfidevorming in persleidingen

Uit sulfidemetingen in de afvoer van vier persleidingen is gebleken, dat aanzienlijk minder sulfide werd gevormd, dan berekend met de uit de literatuur bekende empirische formules van Pomeroy en van Boon & Lister.

2 INLEIDING

2.1 Algemeen

Stankhinder bij zuiveringstechnische werken wordt meestal veroorzaakt door de vorming van stankstoffen in afvalwatertransportstelsels onder anaerobe omstandigheden.

Stankstoffen worden vooral gevormd bij een lange verblijftijd en een geringe natuurlijke beluchting van het afvalwater. Bij turbulente stroming en contact met de buitenlucht kan door ontwijking van de stankstoffen hinder ontstaan.

Er zijn meerdere methoden om stankhinder te beperken. Deze methoden kunnen in drie categorieën worden ingedeeld.

1. Beperking van het ontstaan van stankstoffen in transportstelsels door:
 - stelsels zodanig te ontwerpen, dat de verblijftijd en slibafzettingen minimaal zijn;
 - slibafzettingen en aangroei te verwijderen (periodiek onderhoud);
 - de verblijftijd door toevoeging van suppletiewater te verkorten;
 - de activiteit van bacteriën door toevoeging van chemicaliën te remmen.
2. Beperking van het ontwijken van stankstoffen uit afvalwater door:
 - de turbulentie van het afvalwater te beperken, waardoor het strippen van stankstoffen wordt voorkomen;
 - stankstoffen met chemicaliën te oxyderen;
 - stankstoffen te fixeren.
3. Behandeling van uit het afvalwater ontwijkende stankstoffen door bijvoorbeeld:
 - adsorptie aan actieve kool;
 - biochemische omzetting in een bodemfilter of biowasser;
 - chemische omzetting in een gaswasser;
 - verbranding;
 - maskering met reukstoffen.

Een veel toegepaste methode met betrekking tot de onder 1 en 2 genoemde categorieën is de chemicaliëndosering. Toevoeging van chemicaliën betekent echter meestal een extra verontreiniging van het afvalwater. Een uitzondering hierop vormen zuurstof en waterstofperoxyde. Beide chemicaliën worden in de praktijk op velerlei gebieden toegepast. Voor opslag en gebruik bestaan hinderweteisen.^x

^x zie Stora-rapport "Veiligheid op rioolwaterzuiveringsinrichtingen"

Met zuurstof en waterstofperoxyde kunnen stankstoffen worden geoxydeerd, terwijl met zuurstof tevens de vorming van stankstoffen kan worden voorkomen. Met waterstofperoxyde kan eveneens de vorming van stankstoffen worden voorkomen; de benodigde hoeveelheid peroxyde is echter dermate groot, dat deze methode niet in aanmerking komt voor praktische toepassing.

Gezien het milieuvriendelijke karakter en gelet op de ervaringen met beide chemicaliën in het buitenland is het onderzoek naar de mogelijkheden tot beperking van stankhinder uitsluitend gericht op de toepassing van zuurstof en waterstofperoxyde.

2.2 Doel van het onderzoek

Doel van het onderzoek was het vaststellen onder Nederlandse omstandigheden van randvoorwaarden voor injectie van zuivere zuurstof en dosering van waterstofperoxyde ter beperking van emissie van stankstoffen - vooral sulfiden - uit influent op zuiveringstechnische werken. Hiertoe zijn de volgende methoden getoetst:

- zuurstofinjectie in het begin van een transportleiding ter voorkoming van sulfidevorming;
- zuurstofinjectie nabij het eindpunt van een transportleiding ter oxydatie van sulfiden;
- waterstofperoxydedosering nabij het eindpunt van een transportleiding ter oxydatie van sulfiden.

Veel aandacht is besteed aan procestechnische, economische en organisatorische aspecten. Ook is onderzoek verricht naar sulfidevorming in transportleidingen.

2.3 Aanpak van het onderzoek

Het onderzoek valt in drie delen uiteen:

- een literatuurstudie naar de ontwikkeling van stankstoffen in transportstelsels en de toepassing van waterstofperoxyde en zuivere zuurstof;
- een vergelijkend onderzoek naar de onder 2.2 vermelde methoden van stankbestrijding op één onderzoekobject. Tevens zijn een vijftal door waterkwaliteitsbeheerders zelf uitgevoerde experimenten in het onderzoek betrokken. De bemonsterings-, meet- en analyse-schema's voor de diverse objecten zijn voor een periode van vijf weken zoveel mogelijk op elkaar afgestemd;
- een integrale verwerking van de verkregen gegevens.

3 LITERATUUR

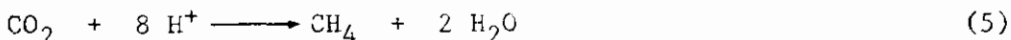
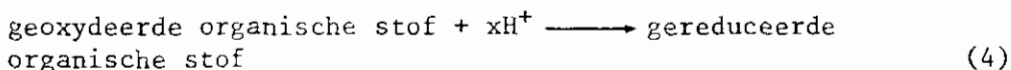
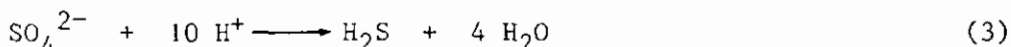
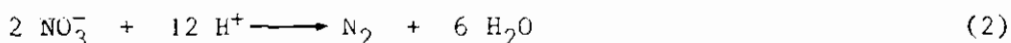
3.1 De ontwikkeling van stankstoffen in transportstelsels

3.1.1 *algemeen*

In transportstelsels met stedelijk afvalwater zijn vooral biochemische oxydatieprocessen de oorzaak van het ontstaan van stankstoffen^{5,6}.

In deze processen worden door bacteriën waterstofionen afgesplitst van organische moleculen en overgedragen aan waterstofionenacceptors. De vrijkomende energie wordt opgeslagen in de bacteriecellen.

Potentiële waterstofionenacceptors met bijbehorende reactieproducten zijn weergegeven in de volgende vergelijkingen⁶.



De reacties (2) t/m (5) vinden plaats bij vergaande of volledige zuurstofuitputting. De reacties (3) en (4) verlopen simultaan bij afwezigheid van zuurstof en nitraat. Reactie (5) treedt op in sterk aangerot afvalwater.

Een eindproduct van reactie (3) is het kwalijk riekende H₂S-gas, terwijl volgens reactie (4) vele stankstoffen kunnen ontstaan (organische zuren, aldehyden, ketonen, amines, sulfiden, mercaptanen, indolen en skatolen).

In tabel 1 zijn voor enkele stankstoffen geurdrempels^x weergegeven⁶, met de meest voorkomende concentraties van deze stoffen in riool-lucht³².

^x de geurdrempel is de laagste concentratie van een stankstof, die door 50% van het aantal personen van een reukpanel kan worden onderscheiden van geurvrije lucht²⁹.

stankcomponent	formule	concentratie mg/m ³	geurdrempel mg/m ³
zwavelwaterstof	H ₂ S	0,3 - 15	1,1
methylmercaptaan	CH ₃ SH	} 0,02 - 0,14	1,1
dimethylsulfide	(CH ₃) ₂ S		1,1
ethylmercaptaan	CH ₃ CH ₂ SH	} 0,02 - 0,13	0,2
dimethylamine	(CH ₃) ₂ NH		23,0
trimethylamine	(CH ₃) ₃ N		1,7

Tabel 1. Enkele stankstoffen in rioollucht: concentraties en geurdrempels.

In rioollucht wordt de geurdrempel van H₂S vaak overschreden; stankbestrijding zal derhalve in eerste instantie gericht moeten zijn op voorkoming van sulfidevorming of bestrijding van reeds gevormde sulfiden.

Sulfideontwikkeling in transportstelsels vindt plaats onder anaerobe omstandigheden en verloopt meestal in twee fasen^{5,6,21}.

In de eerste fase worden sulfiden gevormd uit eiwitachtige verbindingen door proteolytische bacteriën (o.a. Escherichia coli en Proteus-soorten).

In de tweede fase komt de sulfaatreductie op gang, waardoor het merendeel van het sulfide ontstaat. De sulfaatreductie vindt voornamelijk plaats in bacterieslijmlagen en slibafzettingen op de wand en de bodem van de transportstelsels^{5,6,21,22,23} en verloopt optimaal onder de volgende condities^{5,6,18,26}.

- een voldoende hoog sulfaatgehalte; bij sulfaatconcentraties boven 25 mg/l is de snelheid van sulfidevorming niet meer afhankelijk van het sulfaatgehalte;
- een redoxpotentiaal van het afvalwater tussen - 200 en - 300 mV;
- een pH van het afvalwater tussen 6 en 9;
- een temperatuur van het afvalwater tussen 22 en 30° C.

In de praktijk is er een duidelijk verschil tussen sulfideontwikkeling in persleidingen en vrij-vervalleidingen.

3.1.2 sulfideontwikkeling in persleidingen

Volgens Pomeroy²² kan de sulfidevorming in persleidingen onder optimale condities voor sulfaatreductie worden berekend met de empirische formule:

$$C_s = K.t.Lo. \left[(1 + 0,004 d)/d \right] \cdot 1,07^{(T-20)},$$

waarin:

C_s = toename van het sulfidegehalte van het afvalwater in de persleiding (mg/l)

Lo = BZV_5^{20} van het afvalwater (mg/l)

d = diameter van de persleiding (cm)

T = temperatuur van het afvalwater ($^{\circ}C$)

t = verblijftijd van het afvalwater (min.)

K = constante met de waarden:

0,0025 voor $0 < t < 10$ min.

0,0050 voor $10 < t < 60$ min.

0,0066 voor $60 < t < 300$ min

Boon & Lister³ wijzigden de formule van Pomeroy als volgt:

Lo = CZV in plaats van BZV_5^{20} ;

K = 0,00152, berekend uit praktijkwaarnemingen.

Uit eigen onderzoek (tabel 14, p. 24) is evenwel gebleken, dat de formules van Pomeroy en Boon & Lister voor de onderzochte stelsels waarden geven, die een aantal maal hoger zijn dan de gemeten waarden.

In de formule van Thistlethwayte³¹ wordt de sulfideontwikkeling mede afhankelijk gesteld van het sulfaat.

$$C_s = \frac{K.L}{d} \cdot (BZV_5^{20})^{0,8} \cdot (SO_4^{2-})^{0,4} \cdot 1,139^{(T-20)},$$

waarin:

C_s = toename sulfidegehalte (mg/l)

K = constante met de waarde 6×10^{-5}

L = lengte van de persleiding (m)

d = diameter van de persleiding (cm)

BZV_5^{20} = BZV_5^{20} van het afvalwater (mg/l)

SO_4^{2-} = sulfaatgehalte van het afvalwater (mg/l)

T = temperatuur van het afvalwater ($^{\circ}C$)

Toetsing van de formule van Thistlethwayte in het eigen onderzoek was niet mogelijk, vanwege een te gering aantal sulfaatmetingen. De stroomsnelheid van het afvalwater is eveneens van invloed op de sulfideontwikkeling^{22,26}. Bij snelheden boven circa 1,2 m/sec. wordt weinig slib afgezet, terwijl de slijmlaag op de wand van de leiding beperkt blijft. De sulfideontwikkeling is derhalve minder groot.

3.1.3 sulfideontwikkeling in vrij-vervalleidingen

De sulfideontwikkeling in vrij-vervalleidingen wordt mede beïnvloed door de natuurlijke beluchting van het afvalwater. De minimum snelheid van het afvalwater, waarbij sulfideontwikkeling wordt voorkomen, kan worden berekend met de empirische formule van Pomeroy & Bowlus²³:

$$V_{\min.} = 0,042 \cdot (\text{effectieve BZV}_5^{20})^{0,496},$$

waarin:

$V_{\min.}$ = minimum snelheid van het afvalwater ter voorkoming van sulfidevorming (m/sec.)

effectieve BZV_5^{20} = standaard $BZV_5^{20} \cdot (1,07)^{T-20}$

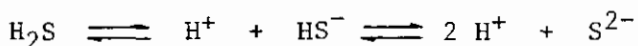
T = temperatuur van het afvalwater ($^{\circ}\text{C}$)

De formule heeft een beperkte waarde, omdat naast de BZV ook de pH en de redoxpotentiaal van invloed zijn op de sulfideontwikkeling. Over de grootte van deze invloed zijn geen kwantitatieve gegevens bekend.

3.2 Stankemissie

Stankhinder ontstaat door emissie van stankstoffen op plaatsen met een turbulente stroming en contact met de buitenlucht. Voor het zwavelwaterstofgas worden als maximaal aanvaardbare inmissieconcentratie in een bedrijfsruimte (MAC-waarde) en maximaal aanvaardbare inmissieconcentratie in de buitenlucht (MIC-waarde) respectievelijk 10 en 0,1 mg $\text{H}_2\text{S}/\text{m}^3$ genoemd.

In waterig milieu is het zwavelwaterstofgas in evenwicht met HS^- en S^{2-} volgens:



De emissie van H_2S uit afvalwater wordt bepaald door²¹:

- de concentratie H_2S in het afvalwater onder het grensvlak waterlucht. Deze concentratie is afhankelijk van de pH en de concentratie aan zware metalen. Uit figuur 1 blijkt, dat bij een lage pH de concentratie H_2S hoog is; bij een lage pH kan derhalve veel H_2S ontwijken naar de gasfase;
- de turbulentie van het afvalwater;
- de H_2S -diffusie in het grensvlak afvalwater - lucht;
- de aanwezigheid van drijfslagen.

Voor een indicatie omtrent de verspreiding van H_2S in de atmosfeer kan gebruik worden gemaakt van verspreidingsformules¹².

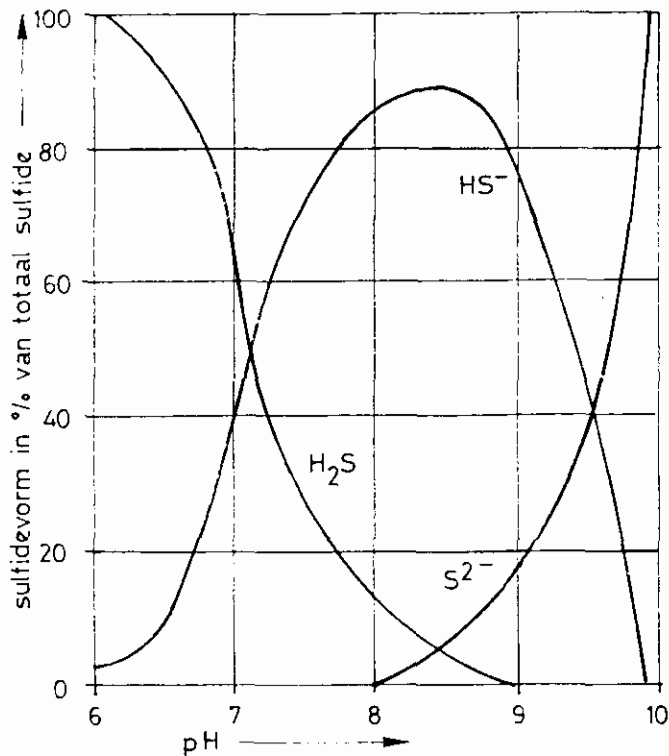


Fig. 1. De invloed van de pH op het H₂S/sulfide-evenwicht in water⁶.

3.3 Preventie van de vorming van stankstoffen in transportstelsels

De ontwikkeling van stankstoffen in transportstelsels kan worden voorkomen door handhaving van aerobe condities^{3,18,21}.

De hoeveelheid zuurstof, die daarvoor nodig is, wordt bepaald door de respiratiesnelheid van het afvalwater en de aerobe bacterielaag op de wand van de leiding (wandverademingsnelheid).

Voor een globale schatting van de benodigde hoeveelheid zuurstof kan volgens Boon³ gebruik worden gemaakt van de empirische formule:

$$C_o = \left[14 + (280/d) \right] \cdot \left[\pi \cdot d^2 \cdot L / (4 \cdot F \cdot 10^4) \right],$$

waarin:

C_o = benodigde hoeveelheid zuurstof per liter afvalwater ter voorkoming van anaerobie (mg/l)

d = diameter persleiding (cm)

L = lengte persleiding (m)

F = gemiddelde waterafvoer (m³/uur)

Voor de respiratiesnelheid van het afvalwater en de wandverademingsnelheid worden in de formule respectievelijk de waarden 14 en (280/d) mg/l per uur gehanteerd.

Door Pomeroy²⁴ is evenwel aangetoond, dat de respiratiesnelheid van afvalwater in een aantal gevallen sterk kan variëren met de tijd (figuur 2).

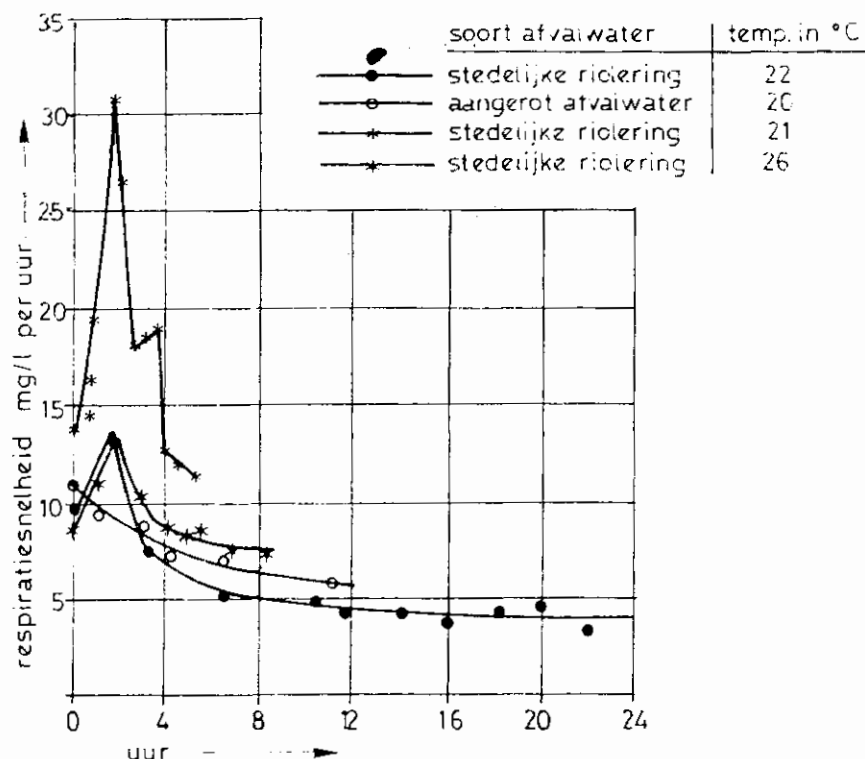


Fig. 2. Respiratiesnelheden in met zuurstof verrijkte afvalwatermonsters.

Uit eigen onderzoek (zie p. 27) is evenwel gebleken, dat:

- de respiratiesnelheid van het beschouwde afvalwater, in tegenstelling tot de gegevens van Pomeroy, vrijwel niet varieert met de tijd;
- de gemiddelde respiratiesnelheid van het afvalwater (circa 5 mg/l per uur) aanzienlijk lager is dan de in de formule van Boon & Lister gegeven waarde van 14 mg/l per uur. Door Boon is deze waarde inmiddels teruggebracht tot 6 mg/l per uur¹⁹.

Zuurstof kan worden toegevoegd als luchtzuurstof of als zuivere zuurstof. Luchtinjectie is in een aantal gevallen een effectieve stankbestrijdingsmethode gebleken²².

De zuurstofverzadigingsconcentratie in water is voor zuivere zuurstof vijfmaal de verzadigingsconcentratie voor lucht. Er kan dus veel meer zuivere zuurstof worden opgelost dan luchtzuurstof.

Uit onderzoeken van het Water Research Centre¹⁹ is gebleken, dat door zuurstofinjectie in het begin van persleidingen sulfidevorming kan worden voorkomen.

Het Reynoldsgetal α moet groter zijn dan circa 300.000, terwijl tevens de maximale oplosbaarheid van zuurstof bij de heersende temperatuur en druk niet mag worden overschreden.

In tabel 2 is het verband tussen de oplosbaarheid van zuivere zuurstof bij 15°C en de druk in de leiding weergegeven²⁸.

druk in de leiding ^{xx} (meter waterkolom)	oplosbaarheid (mg/l)
0	50
11	99
15	117
19	136
26	168

Tabel 2. Oplosbaarheid van zuivere zuurstof bij 15°C.

^{xx} boven atmosferische druk

Uit een onderzoek van het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland bleek, dat door zuurstofverrijking van afvalwater in een pompkelder de sulfidevorming in een persleiding gedeeltelijk kon worden voorkomen⁹.

3.4 Oxydatie van stankstoffen in transportstelsels

3.4.1 *zuurstofinjectie*

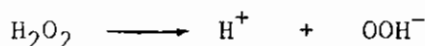
Uit laboratoriumexperimenten, verricht door het Water Research Centre³, de British Oxygen Company⁸ en Gemeentewerken 's-Gravenhage³³ blijkt, dat sulfide in afvalwater kan worden geoxydeerd met zuivere zuurstof. De reactietijd varieert van circa 1 uur tot enkele uren, terwijl tevens andere stoffen worden geoxydeerd.

Chen et al⁴ toonden een positieve katalytische invloed aan van Ni²⁺ Cu²⁺, Mg²⁺ en Ca²⁺ op de oxydatiesnelheid; de grootte van deze katalytische werking van de metalen nam af in de weergegeven volgorde.

3.4.2 *waterstofperoxydedosering*

Waterstofperoxyde, een kleur- en reukloze vloeistof, is in iedere verhouding mengbaar met water.

In water vertoont het waterstofperoxyde een zwak zuur karakter:



α Reynoldsgetal = $v \times D / \gamma$

v = snelheid afvalwater (m/sec.)

D = diameter persleiding (m)

γ = kinematische viscositeit (m²/sec.).

De oxyderende werking van het waterstofperoxyde wordt toegeschreven aan het perhydroxyl-ion (OOH^-).

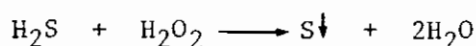
Het waterstofperoxyde is een vrij stabiel product.

De ontledingsreactie:



wordt sterk gekatalyseerd door metaalionen (onder andere: Fe^{2+} , Cr^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} en Co^{2+}), enzymen (katalase en peroxydase) en minerale of organische stoffen^{14,15}.

In zuur of neutraal milieu wordt zwavelwaterstof geoxydeerd tot elementaire zwavel:



In basisch milieu en bij voldoende overmaat aan waterstofperoxyde wordt het zwavelwaterstof geoxydeerd tot sulfaat^{14,15,16}:



Uit laboratoriumexperimenten^{14,15,16,27} en praktijkonderzoeken^{14,15,16,17,27} kan worden geconcludeerd, dat de sulfideoxydatie met waterstofperoxyde een relatief snelle en vrij selectieve oxydatiereactie is. In stedelijk afvalwater kan bij dosering van waterstofperoxyde worden volstaan met een hoeveelheid, die gebaseerd is op een gewichtsverhouding $\text{H}_2\text{O}_2/\text{S}^{2-}$ tussen 1,5 en 2,0 en een reactietijd van 10 tot 30 minuten.

Uit eigen onderzoek (tabel 17, p. 39) is gebleken, dat bij een dosering van circa 2-4 mg $\text{H}_2\text{O}_2/\text{mg S}^{2-}$ de reductie van het sulfidegehalte circa 80-95% bedraagt.

3.5 Conclusies

Het voorgaande literatuuroverzicht kan worden samengevat als volgt:

- de stankstoffen die ontstaan in afvalwatertransportstelsels voor stedelijk afvalwater bestaan vooral uit sulfiden;
- de sulfidevorming in persleidingen is door het ontbreken van een natuurlijke beluchting groter dan in vrij-vervalleidingen;
- de sulfidevorming in persleidingen kan worden geschat met empirische formules;
- door zuurstofinjectie in het begin van persleidingen kan sulfidevorming worden voorkomen;
- door zuurstofinjectie in persleidingen kunnen mogelijk ook sulfiden worden geoxydeerd;
- door waterstofperoxydedosering kunnen in persleidingen en in vrij-vervalleidingen sulfiden worden geoxydeerd.

4 ONDERZOEKOBJECTEN

4.1 Selectie

Via een rondvraag bij de waterkwaliteitsbeheerders is een tiental transportleidingen beoordeeld op geschiktheid voor een vergelijkend onderzoek ten aanzien van de toepasbaarheid van zuivere zuurstof en waterstofperoxyde. Dit heeft geleid tot de keuze van de persleiding van het gemaal Vaassen naar de r.w.z.i.-Apeldoorn. De volgende gunstige proefomstandigheden waren hierbij doorslaggevend:

- een overwegend aandeel huishoudelijk afvalwater in de totale afvoer;
- de afwezigheid van abrupte hoogteverschillen in het leidingprofiel en dus bij injectie van zuivere zuurstof een geringe kans op het ontstaan van gasinsluitingen;
- uitmonding van de persleiding in een afgedekte ontvangput, zonder bijmenging met ander afvalwater.
De meet- en regeltechnische aspecten werden hierdoor sterk vereenvoudigd;
- drie verschillende pompcapaciteiten en een grote bergingscapaciteit op het gemaal, waardoor de mogelijkheid tot proefnemingen bij diverse pompregimes.

Tevens is een vijftal door de waterkwaliteitsbeheerders zelf uitgevoerde experimenten in het onderzoek betrokken.

4.2 Beschrijving

4.2.1 *algemeen*

Er is onderzoek verricht op vijf objecten. Voor elk van deze objecten zijn achtereenvolgens weergegeven:

- het doel van het onderzoek;
- een schematisch overzicht van het transportsysteem;
- gegevens inzake afvalwaterafvoer;
- gegevens inzake samenstelling (zonder chemicaliëndosering) van het afvalwater en de atmosfeer in de ontvangput.

4.2.2 *persleiding Vaassen - Apeldoorn* (figuur 3, tabellen 3 en 4)

Het onderzoek had tot doel:

- preventie van sulfidevorming door zuurstofinjectie¹;
- oxydatie van sulfiden door zuurstofinjectie²;
- oxydatie van sulfiden door waterstofperoxydedosering².

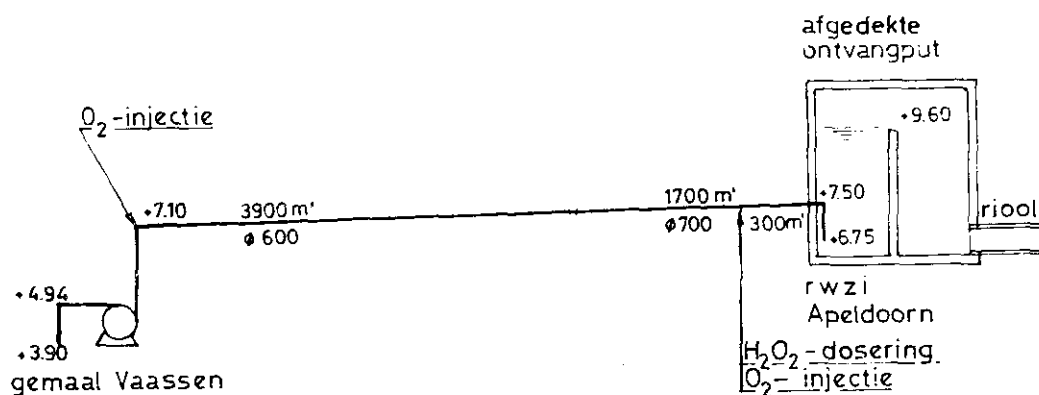


Fig. 3. Persleiding Vaassen - Apeldoorn: schema.

pompcapaciteit m ³ /u	Reynoldsgetal	gemiddelde DWA- afvoer m ³ /u
400	170.000	63
600	260.000	-
1200	520.000	-

Tabel 3. Persleiding Vaassen - Apeldoorn: afvoergegevens.

	pH	BZV mg/l	CZV mg/l	S ²⁻ -tot. mg/l	H ₂ S-atm. mg/m ³
spreiding	6,6 - 7,5	100 - 400	200 - 1100	0,5 - 8	15 - 600
gemiddelde	7,1	220	580	3,7	180
stand. afw.	0,2	90	260	2,2	150
aantal waarn.	60	62	63	34	63

Tabel 4. Persleiding Vaassen - Apeldoorn: samenstelling afvalwater en atmosfeer (in een afgedekte ontvangput).

4.2.3 *persleiding Makkinga - Oosterwolde* (figuur 4, tabellen 5 en 6)

Het onderzoek had tot doel de preventie van sulfidevorming in de persleiding door zuurstofinjectie²⁵.

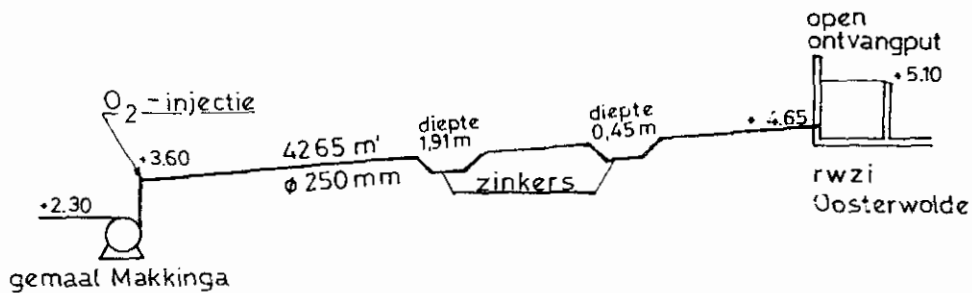


Fig. 4. Persleiding Makkinga - Oosterwolde: schema.

pompcapaciteit m ³ /u	Reynoldsgetal	gemiddelde DWA- afvoer m ³ /u
50	54.000	13
100	108.000	-

Tabel 5. Persleiding Makkinga - Oosterwolde: afvoergegevens.

	pH	BZV mg/l	CZV mg/l	S ²⁻ -totaal mg/l	H ₂ S-atm. mg/m ³
spreiding	5 - 8	150 - 900	400 - 1700	1 - 15	5 - 20
gemiddelde	6,7	470	840	10,5	-
stand. afw.	0,6	260	430	4,2	-
aantal waarn.	30	11	11	24	5

Tabel 6. Persleiding Makkinga - Oosterwolde: samenstelling afvalwater en atmosfeer (in een open ontvangput).

4.2.4 *transportstelsel "Riool-Zuid" - Eindhoven (figuur 5, tabellen 7 en 8)*

Het onderzoek had tot doel:

- preventie van sulfidevorming in de persleiding vanaf het gemaal Aalst en de opvolgende vrij-vervalleiding door zuurstofinjectie in het begin van de persleiding¹⁰;
- oxydatie van sulfiden door waterstofperoxydedosering in de vrij-vervalleiding van het Regelstation-Zuid naar de r.w.z.i.-Eindhoven³⁴.

Over het laatste aspect, onderzocht door de Gemeenschappelijke Technologische Dienst Oost-Brabant en de N.V. Philips, wordt gerapporteerd op p. 41.

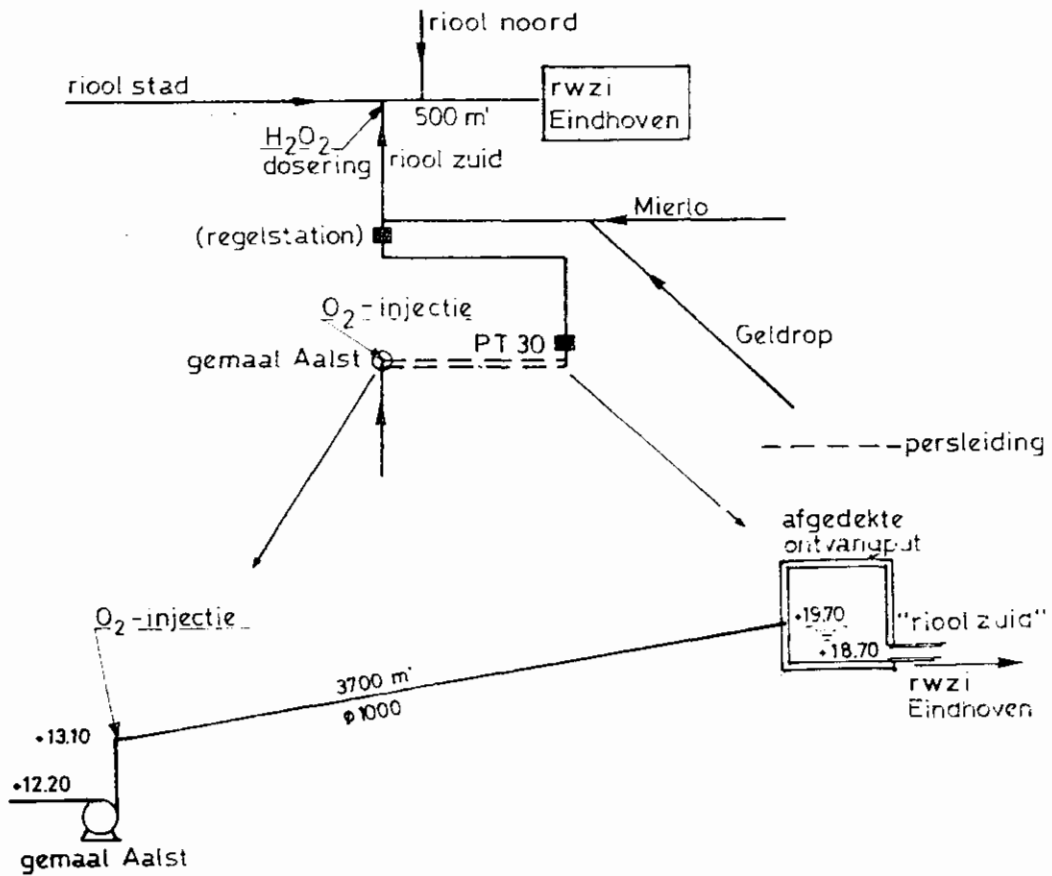


Fig. 5. Transportstelsel "Riool-Zuid" - Eindhoven: schema.

pompcapaciteit ^x m ³ /u	Reynoldsgetal	gemiddelde DWA-afvoer m ³ /u
2400	650.000	1500
4000	1.080.000	-

Tabel 7. Persleiding Aalst - "Riool-Zuid": afvoergegevens.
(^x capaciteit voor elk van de parallelle leidingen).

	pH	BZV mg/l	CZV mg/l	S ²⁻ -totaal mg/l	H ₂ S-arm. mg/m ³
spreiding	6,5 - 7,3	150 - 470	300 - 800	0,2 - 0,5	-
gemiddelde	6,9	390	475	-	-
stand. afw.	0,2	150	150	-	-
aantal waarn.	25	10	23	4	-

Tabel 8. Persleidingen Aalst - "Riool-Zuid": samenstelling afvalwater per plaatse van PT 30 (zie figuur 5).

4.2.5 *persleiding Assendelft - Beverwijk* (figuur 6, tabellen 9 en 10)

Het onderzoek had tot doel de oxydatie van sulfiden door waterstofperoxydedosering nabij het eindpunt van de leiding¹³.

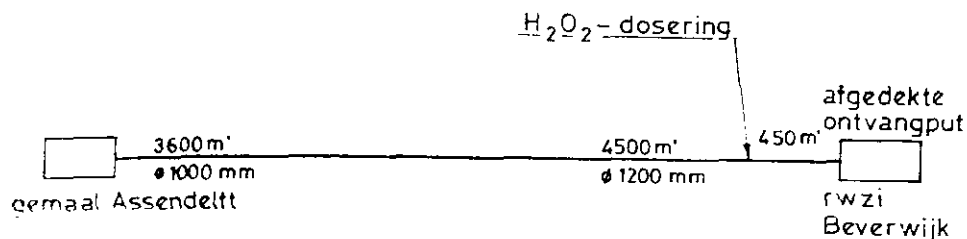


Fig. 6. Persleiding Assendelft - Beverwijk: schema.

pompcapaciteit m ³ /u	Reynoldsgetal	gemiddelde DWA- afvoer m ³ /u
2000	450.000	345
3200	720.000	-

Tabel 9. Persleiding Assendelft - Beverwijk: afvoergegevens.

	pH	BZV mg/l	CZV mg/l	S ²⁻ -totaal mg/l	H ₂ S-atm. mg/m ³
spreiding	7,4 - 7,8	100 - 400	300 - 900	7 - 40	50 - 550
gemiddelde	7,6	220	520	22,2	320
stand. afw.	0,1	60	140	7,4	135
aantal waarn.	20	60	70	34	20

Tabel 10. Persleiding Assendelft - Beverwijk: samenstelling afvalwater en atmosfeer (in een afgedekte ontvangput).

4.2.6 persleiding Terborg - Doetinchem (figuur 7, tabellen 11 en 12)

Het onderzoek had tot doel de oxydatie van sulfiden door waterstofperoxydedosering nabij het eindpunt van de leiding³⁵.

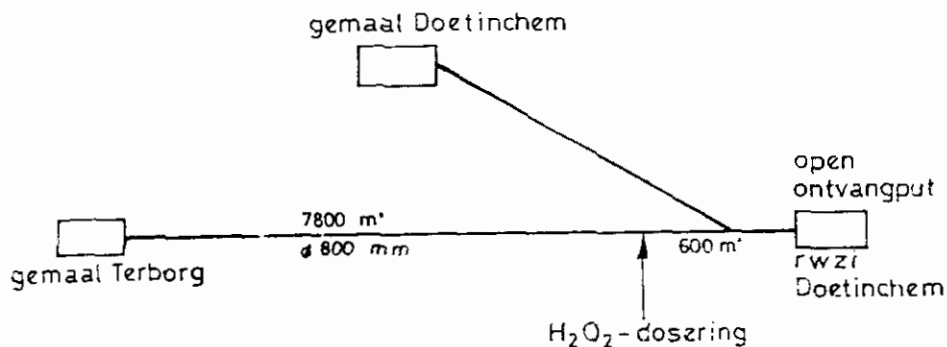


Fig. 7. Persleiding Terborg - Doetinchem: schema.

pompcapaciteit m ³ /u	Reynoldsgetal	gemiddelde DWA- afvoer m ³ /u
1200	410.000	210
2400	820.000	-

Tabel 11. Persleiding Terborg - Doetinchem: afvoergegevens.

	pH	BZV mg/l	CZV mg/l	S ²⁻ -totaal mg/l	H ₂ S-atm. ^x mg/m ³
spreiding	6,7 - 8,0	-	100 - 1100	5 - 25	150 - 600
gemiddelde	7,4	-	720	13,7	465
stand. afw.	0,2	-	205	6,4	225
aantal waarn.	36	-	42	34	23

Tabel 12. Persleiding Terborg - Doetinchem: samenstelling afval-
water en put-atmosfeer
(^x gemeten met een scrubber).

5 BEMONSTERING, METING EN ANALYSE

5.1 Algemeen

De tijdsduur van de onderzoeksperiode per object werd vastgesteld op 5 weken, inclusief een blanco-onderzoek van 1 week aan het begin van de periode.

In de ontvangputten aan het einde van de transportleidingen zijn metingen verricht in het afvalwater en in de atmosfeer. Ter illustratie van de in het navolgende beschreven continue bemonsterings-, meet- en registratieapparatuur is voor het object Vaassen - Apeldoorn in de figuren 8 en 9 een overzicht gegeven van deze apparatuur. Figuur 8 geeft de bemonsterings- en meetapparatuur in de ontvangput; figuur 9 de meet- en registratieapparatuur in de meetwagen bij de ontvangput.

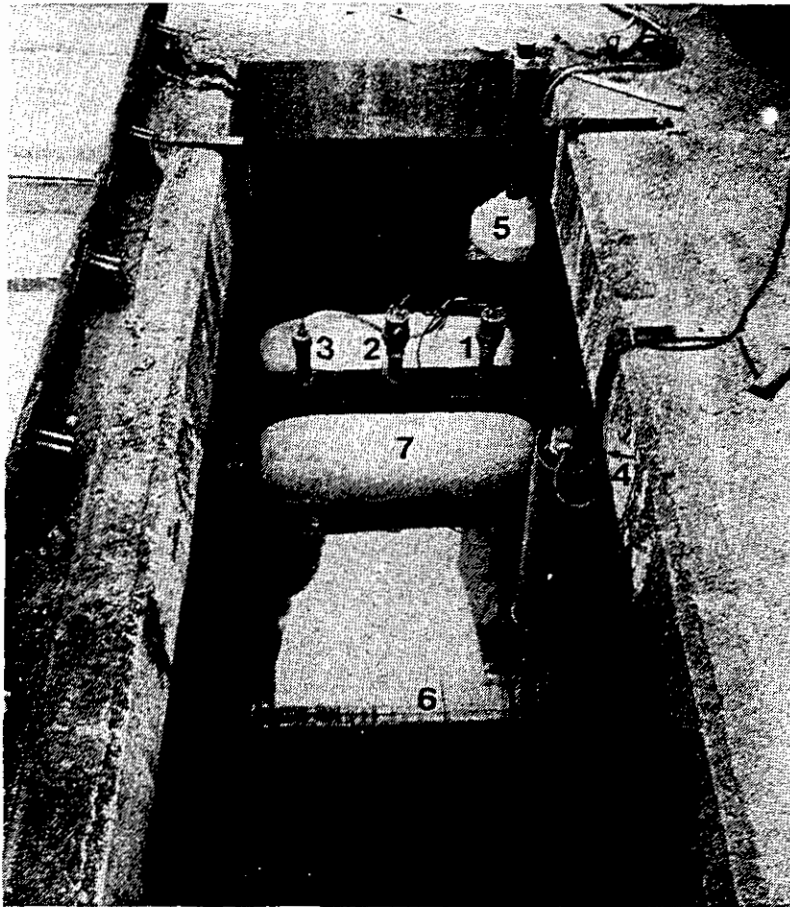


Fig. 8. Bemonsterings- en meetapparatuur in de ontvangput (overzicht).

- | | |
|---|--|
| 1. Zuurstof-electrode;
WTW EO 40/200. | 4. Niveaumeting afvalwater. |
| 2. pH-electrode; WTW A 300 S. | 5. Aanzuigtrecter ten behoeve van
H ₂ S-metingen |
| 3. Redoxpotentiaal-electrode;
WTW Pt-Ag/Ag Cl.
Temperatuurvoeler;
WTW Pt 100/720 | 6. Overstortdrempel. |
| | 7. Drijversysteem. |

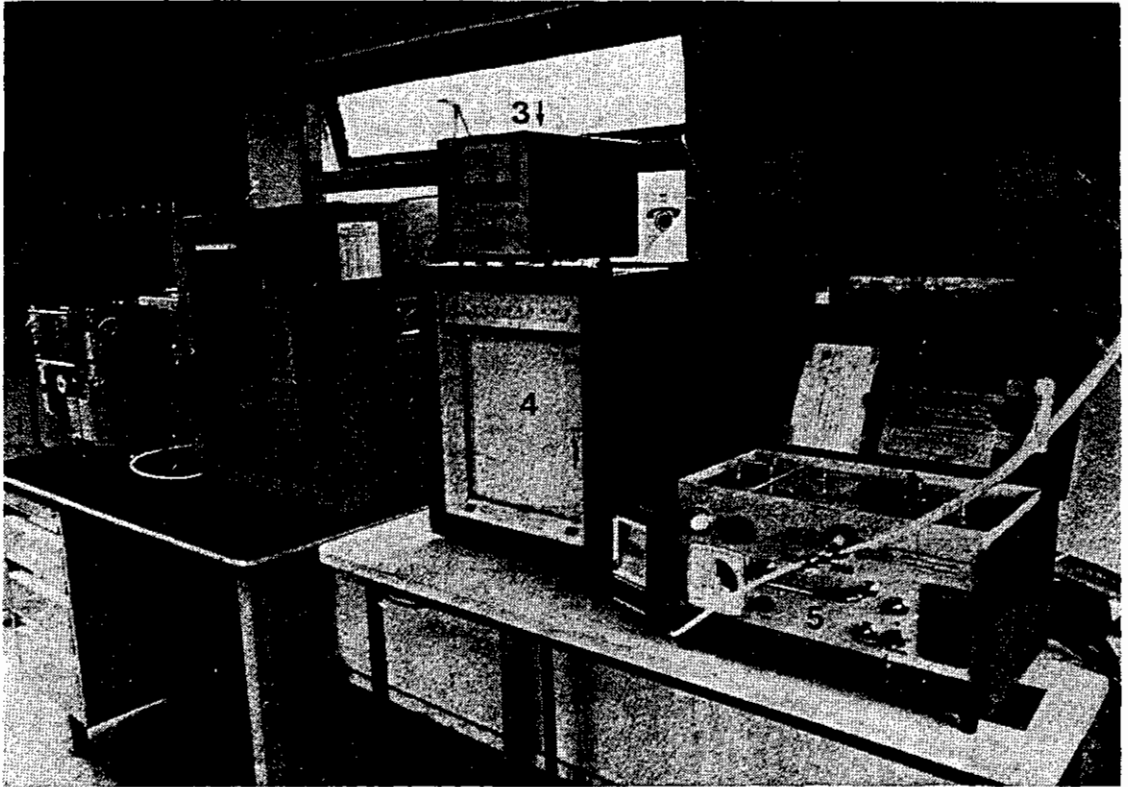


Fig. 9. Meet- en registratieapparatuur in de meetwagen bij de ontvangput (overzicht).

- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1. H ₂ S-monitor: Philips. | 4. 12-punts-recorder. |
| 2. WTW-monitor (pH, O ₂ , redoxpotentialiaal en temperatuur). | 5. H ₂ S-monitor: Imbema. |
| 3. O ₂ -meter lucht; Servomix. | |

Meetgegevens, verzameld in regenperioden zijn buiten beschouwing gelaten.

5.2 Metingen in het afvalwater

Aan het einde van de transportleidingen zijn de pH en het zuurstofgehalte continu gemeten en geregistreerd. Hierbij is gebleken, dat voor een nauwkeurige continu meting de meetelectroden enkele malen per week dienen te worden gereinigd.

Daarnaast zijn steekmonsters van het afvalwater genomen, waarvan de BZV, de CZV en de gehalten aan opgelost en totaal sulfide zijn bepaald.

De sulfidebepalingen zijn verricht volgens een fotometrische meetmethode³⁰; daarnaast zijn op het object Vaassen - Apeldoorn sulfidemetingen verricht met een ion-specifieke electrode (merk Metro-Ohm) volgens een Orion-werkvoorschrift²⁰. Op het object Vaassen - Apeldoorn zijn bovendien de redoxpotentialiaal (Pt-Ag/AlCl₃-electrode) en de temperatuur continu gemeten en geregistreerd.

5.3 H₂S-metingen in de atmosfeer

Het H₂S-gehalte van de atmosfeer in de ontvangput is continu gemeten en geregistreerd.

Op de objecten Vaassen - Apeldoorn en Assendelft - Beverwijk is hier toe bemonsterd in een afgesloten ontvangput; op het object Makkinga - Oosterwolde in een open put.

Tijdens het onderzoek is gebleken dat in een open ontvangput het H₂S-gehalte sterk wordt beïnvloed door de weersomstandigheden. Hierdoor zijn de gemeten H₂S-gehalten onderling niet vergelijkbaar. Op de objecten Terborg - Doetinchem en "Riool-Zuid" - Eindhoven zijn daarom bemonsteringssystemen toegepast, waarmee de weersinvloed zoveel mogelijk wordt geëlimineerd.

Op het object Terborg - Doetinchem is als bemonsteringssysteem een H₂S-scrubber toegepast.

Bij dit systeem wordt het afvalwater aan de bovenzijde van een holle cilindrische buis tangentiaal ingevoerd. Door de buis stroomt van beneden naar boven een constante luchtstroom, die naar een H₂S-monitor wordt geleid. Dit is schematisch weergegeven in figuur 10².

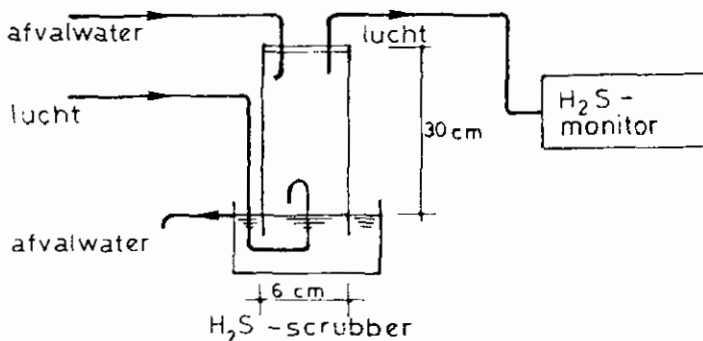


Fig. 10. H₂S-meting met een H₂S-scrubber: schema.

Op het object "Riool-Zuid" - Eindhoven is het volgende bemonsteringssysteem toegepast.

Door een cilindrische buis, die vertikaal in het water is geplaatst, wordt een constante luchtstroom gezogen.

Hiertoe is in de bovenzijde van de buis een ventilator ingebouwd, terwijl boven het waterniveau aanzuigopeningen voor de lucht zijn aangebracht. Vanuit de buis wordt een constante luchtstroom geleid naar een H₂S-monitor. Dit is schematisch weergegeven in figuur 11.

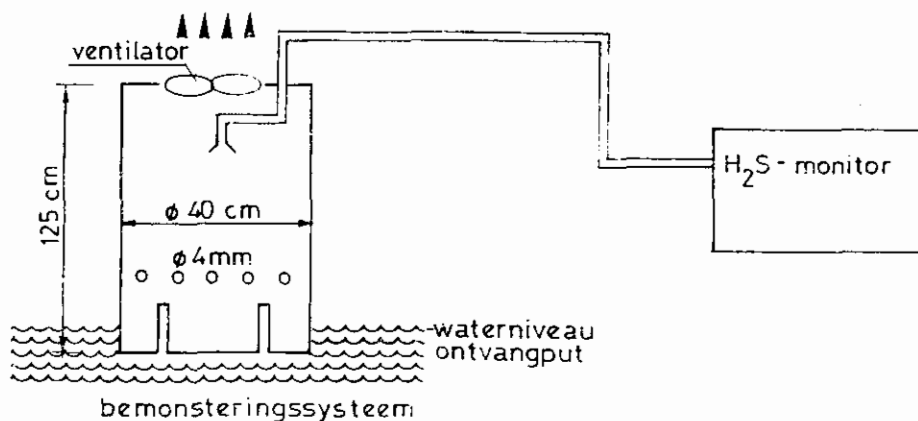


Fig. 11. H_2S -meting in een constante luchtstroom: schema.

De H_2S -metingen zijn verricht met de volgende monitoren:

- een Imbema-monitor, waarvan de werking berust op de verkleuring van loodacetaatpapier door H_2S .
Meetbereik: 0 - 35 mg/m^3 .
Toegepast op de objecten Vaassen - Apeldoorn, Makkinga - Oosterwolde, Terborg - Doetinchem en Assendelft - Beverwijk.
- een Maihak-monitor, waarvan de werking eveneens berust op de verkleuring van loodacetaatpapier door H_2S .
Meetbereik: 0 - 50 mg/m^3 .
Toegepast op het object Assendelft - Beverwijk;
- een Philips-monitor, waarvan de werking berust op een automatische titratie van H_2S met broom.
Meetbereik: 0 - 4,3 mg/m^3 .
Toegepast op de objecten Vaassen - Apeldoorn en "Riool-Zuid" - Eindhoven.

Bij overschrijding van het meetbereik van de monitoren is verdunningsapparatuur (onder andere Imbema-apparatuur) gebruikt.

In de afvoer van vier persleidingen zijn sulfidemetingen verricht. Deze metingen zijn uitgevoerd zonder chemicaliëndosering. In tabel 13 zijn een aantal gegevens over het gehalte aan totaal-sulfide weergegeven.

onderzoekobjecten	n ^x	waarnemings- gebied (mg/l)	gemiddel- de (mg/l)	standaard- afw. (mg/l)
Vaassen-Apeldoorn	50	0,3 - 8,1	3,7	2,2
Assendelft-Beverwijk	34	6,6 - 39,0	22,2	7,4
Terborg Doetinchem	33	5,0 - 25,0	13,7	6,4
Makkinga-Oosterwolde	30	2,1 - 15,2	10,5	4,2

Tabel 13. Gehalte aan totaal sulfide: waarnemingsgebied, gemiddelde en standaardafwijking.

x n is het aantal waarnemingen.

Uit tabel 13 blijkt een grote spreiding in het gehalte aan totaal sulfide; regeling van de chemicaliëndosering op basis van het sulfidegehalte ter besparing van chemicaliën lijkt dan ook zinvol.

In tabel 14 is voor de vier persleidingen uit tabel 13 zowel de gemeten als berekende toename (volgens Pomeroy²² en Boon & Lister³, p. 7) van het totaal-sulfidegehalte weergegeven.

onderzoekobjecten	toename sulfidegehalte (mg/l)		
	gemeten	Pomeroy	Boon & Lister
Vaassen-Apeldoorn	3,7	33	19
Assendelft-Beverwijk	22,2 ^{xx}	30	15
Terborg-Doetinchem	13,7 ^{xx}	31	18
Makkinga-Oosterwolde	10,5 ^{xx}	100	41

Tabel 14. Toename van het sulfidegehalte in persleidingen: gemeten en volgens empirische formules berekend.

xx Toename van het sulfidegehalte in het gehele transportstelsel (inclusief riolen); de toename in de persleidingen is waarschijnlijk lager.

Uit tabel 14 blijkt, dat de gemeten toename van het sulfidegehalte in de persleidingen aanzienlijk minder was, dan de berekende toename. Vooral de formule van Pomeroy gaf een veel te hoge waarde voor de sulfidevorming.

7.1 Materiaal en methoden

De injectie van zuivere zuurstof in de persleidingen kan als volgt worden omschreven.

Vanuit een reservoir wordt zuurstof in gasvormige toestand geïnjecteerd in de persleidingen na een eventuele windketel. In het injectiesysteem zijn een magneetafsluiter en een flowmeter opgenomen. De zuurstof wordt zo goed mogelijk proportioneel met de afvalwaterafvoer geïnjecteerd; de magneetafsluiter in de zuurstoftoevoerleiding wordt hiertoe gestuurd door in- en uitslagniveaus van de afvalwaterpompen. Teneinde er zeker van te zijn, dat de zuurstof steeds werd geïnjecteerd bij voldoende turbulentie is op het object Vaassen-Apeldoorn de zuurstofinjectie vertraagd ingeschakeld na pompstart en vervroegd uitgeschakeld voor pompstop. Dit is schematisch weergegeven in figuur 12.

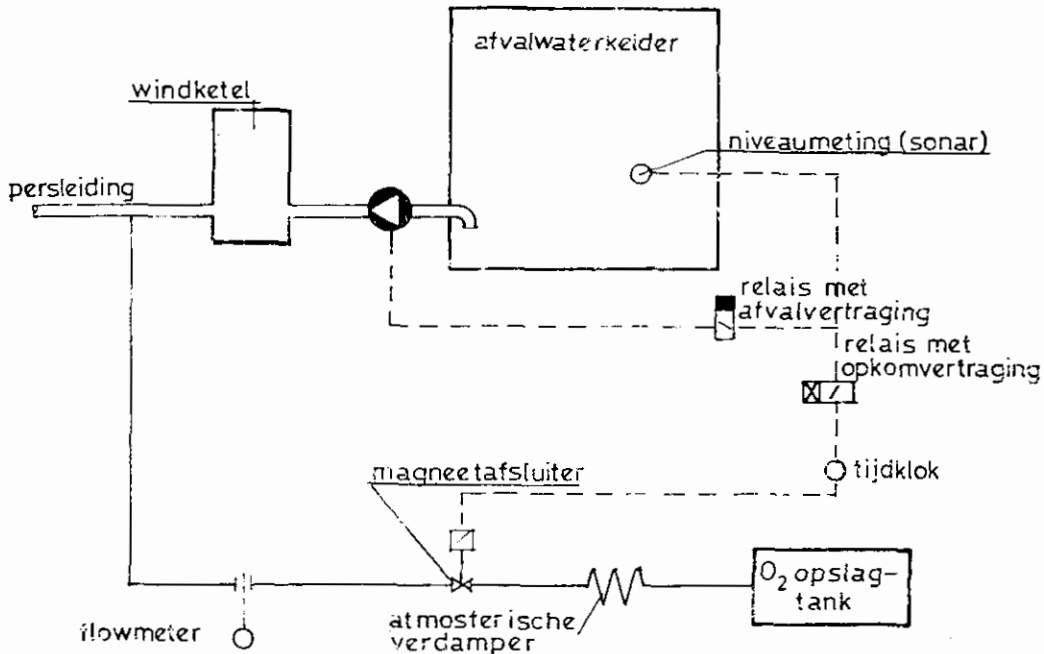


Fig. 12. Zuurstofinjectie: schema.

De zuivere zuurstof werd geïnjecteerd, hetzij:

- via een vertikaal in de leiding aangebrachte buis met sproeiopeningen (figuur 13a).

Een nadeel van deze injectiebuis is, dat de sproeiopeningen kunnen verstopen; (toegepast op de objecten Makkinga - Oosterwolde en Aalst - "Riool-Zuid"), hetzij:

- via een sproei-opening direct beneden de binnenwand van de persleiding en loodrecht op de stromingsrichting (figuur 13b) van het afvalwater; (toegepast op het object Vaassen - Apeldoorn).

Beide methoden zijn schematisch weergegeven in figuur 13.

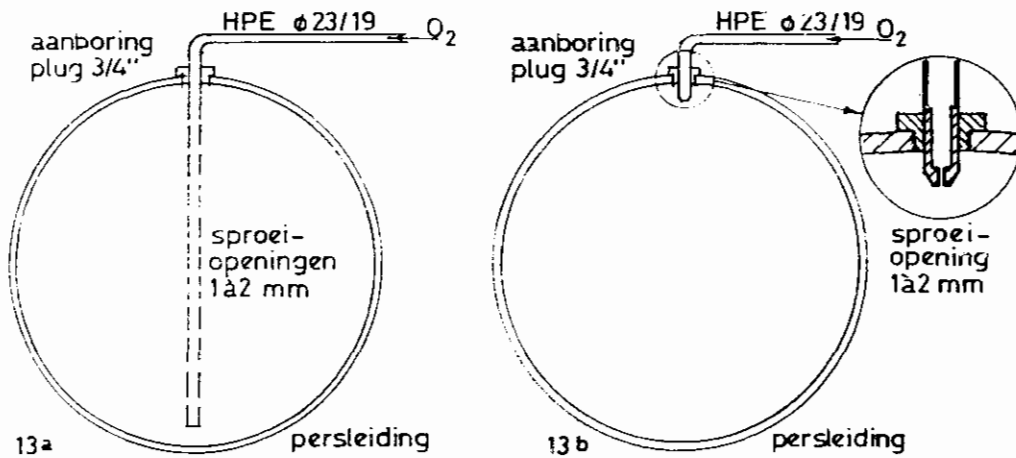


Fig. 13. Zuurstofinjectoren: schema.

7.2 Resultaten en discussie

7.2.1 *effectiviteit*

Voor een schatting van de hoeveelheid zuurstof per liter afvalwater ter voorkoming van anaërobie zijn op het laboratorium respiratieproeven uitgevoerd met "influent" en "effluent" van drie persleidingen. Figuur 14 geeft de resultaten van deze proeven.

Uit figuur 14 blijkt, dat:

- de respiratiesnelheden gedurende een periode van enkele uren na zuurstofverrijking nagenoeg constant blijven;
- slechts geringe verschillen bestaan tussen de respiratiesnelheid van het "influent" en het "effluent" van de persleidingen;
- de gemiddelde respiratiesnelheid over alle respiratieproeven circa 5 mg/l per uur bedraagt.

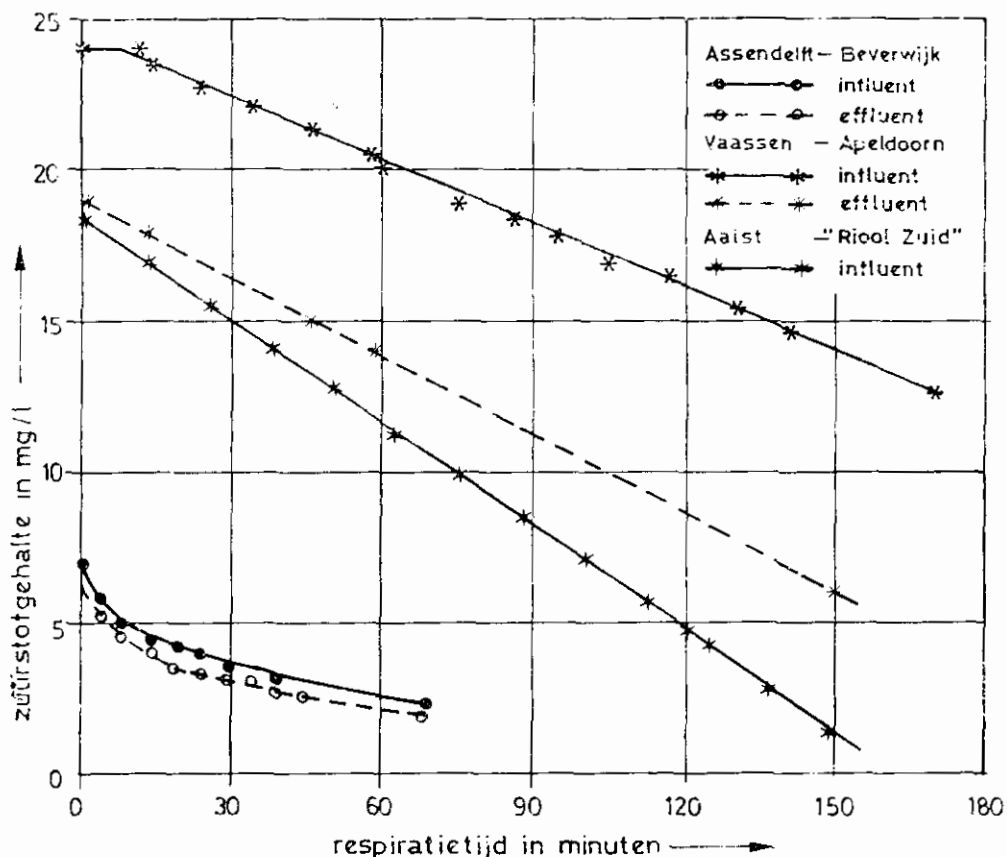


Fig. 14. Zuurstofgehalten in met zuurstof verrijkte afvalwatermonsters (laboratoriumproeven).

Voor de drie persleidingen uit figuur 14 is op basis van de formule van Boon & Lister (zie p. 9) een schatting gemaakt van de hoeveelheid zuurstof per liter afvalwater ter voorkoming van anaërobie. Hiertoe is de door Boon & Lister gegeven waarde van 14 mg/l per uur voor de respiratiesnelheid van het afvalwater (r) vervangen door het gemiddelde van de gemeten respiratiesnelheden van "influent" en "effluent" van de persleiding (r^x).

Het geschatte zuurstofverbruik volgens de aldus gemodificeerde en de oorspronkelijke formule van Boon & Lister is weergegeven in tabel 15.

Uit tabel 15 blijkt, dat het geschatte zuurstofverbruik volgens de oorspronkelijke formule van Boon & Lister aanzienlijk hoger is dan het geschatte zuurstofverbruik volgens de gemodificeerde formule. In beide gevallen wordt de maximale oplosbaarheid van zuurstof bij de heersende temperatuur en pompdruk (50 - 100 mg O_2 /l afvalwater) overschreden.

onderzoekobjecten	geschat zuurstofverbruik (mg/l)	
	r = 14	$r^x = \frac{r.inf. + r.effl.}{2}$
Vaassen-Apeldoorn	510	250
Makkinga-Oosterwolde	410	245
Aalst-"Riool-Zuid"	65	40

Tabel 15. Geschat zuurstofverbruik volgens de oorspronkelijke (r = 14) en de gemodificeerde (r^x) formule van Boon & Lister.

Opgemerkt zij, dat de oorspronkelijke formule van Boon & Lister is afgeleid op basis van waarnemingen in slechts één afvalwaterpersleiding en dus met de nodige voorzichtigheid moet worden beschouwd.

In tabel 16 is voor twee onderzoekobjecten weergegeven het volgens de gemodificeerde formule van Boon & Lister geschatte zuurstofverbruik ter voorkoming van anaerobie, de hoeveelheid geïnjecteerde zuurstof en de hiermede verkregen reductie in sulfidevorming.

onderzoekobjecten	geschat O ₂ -verbr. (mg/l)	O ₂ -injectie mg/l	S ²⁻ -preventie %
Vaassen-Apeldoorn	250	20 - 35	ca. 100
Makkinga-Oosterwolde	245	32	15 - 60
		55	10 - 60
		65	0 - 55
		93	20 - 65

Tabel 16. Geschat zuurstofverbruik, geïnjecteerde hoeveelheid zuurstof en reductie in sulfidevorming.

Uit tabel 16 blijkt, dat in de persleiding Vaassen - Apeldoorn tijdens zuurstofinjectie vrijwel geen sulfidevorming optrad. De hoeveelheid zuurstof ter voorkoming van sulfidevorming bedroeg slechts circa 15% van het geschatte zuurstofverbruik volgens de gemodificeerde formule.

Verder laat de tabel zien, dat in de persleiding Makkinga - Oosterwolde de hoeveelheid zuurstof voor een reductie van 0 tot 60% in de sulfidevorming circa 15% bedroeg van het geschatte zuurstofverbruik

volgens deze formule. Een drievoudige verhoging van de hoeveelheid geïnjecteerde zuurstof leidde nauwelijks tot een hogere reductie in de sulfidevorming.

7.2.2 *mechanisme van zuurstofoplossing en enkele randvoorwaarden voor zuurstofinjectie*

Uit de experimenten op het object Vaassen - Apeldoorn blijkt, dat zuurstofinjectie leidt tot gasophoppingen op hoge plaatsen in de persleiding.

Bij een Reynoldsgetal van circa 520.000 bleven de gasophoppingen van beperkte omvang. De pompbrengst nam slechts weinig af en er ontstond een stabiele situatie.

Zuurstofinjectie bij een Reynoldsgetal van ongeveer 260.000 leidde tot geleidelijk in omvang toenemende gasophoppingen. Daardoor nam de pompbrengst binnen enkele dagen af met circa 75%; voortzetting van de experimenten was niet zinvol.

In figuur 15 zijn voor de experimenten bij een Reynoldsgetal van circa 520.000 de zuurstofgehalten van de gasophoppingen op vier ontluhtingspunten weergegeven. De zuurstofgehalten zijn gemeten tijdens perioden van pompstilstand.

Naast zuurstof bestonden de gasophoppingen voornamelijk uit stikstof.

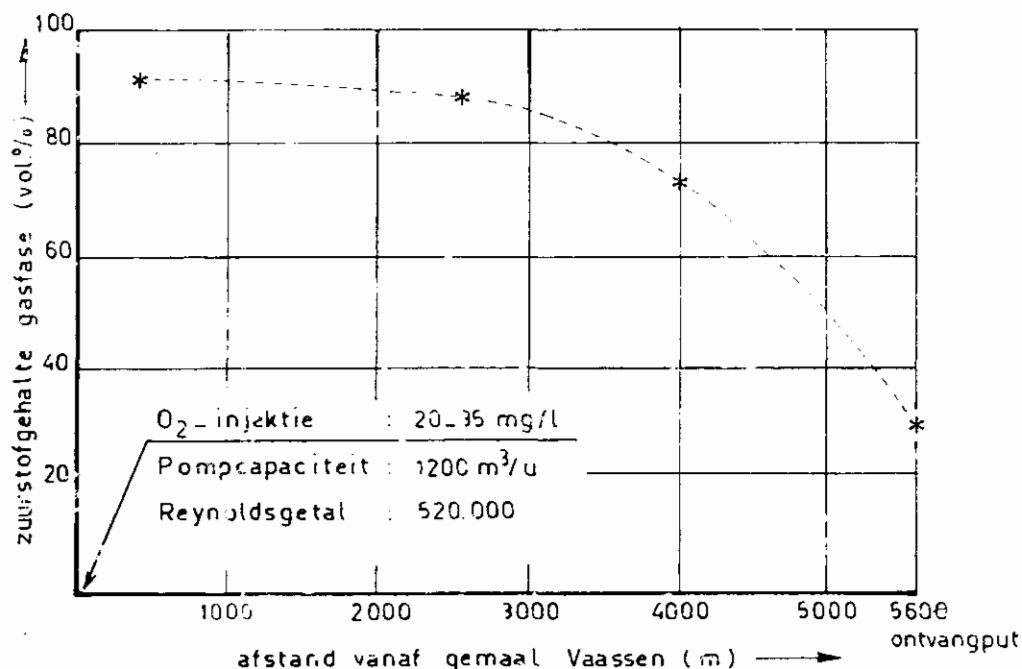


Fig. 15. Persleiding Vaassen - Apeldoorn: zuurstofgehalten van gasophoppingen op vier ontluhtingspunten.

Uit figuur 15 blijkt, dat:

- op relatief hoge punten in het leidingprofiel zuurstofrijke gasophopingen voorkomen;
- het zuurstofgehalte van de gasophopingen bij toenemende afstand van het injectiepunt afneemt. Tijdens het transport van het afvalwater door de persleiding is derhalve zuurstof opgelost.

Op basis van de voorgaande gegevens is voor de wijze, waarop de zuurstof is opgelost in het afvalwater, de volgende hypothese opgesteld.

De tijdens de pompperioden geïnjecteerde zuurstof is zowel gedispergeerd als opgelost in het afvalwater.

In perioden van pompstilstand worden gasophopingen gevormd uit de gedispergeerde zuurstof. Uit deze gasophopingen wordt tijdens het verdere transport door de leiding op identieke wijze zuurstof gedispergeerd en opgelost.

In de afvoer van de persleiding is geen sulfide geconstateerd. Blijkbaar wordt tijdens de pompperioden voldoende zuurstof opgelost om gedurende de perioden van pompstilstand ongunstige condities voor sulfidevorming te handhaven.

In de persleiding Makkinga - Oosterwolde is de zuurstof vermoedelijk op dezelfde wijze opgelost als in de persleiding Vaassen - Apeldoorn. Deze veronderstelling is gebaseerd op de grote overeenkomst tussen waarnemingen verricht tijdens beide experimenten.

In de persleiding Makkinga - Oosterwolde zijn zuurstofrijke gasophopingen in de ontvangput ontweken bij een zuurstofinjectie boven circa 50 - 60 mg per liter afvalwater. Het Reynoldsgetal (54000) was vermoedelijk te laag om de geïnjecteerde zuurstof volledig te dispergeren respectievelijk op te lossen in het afvalwater.

Voor de twee evenwijdig gelegen persleidingen Aalst - "Riool-Zuid" is de hoeveelheid zuurstof ter voorkoming van anaërobie met de gemodificeerde formule van Boon & Lister geschat op circa 40 mg/l afvalwater. Bij een zuurstofinjectie van 40 tot 67 mg/l afvalwater werd in de atmosfeer van de ontvangput van de persleidingen een verhoogde zuurstofconcentratie waargenomen. Het afvalwater in het begin van de opvolgende vrij-vervalleiding bevatte slechts af en toe zuurstof. Er is dus blijkbaar meer zuurstof geïnjecteerd, dan kon worden opgelost bij de heersende pompdruk (10 mwk), turbulentie (Reynoldsgetal 650.000) en het toegepaste pompregime in de persleidingen.

8.1 Materiaal en methoden

8.1.1 *laboratoriumproeven*

Voor het object Vaassen - Apeldoorn zijn op het laboratorium sulfideoxydatieproeven verricht om een schatting te kunnen maken van:

- de hoeveelheid te injecteren zuurstof in de persleiding;
- de vereiste reactietijd en de hieruit af te leiden afstand van het injectiepunt tot het eindpunt van de persleiding.

Daartoe werd van een steekmonster niet aangerot afvalwater de helft bij 20°C bewaard tot door rotting het gewenste sulfidegehalte was bereikt; het overige gedeelte werd bij 4°C bewaard.

Vervolgens werd het afvalwater van 4°C verrijkt met zuivere zuurstof en gemengd met het sulfidehoudende afvalwater, zodanig, dat de gewenste gewichtsverhouding zuurstof/sulfide werd bereikt.

Daarna werden snel vijf BZV-flesjes met dit mengsel gevuld, afgesloten en gedurende respectievelijk 5, 10, 15, 20 en 30 minuten geroerd.

Onmiddellijk na het roeren werden de reactiemengsels gefixeerd met een anti-oxydatiebuffer, waarna het sulfidegehalte spectrofotometrisch of ionspecifiek werd bepaald.

De wijze van bepaling is schematisch weergegeven in figuur 16.

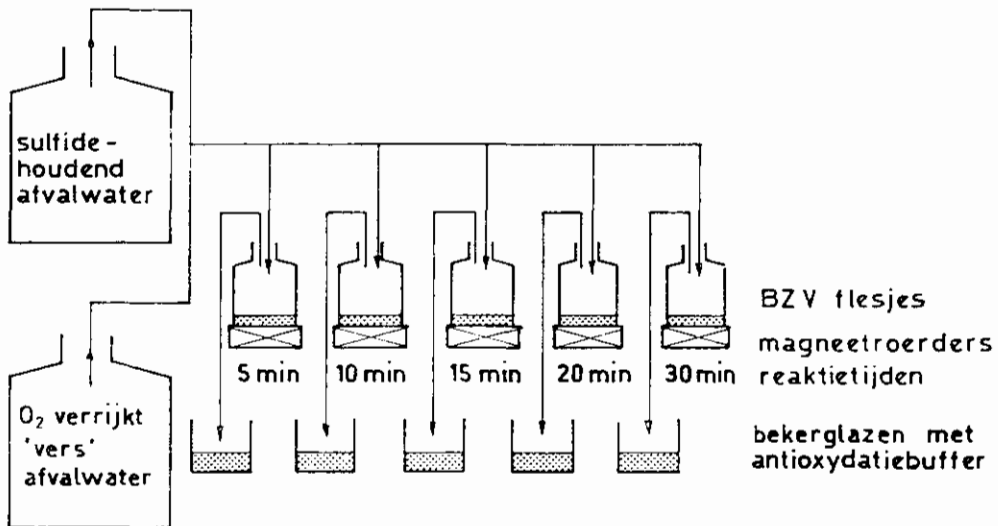
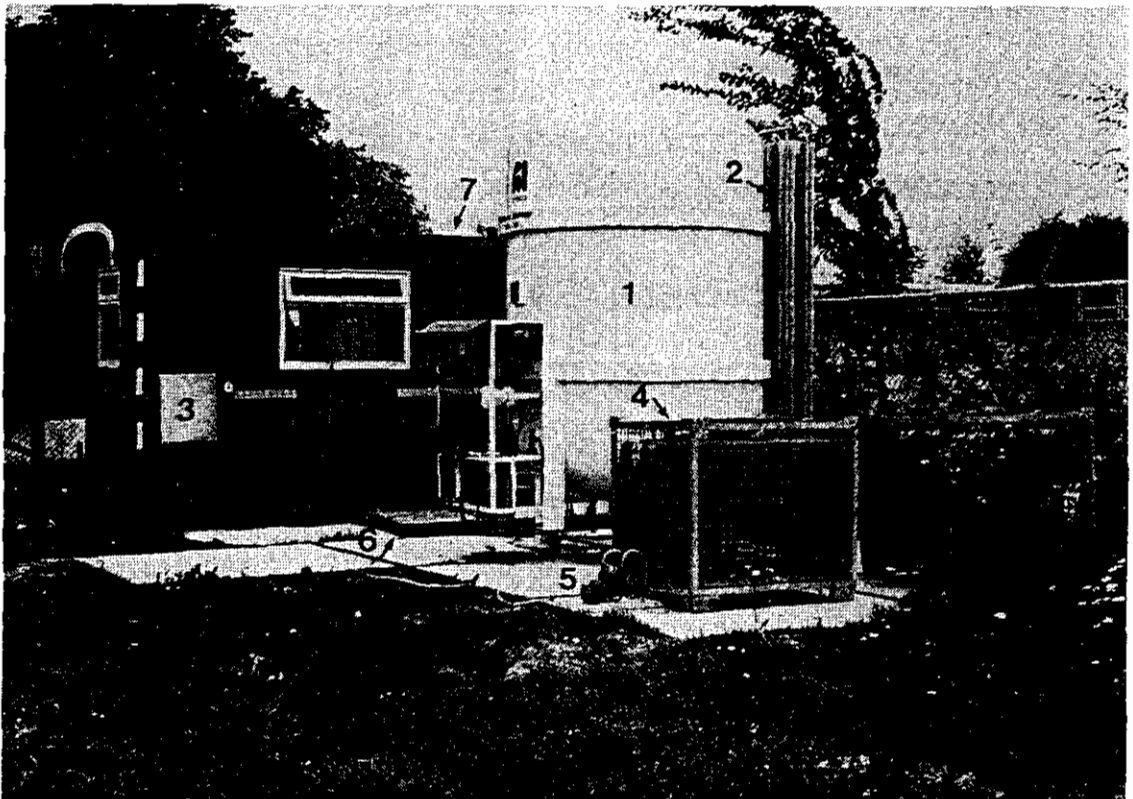


Fig. 16. Sulfide-oxydatiesnelheid met zuivere zuurstof: bepalingmethode (schematisch).

8.1.2 praktijkproeven

In de persleiding Vaassen - Apeldoorn werd vanuit een zuurstoftank op de r.w.z.i.-Apeldoorn (figuur 17) zuurstof geïnjecteerd op een afstand van ongeveer 300 m vanaf de ontvangput. In het systeem zijn een atmosferische zuurstofverdamer, een magneetafsluiter en een flowmeter opgenomen.



17. Object Vaassen - Apeldoorn: opslag- en doseerapparatuur voor zuurstof en waterstofperoxyde (overzicht).

- | | |
|---|--|
| 1. Zuurstoftank (4000 l). | 5. Doseerpomp waterstofperoxyde (cap. 5 - 50 l/uur). |
| 2. Atmosferische zuurstofverdamer (cap. 50 m ³ /uur). | 6. Ontvangput. |
| 3. Regelpaneel zuurstofinjectie. | 7. Meetwagen. |
| 4. Opslagreservoir waterstofperoxyde (multibox, 850 l, 35 gew. % H ₂ O ₂). | |

De zuurstof werd zo goed mogelijk proportioneel met de afvalwaterafvoer geïnjecteerd; de magneetafsluiter in de zuurstoftoevoerleiding werd hiertoe gestuurd door een niveaumeter in de ontvangput. Dit is schematisch weergegeven in figuur 18.

Voor de wijze van injectie in het afvalwater zij verwezen naar figuur 13b, pagina 27.

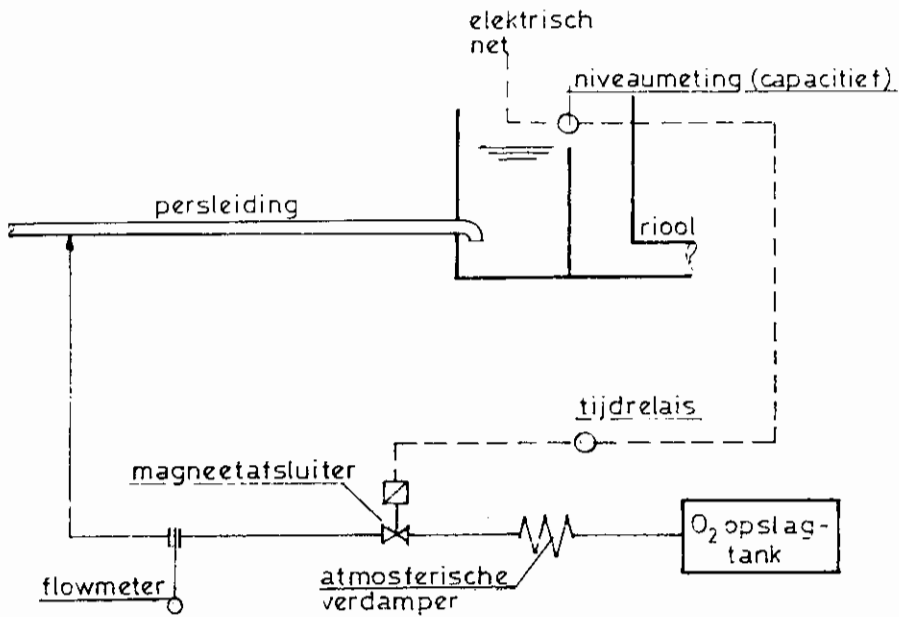


Fig. 18. Persleiding Vaassen - Apeldoorn: zuurstofinjectie (schematisch).

8.2 Resultaten en discussie

8.2.1 *effectiviteit*

De resultaten van de laboratoriumproeven op het object Vaassen - Apeldoorn zijn weergegeven in figuur 19.

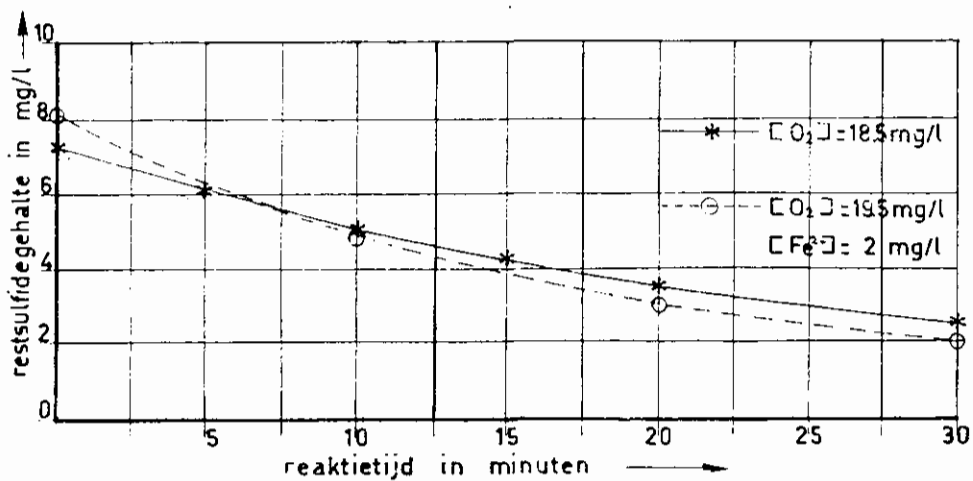


Fig. 19. Sulfidgehalten na zuurstoftoevoeging (laboratoriumproeven).

Uit figuur 19 kan worden afgeleid, dat:

- de sulfideoxydatiesnelheid evenredig is met het sulfidegehalte, met andere woorden:

$$\frac{d [S^{2-}]}{dt} = K [S^{2-}] ,$$

waarin:

S^{2-} = sulfidegehalte (mg/l)

t = tijd (min.)

K = zonder katalysator: 0,036 (min.⁻¹)

met katalysator: 0,040 (min.⁻¹)

- bij een injectie van circa 2,5 mg zuurstof per mg sulfide de reactietijd voor een vrijwel volledige sulfideoxydatie minimaal 45 - 60 min. dient te bedragen;
- de sulfideoxydatie met zuurstof door Fe^{2+} mogelijk positief wordt gekatalyseerd.

Uit de experimenten op werkelijke schaal aan dit object bleek, dat:

- het sulfidegehalte van het afvalwater bij een injectie van 3 - 15 mg zuurstof per mg sulfide (10 - 50 mg O_2 per liter afvalwater) en een reactietijd van circa 1,5 uur slechts afnam met ongeveer 30%;
- bij een injectie van circa 20 mg O_2 per liter afvalwater zuurstofrijke gasophopingen in de ontvangput ontweken. De bijbehorende pompcapaciteit varieerde van 400 - 600 m³/u (Reynoldsgetal = 150.000 - 230.000).

8.2.2 *mechanisme van zuurstofoplossing*

De geïnjecteerde zuurstof werd gedurende de pompperioden zowel gedispergeerd als opgelost in het afvalwater. Tijdens perioden van pompstilstand vormden zich uit de resterende gedispergeerde zuurstof gasophopingen in de kruin van de leiding. Bij een injectie beneden circa 15 mg O_2 per liter afvalwater werden deze gasophopingen bij Reynoldsgetalen van 150.000 - 230.000 wederom gedispergeerd; bij hogere injecties werden zij slechts gedeeltelijk gedispergeerd, waardoor geleidelijk in omvang toenemende gasophopingen ontstonden.

In de laboratoriumexperimenten was aan het begin van de oxydatiereactie circa 20 mg O_2 /l afvalwater opgelost; bij de praktijkexperimenten slechts maximaal circa 5 mg O_2 /l afvalwater.

Dit verklaart het grote verschil tussen de resultaten van de laboratorium- en praktijkexperimenten.

9 OXYDATIE VAN SULFIDE MET WATERSTOFPEROXYDE

9.1 Materiaal en methoden

9.1.1 *laboratoriumproeven*

Op de objecten Vaassen - Apeldoorn en Assendelft - Beverwijk zijn op het laboratorium sulfide-oxydatieproeven met waterstofperoxyde verricht. Hierbij is aandacht besteed aan:

- de benodigde hoeveelheid waterstofperoxyde voor een vrijwel volledige sulfideoxydatie;
- de snelheid van de oxydatiereactie;
- de snelheid van terugvorming van sulfide na arloop van de oxydatiereactie.

In vijf BZV-flesjes werd zoveel waterstofperoxyde gebracht, dat na aanvullen met sulfidehoudend afvalwater de gewenste gewichtsverhouding H_2O_2/S^{2-} werd verkregen.

De BZV-flesjes werden vervolgens snel afgesloten en gedurende respectievelijk 5, 10, 15, 20 en 30 minuten geroerd.

Onmiddellijk na het roeren werden de reactiemengsels gefixeerd met een anti-oxydatiebuffer, waarna het sulfidegehalte werd bepaald.

De wijze van bepaling is schematisch weergegeven in figuur 20.

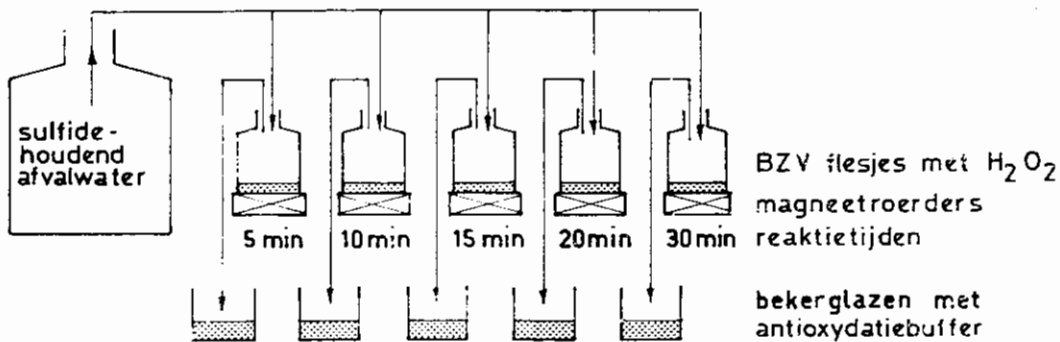


Fig. 20. Sulfideoxydatiesnelheid met waterstofperoxyde: bepalingmethode (schema).

9.1.2 *praktijkproeven*

Het waterstofperoxyde werd vanuit een reservoir op het terrein van de rioolwaterzuiveringsinrichting met een chemicaliënpomp gedoseerd (ter illustratie: zie figuur 17, p. 33). In het systeem waren een flowmeter en een terugslagklep opgenomen.

Het waterstofperoxyde is zo goed mogelijk proportioneel met de afvalwaterafvoer gedoseerd; de chemicaliënpomp werd hiertoe gestuurd door een niveaumeter in de ontvangput.

De afstand van het doseerpunt tot het eindpunt van de leiding bedroeg voor de persleidingen Vaassen - Apeldoorn, Assendelft - Beverwijk en Terborg - Doetinchem respectievelijk 300, 450 en 600 m.

Bij de keuze van deze afstanden is uitgegaan van:

- de minimaal benodigde reactietijd tussen sulfide en waterstofperoxyde, bepaald met behulp van laboratoriumproeven (Vaassen - Apeldoorn), dan wel geschat op basis van literatuurgegevens (Assendelft - Beverwijk en Terborg - Doetinchem);
- de transportsnelheid van het afvalwater;
- de aanwezigheid van een geschikte plaats voor dosering (put, mangat).

Het waterstofperoxyde werd toegevoegd met een tien tot vijftienvoudige overmaat verdunningswater; hierdoor werd een goede menging van het peroxyde met het afvalwater bereikt.

Op de objecten Vaassen - Apeldoorn en Assendelft - Beverwijk werd het waterstofperoxyde op korte afstand vóór het doseerpunt (circa 1 m) verdund met effluent.

Op het object Terborg - Doetinchem is verdund met leidingwater op grote afstand van het doseerpunt (circa 600 m). Dit leidingwater was vrij van katalysatoren, die de ontleding van waterstofperoxyde activeren. Verdunning op grote afstand van het doseerpunt heeft het nadeel, dat bij een eventuele regeling van de dosering zowel de hoeveelheid peroxyde, als de hoeveelheid verdunningswater dienen te worden geregeld.

De methode van dosering is schematisch weergegeven in figuur 21.

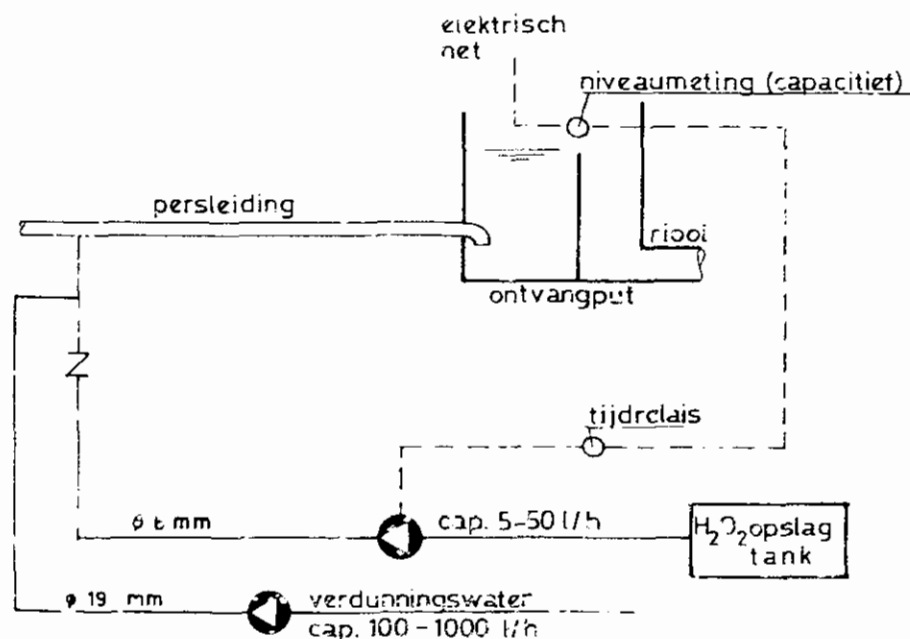


Fig. 21. Waterstofperoxydedosering (schematisch).

Het verdunde waterstofperoxyde werd gedoseerd, hetzij:

- via een geperforeerde ringleiding (figuur 22a), beschermd door een deels open stalen leiding, aangebracht op de binnenomtrek van de transportleiding (toegepast op het object Assendelft - Beverwijk), hetzij:
- via een buis, direct beneden de binnenwand van de transportleiding, loodrecht op de stromingsrichting (figuur 22b) van het afvalwater (toegepast op de objecten Vaassen - Apeldoorn en Terborg - Doetinchem).

Beide methoden zijn schematisch weergegeven in figuur 22.

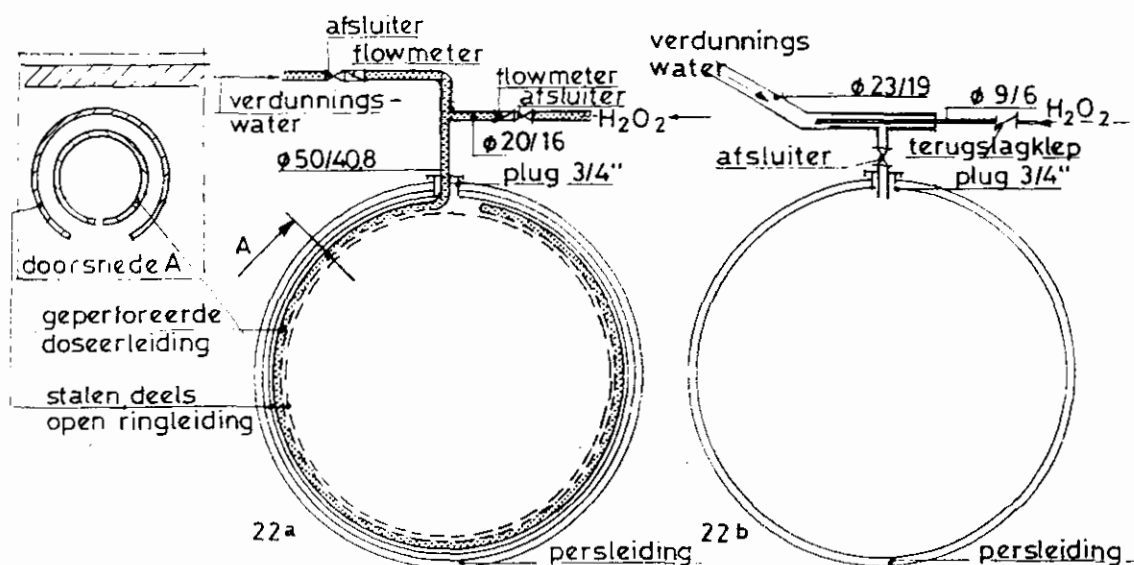


Fig. 22. Waterstofperoxyde-injectoren (schematisch).

9.2 Resultaten en discussie

9.2.1 *effectiviteit*

De resultaten van de sulfide-oxydatieproeven met waterstofperoxyde op het laboratorium zijn weergegeven in figuur 23.

Uit figuur 23 blijkt, dat:

- bij een dosering van circa 2 mg waterstofperoxyde per mg sulfide en een reactietijd van 0,5 tot 1,5 uur het sulfide vrijwel volledig wordt geoxydeerd;
- de sulfide-oxydatiereactie door Fe^{2+} positief wordt gekatalyseerd;
- binnen circa 4 uur na de waterstofperoxydedosering geen sulfidevorming optreedt.

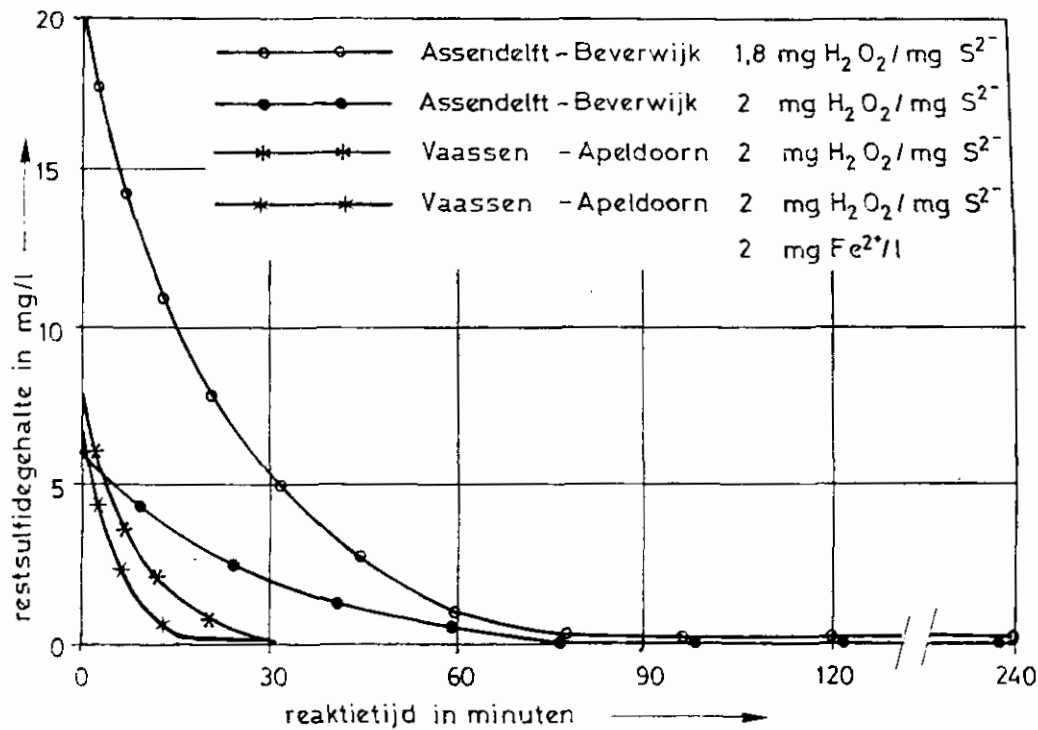


Fig. 23. Sulfidegehalte na waterstofperoxydedosering (laboratoriumproeven).

In tabel 17 zijn voor drie praktijkproeven de reductie van het sulfidegehalte en het rendement van de waterstofperoxydedosering gegeven; onder het rendement wordt verstaan het aantal milligrammen verwijderd sulfide per milligram gedoseerd waterstofperoxyde.

persleiding	S ²⁻ -opgelost mg/l	H ₂ O ₂ mg/mg S ²⁻	reductie S ²⁻		rendement mg S ²⁻ /mg H ₂ O ₂
			mg/l	%	
Assendelft-Beverwijk	20,8	1,8	20,2	97	0,58
Terborg-Doetinchem	11,3	1,8	9,0	80	0,45
Vaassen-Apeldoorn	2,6	3,8	2,1	80	0,21

Tabel 17. Waterstofperoxydedosering: reductie van het sulfidegehalte en rendement.

Uit tabel 17 blijkt, dat het rendement van de waterstofperoxydedosering sterk kan variëren; hoe hoger het gemiddeld sulfidegehalte hoe beter het rendement. In alle gevallen ligt het gemiddelde restsul-

fidgehalte boven 0,5 mg/l.

De gemiddelde reductie van het H_2S -gehalte van de putatmosfeer (in %) komt goed overeen met de reductie van het sulfidegehalte van het afvalwater. Het H_2S -gehalte van de atmosfeer na dosering varieerde van vrijwel nihil tot enkele tientallen milligrammen per m^3 .

Op het object Vaassen - Apeldoorn is gebleken, dat voor een goede menging van het waterstofperoxyde met het afvalwater het peroxyde in verdunde vorm (2-5 gew. %) moet worden gedoseerd. Een homogene samenstelling van het verdunde peroxyde is hierbij essentieel. Dit kan worden bereikt door het geconcentreerde waterstofperoxyde tegenstrooms te doseren juist voor een insnoering in de leiding voor verdunningswater (zie figuur 22b).

9.2.2 *regeling van de waterstofperoxydedosering*

Voor een optimalisering van de waterstofperoxydedosering kunnen de navolgende regelsystemen worden toegepast:

- een regeling, waarbij de dosering wordt gestuurd op basis van het afvalwaterdebiet en het sulfidegehalte van het afvalwater juist vóór het doseerpunt. Deze regeling komt in aanmerking indien sterk fluctuerende sulfidegehalten in het afvalwater voorkomen;
- een regeling, waarbij de dosering wordt gestuurd op basis van het afvalwaterdebiet en het restsulfidegehalte van het afvalwater aan het einde van de transportleiding. Deze regeling komt in aanmerking wanneer geleidelijke veranderingen optreden in het sulfidegehalte.

Een en ander lijkt mogelijk met behulp van een debietmeter, een sulfidemonitor en een chemicaliëndoseerpomp met regelbaar toerental en slagverstelling.

Het toerental kan worden gebruikt voor de regeling op basis van het afvalwaterdebiet; de slagverstelling voor de regeling op basis van het sulfidegehalte.

Bij een volledig automatische regeling van de dosering moeten het sulfidegehalte en het debiet continu worden gemeten. Een continue meting van het sulfidegehalte van het afvalwater is door snelle vervuiling van de elektroden tot dusver niet mogelijk gebleken.

In het eigen onderzoek is evenwel gebleken, dat:

- het H_2S -gehalte in de atmosfeer van een ontvangput van een transportleiding continu kan worden gemeten;
- een significante correlatie bestaat tussen het sulfidegehalte van het afvalwater en het H_2S -gehalte van de atmosfeer in een ontvangput, indien de pH van het afvalwater redelijk konstant is (zie figuur 1, p. 9).

Dit betekent, dat het H_2S -gehalte in de atmosfeer van een ontvangput, indien gemeten onder standaardcondities, in principe een geschikte parameter is voor een automatische regeling van de waterstofperoxydedosering.

Op het object "Riool-Zuid"-Eindhoven is een semi-automatische regeling van de H_2O_2 -dosering op basis van het H_2S -gehalte van de atmos-

feer beproefd.

Het H_2O_2 -doseerpunt lag op circa 500 meter voor het eindpunt van een vrij-vervalleiding (zie figuur 5, p. 16); het H_2S -meetpunt boven een woelgoot aan het einde van de leiding. De H_2S -houdende lucht werd bemonsterd volgens het systeem, weergegeven in figuur 11, p. 23.

Het H_2S -gehalte werd gemeten met een monitor.

De regeling kan globaal als volgt worden omschreven:

- het meetsignaal van de H_2S -monitor wordt vergeleken met een grenswaarde; zodra de grenswaarde wordt overschreden wordt de dosering ingeschakeld;
- de dosering blijft ingeschakeld zolang de meetwaarde groter is dan de grenswaarde;
- zodra de meetwaarde kleiner is geworden dan de grenswaarde wordt nog circa 20 minuten gedoseerd;
- de doseercapaciteit kan met de hand worden gewijzigd.

Uit de meetgegevens blijkt, dat bij inschakeling van de dosering het H_2S -gehalte boven de woelgoot pas na circa 15 minuten daalt tot waarden beneden de grenswaarde. Deze tijd komt overeen met de verblijftijd van het afvalwater in de leiding tussen het doseerpunt en het H_2S -meetpunt. De regelmethode is geschikt voor een globale regeling van de H_2O_2 -dosering.

10 KOSTEN

10.1 Algemeen.

Voor de objecten Vaassen - Apeldoorn, Terborg - Doetinchem en Assendelft - Beverwijk zijn de investeringskosten en de jaarlijkse kosten geraamd. Hierbij is ervan uitgegaan, dat op alle objecten qua veiligheid en bedrijfszekerheid gelijkwaardige voorzieningen worden getroffen. De aldus geraamde kosten zullen daarom niet altijd overeenkomen met de kosten van de experimenten.

De investeringskosten zijn onderverdeeld in bouwkundige en electro-mechanische kosten

Voor waterstofperoxydedosering omvatten deze kosten:

bouwkundig:

- een opslagreservoir voor waterstofperoxyde met fundatie en hekwerk,
- doseerleidingen voor waterstofperoxyde en verdunningswater (300 - 600 m);
- een doseerput, uitgevoerd als controleput.

electro-mechanisch:

- een toerenregelbare chemicaliënpomp met slagverstelling voor waterstofperoxyde en een doseerpomp voor verdunningswater;
- een flow-meter voor waterstofperoxyde en een flow-indicator voor de afvalwaterafvoer;
- een H₂S-monitor voor procesbewaking.

Voor zuurstofinjectie ter preventie van sulfidevorming omvatten de investeringskosten:

bouwkundig:

- fundatie en hekwerk voor een zuurstoftank;
- een doseerleiding voor zuurstof (circa 10 m);
- een injectieput, uitgevoerd als controleput.

Bij de raming van de jaarlijkse kosten is uitgegaan van:

- huur van een zuurstofreservoir met verdamper, respectievelijk aankoop van een waterstofperoxydereservoir;
- een chemicaliëndosering gedurende 180 dagen per jaar;
- een afschrijvingstermijn van 15 jaar en een annuïteit van 11,7% (rentepercentage 8%);
- onderhoud: 0,5% van de bouwkundige investeringskosten
2% van de electro-mechanische investeringskosten;
- bediening: 90 uur/jaar ($\frac{1}{2}$ uur per dag);
- omzetbelasting: 18%;
- prijspeil: 1 juli 1978.

10.2 Persleiding Vaassen - Apeldoorn

10.2.1 *preventie van sulfidevorming door zuurstofinjectie*

Zuurstofinjectie op het gemaal Vaassen.
Jaarlijkse (180 dagen) sulfidevracht: 700 kg.
Gehalte opgelost sulfide: 2,6 mg/l afvalwater (gemiddeld).

investeringskosten

- bouwkundig	f	15.350,--
- electro-mechanisch	f	20.050,--
		<hr/>
Totaal	f	35.400,--
		=====

jaarlijkse kosten

- huur zuurstoftank	f	7.500,--
- zuurstofkosten: 2710 Nm ³ /jaar à f 1,61/Nm ³	f	11.500,--
- onderhoud	f	500,--
- bediening	f	2.000,--
- rente en afschrijving	f	4.150,--
		<hr/>
Totaal	f	25.650,--
		=====

Door zuurstofinjectie werd de sulfidevorming vrijwel volledig voorkomen (700 kg/jaar).
De kosten ter preventie van de vorming van 1 kg sulfide worden voor dit object geraamd op circa f 37,--.

10.2.2 *oxydatie van sulfide door waterstofperoxydedosering*

Waterstofperoxydedosering op circa 300 m vanaf het eindpunt.
Jaarlijkse (180 dagen) sulfidevracht: 700 kg.
Gehalte opgelost sulfide: 2,6 mg/l afvalwater (gemiddeld).

investeringskosten

- bouwkundig	f	27.150,--
- electro-mechanisch	f	20.050,--
		<hr/>
Totaal	f	47.200,--
		=====

jaarlijkse kosten

- waterstofperoxydekosten: 2700 kg à f 3.72/kg H ₂ O ₂ 100%	f 10.050,--
- onderhoud	f 550,--
- bediening	f 2.000,--
- rente en afschrijving	f 5.500,--
	<hr/>
Totaal	f 18.100,--
	=====

Door waterstofperoxydedosering werd circa 80% van het sulfide ge-
oxydeerd (560 kg/jaar).
De kosten voor de oxydatie van 1 kg sulfide worden voor dit object
geraamd op circa f 32,--.

10.3 Persleiding Terborg - Doetinchem

Waterstofperoxydedosering op circa 600 m vanaf het eindpunt.
Jaarlijkse (180 dagen) sulfidevracht: 10.100 kg.
Gehalte opgelost sulfide: 11,3 mg/l afvalwater (gemiddeld).

investeringskosten

- bouwkundig	f 35.400,--
- electro-mechanisch	f 23.600,--
	<hr/>
Totaal	f 59.000,--
	=====

jaarlijkse kosten

- waterstofperoxydekosten: 20.700 kg à f 3,19/kg H ₂ O ₂ 100%	f 66.050,--
- onderhoud	f 650,--
- bediening	f 2.000,--
- rente en afschrijving	f 6.900,--
	<hr/>
Totaal	f 75.600,--
	=====

Door waterstofperoxydedosering werd circa 80% van het sulfide ge-
oxydeerd (8080 kg/jaar).
De kosten voor de oxydatie van 1 kg sulfide worden voor dit object
geraamd op circa f 9,--.

10.4 Persleiding Assendelft - Beverwijk

Waterstofperoxydedosering op circa 450 m vanaf het eindpunt.
Jaarlijkse (180 dagen) sulfidevracht 31.000 kg.
Gehalte opgelost sulfide: 20,8 mg/l afvalwater (gemiddeld).

investeringskosten

- bouwkundig	f 64.900,--
- electro-mechanisch	f 29.500,--
	<hr/>
Totaal	f 94.400,-- =====

jaarlijkse kosten

- waterstofperoxydekosten: 55800 kg à f 2.83/kg H ₂ O ₂ 100%	f 157.900,--
- onderhoud	f 900,--
- bediening	f 2.000,--
- rente en afschrijving	f 11.050,--
	<hr/>
Totaal	f 171.850,-- =====

Door waterstofperoxydedosering werd circa 97% van het sulfide geoxydeerd (30.100 kg/jaar).
De kosten voor de oxydatie van 1 kg sulfide worden voor dit object geraamd op circa f 6,--.

10.5 Discussie

In figuur 24 zijn voor de objecten Vaassen - Apeldoorn, Terborg - Doetinchem en Assendelft - Beverwijk de geraamde kosten per kg verwijderd sulfide weergegeven.

Uit figuur 24 blijkt, dat op het object Vaassen - Apeldoorn de kosten per kg verwijderd sulfide voor zuurstofinjectie en waterstofperoxydedosering weinig verschillen.

De kosten voor de verwijdering van 1 kg sulfide met waterstofperoxyde zijn op dit object aanzienlijk hoger dan op de andere objecten, vanwege:

- een hoog waterstofperoxydeverbruik per kg verwijderde sulfide;
- een hoge waterstofperoxydeprijs, samenhangend met het lage jaarlijkse verbruik;
- hoge investeringskosten ten opzichte van de chemicaliënkosten.

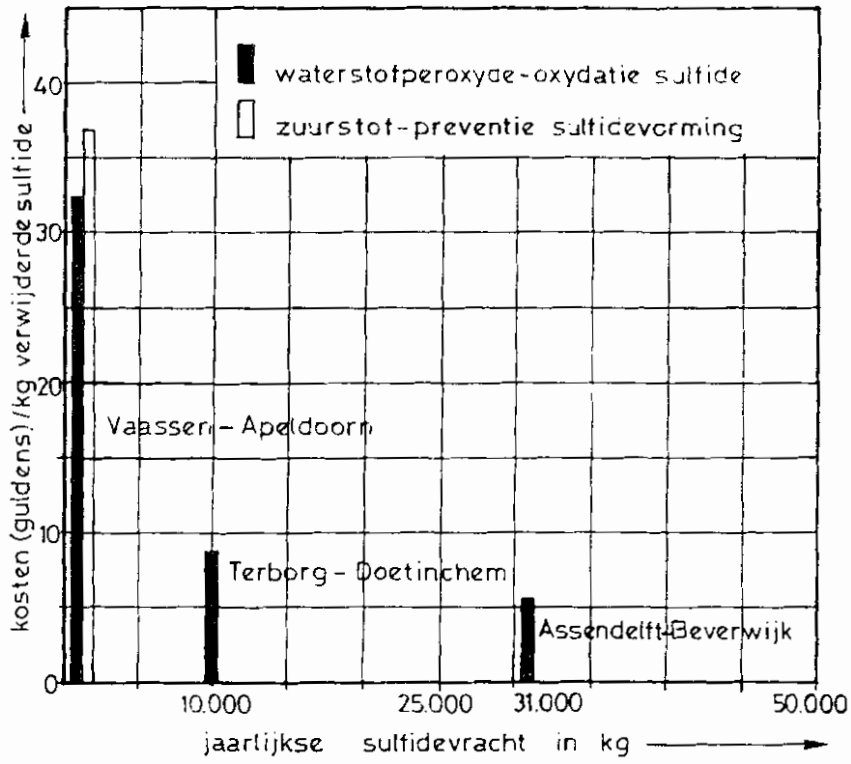


Fig. 24. Geraamde kosten/kg verwijderde sulfide voor drie onderzoek-
objecten.

Sulfidegehalte

- In persleidingen fluctueert het sulfidegehalte sterk; deze fluctuaties zijn niet voorspelbaar.
Berekening van het sulfidegehalte met de empirische formules van Pomeroy en Boon & Lister leidt in het algemeen tot te hoge waarden.

Zuurstofinjectie

- Door zuurstofinjectie in het begin van persleidingen kan sulfidevorming in de leidingen worden voorkomen. Hierbij ontstaan tijdens perioden van pompstilstand zuurstofrijke gasophoppingen op hoge plaatsen in de leiding. In de volgende pompperioden worden deze gasophoppingen geheel of gedeeltelijk gemengd met het afvalwater, waarbij zuurstof wordt opgelost.
Er zijn indicaties, dat deze gasophoppingen:

- bij Reynoldsgetallen boven circa 300.000 van beperkte omvang blijven; er wordt voldoende zuurstof opgelost en de pompopbrengst neemt slechts weinig af. De benodigde hoeveelheid zuurstof bedraagt enkele tientallen milligrammen per liter afvalwater en is aanzienlijk minder dan de hoeveelheid ter voorkoming van anaerobie.
- bij Reynoldsgetallen beneden circa 300.000 geleidelijk in omvang toenemen; er wordt te weinig zuurstof opgelost en de pompopbrengst kan door gasinsluitingen sterk afnemen.

- De kosten ter voorkoming van de vorming van 1 kg sulfide door zuurstofinjectie worden voor een object met een jaarlijkse (180 dagen) sulfidevracht van circa 700 kg geraamd op circa f 37,--; de totale jaarlijkse kosten op f 25.650,--.
- Door zuurstofinjectie in een persleiding nabij het eindpunt werd circa 30% van het sulfide geoxydeerd.
De benodigde hoeveelheid zuurstof voor volledige sulfide-oxydatie werd op basis van laboratoriumproeven geschat op circa 20 mg/l afvalwater. Bij injectie van 20 mg/l en Reynoldsgetallen van 150.000 en 230.000 werd maximaal slechts circa 5 mg opgelost per liter afvalwater; de overige zuurstof ontweek in de ontvangput. Deze methode is derhalve niet geschikt voor stankbestrijding.

Waterstofperoxydedosering

- Door waterstofperoxydedosering in transportleidingen nabij het eindpunt kunnen sulfiden worden geoxydeerd.
De benodigde hoeveelheid waterstofperoxyde per mg sulfide is sterk afhankelijk van de samenstelling van het afvalwater. Op een object met een gemiddeld hoog sulfidegehalte (20,8 mg/l) werd een beter rendement verkregen dan op een object met een gemiddeld laag sulfidegehalte (2,6 mg/l).
- Bij een dosering van ongeveer 2 - 4 mg waterstofperoxyde per mg

sulfide en een reactietijd groter dan circa 30 minuten bedraagt de reductie 80 à 95%.

- De kosten voor de oxydatie van 1 kg sulfide worden voor de drie genoemde objecten met een jaarlijkse (180 dagen) sulfidevracht van 31.000, 10.100 en 700 kg geraamd op respectievelijk f 6,--, f 9,-- en f 32,--. De totale jaarlijkse kosten worden geraamd op respectievelijk f 171.850,--, f 75.600,-- en f 18.100,--.

Slotopmerkingen

- Er is onvoldoende inzicht verkregen in de randvoorwaarden voor zuurstofinjectie ter preventie van sulfidevorming. Uit het onderzoek op het object Vaassen - Apeldoorn blijkt, dat de kosten van zuurstofinjectie ter preventie van sulfidevorming en waterstofperoxydedosering ter oxydatie van sulfiden weinig verschillen. Nader onderzoek naar deze randvoorwaarden lijkt gewenst.
- Tijdens de experimenten met zuurstofinjectie ter preventie van sulfidevorming is geen significante BZV-reductie in het afvalwater opgetreden.
- Een dosering van waterstofperoxyde, afgestemd op het sulfidegehalte van het afvalwater kan leiden tot een aanzienlijke besparing in de chemicaliënkosten.
- Indien in een bestaande transportleiding dosering van waterstofperoxyde wordt overwogen verdient het aanbeveling:
 - het sulfidegehalte van het afvalwater te meten;
 - op het laboratorium sulfideoxydatieproeven uit te voeren bij een sulfidegehalte, overeenkomend met het gemiddelde gehalte in de transportleiding.
- Voor een schatting van de sulfidevorming in nog aan te leggen persleidingen staan de empirische formules van Pomeroy en Boon & Lister ter beschikking. Deze formules geven echter vaak te hoge waarden.

1. Adviesbureau Bongaerts, Kuyper en Huiswaard. - Experimenten ter preventie van sulfidevorming in de persleiding van het gemeaal Vaassen naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie Apeldoorn, Stora 60/78 - 8, den Haag, 1978.
2. Adviesbureau Bongaerts, Kuyper en Huiswaard. - Sulfideoxydatie-experimenten in de persleiding van het gemeaal Vaassen naar de rioolwaterzuiveringsinstallatie Apeldoorn, Stora 60/78 - 7, den Haag, 1978.
3. Boon, A.G. & Lister, A.R. - Formation of Sulphide in Rising Main Sewers and its Prevention by Injection of Oxygen, Progress in Water Technology, 7 (1975) 2: 289 - 300.
4. Chen, K.Y. & Morris, J.C. - Oxydation of Sulphide by O_2 : Catalysis and Inhibition, Journal of the San. Eng. Div. ASCE, 98 (1972) 2 : 215 - 228.
5. Corrosion of Concrete Sewers, South African Council for Scientific and Industrial Research, (1959) : 3 - 11.
6. Daque, R.R. - Fundamentals of Odor Control, J.W.P.C.F. 44 (1972) 4 : 583 - 594.
7. Davy, W.J. - Influence of Velocity on Sulfide Generation in Sewers, Sewage and Industrial Wastes, 22 (1950) 9 : 1132 - 1138.
8. Garret, M.E. - British Oxygen Company Ltd., Environmental Department, Londen; persoonlijke mededelingen (niet gepubliceerd).
9. Gast, M.K.H. & v. Giffen, A.E. - Bestrijding Stankbezwaar op de r.w.z.i. Beemster. Deel 1 : Ervaringen, beproevingen, verwachtingen, H_2O , 9 (1976) 23 : 469 - 478.
10. Gemeenschappelijke Technologische Dienst Oost-Brabant. - Projekt stankbestrijding rioolwaterzuiveringsinrichting Eindhoven, nr. R - 78 - 4, Boxtel, juni 1978.
11. van Giffen, A.E. - Bestrijding stankbezwaar op de r.w.z.i. Beemster. Deel 2: Onderzoek op laboratoriumschaal naar de sulfideontwikkeling in afvalwater en de bestrijding daarvan, H_2O , 9 (1976) 24 : 503 - 505.
12. Goumans, H.H.J.M. - Geur en Stank; in het veld tussen Emissie, Perceptie en Hinder, Polytechnische Tijdschrift:Procestech-niek, 32 (1977) 9 : 523 - 528.
13. Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland. - Stankbestrijding rioolwaterzuiveringsinstallatie Beverwijk, Zaanstreek, Edam, 2 februari 1978.
14. Interox Chemie B.V. - Hydrogen peroxyde in Odour and Corrosion Control, Solvay & Laporte, België.
15. Interox Chemie B.V. - Waterstofperoxyde in het Milieu, verzameling van lezingen over "Waterstofperoxyde in het Milieu" mei 1976 te Utrecht.
16. Kibbel, W.H., Raleigh, C.W. & Shepherd, J.A. - Hydrogen Peroxyde for Industrial Pollution Control, Eng. Bull. Purdue. Univ. Eng. Ext. Ser. (1972) : 824 - 839.
17. Matthews, D.G. - Hydrogen Peroxyde in Collection System Corrosion and Odor Control, J.W.P.C.F. 14 (1974) 4 : Deeds & Data: 2 - 7

18. Matthews P.J. & Boon, A.G. - Odour Nuisance in Sewerage and treatment Systems: Problems and Control.
In: Conference Paper no. 7 of the Annual Conference of the Institute of Water Pollution Control. Brighton, 1977.
19. Newcombe, S., Skellett, C.F. & Boon, A.G. - An Appraisal of the use of Oxygen to treat sewage in a rising main, Water Research Centre Stevenage.
20. Orion Research Incorporated - Determination of total sulfide content in water, Applications bulletin no. 12, Cambridge.
21. Parker, C.D. - Mechanics of Corrosion of Concrete Sewers by Hydrogen Sulfide, Sewage and Ind. Wastes, 23 (1951) 12 : 1477 - 1486.
22. Pomeroy, R. - Generation and Control of Sulfide in Filled Pipes, Sewage and Ind. Wastes, 31 (1959) 9 : 1082 - 1096.
23. Pomeroy, R. & Bowlus, F.D. - Progress Report on Sulfide Control Research, Journal of Sewage Works, 23 (1946) 7 : 597 - 640.
24. Pomeroy, F. & Parkhurst, J.D. - Self Purification in Sewers.
In: Advances in Water Pollution Research, Proceedings of the 6th Int. Conf. of Water Pollution Control Fed., Jenkins, S.H., Jerusalem (1972) : 291 - 307.
25. Provinciale Waterstaat van Friesland -Zuurstofinjectie in de persleiding Makkinga - Oosterwolde, Leeuwarden, 1978.
26. Santry, I.W. - Hydrogen Sulfide in Sewers, J.W.P.C.F., 35 (1963) 12 : 1580 - 1589.
27. Shepherd, J.A. & Hobbs, M.F. - Control of Sewage Hydrogen Sulfide with Hydrogen Peroxyde, Journal of Water and Sewage Works, augustus 1973 : 67 - 72.
28. Stankbestrijding op rioolwaterzuiveringsinrichtingen (stand van zaken in het Verenigd Koninkrijk). Verslag van een studiebezoek aan het Water Research Centre (U.K.). Stora, den Haag, 5/5/1976 NvdK/Cr.
29. Stork, B. & van Gemert, L.J. - Sensorische metingen in verband met Stankhinder in het Milieu, Polytechnisch Tijdschrift/Procesttechnologie, 32 (1977) 2 : 82 - 87.
30. Technische Dienst van het Hoogheemraadschap van de Uitwaterende Sluizen in Kennemerland en Westfriesland - Concept werkvoorschrift voor de fotometrische sulfidebepaling, nr. 98862/III
31. Thistlethwayte, D.K.B. - The Control of Sulphides in Sewerage Systems, Butterworths 1972 Londen.
32. Thistlethwayte, D.K.B. & Goleb, E.E. - The Composition of Sewer Air. In: Sewers and Storm Water, Proc. of the 6-th Int. Conf. of Water Pollution Control Fed., Jenkins S.H. Jerusalem 1972 : 281 - 290.
33. Vink, J.K. - Gemeentewerken 's-Gravenhage, Rioleringslaboratorium; persoonlijke mededelingen (niet gepubliceerd).
34. Waterschap De Dommel en Philips Nederland B.V. - Peroxydedoseringsregeling Rioolwaterzuivering Eindhoven, Boxtel/Eindhoven, juni 1978.
35. Zuiveringsschap Oostelijk Gelderland, - Stankbestrijding R.Z.I. Doetinchem, Technische Dienst Zuiveringsschap Oostelijk Gelderland, Doetinchem, januari 1978.

