

B-89-687

SULFIDEVORMING IN PERSLEIDINGEN

Oktober 1989

RP/TvM/MvdB

Aan:

STORA

T.a.v. ir. P.C. Stamperius

Postbus 80200

2508 GE DEN HAAG

Bladzijden: 32  
Tabellen : 2  
Figuren : 5  
Bijlagen : 2

Projectnaam :sulfidevorming persleidingen  
Projectnummer:61.4.3010  
Auteur(s) :Dr. R.B. Polder  
Ir.J.F.M Haase  
Ir. A.C.A.van Mechelen

Thema: -

WP-onderwerp: 212.2

Trefwoord(en): rioolaantasting, bouwchemie, transportleidingen, BZA,  
afvalwater, sulfidevorming, persleidingen



## VOORWOORD

De ontwikkeling van zwavelwaterstofgas in lange transportleidingen is de oorzaak van de meeste stankproblemen op en rondom zuiveringstechnische werken. Zwavelwaterstofgas speelt tevens een belangrijke rol bij de aantasting van betonnen constructies die bloot staan aan de rioolatmosferaer. Bij de bestrijding van de problemen door sulfidevorming is het allereerst nodig de voorkomende sulfidegehalten goed te kunnen voorspellen.

In een eerder onderzoek door de auteurs [Haase en Polder 1987] is na metingen aan een persleiding in Rotterdam een eenvoudige vergelijking opgesteld waarmee de vorming van sulfide in deze persleiding kon worden beschreven. Om een vergelijking te vinden die algemeen toepasbaar is voor Nederlandse persleidingen is in 1988 een aanvullend onderzoek uitgevoerd door IBBC-TNO onder de stimuleringsregeling TNO en een financiële bijdrage van de Stichting Toegepast Onderzoek Reiniging Afvalwater (STORA).

Het onderzoek is verricht door ir. J.F.M. Haase die ook het eerste conceptrapport heeft opgesteld. Het geheel stond onder leiding van dr. R.B. Polder van IBBC-TNO, die de eindrapportage verzorgde. Het onderzoek werd begeleid door ir. P.C. Stamperius van STORA en ir. F.H.M. van de Ven van de TU-Delft vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing.

De bereidheid van de beheerders van de meetobjecten om mee te werken aan dit onderzoek was zeer groot. De onderzoekers zijn dank verschuldigd aan het Hoogheemraadschap van Schieland, de afdeling Beheer en Waterhuishouding van Gemeentewerken Rotterdam, het Hoogheemraadschap van Rijnland en het Zuiveringschap Amstel- en Gooiland.



## SAMENVATTING

In dit rapport wordt onderzoek beschreven naar sulfidevorming in persleidingen. Sulfide veroorzaakt stankproblemen bij rioolstelsels en rioolwaterzuiveringsinrichtingen, en speelt in de vorm van zwavelwaterstof een belangrijke rol bij de zogenaamde Biogene Zwavelzuuraantasting van beton dat is blootgesteld aan de rioolatmosfeer.

De belangrijkste invloed op de sulfideconcentratie van het afvalwater is, blijkens dit onderzoek, de verblijftijd van het water in de persleiding en de geometrie van de persleiding. De tijd die verloopt voordat het water anaëroob wordt, de vertragingstijd, is relatief kort in vergelijking tot de gebruikelijke verblijftijden en blijkt te kunnen worden verwaarloosd.

Het verrichte onderzoek naar de sulfidevorming in persleidingen heeft geleid tot een eenvoudige vergelijking waarmee de sulfideconcentraties in persleidingen, bij een aantal randvoorwaarden, zeer goed kan worden voorspeld.

Uit confrontatie van de gevonden relatie met andere (buitenlandse) vergelijkingen blijken deze vergelijkingen doorgaans te lage sulfideconcentraties te voorspellen en daardoor minder geschikt te zijn voor de Nederlandse situatie. De nieuwe vergelijking is opgesteld aan de hand van metingen aan Nederlandse persleidingen en daardoor van toepassing op een groot deel daarvan. Tevens kan de vergelijking dienen bij het ontwerp van persleidingen om schattingen te kunnen maken van de te verwachten sulfideconcentraties.

---

IBBC B-89-687	oktober 1989	pagina 4
	VOORWOORD	2
	SAMENVATTING	3
	INHOUDSOPGAVE	4-5
1	INLEIDING	6
2	ACHTERGRONDEN	8
2.1	Inleiding	8
2.2	Het BZA-mechanisme	8
2.3	Stankproblemen	10
2.4	Toename van sulfidevorming in de afgelopen decennia	10
2.5	Sulfidevorming in persleidingen	11
2.5.1	bestaande vergelijkingen voor het voorspellen van de sulfideconcentratie in persleidingen	12
2.5.2	de persleiding als biofilmreactor	13
3	PRAKTIJKONDERZOEK	16
3.1	De onderzochte persleidingen	16
3.2	De opzet van het onderzoek	17
3.3	De meetresultaten	18
4	BESPREKING VAN DE RESULTATEN	19
4.1	Globaal resultaat van de metingen	19
4.2	Nadere analyse van de resultaten	20
4.2.1	de invloed van de verblijftijd en de vertragingstijd	21
4.2.2	overige invloedsfactoren	24

IBBC  
B-89-687oktober  
1989pagina  
5

5	CONFRONTATIE MET ANDERE VERGELIJKINGEN	27
6	CONCLUSIES	29
7	LITERATUUR	32

Bijlage 1: meetgegevens van de persleidingen

Bijlage 2: lineaire regressie van:

- a. sulfideproduktie en verblijftijd voor alle waarnemingen met CZV < 700 of niet gemeten
- b. sulfideproduktie en CZV, verblijftijd, temperatuur, lengte, pH, hydraulische straal, voor alle waarnemingen met CZV < 700 of niet gemeten





## 1 INLEIDING

Sulfidevorming is reeds lang een bron van problemen voor de beheerders van rioolstelsels en rioolwaterzuiveringsinrichtingen (rwzi's). Veel stankklachten van omwonenden van gemalen, rioolputten of rwzi's worden veroorzaakt door vrijkomend zwavelwaterstofgas uit het riool. Het betreden van riolen kan levensgevaarlijk zijn bij aanwezigheid van dit zeer giftige gas, dat weliswaar een kenmerkende geur heeft, maar dat na zekere tijd niet meer wordt geroken door gewenning. Steeds is het nodig een detectieapparaat in het riool te dragen. Naast de overlast voor mensen loopt ook het rioolstelsel gevaar. Hierbij wordt bedoeld op aantasting van betonnen constructiedelen volgens het mechanisme van de biogene zwavelzuuraantasting, afgekort als BZA [Polder 1987].

Sulfidevorming is een fenomeen dat al sinds de vorige eeuw onderwerp van een reeks van studies is geweest. Toch zijn er nog onduidelijkheden, vooral wanneer sulfideconcentraties moeten worden voorspeld. In 1987 is de sulfidevorming gemeten in een persleiding in Rotterdam als onderdeel van een afstudeeronderzoek [Haase & Polder 1987]. Uit de resultaten werd een voorlopige vergelijking voor het voorspellen van sulfide afgeleid. Daar onderzoek aan een enkele persleiding onvoldoende werd geacht om tot een algemeen geldige vergelijking te komen, is aanvullend onderzoek verricht.

Dit rapport beschrijft een onderzoek aan zeven uiteenlopende Nederlandse persleidingen, met als doel te komen tot een eenvoudige vergelijking waarmee de vorming van sulfide in een persleiding kan worden voorspeld. Hiermee zou de noodzaak van het uitvoeren van metingen van sulfide aan bestaande persleidingen, een tijdrovende en kostbare zaak, kunnen verminderen. Bij het ontwerp van een persleiding zijn metingen zelfs onmogelijk, zodat een rekenkundige methode de enig uitvoerbare is. Er bestaan overigens al vele jaren formules afkomstig van buitenlands onderzoek voor het voorspellen van sulfide. De resultaten daarvan zijn voor de Nederlandse praktijk vaak matig tot slecht.

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry should be supported by a valid receipt or invoice to ensure transparency and accountability.

2. The second part outlines the procedures for handling discrepancies between the recorded amounts and the actual cash received. It states that any such variance must be investigated immediately and reported to the appropriate authority.

3. The third part details the requirements for the physical handling of cash. It specifies that cash should be stored in a secure location and that all movements should be accompanied by a signed receipt.

4. The fourth part addresses the issue of cash deposits. It requires that all cash received must be deposited into the designated bank account within a specified time frame.

5. The fifth part discusses the periodic reconciliation of the cash book with the bank statements. It notes that this process should be performed regularly to identify and correct any errors.

6. The sixth part covers the reporting requirements for cash transactions. It mandates that a detailed report be submitted at the end of each month, including a summary of all receipts and payments.

7. The seventh part provides information on the consequences of non-compliance with these regulations. It states that failure to adhere to these rules may result in disciplinary action or legal proceedings.

8. The eighth part offers advice on how to prevent fraud and other forms of misappropriation of funds. It suggests implementing strict internal controls and conducting regular audits.

9. The ninth part discusses the role of the audit committee in overseeing the cash management process. It highlights the committee's responsibility for ensuring that all procedures are followed correctly.

10. The tenth part concludes with a statement of intent to maintain the highest standards of integrity and transparency in all financial dealings.

Voordat verder wordt ingegaan op het uitgevoerde onderzoek komen als achtergrondinformatie de volgende onderwerpen aan de orde:

- Het BZA-mechanisme
- Stankproblemen
- Ontwikkelingen in het afvalwatertransport die hebben geleid tot grotere sulfidevorming
- Theorie van de vorming van sulfide in persleidingen.

Daarna wordt de opzet van het verrichte onderzoek toegelicht en de resultaten besproken. Na een vergelijking met andere voorspellende formules wordt de hoofdtekst van dit rapport afgerond met een conclusie ten aanzien van het voorspellen van sulfidevorming in persleidingen. Tenslotte volgen een literatuuropgave en bijlagen met meetgegevens.

Vertical text on the left margin, possibly a page number or title indicator.

五

第

一

章

第

一

節

第

一

條

第

一

項

第

一

## 2 ACHTERGRONDEN

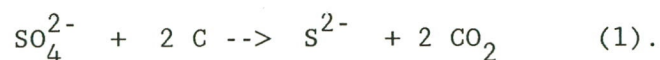
## 2.1 Inleiding

Sulfidevorming in afvalwater kan verschillende negatieve gevolgen hebben. Hier wordt ingegaan op de aantasting van het beton van rioolbuizen en opvangkelders door het mechanisme dat bekend staat als biogene zwavelzuuraantasting (BZA), en op het ontstaan van stank bij gemalen en zuiveringen.

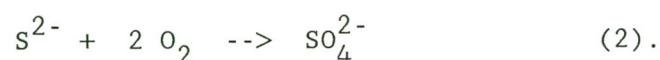
## 2.2 Het BZA-mechanisme

Schade aan betonnen constructies in de rioolatmosfeer is veelal het gevolg van biogene zwavelzuuraantasting (BZA), waarbij sulfide een centrale rol speelt. BZA bestaat uit een reeks van processen waarbij, na verscheidene bacteriologische omzettingen, zwavelzuur wordt gevormd op het betonoppervlak, dat daardoor sterkte en samenhang verliest. In grote lijnen verloopt BZA als volgt (zie ook figuur 1).

- Onder water ontstaat op de wand van het riool een biologische huid: de slijm laag.
- In de slijm laag oxyderen sulfaatreducerende bacteriën organisch materiaal (hier voorgesteld als C), waarbij sulfaat wordt omgezet in sulfide volgens:

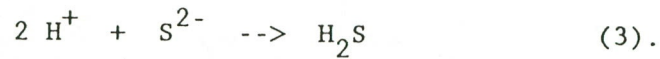


- Het gevormde sulfide treedt uit de slijm laag naar het stroomlichaam. Indien daar zuurstof aanwezig is, wordt het sulfide weer geoxydeerd tot sulfaat waardoor de BZA-keten wordt onderbroken, volgens:

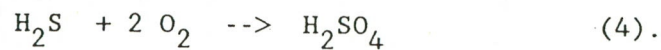


- Wanneer het sulfide echter bij anaerobie van het afvalwater niet wordt geoxydeerd, kan het als zwavelwaterstofgas ( $\text{H}_2\text{S}$ ) uit het stroomlichaam

naar de rioolatmosfeer ontsnappen, vooral bij turbulente stromingscondities, volgens:

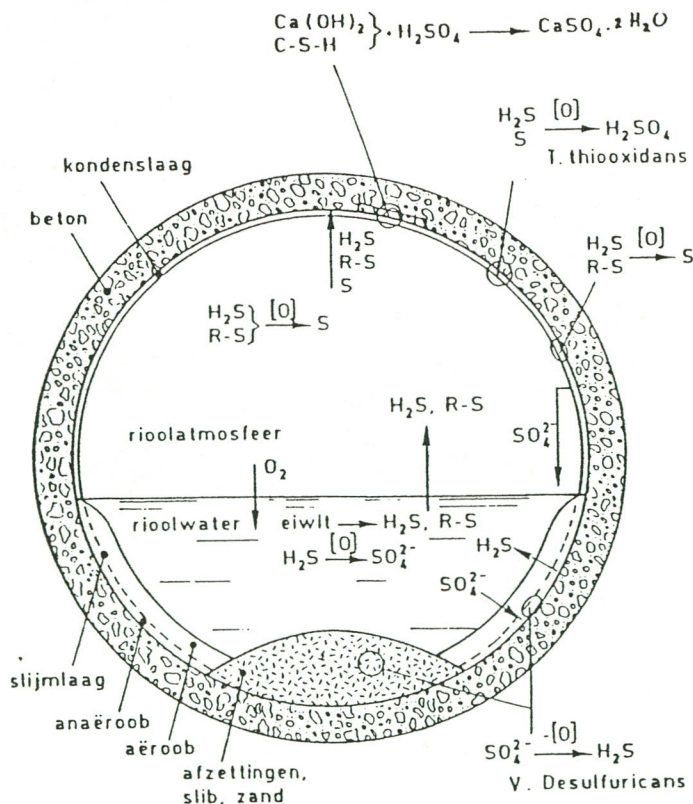


- Het  $\text{H}_2\text{S}$ -gas lost op in de condenslaag die zich boven de waterspiegel op het beton bevindt en kan daar door zwaveloxyderende bacteriën van de soort *Thiobacillus* in zwavelzuur worden omgezet volgens:



- In dit sterke zuur lost de cementsteen van het beton op. Hierdoor kan de wanddikte onder voor het BZA-proces gunstige omstandigheden ettelijke millimeters per jaar afnemen. De meest actieve bacteriesoort wordt *Thiobacillus concretivorus* genoemd, ofwel de betoneter.

Hieruit blijkt dat BZA optreedt boven de waterspiegel, bij aanwezigheid van veel sulfide in het afvalwater; in het bijzonder wanneer dat kan ontsnappen door turbulente stromingscondities en wanneer de ruimte boven het water slecht is geventileerd.



Figuur 1: schematische weergave van het BZA-mechanisme in een vrijverval riool



### 2.3 Stankproblemen

Stank, veroorzaakt door vrijkomend  $H_2S$  rond rwzi's of gemalen, kan slechts in zeer beperkte mate worden geaccepteerd. Bij nieuw te bouwen installaties moet kunnen worden aangetoond dat zich geen stankklachten zullen voordoen. Nieuwbouw kan vertraging oplopen door juridische procedures en omwonenden kunnen bezwaren indienen en kostbare stankbestrijdingsmaatregelen eisen. De mogelijkheid bestaat dat complete installatieonderdelen moeten worden afgedekt en worden voorzien van goede ventilatie om aantasting te voorkomen. De afgezogen lucht dient te worden afgevoerd via bijvoorbeeld compostfilters waarin stankstoffen worden verwijderd. Eventueel kan sulfidevorming door chemicaliëndosering worden bestreden.

Het is dus van groot belang bij het ontwerp van een nieuwe rwzi, bij het maken van een milieueffectrapportage of bij het bestrijden van stankklachten op kritieke plaatsen, de aanvoer van sulfide te kunnen schatten.

### 2.4 Toename van sulfidevorming in de afgelopen decennia

Problemen als gevolg van sulfidevorming zijn aanvankelijk vooral opgetreden in gebieden met een warm klimaat. Toch zijn gedurende de laatste decennia ook in streken met een gematigd klimaat hoge sulfideconcentraties opgetreden, vermoedelijk doordat de samenstelling en de wijze van transport van het afvalwater zijn veranderd.

- De afvalwatertemperatuur is hoger door meer industriële lozingen en verhoogd warmwaterverbruik in de huishoudens.
- Het sulfaatgehalte in het afvalwater is vooral door het toenemend gebruik van synthetische wasmiddelen sterk gestegen.
- Afvalwater wordt steeds meer centraal gezuiverd in grote rwzi's, waardoor het afvalwater over grotere afstanden moet worden aangevoerd (lange verblijftijden en slechte beluchting).



1

2

3

4

5

6

7

8

9

10

- De grote berging in het Nederlandse stelsel, die het aantal overstortingen moet beperken, is vooral verkregen door toepassing van extra grote buisdiameters. Hierdoor ontstaan bij droog weer extra lange verblijftijden.
- Transportriolen kunnen bij de aanleg zijn overgedimensioneerd om aansluiting van stadsuitbreidingsgebieden mogelijk te maken, met vooralsnog lange verblijftijden. Wanneer de bevolkingsgroei achterblijft bij de prognoses wordt deze situatie permanent.

## 2.5 Sulfidevorming in persleidingen

Sulfidevorming treedt op bij gebrek aan zuurstof in het afvalwater, hetgeen veelvuldig voorkomt in persleidingen door de vaak lange verblijftijden. De uitmondingen van persleidingen zijn berucht om hun aantastings- en stankproblemen; de ontvangende riolen en kelders krijgen een grote stroom zwavelwaterstofgas te verwerken, dat vooral vrijkomt door de vaak turbulente stromingscondities bij de uitmonding. Het is dus van groot praktisch belang hoge sulfidegehalten aan het eind van een persleiding goed te kunnen voorspellen. Ter voorkoming van misverstanden zij opgemerkt dat niet het materiaal van de persleiding zelf bloot staat aan BZA; er is immers geen atmosfeer. Pas stroomafwaarts ontstaan aantasting (aan vrijvervalleidingen, putten, kelders en rwzi's) en stankproblemen door sulfide dat in de persleiding is gevormd.

Een persleiding is met een relatief eenvoudig model te beschrijven. Een vrijvervalriool is ingewikkelder, omdat daar steeds zuurstof kan toetreden naar het afvalwater. Mede daarom is dit onderzoek beperkt gebleven tot persleidingen.



### 2.5.1 bestaande vergelijkingen voor het voorspellen van de sulfideconcentratie in persleidingen

In Nederland worden meestal de vergelijkingen van Boon & Lister [1975] of van Pomeroy [1959] gebruikt om een indruk te krijgen van de sulfideconcentraties aan het eind van een persleiding. Afgezien van kleine verschillen hebben zij dezelfde algemene formule:

$$S = A * t * L * C / R \quad (5),$$

waarin

- S: de (toename van de) sulfideconcentratie in  $g/m^3$ ,
- A: een empirisch bepaalde konstante in m/uur,
- t: de verblijftijd in de persleiding in uur,
- L: de concentratie organisch materiaal (CZV of BZV) in mg/l,
- R: de hydraulische straal van de persleiding in m (bij ronde leidingen een kwart van de diameter)
- C: een temperatuur(correctie)factor.

Bij deze vergelijkingen gelden beperkende voorwaarden. Zo wordt een geleidelijke opbouw van het sulfidegehalte vanaf nul aan het begin van de persleiding verondersteld; tevens mag geen uitputting optreden door lange pomppauzes of te lange verblijftijden. Voor meer theoretische achtergronden wordt verwezen naar de literatuurstudie van Haase en Polder [1987]. In werkelijkheid zal niet altijd aan de voorwaarden zijn voldaan. Hierdoor wijken de resultaten van de formules soms sterk af van wat bij diverse controlemetingen wordt gevonden [BKH 1987].

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes that this is essential for ensuring transparency and accountability in the organization's operations.

2. The second part of the document outlines the various methods and tools used to collect and analyze data. It highlights the need for consistent and reliable data collection processes to support effective decision-making.

3. The third part of the document focuses on the role of technology in modern data management. It discusses how advanced software solutions can streamline data collection, storage, and analysis, leading to more efficient and accurate results.

4. The fourth part of the document addresses the challenges associated with data security and privacy. It stresses the importance of implementing robust security measures to protect sensitive information from unauthorized access and breaches.

5. The fifth part of the document explores the integration of data from various sources into a unified system. It discusses the benefits of data integration, such as improved data accuracy and the ability to gain a more comprehensive view of the organization's performance.

6. The sixth part of the document discusses the importance of data governance and compliance. It outlines the key principles and practices that organizations should follow to ensure that their data management processes are aligned with relevant regulations and standards.

7. The seventh part of the document focuses on the role of data in driving innovation and growth. It highlights how data-driven insights can identify new market opportunities, optimize existing products, and develop more effective marketing strategies.

8. The eighth part of the document discusses the importance of data literacy and training. It emphasizes that all employees should have a basic understanding of data and its applications to make the most of the organization's data resources.

9. The ninth part of the document concludes by summarizing the key takeaways and providing a call to action. It encourages organizations to embrace a data-driven culture and invest in the necessary resources to maximize the value of their data.

Hadjianghelou [1984] heeft uit de meetresultaten van Pomeroy en Boon & Lister geen verband tussen CZV of BZV enerzijds en de gemeten sulfidegehalten anderzijds kunnen vaststellen. Hij stelt een zeer eenvoudige versie van vergelijking (5) voor:

$$S = 0,15 * t / R \quad (6),$$

met S, t en R als in (5).

Hierin is de snelheid van de sulfidevorming constant verondersteld, ongeacht het CZV of BZV, de temperatuur en het sulfaatgehalte van het afvalwater. Hadjianghelou meent dat deze vergelijking tenminste even betrouwbaar is als die van Pomeroy of Boon & Lister, terwijl zij bovendien eenvoudiger is.

Vanwege de slechte resultaten verkregen met de bekende vergelijkingen is het hier beschreven onderzoek verricht. Onderzocht is een aantal persleidingen dat qua lengte, diameter en verblijftijd model staat voor het merendeel van de Nederlandse persleidingen. Het doel was een vergelijking te vinden die voor algemeen gebruik bij persleidingen in Nederland geschikt is.

#### 2.5.2 de persleiding als biofilmreactor

Bij onderzoek naar sulfidevorming in persleidingen wordt meestal uitgegaan van een constante omzettingssnelheid van sulfaat naar sulfide volgens (1) in de slijm laag over de gehele lengte van de persleiding (bij een bepaalde temperatuur). Een persleiding is te zien als een biofilmreactor. In de slijm laag (biofilm) wordt sulfide gevormd, dat met een zekere snelheid wordt afgestaan aan het stroomlichaam. Deze sulfideafgifte per  $m^2$  uitgedrukt, wordt de sulfideflux  $f_i$  genoemd.

Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page. The text is arranged in several horizontal lines across the page.

Zolang er nog zuurstof in het afvalwater aanwezig is, wordt het sulfide echter geoxydeerd volgens (2). Aangezien het verbruiken van de oorspronkelijk aanwezige zuurstof enige tijd kost, gedurende welke het water door de leiding stroomt, is er in principe een minimum verblijftijd waarboven pas sulfide wordt gemeten aan het eind van de persleiding. Deze wordt de vertragingstijd genoemd, zoals schematisch wordt geïllustreerd in figuur 2.

De accumulatie van sulfide kan dan (bij een konstante temperatuur) worden beschreven met:

$$S = f_i * (t - v_t) / R \quad (7).$$

Hierin zijn

- S : het sulfidegehalte van het afvalwater aan het einde van de persleiding in g S/m<sup>3</sup>,
- f<sub>i</sub>: de sulfideflux die radiaal uit de slijmlaag op de buiswand treedt in g S/(m<sup>2</sup> \* uur),
- t : de verblijftijd in uur,
- v<sub>t</sub>: de vertragingstijd in uur,
- R : de hydraulische straal in m.

De sulfideflux is een eigenschap van de betreffende persleiding, die wordt bepaald door de soort en activiteit van de aanwezige bacteriën. De grootte ervan kan in principe nog afhangen van:

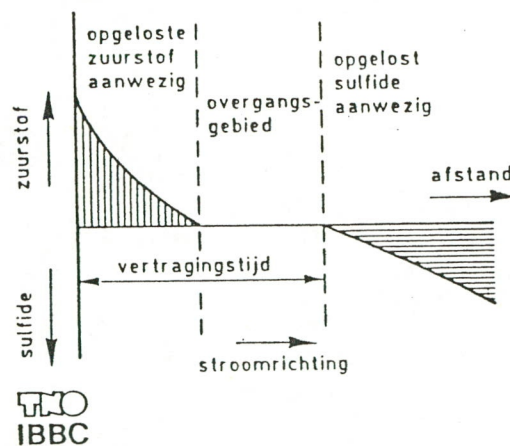
- de concentraties van reagerende stoffen als sulfaat en organisch materiaal (CZV, BZV),
- de afvalwatertemperatuur,
- de stromingscondities ofwel het pompregime, en
- de aanwezigheid van voor sulfaatreducerende bacteriën giftige stoffen zoals zuren, alkaliën of bactericiden.

De vertragingstijd v<sub>t</sub> hangt af van de samenstelling van het inkomende afvalwater en de snelheid waarmee zuurstof(bronnen) worden verbruikt.



De hydraulische straal  $R$  is de verhouding tussen het volume van het stroomlichaam en het natte oppervlak van de buiswand, dat hier gelijk is aan het biofilmoppervlak.

Het is bekend dat er ook in het afvalwater zelf, of in erin zwevende delen, sulfide wordt gevormd [Polder 1987]. De hoeveelheid sulfide die daarbij wordt geproduceerd is echter zelfs niet bij benadering te schatten. Bij genoemde formules wordt meestal een term toegevoegd die deze hoeveelheid schat op een percentage van de in de slijmlaag gevormde hoeveelheid. Daar elke theorie hierachter ontbreekt, wordt in het hier beschreven onderzoek een dergelijke term niet gehanteerd.



Figuur 2: Schematische voorstelling van het verloop van het zuurstof- respectievelijk het sulfidegehalte van het rioolwater als functie van de afstand tot het begin van de leiding



### 3 PRAKTIJKONDERZOEK

Het hoofddoel van dit onderzoek is vast te stellen hoeveel sulfide wordt gevormd tijdens het transport van afvalwater door een persleiding. Op voorhand kon worden verwacht dat de sulfidevorming voornamelijk wordt bepaald door de verblijftijd, het gehalte aan organisch materiaal (CZV) en de temperatuur. Deze grootheden zijn gemeten in het afvalwater. Daarnaast zijn het zuurstofgehalte en de respiratiesnelheid bepaald voor een indruk van de tijd die verstrijkt tot zuurstofloze condities optreden. Volledigheidshalve is ook steeds de pH gemeten. Het sulfidegehalte werd met een ionselectieve elektrode gemeten, nadat de monsters waren gebufferd en geconserveerd.

#### 3.1 De onderzochte persleidingen

Zeven persleidingen zijn geselecteerd voor dit onderzoek, waarbij zij moesten voldoen aan de volgende criteria:

- het afvalwater is voor meer dan 80% afkomstig van huishoudens;
- er treedt geen vermindering op van de sulfidevorming als gevolg van uitputtingsverschijnselen (geen al te lange verblijftijden of pomppauzes van meer dan een half uur);
- er zijn goede meetfaciliteiten, zoals betrouwbare debietmeters met recorders, eenvoudige mogelijkheid tot bemonstering en een laboratorium;
- de geselecteerde leidingen geven samen een goede afspiegeling van de in Nederland in gebruik zijnde afvalwaterpersleidingen.

In tabel 1 zijn de karakteristieken van de gekozen leidingen opgenomen, zie bijlage 1 voor nadere bijzonderheden. Deze persleidingen variëren voldoende in afmetingen en in verblijftijden om samen een dekkend beeld te kunnen geven van de sulfidevorming in het merendeel van de Nederlandse persleidingen.



Tabel 1: Karakteristieken van de onderzochte persleidingen

PERSLEIDING (GEMAAL)	LENGTE (m)	DIAMETER (m)	VERBLIJFT. (uur)	TEMPERATUUR (°C)	MIN. SNELH.* (m/s)
R'dam A'laan	5900	1,0	3...10	15...19	0,15
R'dam A'laan	5900			12	#
R'dam S'str	4100	1,2	3...7	19	0,59
R'dam S'str	4100			12	#
NieuwVennep	5200	0,7	9...16	17	0,56
Hoofddorp	6700	0,7	10..18	17	0,56
NaardenBussum	6500	0,8	4...8	18	0,50
HilversumWest	9100	0,7	6...13	18	0,52
Nederhorst DB	2800	0,3	2...6	19	0,61

\* De minimale stroomsnelheid bij één werkende DWA-pomp.

# Deze persleidingen werden ook in het winterseizoen onderzocht.

### 3.2 De opzet van het onderzoek

De geselecteerde persleidingen zijn gedurende 24 uur bemonsterd. Per etmaal zijn steeds ongeveer 18 steekmonsters aan de uitlaatzijde en ongeveer 6 monsters aan de inlaatzijde genomen. Uit eerder uitgevoerd onderzoek aan de persleiding tussen het gemaal Alexanderlaan en de rwzi Kralingseveer te Rotterdam [Haase en Polder, 1987 en 1988] bleek dat het nemen van meer monsters aan de inlaatzijde niet meer informatie opleverde. Het sulfaatgehalte is niet bepaald, omdat uit genoemd onderzoek gebleken was dat het sulfaatgehalte geen merkbare invloed had op de sulfidevorming. Dit is overigens ook de algemeen geldende opvatting in de literatuur.

Gekozen is voor uitvoering van het onderzoek in de warme jaargetijden bij droogweercondities, omdat dan de grootste sulfideconcentraties

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions.

2. It is essential to ensure that all entries are supported by appropriate documentation and receipts.

3. Regular audits should be conducted to verify the accuracy of the records and identify any discrepancies.

4. The second part of the document outlines the procedures for handling cash and credit transactions.

5. All cash receipts should be recorded immediately and deposited in a secure bank account.

6. Credit sales should be recorded on an accrual basis, and accounts receivable should be monitored closely.

7. The third part of the document provides guidelines for managing inventory and stock levels.

8. Inventory should be counted regularly to ensure that the records match the actual physical stock.

verwacht mogen worden. Daarnaast zijn de persleidingen van de gemalen Alexanderlaan en Schuurmanstraat naar de rwzi Kralingseveer ook eenmaal 's winters onderzocht.

### 3.3 De meetresultaten

In totaal zijn in zes meetdagen bij de uitmonding van de zeven persleidingen 198 steekmonsters genomen en bij de inlaatzijde 71. De meetresultaten zijn vermeld in bijlage 1. Niet alle resultaten zijn even geschikt gebleken voor het afleiden van een formule.

Door de lage temperatuur ( $12^{\circ}\text{C}$ ) van het afvalwater gedurende de metingen van 17/18 februari 1988 bij de rwzi Kralingseveer (persleidingen Alexanderlaan en Schuurmanstraat) zijn toen bijzonder lage sulfideconcentraties waargenomen. Deze resultaten worden slechts zijdelings bij de analyse betrokken.

De monsters die zijn verkregen bij de rwzi Zwaanshoek (persleidingen Hoofddorp en Nieuw-Vennep) op 8/9 juni bleken onbruikbaar. Er stroomt daar, wanneer de pompen uitslaan, water vanuit de ontvangkelder terug in de persleidingen tot voorbij het bemonsteringspunt. Dit terugstromende water is verdund met (reeds gezuiverd, en daardoor zuurstofrijk) recirculatiewater en is daardoor niet representatief voor afvalwater dat de persleiding heeft doorstroomd. Bij de verdere analyse zijn genoemde proefresultaten niet betrokken. Overigens zijn er op 22 juni 1988 aanvullende metingen verricht bij de rwzi Zwaanshoek, waarbij uitsluitend werd bemonsterd wanneer de pompen aanstonden, zodat zeker was dat de persleidingen goed (in de juiste richting) werden doorstroomd.

De monsters uit de persleiding Schuurmanstraat Rotterdam bevatten voor huishoudelijk afvalwater uitzonderlijk veel organisch materiaal (CZV > 700 mg/l); daarom zijn zij slechts zijdelings bij de analyses betrokken.

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions.

2. It is essential to ensure that all entries are supported by appropriate documentation and receipts.

3. Regular audits should be conducted to verify the accuracy of the records and to identify any discrepancies.

4. The second part of the document outlines the procedures for handling any irregularities or discrepancies that may arise.

5. It is important to investigate any such issues promptly and to take appropriate corrective action.

6. The final part of the document provides a summary of the key points and a conclusion.

7. It is hoped that this document will provide a clear and concise guide for all concerned parties.

8. Thank you for your attention and cooperation in this matter.

9. Yours faithfully,  
[Signature]



## 4 BESPREKING VAN DE RESULTATEN

## 4.1 globaal resultaat van de metingen

De resultaten van de metingen blijken goed overeen te stemmen met het vrij eenvoudige model van (5). Per persleiding is er een vrijwel evenredige toename van het sulfidegehalte van het afvalwater met de verblijftijd. Een vrij willekeurig gekozen voorbeeld hiervan wordt gegeven in figuur 3. Omdat de verschillende onderzochte persleidingen verschillende diameters hebben, is het niet zinvol de gevonden sulfidegehalten zonder meer te vergelijken, bijvoorbeeld door alle resultaten in één figuur te zetten. De vergelijking van de resultaten kan gebeuren door de gevonden sulfideflux en vertragingstijd bij verschillende persleidingen te beschouwen. Daaruit blijkt een gemiddelde sulfideflux van  $0,25 \text{ g S}/(\text{m}^2 \cdot \text{uur})$ , en een gemiddelde vertragingstijd van ongeveer 1,1 uur, de laatste echter met een vrij grote onzekerheidsmarge. De overige onderzochte grootheden hebben geen invloed op het sulfidegehalte van het afvalwater; dit geldt voor de pH, temperatuur, CZV, en voor de afmetingen van de persleiding. Op de nadere analyse van de resultaten wordt hieronder ingegaan.

De gemeten sulfidegehalten kunnen worden beschreven met de volgende formule:

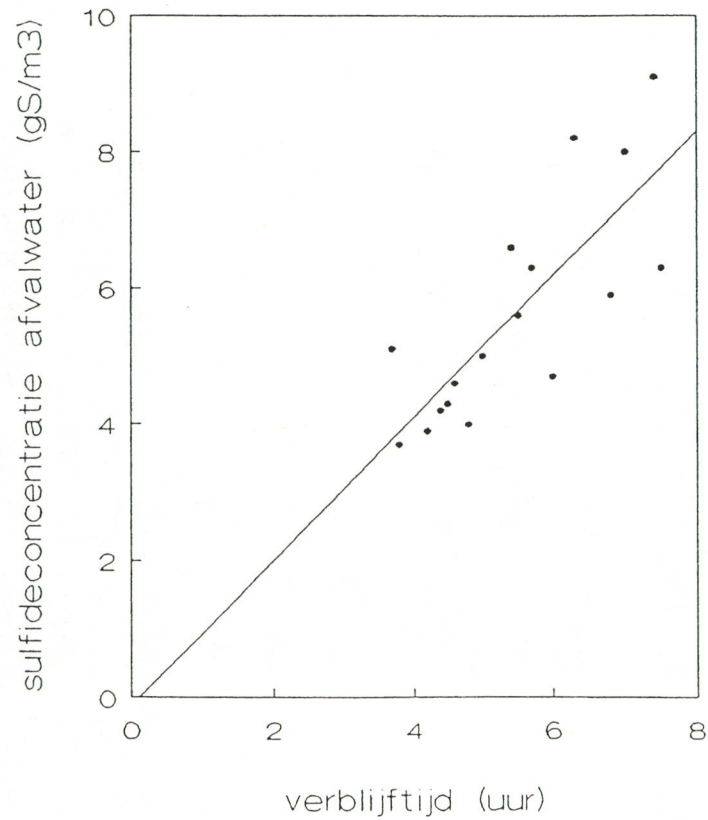
$$S = 0,25 (t - 1,1) / R \quad (8),$$

waarin

S: het sulfidegehalte aan het eind in  $\text{g S}/\text{m}^3$ ,

t: de verblijftijd van het afvalwater in uur,

R: de hydraulische straal in m.



Figuur 3: Het verband tussen de verblijftijd van het afvalwater in de persleiding en het sulfidegehalte aan eht einde van een van de onderzochte persleidingen (NB-hmr-(25-5-88)); lengte 6500 m, diameter 0,4 m, temperatuur 18°C, meting mei 1988

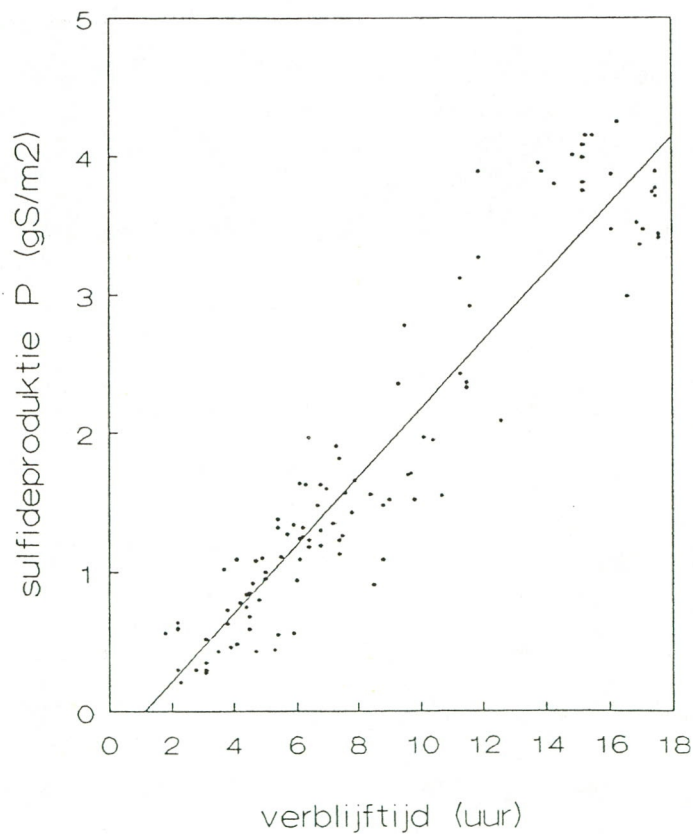
#### 4.2 Nadere analyse van de resultaten

Uit de hierboven gegeven globale beschouwing blijkt dat het model volgens (7) de gevonden sulfidegehalten redelijk goed beschrijft. Daarom wordt hier allereerst de invloed van de verblijftijd en de vertragingstijd nader uitgewerkt; vervolgens wordt de invloed van de overige factoren beschouwd.

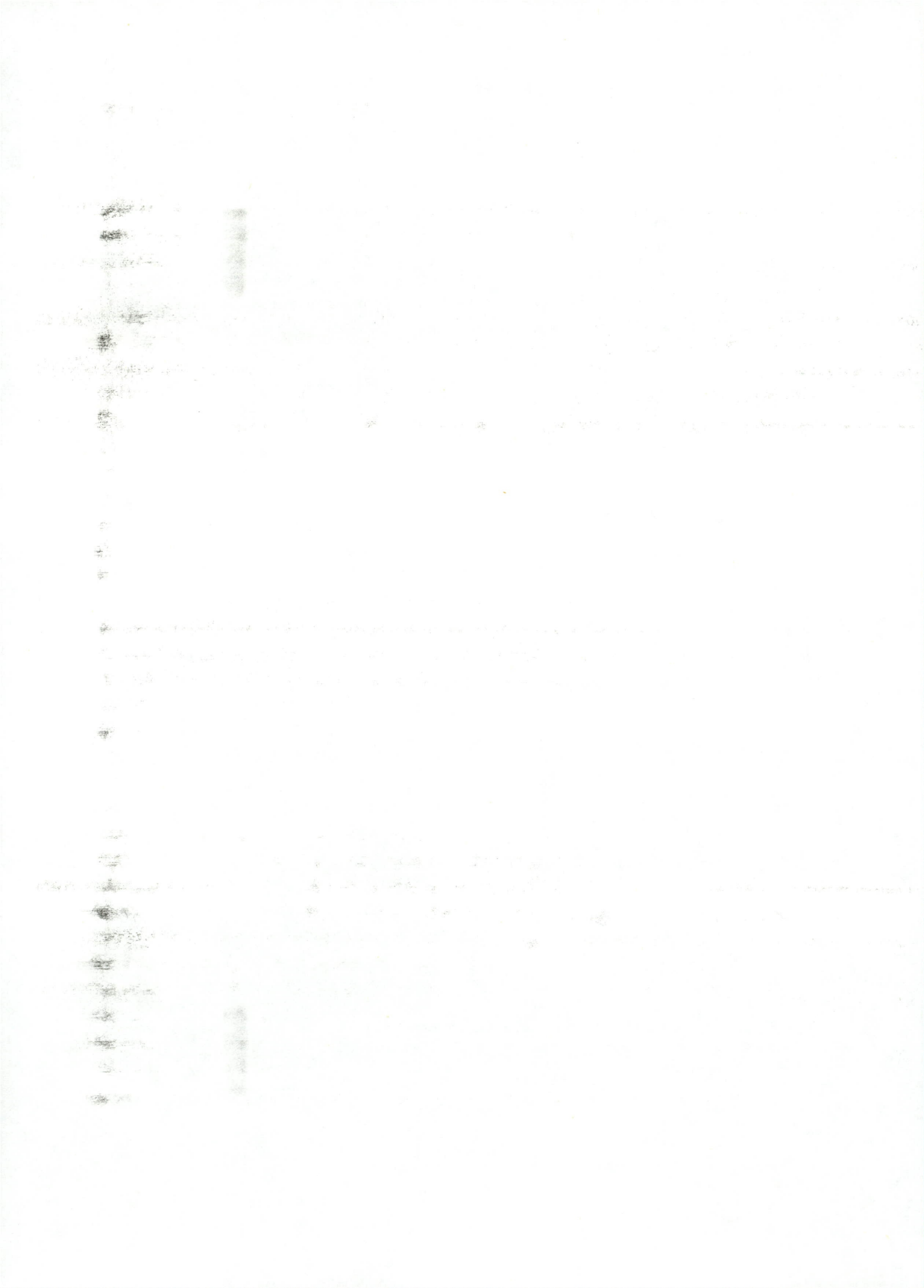
## 4.2.1 de invloed van de verblijftijd en de vertragingstijd

De onderlinge vergelijking van de persleidingen kan op de volgende wijze worden uitgevoerd. Bij het transport door een persleiding ontstaat sulfide in de slijmlaag aan de binnenzijde van de wand.

De opbouw van sulfide verloopt globaal volgens (7). Bij persleidingen met een kleinere diameter neemt de concentratie aan sulfide snel toe, omdat het oppervlak van de slijmlaag relatief groot is ten opzichte van het stroomlichaam.



Figuur 4: De sulfideproductie gevonden bij 107 waarnemingen aan zeven persleidingen als functie van de verblijftijd (#), en de best passende rechte lijn door de meetpunten (\_\_\_\_\_)



Uit (7) ontstaat eenvoudig een genormeerde (van de geometrie van de individuele persleiding onafhankelijke) grootheid  $P$ , de sulfideproduktie, namelijk:

$$P = R * S = f_i * (t - vt) \quad (9).$$

Hierin zijn

$P$  : de sulfideproduktie in  $g S/m^2$

$S$  : het sulfidegehalte van het afvalwater aan het einde van de persleiding in  $g S/m^3$

$R$  : de hydraulische straal in  $m$

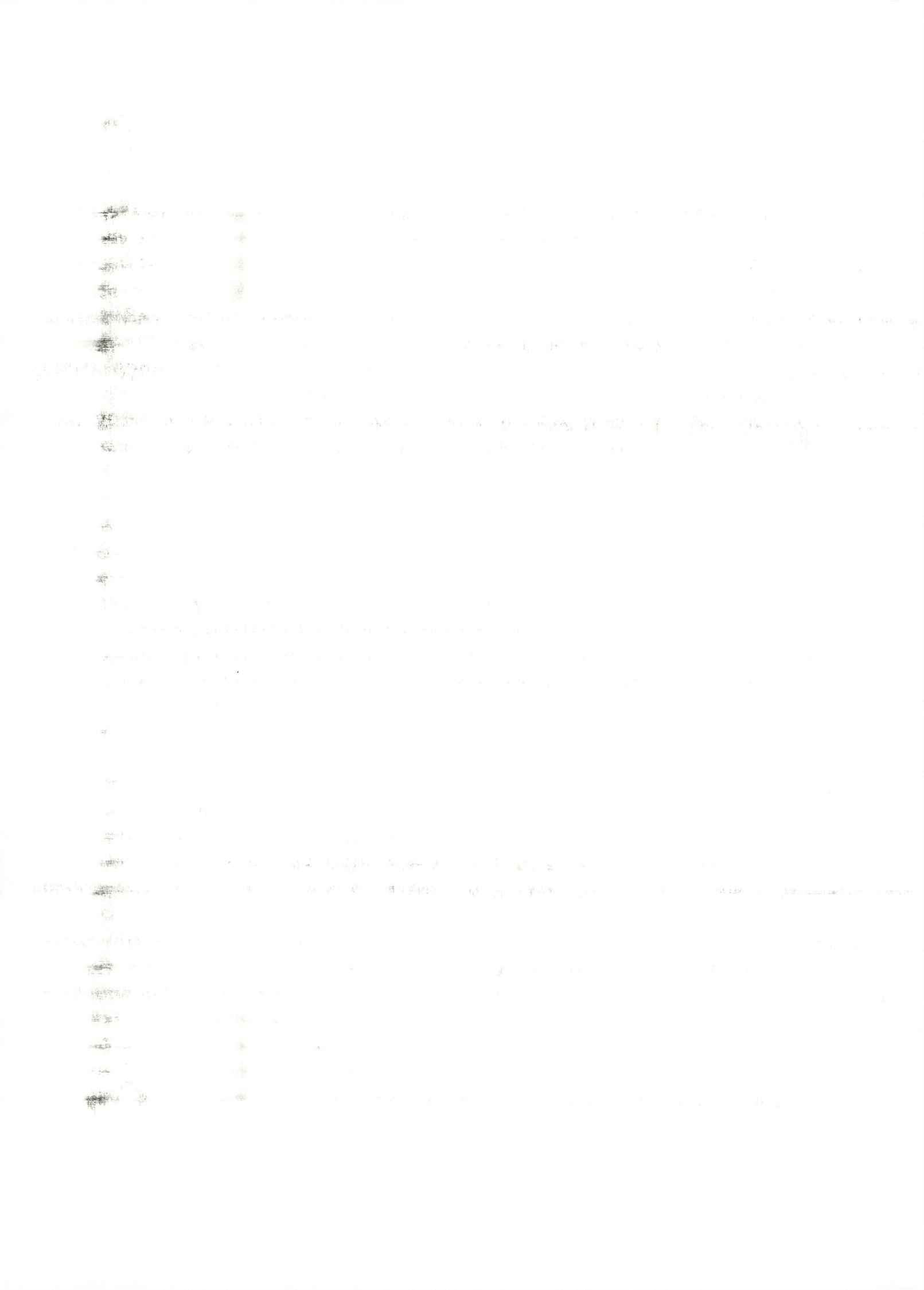
$f_i$ : de sulfideflux in  $g S/(m^2 * \text{uur})$

$t$  : de verblijftijd van het afvalwater in uur

$vt$ : de vertragingstijd in uur.

Een grafische weergave van  $P$  als functie van de verblijftijd van alle onderzochte persleidingen geeft dan een overzichtelijke vergelijking. Uit een dergelijke figuur kunnen worden afgelezen de gemiddelde flux, dat is de helling van de beste rechte lijn door de meetpunten, resp. de gemiddelde vertragingstijd, dat is de tijd waarbij de beste rechte lijn de tijdas snijdt.

In figuur 4 zijn op deze wijze 107 meetpunten uit dit onderzoek weergegeven. De doorgetrokken lijn is de best passende lijn volgens de kleinstekwadratenmethode (de fout in de verblijftijd is hierbij nihil verondersteld). Deze lijn wordt verkregen door in (9) voor  $f_i$  0,25  $g S/(m^2 * \text{uur})$  en voor  $vt$  1,1 uur in te vullen. De correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,94 ( $R^2 = 88,9 \%$ ). De correlatie is dermate goed, dat hieruit met grote stelligheid kan worden afgeleid dat de sulfideproduktie lineair toeneemt met de verblijftijd over een breed gebied. Met 95 % betrouwbaarheid kan worden gesteld dat de werkelijke sulfideflux ligt tussen de grenzen 0,25 +/- 0,02  $g S/(m^2 * \text{uur})$ . De nauwkeurigheid van de vertragingstijd is echter nogal gering. Met 95 % betrouwbaarheid ligt  $vt$  tussen 1,1 +/- 0,8, d.w.z. tussen 0,3 en 1,9 uur. Dat zijn ruime



grenzen, terwijl de getalswaarde relatief klein is. Dit veroorzaakt een geringe nauwkeurigheid van de resulterende formule bij korte verblijftijden. Dit is echter niet ernstig, omdat de sulfidegehalten bij korte verblijftijden niet erg hoog zijn. De gevonden vertragingstijd zou daarom, zeker ten opzichte van de relatief lange verblijftijden in persleidingen, met betrekkelijk geringe gevolgen kunnen worden verwaarloosd.

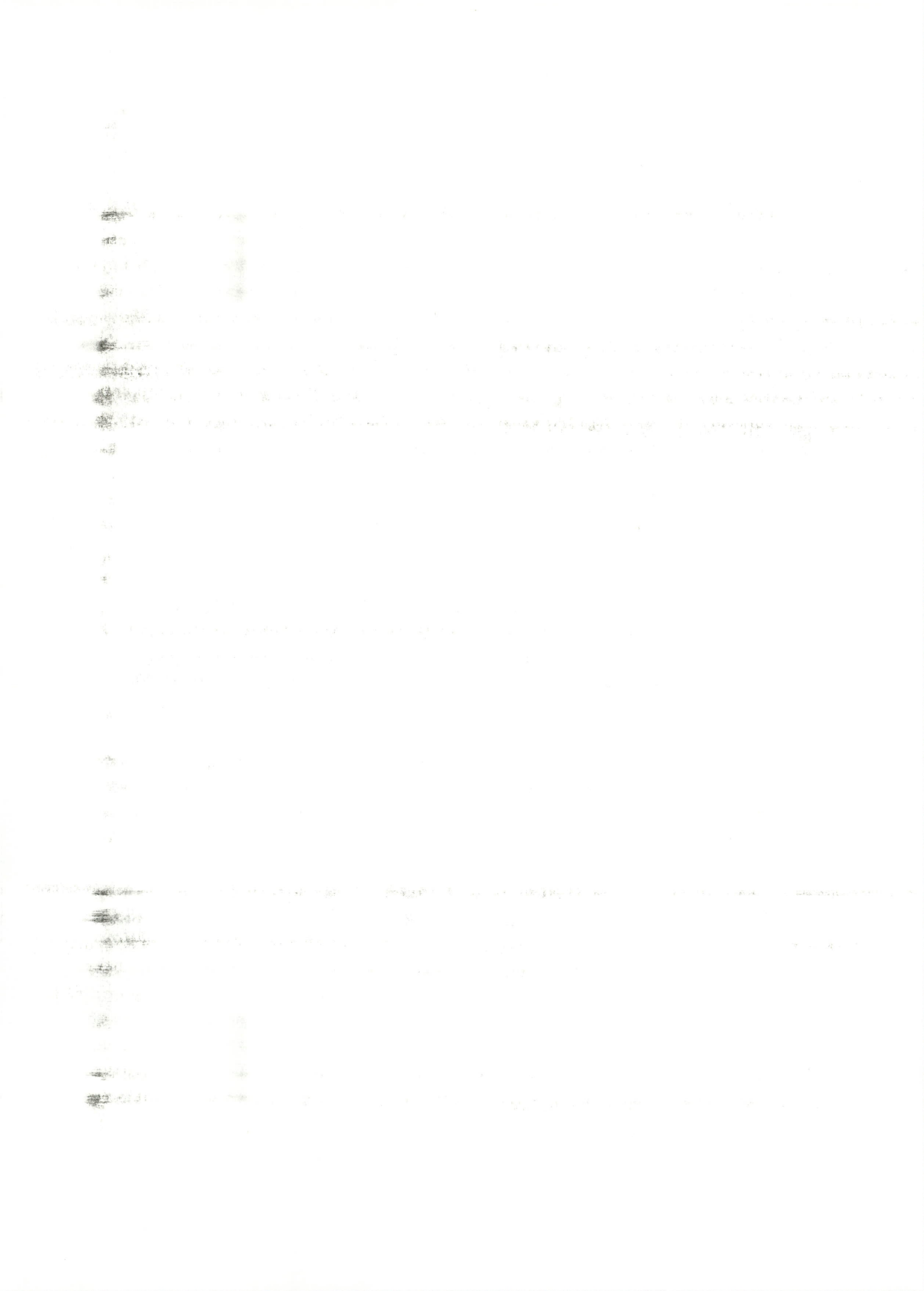
Wanneer de gemiddelde flux en de gemiddelde vertragingstijd worden ingevuld in de modelvergelijking (7) ontstaat (8). De voorspelling die daarmee kan worden gedaan is de betrouwbaarste die mogelijk is op basis van de gevonden waarden. Wanneer wordt uitgegaan van een betrouwbaarheidsinterval van 95 %, geeft (8) een sulfidevoorspelling die bij een verblijftijd van 4 uur ongeveer 35 %, bij een verblijftijd van 8 uur ongeveer 20 %, en bij een verblijftijd van 18 uur ongeveer 12,5 % naar boven of beneden afwijkt van de juiste waarde.

Een eenvoudiger formule kan worden gebruikt wanneer de vertragingstijd wordt verwaarloosd, namelijk:

$$S = 0,23 * t / R \quad (10),$$

met S, R en t als boven. De correlatiecoëfficiënt bedraagt 0,98 ( $R^2 = 0,962$ ). Deze eenvoudige formule komt bij verblijftijden boven 4 uur in het 95 % betrouwbaarheidsinterval van formule (8). De eenvoudige formule (10) geeft bij verblijftijden van 4 resp. 18 uur 25 % te hoge, resp. enkele % te lage sulfidegehalten ten opzichte van het gemiddelde volgens (8).

Dat een zekere vertragingstijd kan optreden is beredeneerd in 2.5.2. Dat de gevonden waarde qua grootte-orde heel redelijk is, blijkt uit het volgende. Het gemiddelde zuurstofgehalte van het inkomende water varieert van persleiding tot persleiding tussen 1,0 en 3,2 g  $O_2/m^3$ . De gemiddelde snelheid waarmee zuurstof in het afvalwater wordt verbruikt (de respiratiesnelheid), ligt tussen 3,1 en 9,2 g  $O_2/(m^3 * \text{uur})$ . Hieruit





volgt dat er tussen 0,1 en 1,0 uur verloopt voordat anaerobe condities optreden in het afvalwater.

#### 4.2.2 overige invloedsfactoren

De vraag is of nog andere factoren van belang zijn voor de grootte van de sulfidevorming. De samenstelling en overige eigenschappen van het onderzochte afvalwater varieerden over het algemeen niet erg sterk. In Tabel 2 zijn enige eigenschappen van het afvalwater in de persleidingen weergegeven, zoals die van mei tot juni zijn gemeten.

Tabel 2: Enige eigenschappen van het onderzochte afvalwater

eigenschap	waarde
temperatuur	: 15 tot 20 (°C)
pH	: 7 tot 8 (-)
CZV	: 300 tot 700 (g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )

Verder variëren de lengte en de diameter van de onderzochte persleidingen. Wanneer het eenvoudige model niet juist is, zouden ook die invloed kunnen hebben op de sulfideproductie. De afmetingen zijn eerder vermeld in Tabel 1.

Multivariante analyse van de gevonden resultaten gaf voor alle genoemde factoren aan, dat zij geen significante invloed hebben op de sulfideproductie. Binnen 95 % betrouwbaarheidsgrenzen waren alle coëfficiënten gelijk aan nul. Hierna worden enkele ervan apart besproken.

#### invloed van de temperatuur:

De invloed van variatie in de afvalwatertemperatuur binnen de grenzen zoals aangegeven in Tabel 2 was vrijwel afwezig, en zeker niet

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions and activities. It emphasizes the need for transparency and accountability in financial reporting.

2. The second part of the document outlines the various methods and techniques used to collect and analyze data. It highlights the importance of using reliable sources and ensuring the accuracy of the information gathered.

3. The third part of the document focuses on the interpretation and analysis of the collected data. It discusses the various statistical tools and techniques used to identify trends and patterns in the data.

4. The fourth part of the document discusses the importance of communication and reporting. It emphasizes the need for clear and concise communication of the findings and conclusions of the study.

5. The fifth part of the document discusses the importance of ethical considerations in research. It highlights the need for researchers to adhere to strict ethical guidelines and to be transparent about any potential conflicts of interest.

6. The sixth part of the document discusses the importance of ongoing evaluation and improvement. It emphasizes the need for researchers to regularly assess the quality and effectiveness of their research and to make necessary adjustments.

7. The seventh part of the document discusses the importance of collaboration and teamwork. It highlights the benefits of working with other researchers and experts in the field to enhance the quality and impact of the research.

8. The eighth part of the document discusses the importance of staying up-to-date on the latest research and developments in the field. It emphasizes the need for researchers to engage in continuous learning and professional development.

significant ten opzichte van de onnauwkeurigheden uit diverse bronnen. Toch ligt het voor de hand dat variatie van de temperatuur binnen ruimere grenzen invloed zal hebben op de vormingssnelheid van sulfide. Zo bleek bij de persleiding vanuit Nederhorst den Berg dat tijdens de metingen door lozingen van wasserijen de temperatuur incidenteel werd verhoogd tot boven 20 °C. Bij die hogere temperaturen werd ook meer sulfide gevormd. Aan de andere kant is bij de metingen in Rotterdam van 16/17 februari 1988 gevonden dat bij een watertemperatuur van 12 °C de sulfidevorming nagenoeg stopt.

Binnen het temperatuurinterval van 15 tot 20 °C echter is de invloed te gering om significant vast te kunnen stellen met de gevonden resultaten. Afwijkingen door meetfouten overtreffen de temperatuureffecten. De vergelijking die wordt voorgesteld kan dan ook alleen gebruikt worden in gevallen waarbij de temperatuur van het afvalwater ligt tussen 15 en 20 °C. Overigens zal de afvalwatertemperatuur in het warmere jaargetijde in Nederland vrijwel steeds in dit interval liggen, behalve bij lozing van extra warm afvalwater. Bij lagere temperaturen treedt weinig of geen sulfidevorming op, zodat er bij die temperaturen nauwelijks behoefte bestaat aan voorspelling daarvan.

#### invloed van de pH:

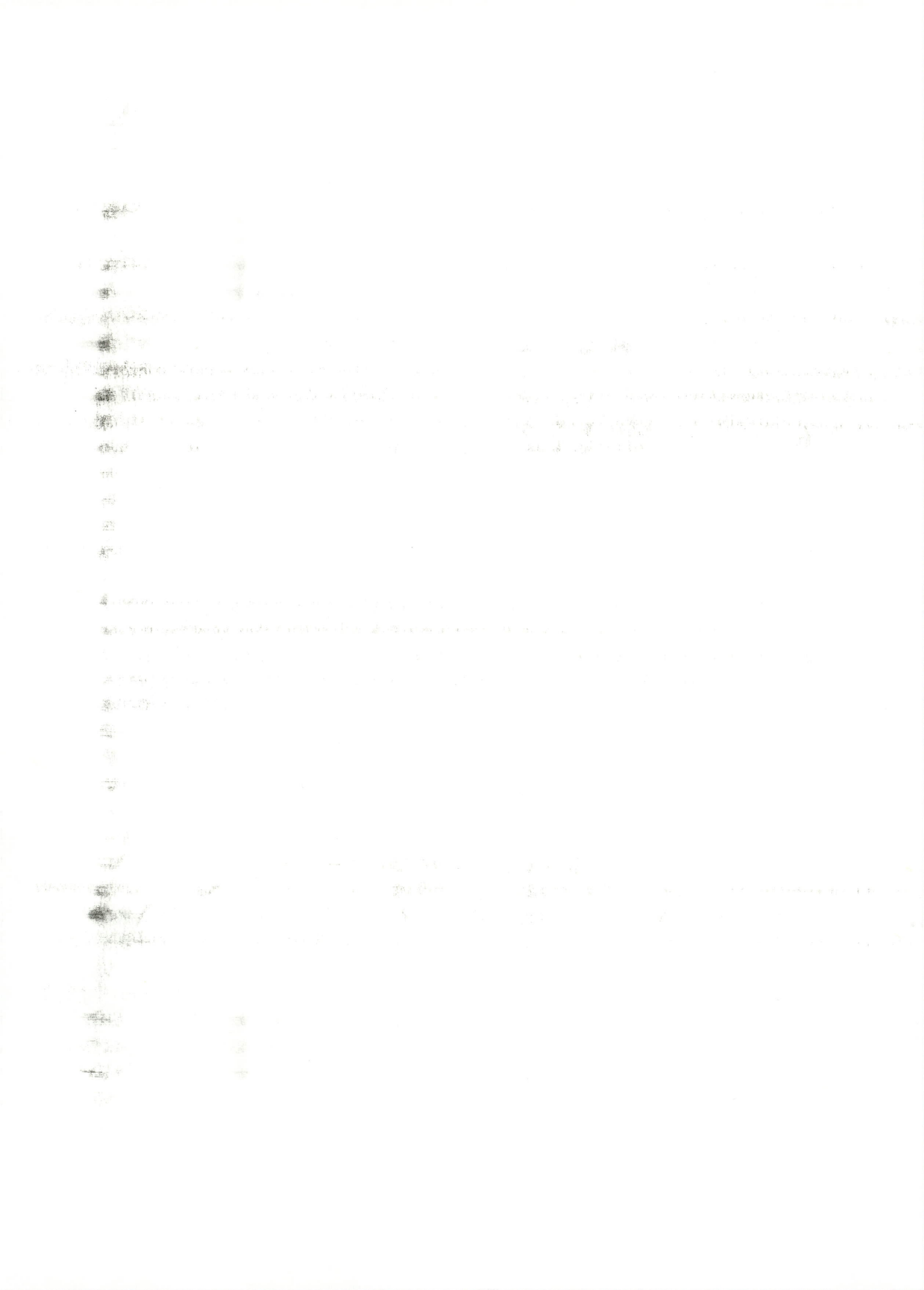
De pH van het afvalwater varieerde slechts weinig in het etmaal en per persleiding. Uit de multivariante analyse blijkt dat de invloed van die variaties niet significant aanwezig is. Bij sterk van het gemiddelde afwijkende pH-waarden kan de snelheid van de sulfidevorming afnemen omdat pH = 7,5 een optimum is voor sulfaatreducerende bacteriën. Sterke afwijkingen hiervan zullen vermoedelijk slechts optreden door industriële lozingen.



de invloed van het CZV:

De CZV-waarden bleven doorgaans tussen de opgegeven grenzen, namelijk 300 tot 700 mg/l. De variatie binnen dit gebied bleek geen invloed te hebben op de sulfideproductie.

Bij het gemaal Schuurmanstraat te Rotterdam zijn veel hogere waarden aangetroffen dan bij de andere persleidingen, en dan voor huishoudelijk afvalwater gebruikelijk zijn. Een verklaring hiervoor is moeilijk te vinden. Waarschijnlijk vonden er geen bijzondere lozingen plaats op het stelsel. Doordat er op een laag niveau werd bemalen ten tijde van de proefneming, is mogelijk extra veel slib getransporteerd waardoor er bij de rwzi zulke hoge CZV-waarden zijn gevonden. Het lijkt waarschijnlijk dat dergelijke hoge CZV's aanleiding geven tot verhoogde sulfideproductie. Gezien het beperkte aantal metingen kan dat niet nauwkeurig worden aangegeven. Globaal geldt dat bij CZV's rond 900 mg O<sub>2</sub>/l met 50 % meer sulfidevorming rekening moet worden gehouden, dan wordt berekend volgens hoofdstuk 4.1.



## 5 CONFRONTATIE MET ANDERE VERGELIJKINGEN

Voor de voorspelling van sulfidevorming in persleidingen zijn al jaren formules in gebruik. Vaak blijken zij bij controle niet de juiste uitkomsten te geven. Bij nadere bestudering van het originele onderzoeksmateriaal blijken dergelijke veel gebruikte formules te berusten op slechts weinig metingen [Haase en Polder 1987]. Hier wordt nu een vergelijking getrokken tussen formules uit de literatuur en de bij dit onderzoek gevonden formule. Het resultaat van de verschillende formules is weergegeven in figuur 6. Bij de vergelijking van Boon en Lister is uitgegaan van afvalwater van 18 °C en een CZV van 500 g/m<sup>3</sup>. Het valt op dat de vergelijkingen uit de literatuur minder sulfide voorspellen dan formule (8), die gebaseerd is op de resultaten van de onderzochte Nederlandse persleidingen.

Een mogelijke verklaring voor een lager niveau van de sulfideproductie bij de experimenten van Boon & Lister is het voor sulfidevorming minder gunstige pompregime. In hun experiment stond het afvalwater in de pomppauzes steeds meer dan een half uur stil en waren de periodes gedurende welke er gepompt werd slechts kort (ongeveer 5 minuten). Daardoor is er geen optimale uitwisseling van voedingsstoffen en afvalstoffen tussen de slijmlaag en het stroomlichaam. Bij de onderhavige experimenten zijn de pomppauzes steeds kort geweest.

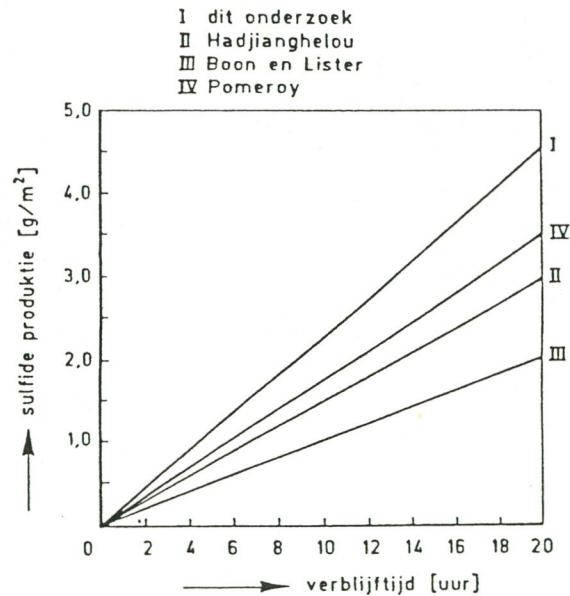
De vergelijking van Pomeroy voorspelt doorgaans tweemaal hogere waarden dan die van Boon en Lister. Deze vergelijking geeft inderdaad waarden die slechts weinig lager zijn dan de waarden die bij dit onderzoek zijn gevonden. Bij de berekening is uitgegaan van een BZV van 200 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, geschat op basis van een CZV tussen 400 en 500 en  $BZV = 0,3 \text{ tot } 0,5 * CZV$ .

De vergelijking van Hadjianghelou geeft waarden die liggen tussen de voorspellingen van Pomeroy en van Boon en Lister, wat begrijpelijk is omdat deze vergelijking uit de meetresultaten van de andere genoemde auteurs is afgeleid.





Uit het bovenstaande blijkt dat in Nederlandse persleidingen regelmatig meer sulfide aanwezig is, dan zou zijn voorspeld met een van de bekende vergelijkingen.



Figuur 5: De sulfideproduktie in een persleiding als functie van de verblijftijd; aangegeven zijn waarden volgens vergelijkingen uit de literatuur en waarden voorspeld met formule (10) uit dit onderzoek

## 6 CONCLUSIES

De belangrijkste invloeden op het sulfidegehalte van het afvalwater aan het einde van een persleiding blijken de verblijftijd en de geometrie van de leiding te zijn. De tijd die verloopt voordat het afvalwater anaerob is, de vertragingstijd, is relatief kort vergeleken met de gebruikelijke verblijftijden, zodat deze vertragingstijd in principe kan worden verwaarloosd.

Aan de hand van het verrichte onderzoek wordt een zeer eenvoudige vergelijking voorgesteld, die geldt onder de hierna nog te noemen condities:

$$S = 0,23 * t / R \quad (10).$$

waarin:

S: de sulfideconcentratie in het afvalwater aan het einde van de persleiding in  $\text{g/m}^3$ ,

t: de verblijftijd van het afvalwater in uur, en

R: de hydraulische straal van de persleiding in m, gelijk aan een kwart van de diameter bij ronde leidingen.

Met deze vereenvoudigde formule wordt het sulfidegehalte bij korte verblijftijden (vanaf 4 uur) ongeveer 25 % te hoog en bij langere verblijftijden (tot 18 uur) enkele procenten te laag geschat ten opzichte van het gemiddelde dat (8) geeft. Ter wille van de eenvoud wordt dit aanvaardbaar geacht. Wanneer dat niet acceptabel is, kan met (8) een betere voorspelling worden gedaan. De nauwkeurigheid hiervan is aangegeven in 4.2. Daarnaast is het belangrijk om bij het gebruik van de vergelijking de volgende randvoorwaarden in het oog te houden.

- Het afvalwater dient hoofdzakelijk van huishoudelijke herkomst te zijn, en geen sterk afwijkende pH- en CZV-waarden te hebben (pH tussen 7 en 8, CZV tussen 300 en 700  $\text{g O}_2/\text{m}^3$ ).

1. The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records.

2. It then goes on to describe the various methods used to collect and analyze data.

3. The next section details the results of the study and the conclusions drawn from them.

4. Finally, the document provides a list of references and a bibliography for further reading.

5. The author expresses their gratitude to the funding agencies and the research assistants.

6. The document is signed by the principal investigator and dated.

7. The title page is included at the end of the document.

8. The document is formatted according to the journal's guidelines.

9. The final version of the document is submitted for publication.

10. The document is published in the journal and becomes available to the public.

11. The author receives a proof of the document and makes any necessary corrections.

12. The document is printed and distributed to the subscribers of the journal.

13. The document is archived in the journal's database for future reference.

14. The document is cited in other works and contributes to the field of research.

15. The document is reviewed by the journal's editorial board and accepted for publication.

16. The document is assigned to a peer reviewer for evaluation.

17. The document is accepted for publication and the author is notified.

18. The document is published in the journal and becomes available to the public.

19. The document is cited in other works and contributes to the field of research.

20. The document is archived in the journal's database for future reference.

- De temperatuur van het afvalwater ligt tussen 15 en 20 °C.
- Het instromende afvalwater bevat weinig sulfide (tot ongeveer 1 g S/m<sup>3</sup>), anders dient hiervoor gecorrigeerd te worden.
- Er is geen neerslag, er gelden droogweercondities. Bij regen treedt mogelijk sterke verdunning op van de sulfidevormende componenten. Overigens worden de verblijftijden bij neerslag snel korter, waardoor de sulfidevorming toch al zou afnemen.
- De vergelijking geldt voor verblijftijden tussen 4 en 18 uur. Bij langere verblijftijden treedt mogelijk uitputting van voedingsstoffen op en blijft de werkelijke sulfidevorming achter bij de voorspelling met de vergelijking. Hoeveel sulfide maximaal kan ontstaan hangt af van de sulfaatconcentratie van het inkomende afvalwater.
- Het afvalwater in de leiding staat niet erg lang achtereen stil als gevolg van pomppauzes. Wanneer dit wel gebeurt, wordt minder sulfide gevormd dan wordt berekend met (10).

Met deze randvoorwaarden kan de vergelijking voor een groot deel van de Nederlandse persleidingen worden toegepast. Het is hiermee mogelijk een goede voorspelling te doen van de in de zomer voorkomende sulfidegehalten in (hoofdzakelijk huishoudelijk) afvalwater. Het uitvoeren van tijdrovende (en kostbare) metingen kan hierdoor in belangrijke mate achterwege blijven.

Tevens wordt hiermee de mogelijkheid geboden reeds bij het ontwerp van een persleiding een goede schatting te maken van de te verwachten sulfidegehalten.

De verblijftijden in een persleiding vertonen meestal een duidelijk dag- en nachtritme. Door de geringe aanvoer van afvalwater 's nachts neemt de verblijftijd toe. Hiermee stijgt dan volgens (10) ook de sulfideconcentratie. In de ochtendpiekaanvoer treedt dan een maximale aanvoer

van stankstoffen naar de rwzi op, door de (tijdelijke) combinatie van een hoog debiet en hoge sulfideconcentratie. Wanneer de aanvoer enige tijd hoog blijft, daalt de verblijftijd en daarmee weer de concentratie van het sulfide.



Dr. R. B. Polder  
TNO INSTITUUT VOOR  
BOUWMATERIALEN EN BOUWCONSTRUCTIES  
Sectie Bouwfysica en Chemie



Ir. A. C. A. van Mechelen



## 7 LITERATUUR

BKH, adviesbureau. Aanvoer en emissie van stankstoffen op RWZI's. Inventariserend onderzoek uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat DBW/RIZA, 16 september 1987, 's Gravenhage.

Boon, A.G., Lister A.R. (1975). Formation of sulfide in rising main sewers and its prevention by injection of oxygen. Progress in Watertechnology (7), nr. 2, p. 289-300.

Environmental Protection Agency Design Manual. Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants. EPA/625/1-85/018, October 1985.

Haase, J.F.M., R.B. Polder (1987). Sulfidevorming in persleidingen. Deel 1: Literatuurstudie, Rapport BI-87-92\*/61.4.3420, TNO-IBBC, Deel 2: Experimenteel gedeelte, Rapport BI-87-102\*/61.4.3420, TNO-IBBC.

Haase, J.F.M., R.B. Polder (1988). Sulfidevorming in persleidingen, H<sub>2</sub>O, 18/88, 1988, p. 523 - 527.

Hadjianghelou, H., e.a. (1984). Über die Berechnung der zu erwartenden Sulfidbildung in Abwasserdruckleitungen. Vom Wasser (62), p. 267 - 278.

Polder, R.B. (1987), Duurzaamheid rioolleidingen, een literatuurstudie naar aantastingsmechanismen, TNO-CHO-IBBC rapport nummer 17.

Pomeroy, R. (1959). Generation and control of sulfide in filled pipes. Sewage and Industrial Wastes, nr. 31, p. 1082-1095.

Bijlage 1: meetgegevens van de persleidingen; NB CZV 99 betekent: niet gemeten

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
1	5900	15.2	7.00	0.25	1.2	0.30	0.11	3.1	614	0.09677419	al-krv(17-6-87)
2	5900	15.2	7.00	0.25	1.2	0.30	0.12	2.8	420	0.10714286	al-krv(17-6-87)
3	5900	14.9	7.20	0.25	1.4	0.35	0.13	3.1	532	0.11290323	al-krv(17-6-87)
4	5900	15.0	7.20	0.25	1.1	0.28	0.10	3.1	363	0.09032258	al-krv(17-6-87)
5	5900	15.1	7.20	0.25	1.7	0.43	0.13	3.5	406	0.12285714	al-krv(17-6-87)
6	5900	15.8	7.30	0.25	1.9	0.48	0.13	4.1	485	0.11707317	al-krv(17-6-87)
7	5900	15.9	7.30	0.25	3.0	0.75	0.18	4.4	612	0.17045455	al-krv(17-6-87)
8	5900	15.9	7.30	0.25	2.7	0.68	0.16	4.5	633	0.15111111	al-krv(17-6-87)
9	5900	15.1	7.20	0.25	4.3	1.08	0.25	4.7	413	0.22978723	al-krv(17-6-87)
10	5900	15.2	7.00	0.25	4.4	1.10	0.24	4.9	336	0.22448980	al-krv(17-6-87)
11	5900	15.2	7.00	0.25	5.5	1.38	0.27	5.4	356	0.25555556	al-krv(17-6-87)
12	5900	15.1	7.10	0.25	5.9	1.48	0.23	6.7	322	0.22089552	al-krv(17-6-87)
13	5900	15.0	7.30	0.25	5.7	1.43	0.22	7.0	353	0.20428571	al-krv(17-6-87)
14	5900	15.0	7.30	0.25	5.4	1.35	0.20	7.2	383	0.18750000	al-krv(17-6-87)
15	5900	14.8	7.30	0.25	6.5	1.63	0.25	6.8	331	0.23970588	al-krv(17-6-87)
16	5900	15.3	7.20	0.25	4.7	1.18	0.19	6.4	279	0.18437500	al-krv(17-6-87)
17	5900	15.4	7.30	0.25	3.8	0.95	0.20	5.0	227	0.19000000	al-krv(17-6-87)
18	5900	15.1	7.40	0.25	2.5	0.63	0.18	3.8	252	0.16578947	al-krv(17-6-87)
19	9100	18.5	7.60	0.18	7.0	1.23	0.20	6.4	590	0.19218750	hw-hmr(25-5-88)
20	9100	18.1	7.70	0.18	7.5	1.30	0.20	6.8	590	0.19117647	hw-hmr(25-5-88)
21	9100	18.0	7.70	0.18	7.0	1.23	0.17	7.4	560	0.16621622	hw-hmr(25-5-88)
22	9100	17.5	7.70	0.18	9.0	1.57	0.22	7.6	560	0.20657895	hw-hmr(25-5-88)
23	9100	18.0	7.70	0.18	5.2	0.91	0.11	8.5	560	0.10705882	hw-hmr(25-5-88)
24	9100	18.0	7.70	0.18	6.3	1.09	0.13	8.8	560	0.12386364	hw-hmr(25-5-88)
25	9100	16.9	7.60	0.18	8.5	1.48	0.18	8.8	595	0.16818182	hw-hmr(25-5-88)
26	9100	16.9	7.40	0.18	8.7	1.52	0.16	9.8	595	0.15510204	hw-hmr(25-5-88)



nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
27	9100	17.2	7.40	0.18	11.2	1.97	0.20	10.1	595	0.19504950	hw-hmr(25-5-88)
28	9100	17.1	7.40	0.18	11.2	1.95	0.19	10.4	560	0.18750000	hw-hmr(25-5-88)
29	9100	17.3	7.50	0.18	13.5	2.37	0.21	11.5	560	0.20608696	hw-hmr(25-5-88)
30	9100	17.6	7.50	0.18	12.0	2.09	0.17	12.6	560	0.16587302	hw-hmr(25-5-88)
31	9100	18.3	7.40	0.18	8.8	1.55	0.15	10.7	525	0.14485981	hw-hmr(25-5-88)
32	6500	18.4	7.60	0.20	5.1	1.02	0.30	3.7	655	0.27567568	NB-hmr(25-5-88)
33	6500	18.3	8.30	0.20	3.7	0.73	0.21	3.8	655	0.19210526	NB-hmr(25-5-88)
34	6500	18.2	8.10	0.20	3.9	0.78	0.20	4.2	655	0.18571429	NB-hmr(25-5-88)
35	6500	18.4	7.90	0.20	4.2	0.84	0.21	4.4	655	0.19090909	NB-hmr(25-5-88)
36	6500	18.2	7.90	0.20	4.3	0.85	0.20	4.5	620	0.18888889	NB-hmr(25-5-88)
37	6500	18.3	7.70	0.20	4.6	0.92	0.22	4.6	620	0.20000000	NB-hmr(25-5-88)
38	6500	18.3	7.80	0.20	4.0	0.80	0.18	4.8	620	0.16666667	NB-hmr(25-5-88)
39	6500	18.1	7.50	0.20	5.0	1.00	0.21	5.0	620	0.20000000	NB-hmr(25-5-88)
40	6500	18.4	7.60	0.20	6.6	1.32	0.26	5.4	500	0.24444444	NB-hmr(25-5-88)
41	6500	17.8	7.60	0.20	5.6	1.11	0.22	5.5	500	0.20181818	NB-hmr(25-5-88)
42	6500	17.5	7.50	0.20	6.3	1.27	0.24	5.7	500	0.22280702	NB-hmr(25-5-88)
43	6500	17.6	7.50	0.20	8.2	1.63	0.27	6.3	510	0.25873016	NB-hmr(25-5-88)
44	6500	18.0	7.40	0.20	5.9	1.19	0.18	6.8	510	0.17500000	NB-hmr(25-5-88)
45	6500	18.0	7.30	0.20	9.1	1.82	0.26	7.4	510	0.24594595	NB-hmr(25-5-88)
46	6500	18.1	7.40	0.20	8.0	1.60	0.24	7.0	360	0.22857143	NB-hmr(25-5-88)
47	6500	18.3	7.70	0.20	6.3	1.26	0.18	7.5	360	0.16800000	NB-hmr(25-5-88)
48	6500	18.3	7.80	0.20	4.7	0.94	0.17	6.0	360	0.15666667	NB-hmr(25-5-88)
49	2850	18.5	8.10	0.08	2.7	0.21	0.11	2.3	670	0.09130435	nhdb-hmr(25-5-88)
50	2850	19.3	8.30	0.08	3.9	0.30	0.16	2.2	670	0.13636364	nhdb-hmr(25-5-88)
51	2850	22.1	8.90	0.08	8.2	0.64	0.34	2.2	670	0.29090909	nhdb-hmr(25-5-88)
52	2850	21.9	8.50	0.08	7.6	0.60	0.32	2.2	670	0.27272727	nhdb-hmr(25-5-88)
53	2850	20.3	8.00	0.08	6.6	0.52	0.19	3.1	540	0.16774194	nhdb-hmr(25-5-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
54	2850	18.1	7.60	0.08	5.8	0.46	0.13	3.9	540	0.11794872	nhdb-hmr(25-5-88)
55	2850	20.4	7.90	0.08	13.9	1.09	0.29	4.1	390	0.26585366	nhdb-hmr(25-5-88)
56	2850	19.0	7.60	0.08	7.4	0.59	0.14	4.5	390	0.13111111	nhdb-hmr(25-5-88)
57	2850	18.2	7.60	0.08	5.5	0.43	0.10	4.7	390	0.09148936	nhdb-hmr(25-5-88)
58	2850	19.3	7.60	0.08	7.5	0.59	0.32	2.2	340	0.26818182	nhdb-hmr(25-5-88)
59	2850	19.8	7.50	0.08	7.0	0.56	0.38	1.8	340	0.31111111	nhdb-hmr(25-5-88)
60	6700	18.1	7.50	0.18	19.8	3.47	0.22	16.1	99	0.21552795	HD-ZWK(22-6-88)
61	6700	18.2	7.50	0.18	17.1	2.99	0.18	16.6	99	0.18012048	HD-ZWK(22-6-88)
62	6700	18.2	7.40	0.18	20.1	3.52	0.21	16.9	99	0.20828402	HD-ZWK(22-6-88)
63	6700	18.1	7.40	0.18	19.2	3.36	0.20	17.0	99	0.19764706	HD-ZWK(22-6-88)
64	6700	18.2	7.30	0.18	19.7	3.44	0.20	17.6	99	0.19545455	HD-ZWK(22-6-88)
65	6700	18.2	7.20	0.18	19.5	3.41	0.20	17.6	99	0.19375000	HD-ZWK(22-6-88)
66	6700	18.2	7.10	0.18	19.8	3.47	0.21	17.1	99	0.20292398	HD-ZWK(22-6-88)
67	6700	18.5	7.20	0.18	21.2	3.71	0.22	17.5	99	0.21200000	HD-ZWK(22-6-88)
68	6700	18.2	7.20	0.18	21.4	3.74	0.22	17.4	99	0.21494253	HD-ZWK(22-6-88)
69	6700	18.1	7.30	0.18	22.2	3.89	0.23	17.5	99	0.22228571	HD-ZWK(22-6-88)
70	6700	18.1	7.40	0.18	21.5	3.77	0.22	17.5	99	0.21542857	HD-ZWK(22-6-88)
71	5200	17.4	6.90	0.18	24.3	4.25	0.27	16.3	99	0.26073620	NV-ZWH(22-6-88)
72	5200	17.4	7.00	0.18	22.1	3.87	0.25	16.1	99	0.24037267	NV-ZWH(22-6-88)
73	5200	17.5	7.20	0.18	22.8	3.99	0.27	15.2	99	0.26250000	NV-ZWH(22-6-88)
74	5200	17.5	7.50	0.18	21.8	3.81	0.26	15.2	99	0.25065789	NV-ZWH(22-6-88)
75	5200	17.5	7.20	0.18	23.7	4.15	0.27	15.5	99	0.26774194	NV-ZWH(22-6-88)
76	5200	17.5	7.20	0.18	21.4	3.75	0.25	15.2	99	0.24671053	NV-ZWH(22-6-88)
77	5200	17.5	7.30	0.18	22.9	4.01	0.28	14.9	99	0.26912752	NV-ZWH(22-6-88)
78	5200	17.6	7.30	0.18	21.7	3.80	0.27	14.3	99	0.26573427	NV-ZWH(22-6-88)
79	5200	17.5	7.30	0.18	22.2	3.89	0.29	13.9	99	0.27985612	NV-ZWH(22-6-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
107	5900	19.3	7.30	0.25	6.8	1.71	0.18	9.7	485	0.17628866	al-krv(28-6-88)
108	4100	18.6	7.40	0.30	6.2	1.85	0.30	6.2	1140	0.29838710	SC-KRV(28-6-88)
109	4100	18.6	7.60	0.30	4.2	1.27	0.31	4.1	1140	0.30975610	SC-KRV(28-6-88)
110	4100	18.6	7.50	0.30	2.4	0.71	0.24	3.0	835	0.23666667	SC-KRV(28-6-88)
111	4100	19.7	7.60	0.30	3.1	0.94	0.29	3.2	835	0.29375000	SC-KRV(28-6-88)
112	4100	19.8	7.60	0.30	4.3	1.29	0.39	3.3	845	0.39090909	SC-KRV(28-6-88)
113	4100	19.7	7.50	0.30	5.2	1.57	0.47	3.3	845	0.47575758	SC-KRV(28-6-88)
114	4100	19.6	7.50	0.30	4.4	1.33	0.43	3.1	845	0.42903226	SC-KRV(28-6-88)
115	4100	19.5	7.50	0.30	4.7	1.40	0.44	3.2	845	0.43750000	SC-KRV(28-6-88)
116	4100	19.3	7.40	0.30	5.4	1.61	0.46	3.5	845	0.46000000	SC-KRV(28-6-88)
117	4100	19.4	7.40	0.30	4.4	1.31	0.36	3.6	975	0.36388889	SC-KRV(28-6-88)
118	4100	19.4	7.40	0.30	6.2	1.86	0.49	3.8	975	0.48947368	SC-KRV(28-6-88)
119	4100	19.4	7.50	0.30	6.7	2.03	0.38	5.3	820	0.38301887	SC-KRV(28-6-88)
120	4100	19.4	7.40	0.30	6.5	1.94	0.34	5.8	820	0.33448276	SC-KRV(28-6-88)
121	4100	19.1	7.40	0.30	6.2	1.86	0.28	6.7	820	0.27761194	SC-KRV(28-6-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
80	5200	17.5	7.40	0.18	22.6	3.95	0.29	13.8	99	0.28623188	NV-ZWH(22-6-88)
81	5200	17.3	7.50	0.18	22.2	3.89	0.34	11.9	99	0.32689076	NV-ZWH(22-6-88)
82	5200	16.6	7.50	0.18	13.3	2.33	0.21	11.5	99	0.20260870	NV-ZWH(juni1988)
83	5200	17.0	7.60	0.18	13.5	2.36	0.26	9.3	99	0.25376344	NV-ZWH(8-6-88)
84	5200	16.7	7.80	0.18	15.9	2.78	0.30	9.5	99	0.29263158	NV-ZWH(8-6-88)
85	5200	16.7	7.10	0.18	23.3	4.08	0.27	15.2	99	0.26842105	NV-ZWH(8-6-88)
86	5200	16.7	7.00	0.18	23.7	4.15	0.28	15.3	99	0.27124183	NV-ZWH(8-6-88)
87	6700	17.0	7.90	0.18	13.9	2.43	0.22	11.3	99	0.21504425	HD-ZWH(8-6-88)
88	6700	17.4	8.00	0.18	16.7	2.92	0.26	11.6	99	0.25172414	HD-ZWH(8-6-88)
89	6700	17.4	7.80	0.18	17.8	3.12	0.28	11.3	99	0.27610619	HD-ZWH(8-6-88)
90	6700	17.3	7.70	0.18	18.7	3.27	0.28	11.9	99	0.27478992	HD-ZWH(8-6-88)
91	5900	18.7	7.30	0.25	6.8	1.70	0.18	9.6	490	0.17708333	al-krv(28-6-88)
92	5900	18.5	7.30	0.25	6.1	1.52	0.17	9.0	490	0.16888889	al-krv(28-6-88)
93	5900	18.8	7.30	0.25	4.5	1.13	0.15	7.4	490	0.15270270	al-krv(28-6-88)
94	5900	18.8	7.30	0.25	2.2	0.55	0.10	5.4	365	0.10185185	al-krv(28-6-88)
95	5900	19.1	7.40	0.25	1.8	0.44	0.08	5.3	365	0.08301887	al-krv(28-6-88)
96	5900	19.2	7.50	0.25	2.2	0.56	0.09	5.9	475	0.09491525	al-krv(28-6-88)
97	5900	19.3	7.50	0.25	5.0	1.25	0.20	6.2	475	0.20161290	al-krv(28-6-88)
98	5900	19.3	7.50	0.25	5.3	1.32	0.21	6.2	475	0.21290323	al-krv(28-6-88)
99	5900	19.2	7.20	0.25	5.0	1.24	0.20	6.1	395	0.20327869	al-krv(28-6-88)
100	5900	19.1	7.40	0.25	5.3	1.34	0.23	5.9	395	0.22711864	al-krv(28-6-88)
101	5900	19.1	7.40	0.25	4.3	1.09	0.18	6.1	395	0.17868852	al-krv(28-6-88)
102	5900	19.1	7.40	0.25	6.5	1.64	0.27	6.1	430	0.26885246	al-krv(28-6-88)
103	5900	19.0	7.20	0.25	7.9	1.97	0.31	6.4	430	0.30781250	al-krv(28-6-88)
104	5900	19.0	7.30	0.25	7.6	1.91	0.26	7.3	430	0.26164384	al-krv(28-6-88)
105	5900	19.1	7.30	0.25	6.6	1.66	0.21	7.9	485	0.21012658	al-krv(28-6-88)
106	5900	19.0	7.30	0.25	6.3	1.56	0.19	8.4	485	0.18571429	al-krv(28-6-88)

Bijlage 2 : Lineaire regressie van:

- a. sulfideproduktie en verblijftijd voor alle waarnemingen met CZV<700 of niet gemeten,
- b. sulfideproduktie en CZV, verblijftijd, temperatuur, lengte, pH en hydraulische straal, voor alle waarnemingen met CZV<700 of niet gemeten

Dependent variable is: R\*[S]  
 243 total cases of which 136 are missing  
 $R^2 = 88.9\%$   $R^2(\text{adjusted}) = 88.8\%$   
 $s = 0.4094$  with  $107 - 2 = 105$  degrees of freedom

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-ratio
Regression	140.755	1	141	840
Residual	17.6020	105	0.167638	

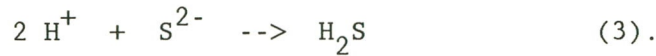
Variable	Coefficient	s.e. of Coeff	t-ratio
Constant	-0.276600	0.0821	-3.37
verbl	0.245285	0.0085	29.0

Dependent variable is: R\*[S]  
 243 total cases of which 167 are missing  
 $R^2 = 71.8\%$   $R^2(\text{adjusted}) = 69.3\%$   
 $s = 0.2819$  with  $76 - 7 = 69$  degrees of freedom

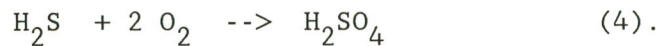
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-ratio
Regression	13.9275	6	2.321	29.2
Residual	5.48313	69	0.079466	

Variable	Coefficient	s.e. of Coeff	t-ratio
Constant	-0.514983	1.230	-0.419
CZV	-0.000244	0.0004	-0.628
verbl	0.182133	0.0233	7.81
temp	0.031924	0.0287	1.11
lengte	-0.000014	0.0000	-0.401
pH	0.000855	0.1782	0.005
Hydr	0.822435	0.8515	0.966

naar de rioolatmosfeer ontsnappen, vooral bij turbulente stromingscondities, volgens:

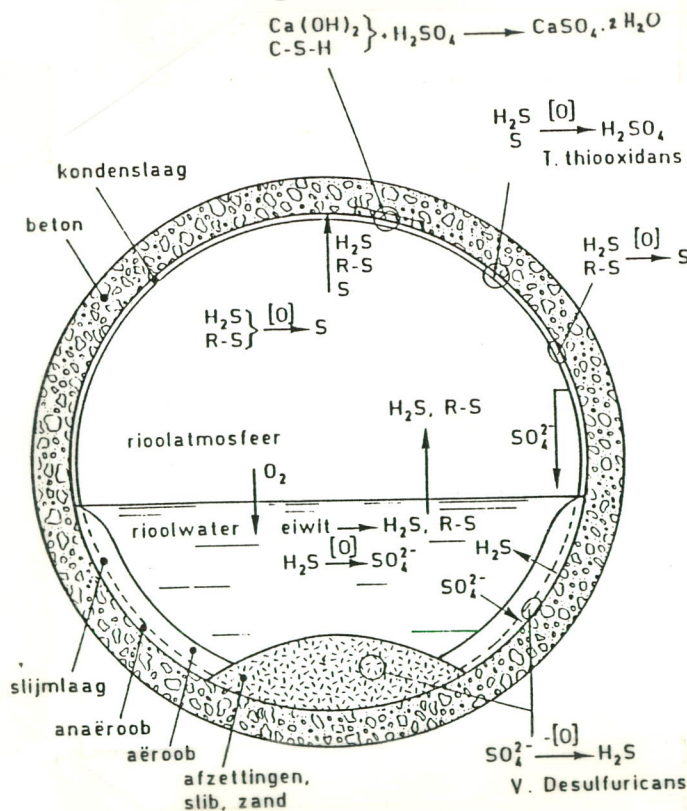


- Het  $\text{H}_2\text{S}$ -gas lost op in de condenslaag die zich boven de waterspiegel op het beton bevindt en kan daar door zwaveloxyderende bacteriën van de soort Thiobacillus in zwavelzuur worden omgezet volgens:



- In dit sterke zuur lost de cementsteen van het beton op. Hierdoor kan de wanddikte onder voor het BZA-proces gunstige omstandigheden ettelijke millimeters per jaar afnemen. De meest actieve bacteriesoort wordt Thiobacillus concretivorus genoemd, ofwel de betoneter.

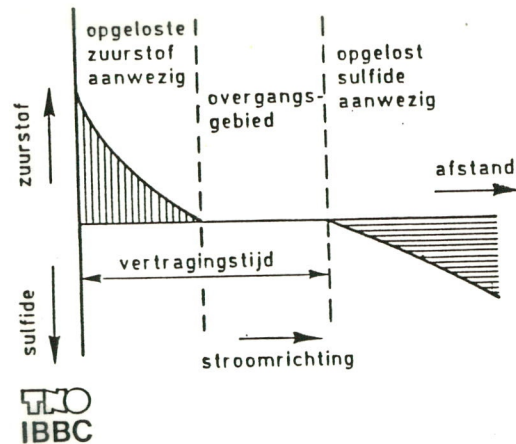
Hieruit blijkt dat BZA optreedt boven de waterspiegel, bij aanwezigheid van veel sulfide in het afvalwater; in het bijzonder wanneer dat kan ontsnappen door turbulente stromingscondities en wanneer de ruimte boven het water slecht is geventileerd.



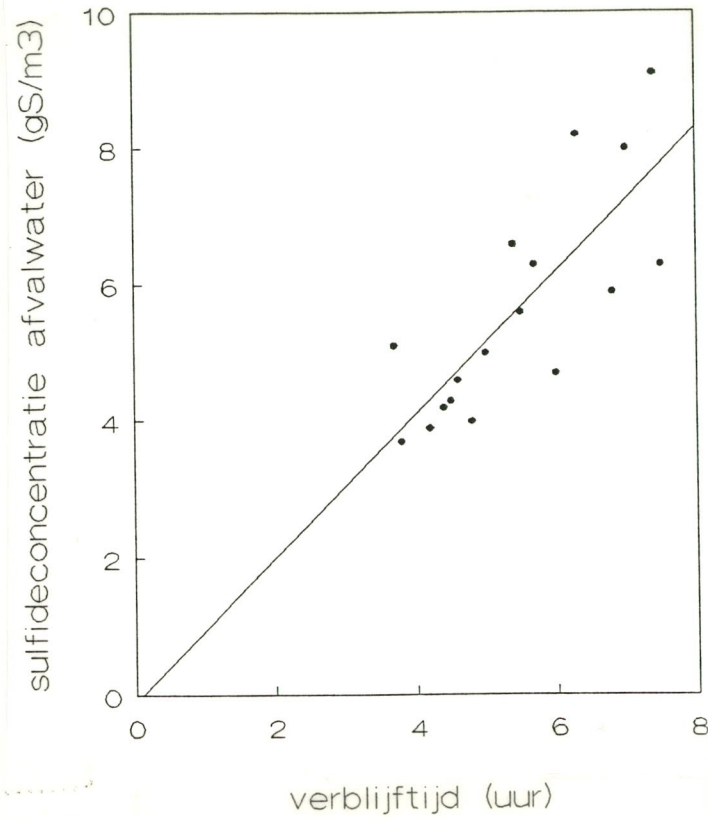
Figuur 1: schematische weergave van het BZA-mechanisme in een vrijverval riool

De hydraulische straal  $R$  is de verhouding tussen het volume van het stroomlichaam en het natte oppervlak van de buiswand, dat hier gelijk is aan het biofilmoppervlak.

Het is bekend dat er ook in het afvalwater zelf, of in erin zwevende delen, sulfide wordt gevormd [Polder 1987]. De hoeveelheid sulfide die daarbij wordt geproduceerd is echter zelfs niet bij benadering te schatten. Bij genoemde formules wordt meestal een term toegevoegd die deze hoeveelheid schat op een percentage van de in de slijmlaag gevormde hoeveelheid. Daar elke theorie hierachter ontbreekt, wordt in het hier beschreven onderzoek een dergelijke term niet gehanteerd.



Figuur 2: Schematische voorstelling van het verloop van het zuurstof- respectievelijk het sulfidegehalte van het rioolwater als functie van de afstand tot het begin van de leiding



Figuur 3: Het verband tussen de verblijftijd van het afvalwater in de persleiding en het sulfidegehalte aan eht einde van een van de onderzochte persleidingen (NB-hmr-(25-5-88)); lengte 6500 m, diameter 0,4 m, temperatuur 18°C, meting mei 1988

#### 4.2 Nadere analyse van de resultaten

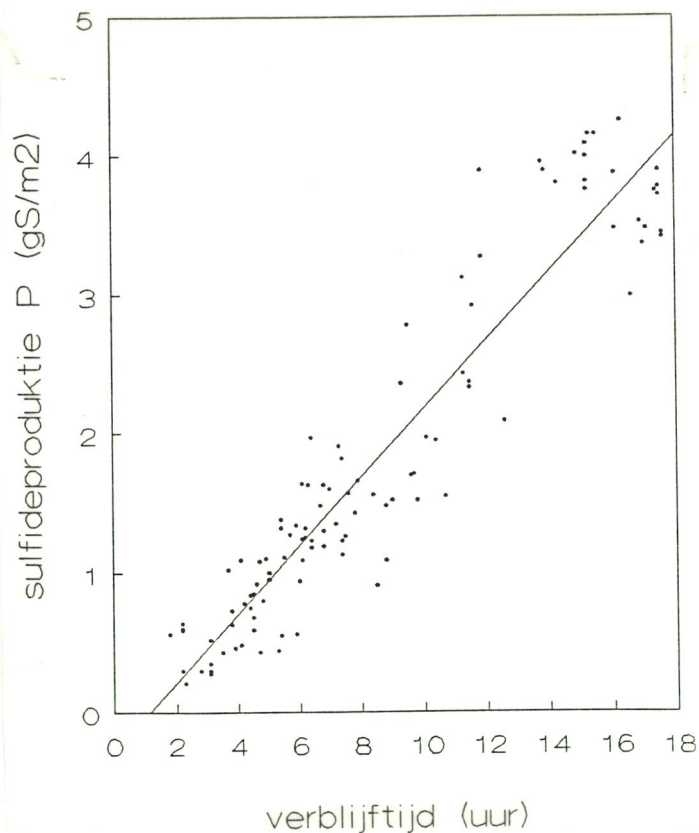
Uit de hierboven gegeven globale beschouwing blijkt dat het model volgens (7) de gevonden sulfidegehalten redelijk goed beschrijft. Daarom wordt hier allereerst de invloed van de verblijftijd en de vertragings-tijd nader uitgewerkt; vervolgens wordt de invloed van de overige factoren beschouwd.



## 4.2.1 de invloed van de verblijftijd en de vertragingstijd

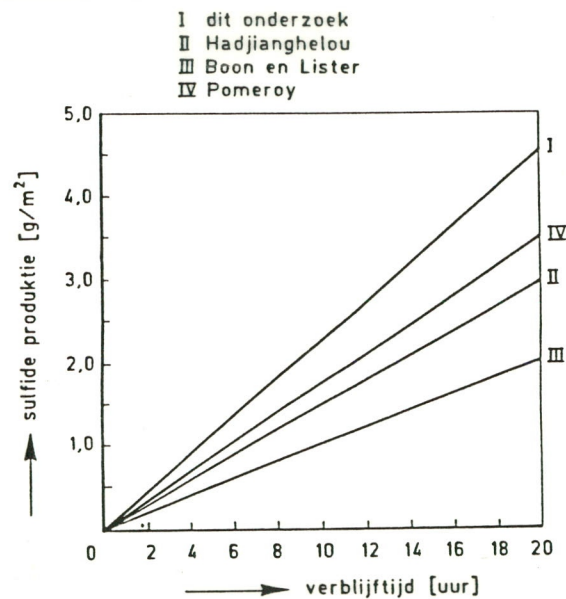
De onderlinge vergelijking van de persleidingen kan op de volgende wijze worden uitgevoerd. Bij het transport door een persleiding ontstaat sulfide in de slijmlaag aan de binnenzijde van de wand.

De opbouw van sulfide verloopt globaal volgens (7). Bij persleidingen met een kleinere diameter neemt de concentratie aan sulfide snel toe, omdat het oppervlak van de slijmlaag relatief groot is ten opzichte van het stroomlichaam.



Figuur 4: De sulfideproductie gevonden bij 107 waarnemingen aan zeven persleidingen als functie van de verblijftijd (#), en de best passende rechte lijn door de meetpunten (\_\_\_\_\_)

Uit het bovenstaande blijkt dat in Nederlandse persleidingen regelmatig meer sulfide aanwezig is, dan zou zijn voorspeld met een van de bekende vergelijkingen.



Figuur 5: De sulfideproduktie in een persleiding als functie van de verblijftijd; aangegeven zijn waarden volgens vergelijkingen uit de literatuur en waarden voorspeld met formule (10) uit dit onderzoek

Bijlage 1: meetgegevens van de persleidingen; NB CZV 99 betekent: niet gemeten

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
1	5900	15.2	7.00	0.25	1.2	0.30	0.11	3.1	614	0.09677419	al-krv(17-6-87)
2	5900	15.2	7.00	0.25	1.2	0.30	0.12	2.8	420	0.10714286	al-krv(17-6-87)
3	5900	14.9	7.20	0.25	1.4	0.35	0.13	3.1	532	0.11290323	al-krv(17-6-87)
4	5900	15.0	7.20	0.25	1.1	0.28	0.10	3.1	363	0.09032258	al-krv(17-6-87)
5	5900	15.1	7.20	0.25	1.7	0.43	0.13	3.5	406	0.12285714	al-krv(17-6-87)
6	5900	15.8	7.30	0.25	1.9	0.48	0.13	4.1	485	0.11707317	al-krv(17-6-87)
7	5900	15.9	7.30	0.25	3.0	0.75	0.18	4.4	612	0.17045455	al-krv(17-6-87)
8	5900	15.9	7.30	0.25	2.7	0.68	0.16	4.5	633	0.15111111	al-krv(17-6-87)
9	5900	15.1	7.20	0.25	4.3	1.08	0.25	4.7	413	0.22978723	al-krv(17-6-87)
10	5900	15.2	7.00	0.25	4.4	1.10	0.24	4.9	336	0.22448980	al-krv(17-6-87)
11	5900	15.2	7.00	0.25	5.5	1.38	0.27	5.4	356	0.25555556	al-krv(17-6-87)
12	5900	15.1	7.10	0.25	5.9	1.48	0.23	6.7	322	0.22089552	al-krv(17-6-87)
13	5900	15.0	7.30	0.25	5.7	1.43	0.22	7.0	353	0.20428571	al-krv(17-6-87)
14	5900	15.0	7.30	0.25	5.4	1.35	0.20	7.2	383	0.18750000	al-krv(17-6-87)
15	5900	14.8	7.30	0.25	6.5	1.63	0.25	6.8	331	0.23970588	al-krv(17-6-87)
16	5900	15.3	7.20	0.25	4.7	1.18	0.19	6.4	279	0.18437500	al-krv(17-6-87)
17	5900	15.4	7.30	0.25	3.8	0.95	0.20	5.0	227	0.19000000	al-krv(17-6-87)
18	5900	15.1	7.40	0.25	2.5	0.63	0.18	3.8	252	0.16578947	al-krv(17-6-87)
19	9100	18.5	7.60	0.18	7.0	1.23	0.20	6.4	590	0.19218750	hw-hmr(25-5-88)
20	9100	18.1	7.70	0.18	7.5	1.30	0.20	6.8	590	0.19117647	hw-hmr(25-5-88)
21	9100	18.0	7.70	0.18	7.0	1.23	0.17	7.4	560	0.16621622	hw-hmr(25-5-88)
22	9100	17.5	7.70	0.18	9.0	1.57	0.22	7.6	560	0.20657895	hw-hmr(25-5-88)
23	9100	18.0	7.70	0.18	5.2	0.91	0.11	8.5	560	0.10705882	hw-hmr(25-5-88)
24	9100	18.0	7.70	0.18	6.3	1.09	0.13	8.8	560	0.12386364	hw-hmr(25-5-88)
25	9100	16.9	7.60	0.18	8.5	1.48	0.18	8.8	595	0.16818182	hw-hmr(25-5-88)
26	9100	16.9	7.40	0.18	8.7	1.52	0.16	9.8	595	0.15510204	hw-hmr(25-5-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
27	9100	17.2	7.40	0.18	11.2	1.97	0.20	10.1	595	0.19504950	hw-hmr(25-5-88)
28	9100	17.1	7.40	0.18	11.2	1.95	0.19	10.4	560	0.18750000	hw-hmr(25-5-88)
29	9100	17.3	7.50	0.18	13.5	2.37	0.21	11.5	560	0.20608696	hw-hmr(25-5-88)
30	9100	17.6	7.50	0.18	12.0	2.09	0.17	12.6	560	0.16587302	hw-hmr(25-5-88)
31	9100	18.3	7.40	0.18	8.8	1.55	0.15	10.7	525	0.14485981	hw-hmr(25-5-88)
32	6500	18.4	7.60	0.20	5.1	1.02	0.30	3.7	655	0.27567568	NB-hmr(25-5-88)
33	6500	18.3	8.30	0.20	3.7	0.73	0.21	3.8	655	0.19210526	NB-hmr(25-5-88)
34	6500	18.2	8.10	0.20	3.9	0.78	0.20	4.2	655	0.18571429	NB-hmr(25-5-88)
35	6500	18.4	7.90	0.20	4.2	0.84	0.21	4.4	655	0.19090909	NB-hmr(25-5-88)
36	6500	18.2	7.90	0.20	4.3	0.85	0.20	4.5	620	0.18888889	NB-hmr(25-5-88)
37	6500	18.3	7.70	0.20	4.6	0.92	0.22	4.6	620	0.20000000	NB-hmr(25-5-88)
38	6500	18.3	7.80	0.20	4.0	0.80	0.18	4.8	620	0.16666667	NB-hmr(25-5-88)
39	6500	18.1	7.50	0.20	5.0	1.00	0.21	5.0	620	0.20000000	NB-hmr(25-5-88)
40	6500	18.4	7.60	0.20	6.6	1.32	0.26	5.4	500	0.24444444	NB-hmr(25-5-88)
41	6500	17.8	7.60	0.20	5.6	1.11	0.22	5.5	500	0.20181818	NB-hmr(25-5-88)
42	6500	17.5	7.50	0.20	6.3	1.27	0.24	5.7	500	0.22280702	NB-hmr(25-5-88)
43	6500	17.6	7.50	0.20	8.2	1.63	0.27	6.3	510	0.25873016	NB-hmr(25-5-88)
44	6500	18.0	7.40	0.20	5.9	1.19	0.18	6.8	510	0.17500000	NB-hmr(25-5-88)
45	6500	18.0	7.30	0.20	9.1	1.82	0.26	7.4	510	0.24594595	NB-hmr(25-5-88)
46	6500	18.1	7.40	0.20	8.0	1.60	0.24	7.0	360	0.22857143	NB-hmr(25-5-88)
47	6500	18.3	7.70	0.20	6.3	1.26	0.18	7.5	360	0.16800000	NB-hmr(25-5-88)
48	6500	18.3	7.80	0.20	4.7	0.94	0.17	6.0	360	0.15666667	NB-hmr(25-5-88)
49	2850	18.5	8.10	0.08	2.7	0.21	0.11	2.3	670	0.09130435	nhdb-hmr(25-5-88)
50	2850	19.3	8.30	0.08	3.9	0.30	0.16	2.2	670	0.13636364	nhdb-hmr(25-5-88)
51	2850	22.1	8.90	0.08	8.2	0.64	0.34	2.2	670	0.29090909	nhdb-hmr(25-5-88)
52	2850	21.9	8.50	0.08	7.6	0.60	0.32	2.2	670	0.27272727	nhdb-hmr(25-5-88)
53	2850	20.3	8.00	0.08	6.6	0.52	0.19	3.1	540	0.16774194	nhdb-hmr(25-5-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
54	2850	18.1	7.60	0.08	5.8	0.46	0.13	3.9	540	0.11794872	nhdb-hmr(25-5-88)
55	2850	20.4	7.90	0.08	13.9	1.09	0.29	4.1	390	0.26585366	nhdb-hmr(25-5-88)
56	2850	19.0	7.60	0.08	7.4	0.59	0.14	4.5	390	0.13111111	nhdb-hmr(25-5-88)
57	2850	18.2	7.60	0.08	5.5	0.43	0.10	4.7	390	0.09148936	nhdb-hmr(25-5-88)
58	2850	19.3	7.60	0.08	7.5	0.59	0.32	2.2	340	0.26818182	nhdb-hmr(25-5-88)
59	2850	19.8	7.50	0.08	7.0	0.56	0.38	1.8	340	0.31111111	nhdb-hmr(25-5-88)
60	6700	18.1	7.50	0.18	19.8	3.47	0.22	16.1	99	0.21552795	HD-ZWK(22-6-88)
61	6700	18.2	7.50	0.18	17.1	2.99	0.18	16.6	99	0.18012048	HD-ZWK(22-6-88)
62	6700	18.2	7.40	0.18	20.1	3.52	0.21	16.9	99	0.20828402	HD-ZWK(22-6-88)
63	6700	18.1	7.40	0.18	19.2	3.36	0.20	17.0	99	0.19764706	HD-ZWK(22-6-88)
64	6700	18.2	7.30	0.18	19.7	3.44	0.20	17.6	99	0.19545455	HD-ZWK(22-6-88)
65	6700	18.2	7.20	0.18	19.5	3.41	0.20	17.6	99	0.19375000	HD-ZWK(22-6-88)
66	6700	18.2	7.10	0.18	19.8	3.47	0.21	17.1	99	0.20292398	HD-ZWK(22-6-88)
67	6700	18.5	7.20	0.18	21.2	3.71	0.22	17.5	99	0.21200000	HD-ZWK(22-6-88)
68	6700	18.2	7.20	0.18	21.4	3.74	0.22	17.4	99	0.21494253	HD-ZWK(22-6-88)
69	6700	18.1	7.30	0.18	22.2	3.89	0.23	17.5	99	0.22228571	HD-ZWK(22-6-88)
70	6700	18.1	7.40	0.18	21.5	3.77	0.22	17.5	99	0.21542857	HD-ZWK(22-6-88)
71	5200	17.4	6.90	0.18	24.3	4.25	0.27	16.3	99	0.26073620	NV-ZWH(22-6-88)
72	5200	17.4	7.00	0.18	22.1	3.87	0.25	16.1	99	0.24037267	NV-ZWH(22-6-88)
73	5200	17.5	7.20	0.18	22.8	3.99	0.27	15.2	99	0.26250000	NV-ZWH(22-6-88)
74	5200	17.5	7.50	0.18	21.8	3.81	0.26	15.2	99	0.25065789	NV-ZWH(22-6-88)
75	5200	17.5	7.20	0.18	23.7	4.15	0.27	15.5	99	0.26774194	NV-ZWH(22-6-88)
76	5200	17.5	7.20	0.18	21.4	3.75	0.25	15.2	99	0.24671053	NV-ZWH(22-6-88)
77	5200	17.5	7.30	0.18	22.9	4.01	0.28	14.9	99	0.26912752	NV-ZWH(22-6-88)
78	5200	17.6	7.30	0.18	21.7	3.80	0.27	14.3	99	0.26573427	NV-ZWH(22-6-88)
79	5200	17.5	7.30	0.18	22.2	3.89	0.29	13.9	99	0.27985612	NV-ZWH(22-6-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
107	5900	19.3	7.30	0.25	6.8	1.71	0.18	9.7	485	0.17628866	al-krv(28-6-88)
108	4100	18.6	7.40	0.30	6.2	1.85	0.30	6.2	1140	0.29838710	SC-KRV(28-6-88)
109	4100	18.6	7.60	0.30	4.2	1.27	0.31	4.1	1140	0.30975610	SC-KRV(28-6-88)
110	4100	18.6	7.60	0.30	2.4	0.71	0.24	3.0	835	0.23666667	SC-KRV(28-6-88)
111	4100	19.7	7.60	0.30	3.1	0.94	0.29	3.2	835	0.29375000	SC-KRV(28-6-88)
112	4100	19.8	7.60	0.30	4.3	1.29	0.39	3.3	845	0.39090909	SC-KRV(28-6-88)
113	4100	19.7	7.50	0.30	5.2	1.57	0.47	3.3	845	0.47575758	SC-KRV(28-6-88)
114	4100	19.6	7.50	0.30	4.4	1.33	0.43	3.1	845	0.42903226	SC-KRV(28-6-88)
115	4100	19.5	7.50	0.30	4.7	1.40	0.44	3.2	845	0.43750000	SC-KRV(28-6-88)
116	4100	19.3	7.40	0.30	5.4	1.61	0.46	3.5	845	0.46000000	SC-KRV(28-6-88)
117	4100	19.4	7.40	0.30	4.4	1.31	0.36	3.6	975	0.36388889	SC-KRV(28-6-88)
118	4100	19.4	7.40	0.30	6.2	1.86	0.49	3.8	975	0.48947368	SC-KRV(28-6-88)
119	4100	19.4	7.50	0.30	6.7	2.03	0.38	5.3	820	0.38301887	SC-KRV(28-6-88)
120	4100	19.4	7.40	0.30	6.5	1.94	0.34	5.8	820	0.33448276	SC-KRV(28-6-88)
121	4100	19.1	7.40	0.30	6.2	1.86	0.28	6.7	820	0.27761194	SC-KRV(28-6-88)

nr.	lengte	temp	pH	Hydr	[S]	R*[S]	FLUX	verbl	CZV	R*[S]/verbl	label
80	5200	17.5	7.40	0.18	22.6	3.95	0.29	13.8	99	0.28623188	NV-ZWH(22-6-88)
81	5200	17.3	7.50	0.18	22.2	3.89	0.34	11.9	99	0.32689076	NV-ZWH(22-6-88)
82	5200	16.6	7.50	0.18	13.3	2.33	0.21	11.5	99	0.20260870	NV-ZWH(juni1988)
83	5200	17.0	7.60	0.18	13.5	2.36	0.26	9.3	99	0.25376344	NV-ZWH(8-6-88)
84	5200	16.7	7.80	0.18	15.9	2.78	0.30	9.5	99	0.29263158	NV-ZWH(8-6-88)
85	5200	16.7	7.10	0.18	23.3	4.08	0.27	15.2	99	0.26842105	NV-ZWH(8-6-88)
86	5200	16.7	7.00	0.18	23.7	4.15	0.28	15.3	99	0.27124183	NV-ZWH(8-6-88)
87	6700	17.0	7.90	0.18	13.9	2.43	0.22	11.3	99	0.21504425	HD-ZWH(8-6-88)
88	6700	17.4	8.00	0.18	16.7	2.92	0.26	11.6	99	0.25172414	HD-ZWH(8-6-88)
89	6700	17.4	7.80	0.18	17.8	3.12	0.28	11.3	99	0.27610619	HD-ZWH(8-6-88)
90	6700	17.3	7.70	0.18	18.7	3.27	0.28	11.9	99	0.27478992	HD-ZWH(8-6-88)
91	5900	18.7	7.30	0.25	6.8	1.70	0.18	9.6	490	0.17708333	al-krv(28-6-88)
92	5900	18.5	7.30	0.25	6.1	1.52	0.17	9.0	490	0.16888889	al-krv(28-6-88)
93	5900	18.8	7.30	0.25	4.5	1.13	0.15	7.4	490	0.15270270	al-krv(28-6-88)
94	5900	18.8	7.30	0.25	2.2	0.55	0.10	5.4	365	0.10185185	al-krv(28-6-88)
95	5900	19.1	7.40	0.25	1.8	0.44	0.08	5.3	365	0.08301887	al-krv(28-6-88)
96	5900	19.2	7.50	0.25	2.2	0.56	0.09	5.9	475	0.09491525	al-krv(28-6-88)
97	5900	19.3	7.50	0.25	5.0	1.25	0.20	6.2	475	0.20161290	al-krv(28-6-88)
98	5900	19.3	7.50	0.25	5.3	1.32	0.21	6.2	475	0.21290323	al-krv(28-6-88)
99	5900	19.2	7.20	0.25	5.0	1.24	0.20	6.1	395	0.20327869	al-krv(28-6-88)
100	5900	19.1	7.40	0.25	5.3	1.34	0.23	5.9	395	0.22711864	al-krv(28-6-88)
101	5900	19.1	7.40	0.25	4.3	1.09	0.18	6.1	395	0.17868852	al-krv(28-6-88)
102	5900	19.1	7.40	0.25	6.5	1.64	0.27	6.1	430	0.26885246	al-krv(28-6-88)
103	5900	19.0	7.20	0.25	7.9	1.97	0.31	6.4	430	0.30781250	al-krv(28-6-88)
104	5900	19.0	7.30	0.25	7.6	1.91	0.26	7.3	430	0.26164384	al-krv(28-6-88)
105	5900	19.1	7.30	0.25	6.6	1.66	0.21	7.9	485	0.21012658	al-krv(28-6-88)
106	5900	19.0	7.30	0.25	6.3	1.56	0.19	8.4	485	0.18571429	al-krv(28-6-88)

Bijlage 2 : Lineaire regressie van:

- a. sulfideproductie en verblijftijd voor alle waarnemingen met CZV<700 of niet gemeten,
- b. sulfideproductie en CZV, verblijftijd, temperatuur, lengte, pH en hydraulische straal, voor alle waarnemingen met CZV<700 of niet gemeten

Dependent variable is: R\*[S]  
 243 total cases of which 136 are missing  
 $R^2 = 88.9\%$   $R^2(\text{adjusted}) = 88.8\%$   
 $s = 0.4094$  with  $107 - 2 = 105$  degrees of freedom

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-ratio
Regression	140.755	1	141	840
Residual	17.6020	105	0.167638	

Variable	Coefficient	s.e. of Coeff	t-ratio
Constant	-0.276600	0.0821	-3.37
verbl	0.245285	0.0085	29.0

Dependent variable is: R\*[S]  
 243 total cases of which 167 are missing  
 $R^2 = 71.8\%$   $R^2(\text{adjusted}) = 69.3\%$   
 $s = 0.2819$  with  $76 - 7 = 69$  degrees of freedom

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-ratio
Regression	13.9275	6	2.321	29.2
Residual	5.48313	69	0.079466	

Variable	Coefficient	s.e. of Coeff	t-ratio
Constant	-0.514983	1.230	-0.419
CZV	-0.000244	0.0004	-0.628
verbl	0.182133	0.0233	7.81
temp	0.031924	0.0287	1.11
lengte	-0.000014	0.0000	-0.401
pH	0.000855	0.1782	0.005
Hydr	0.822435	0.8515	0.966