

**DUURZAAMHEID RIOOLLEIDINGEN
EEN LITERATUURSTUDIE NAAR AANTASTINGSMECHANISMEN**

IBBC

CHO

**DUURZAAMHEID RIOOLLEIDINGEN
EEN LITERATUURSTUDIE NAAR AANTASTINGSMECHANISMEN**

R.B. Polder



COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO – 's-Gravenhage – 1987

RAPPORTEN EN NOTA'S No. 17

CIP-GEGEVENS KONINKLIJKE BIBLIOTHEEK, DEN HAAG

Polder, R.B.

Duurzaamheid rioolleidingen: een literatuurstudie naar aantastingsmechanismen / R.B. Polder; [red. J.C. Hooghart]. – 's-Gravenhage: Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO. – III. – (Rapporten en nota's/Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO; no. 17)

Met lit. opg. – Met samenvatting in het Engels en Duits.

ISBN 90-6743-100-1

SISO 649.1 UDC 620.1:628.2

Trefw.: rioleringen; materiaalonderzoek.

**DUURZAAMHEID RIOOLLEIDINGEN
EEN LITERATUURSTUDIE NAAR AANTASTINGSMECHANISMEN**

**COPYRIGHT © Nederlandse organisatie voor
toegepast natuurwetenschappelijk onderzoek
TNO, 1987**

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord	4
Samenvatting	5
Summary	8
Zusammenfassung	10
1 Inleiding en probleemstelling	13
2 Door de literatuur bestreken gebied	15
3 Inhoud onderzochte literatuur	17
3.1 Vermindering van de duurzaamheid van beton door BZA (Biogene Zwavelzuur Aantasting)	17
3.1.1 Inleiding	17
3.1.2 Het mechanisme van BZA	17
3.1.3 Parameters die BZA bepalen	21
3.1.3.1 Sulfidevorming	21
3.1.3.2 Overdracht naar de atmosfeer	26
3.1.3.3 Zwavelzuurvorming	28
3.1.4 Maatregelen tegen BZA	31
3.1.4.1 Zwavelgehalte rioolwater	31
3.1.4.2 Diverse stroomgrootheden	31
3.1.4.3 Sulfidevorming in het water	32
3.1.4.4 Overdracht van sulfide via de atmosfeer	36
3.1.4.5 De zwavelzuurvorming	36
3.1.4.6 De betoneigenschappen	36
3.1.5 Bescherming van beton tegen BZA	37
3.2 Aantasting van beton door andere mechanismen dan BZA	39
3.3 Vermindering van de duurzaamheid van voegmaterialen	40
3.4 Vermindering van de duurzaamheid van kunststof buizen	40
4 Discussie en ontbrekende kennis	41
4.1 Beton	41
4.2 Andere materialen	42

5 Voorstellen voor verder onderzoek	43
5.1 Nader onderzoek naar de aantasting van beton	43
5.2 Nader onderzoek naar beschermings- en bestrijdings- maatregelen	44
5.3 Kosten en tijdsduur van de voorgestelde onderzoeken	45
Referenties	47

VOORWOORD

Het hier gerapporteerde onderzoek is tot stand gekomen naar aanleiding van een vraag naar de meest recente inzichten op het gebied van aantastingsmechanismen van rioolleidingen. Deze vraag werd gesteld door de Werkgroep Riolering uit de Contactgroep Stedelijke Hydrologie.

Deze Contactgroep functioneert onder de Commissie voor Hydrologisch Onderzoek TNO. Het onderzoek werd uitgevoerd door het Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies.

Deze studie is een uitwerking van een van de voorstellen gedaan in het rapport "Roolleidingen/Programmavoorstellen voor op innovatie gericht onderzoek", dat werd opgesteld door B.G. ten Dam van IBBC-TNO.

Door de Werkgroep Riolering werd aan het onderzoek bijgedragen met financiële middelen en door inbreng van deskundigheid. De inbreng van Dienst Gemeentewerken Rotterdam, Dienst Openbare Werken Amsterdam, Gemeentelijke Dienst Openbare Werken Enschede, Publieke Werken Tilburg, Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders Lelystad, Ingenieursbureau Witteveen en Bos Deventer, bij dit onderzoek is van groot belang geweest.

De in dit rapport voorgestelde onderzoeken zijn aan de stichting RIONED aangeboden in het kader van de samenwerking tussen de Contactgroep Stedelijke Hydrologie en RIONED.

Ir. F.H.M. van de Ven

SAMENVATTING

Dit rapport beschrijft de resultaten van een literatuuronderzoek naar de aantasting van rioolleidingen. De literatuur is zowel brongericht als systematisch benaderd.

Het blijkt dat aantasting van beton in riolen door één speciaal mechanisme verreweg de meeste aandacht krijgt in de literatuur. Dit mechanisme staat bekend als Biogene Zwavelzuur Aantasting (BZA).

Het proces loopt kort weergegeven als volgt. Sulfaat in het rioolwater wordt bij gebrek aan zuurstof gereduceerd (door bacteriën) tot sulfide. Dit gaat als zwavelwaterstof via de atmosfeer over naar de condenslaag op het bovenste deel van de buiswand. Bacteriën van enkele soorten *Thiobacillus* oxideren het sulfide tot zwavelzuur. Het zwavelzuur lost de cementsteen op en het beton verliest zijn samenhang.

Onder voor het proces gunstige omstandigheden kan deze aantasting een materiaalverlies van vele millimeters per jaar veroorzaken.

Dit mechanisme is als zodanig diepgaand onderzocht. Er zijn formules om het optreden van aantasting te voorspellen en om de aantastingssnelheid te bepalen. Er bestaan echter verschillen tussen formules van diverse auteurs en de nauwkeurigheid van de uitkomsten is waarschijnlijk klein. De berekeningen gaan uit van verschillende combinaties van parameters, waarvan de belangrijkste zijn: het verval van de leiding, de dimensies van de leiding (inclusief het bevochtigde oppervlak), het (biochemisch of chemisch) zuurstofverbruik van het rioolwater, de temperatuur, de afvalwaterstroom en de hoeveelheid om te zetten alkali in het beton. De snelheid van de aantasting van de rioolwand kan nader bepaald worden door de pH-waarde van het condensvocht op de buiswand te meten, en het aantal *Thiobacilli* per eenheid van oppervlak te tellen.

De aantasting van beton door BZA kan worden bestreden door:

- hydraulische maatregelen (snelheid, verblijftijd),
- beluchten van het water of toevoegen van oxiderende chemicaliën,
- beschermen van het beton door coaten,
- beschermen van het beton door bekleden met kunststof materiaal.

Daar de literatuur niet eenduidig is over het belang van diverse parameters, wordt voorgesteld nader onderzoek hiernaar te verrichten, met als

doel de nauwkeurigheid te verbeteren. Verder lijkt het nuttig te zoeken naar moderne (eenvoudig te bedienen en/of geautomatiseerde) meetmethoden ter bepaling van de relevante parameters.

Er blijkt verschil van mening te bestaan over verschillende vormen van chemische bestrijding, en vooral over de kosten daarvan. Het bestuderen van de ervaringen in binnen- en buitenland lijkt een zinvol onderzoek.

Het coaten van beton wordt in de literatuur en door rioolbeheerders als een onvoldoende duurzame bescherming beschouwd.

De onderzochte literatuur geeft weinig informatie over de kwaliteit, de duurzaamheid en de economische aspecten van verschillende bekledingsmaterialen. Voorgesteld wordt hier nader onderzoek naar te verrichten.

Er bestaat verschil van inzicht in de onderzochte literatuur over de beste betonsamenstelling (in het licht van bestandheid en optimale duurzaamheid). Vooral de keuze van de cementsoort maar ook van het toeslagmateriaal, kan grote invloed hebben op de levensduur. Er wordt aanbevolen verder onderzoek te verrichten naar deze voor de Nederlandse praktijk belangrijke kwestie.

Andere aantastingsprocessen die mogelijk van belang zijn voor de duurzaamheid van riolen komen in de onderzochte literatuur slechts in geringe mate voor. Hierbij kan gedacht worden aan:

- Aantasting van beton door andere mechanismen dan BZA. Beoordeling van het (omringende) milieu op basis van DIN 3040 en TGL 11357 voldoet hier waarschijnlijk.
- Aantasting van elastische voegmaterialen, onder andere door bacteriën. Het belang hiervan kan moeilijk worden aangegeven, en zou nader kunnen worden bekeken.

Het rapport wordt afgesloten met kort geformuleerde voorstellen voor nader onderzoek, te weten:

- onderzoek naar de aantastingssnelheid van beton als functie van de samenstelling, met de nadruk op de cementsoort en het type toeslagmateriaal;

- onderzoek naar de geldigheid van diverse voorspellende formules, waaruit mogelijk een voorspellend model zal resulteren;
- onderzoek naar moderne, eenvoudige en/of geautomatiseerde meetmethoden ter bepaling van de relevante rioolparameters (hydraulisch, chemisch);
- onderzoek naar de economische en technische aspecten van bekledingsmaterialen voor beton;
- onderzoek naar economische en technische aspecten van chemische bestrijdingswijzen van sulfidevorming in riolen;
- onderzoek naar de mechanismen bij de aantasting van afdichtingsmaterialen en naar het functioneren van de afdichtingen op langere termijn.

SUMMARY

This report gives a survey of the literature on degradation of sewer pipes.

One particular mechanism of degradation of concrete sewer pipes dominates the literature. It is known as Biogenic Sulfuric acid Attack (BSA). It can be summarized as follows. Under anaerobic conditions sulfate in the sewage is reduced to sulfide by the action of bacteriae. At the pH values usually prevailing in sewers hydrogen sulfide is liberated to the atmosphere in the form of hydrogen sulfide (hence the traditional term Hydrogen sulfide Corrosion), where it is absorbed by the water film covering the upper surface of the pipe. Here aerobic conditions prevail, allowing Thiobacilli to oxidize the sulfide to sulfuric acid, which in turn dissolves the hardened cement paste, causing loss of integrity of the concrete.

Under conditions favourable for the process BSA can cause a loss of material of many millimeters per year.

The mechanism of BSA has been thoroughly investigated, resulting in several equations to predict the occurrence of attack and its rate. Calculations involve various combinations of: dimensions of the pipeline, oxygen content and demand of the sewage, temperature, sewage flow and alkali content of the concrete. However, differences exist between various authors' equations, and their accuracy is considered to be poor.

Once the attack has started its intensity can be estimated from the pH of the water film on the upper part of the pipe and from the number of Thiobacilli per unit surface area.

In order to elucidate some of the existing controversies three studies are proposed concerning the parameters governing BSA. One programme investigates the influence of concrete parameters (cement type, e.g. portland vs blast furnace slag cement, aggregate type, quartz vs limestone etc) on the rate of degradation. The second programme is aimed at the influence of sewer parameters (oxygen content and demand, flow rate, temperature etc) on the occurrence of sulfuric acid production. A third study will investigate the possibilities of measuring the relevant

parameters by means of either automated methods or equipment that can be operated by relatively unskilled personnel.

Concrete pipes can be protected against BSA by:

- hydraulic measures (e.g. flow rate),
- aerating the sewage or the addition of chemicals,
- surface coatings,
- linings of impervious material.

The various chemical methods of reducing sulfide build up are judged very differently in literature (especially with respect to costs). In addition to the aforementioned research projects it is proposed to investigate the existing experience with these methods, including the economic aspects.

Surface coating for concrete protection in sewers is rejected by the majority of the sources investigated, because the coatings invariably get detached after a short time.

Protection of concrete by inert, polymer linings is regarded as successful, but the choice of the material seems to be a matter of taste. An investigation is proposed into the economic and durability aspects of polymer materials both for new pipes and for relining existing pipes.

The degradation of concrete by the surrounding soil or water can be evaluated using existing Standards.

Very little information has been found concerning the degradation of the flexible joint materials, e.g. caused by bacterial attack. However, this may be of importance in connection with the inflow of groundwater (leaving cavities), or the outflow of sewage (causing pollution problems). A research programme concerning this matter is proposed.

ZUSAMMENFASSUNG

Dieser Bericht beschreibt die Ergebnisse einer Literaturforschung nach dem Angreifen der Kanalisationsrohren. Die Literatur ist sowohl quellenmässig als auch systematisch angegangen worden.

Es stellt sich heraus dass das Angreifen Betons in Abwasserkanälen von einem besonderen Mechanismus weitaus die grösste Aufmerksamkeit in der Literatur auf sich zu lenken weiss. Dieser Mechanismus ist bekannt als Biogene Schwefelsäure Korrosion (BSK). Der Prozess vollzieht sich kurz wiedergegeben folgendermassen. Das Sulfat im Abwasser wird in Ermangelung Sauerstoffes (durch Bakterien) zu Sulfid reduziert. Jenes geht als Schwefelwasserstoff durch die Atmosphäre über in die Kondenswasserschicht auf dem obersten Teil der Rohrwand. Bakterien einiger Sorten von Thiobacillus oxidieren das Sulfid zu Schwefelsäure. Die Schwefelsäure löst den Zementstein auf und der Beton verliert seine Kohäsion.

Unter Umständen die dem Prozess begünstigen kann dieses Angreifen einen Materialverlust von jährlich vielen Millimetern verursachen.

Dieser Mechanismus ist als solcher gründlich untersucht worden. Es gibt Formeln die die Erscheinung des Angreifens und dessen Geschwindigkeit vorhersagen und bestimmen können. Es bestehen jedoch Unterschiede zwischen Formeln verschiedener Autoren und die Genauigkeit der Ergebnisse ist wahrscheinlich klein. Die Berechnungen gehen aus von verschiedenen Kombinationen von Parametern deren wichtigste sind:
das Gefälle der Leitung, die Dimensionen der Leitung (einschliesslich der befeuchteten Oberfläche), der (biochemische oder chemische) Sauerstoffverbrauch des Abwassers, die Temperatur, der Abwasserabfluss, die umzusetzende Alkalimenge im Beton.

Die Angreifgeschwindigkeit der Kanalisationswand kann näher bestimmt werden durch den pH-Wert der Kondensfeuchtigkeit auf der Rohrwand zu messen, und die Thiobacillenzahl pro Oberfläche-Einheit zu zählen.

Das Angreifen Betons durch BSK kann vorgebeugt werden durch:

- hydraulische Massnahmen (Geschwindigkeit, Aufenthaltszeit),
- Belüften des Abwassers oder Zufügung oxidierender Chemikalien,
- Schätzung des Betons durch Beschichtungen,

- Schützung des Betons durch Auskleidung mit Platten oder Folien aus Kunststoffmaterial.

Da die Literatur nicht eindeutig ist hinsichtlich der Wichtigkeit verschiedener Parametern, wird vorgeschlagen nähere Forschungen danach zu verrichten, mit dem Ziel die Genauigkeit zu verbessern. Weiter scheint es nützlich nach modernen (einfach zu bedienenden und/oder automatisierten) Messmethoden zur Bestimmung der relevanten Parameter zu suchen.

Es soll Meinungsunterschiede über verschiedene Formen chemischer Bekämpfung geben, und vor allem über deren Kosten. Das Studieren der Erfahrungen in In- und Ausland scheint eine sinnvolle Untersuchung zu sein.

Das Beschichten des Betons wird in der Literatur und durch Kanalisationsverwalter als eine ungenügende beständige Schützung betrachtet.

Die untersuchte Literatur gibt wenig Information über die Qualität, die Dauerhaftigkeit und die wirtschaftlichen Aspekte der verschiedenen Auskleidungsmaterialien. Vorgeschlagen wird dieses Gebiet weiter nachzuforschen.

Es gibt Einsichtsunterschiede in der durchforschten Literatur über die beste Betonzusammensetzung (im Licht der Bestandtheit und optimaler Dauerhaftigkeit). Vor allem der Wahl der Zementart aber auch des Zuschlagmaterials, kann grossen Einfluss auf die Lebensdauer ausüben. Es wird empfohlen weiterzuforschen nach dieser für die niederländische Praxis wichtigen Frage.

Andere Angreifprozesse die vielleicht von Bedeutung sind für die Dauerhaftigkeit der Kanalisationen kommen in der untersuchten Literatur nur in geringem Masse vor. Dabei denke man an:

- Angreifen des Betons durch andere Mechanismen als BSK. Beurteilung der Umwelt auf der Grundlage des DIN 4030 und TGL 11357 reicht hier wahrscheinlich aus;
- Angreifen elastischer Fügmaterialien, u.a. durch Bakterien; Dessen Wichtigkeit kann schwer angegeben werden, und sollte deswegen näher untersucht werden müssen.

Dieser Bericht endet mit kurz formulierten Vorschlägen für eine eingehender Untersuchung, nämlich:

- Untersuchung nach der Angreifsgeschwindigkeit Betons als Funktion der Zusammensetzung, mit Nachdruck auf der Zementart und den Typus des Zuschlagmaterials;
- Untersuchung nach der Gültigkeit verschiedener vorhersagenden Formeln aus denen man möglicherweise ein vorhersagendes Modell schliessen kann;
- Untersuchung nach modernen, einfachen und/oder automatisierten Messmethoden zur Bestimmung der relevanten Kanalisationsparameter (hydraulisch, chemisch);
- Untersuchung nach wirtschaftlichen und technischen Aspekten der Auskleidungsmaterialien für Beton;
- Untersuchung nach den wirtschaftlichen und technischen Aspekte chemischer Bekämpfungsmethoden der Sulfidbildung in Kanalisationen;
- Untersuchung nach Mechanismen bei dem Angreifen der Abdichtungsmaterialien und nach dem langfristigen Funktionieren der Abdichtungen.

1 INLEIDING EN PROBLEEMSTELLING

De waarde van de Nederlandse rioolstelsels bedraagt meerdere tientallen miljarden guldens. Beheer, onderhoud en renovatie staan sinds enige tijd in de belangstelling bij overheid en bedrijfsleven. Dit mede omdat aan rioolleidingen problemen zijn geconstateerd op het gebied van sterkte (draagvermogen), duurzaamheid (aantasting), waterdichtheid (in- en uitstroom) en profielverstoringen (verstoppingen), waardoor het functioneren wordt bedreigd en de levensduur wordt bekort.

Voor beheerders van rioolsystemen is het van groot belang de bedreigingen door bovenstaande mechanismen te kennen, te kunnen kwantificeren en te kunnen inbrengen in een onderhoudsbeleid.

Het uitgevoerde literatuuronderzoek heeft tot doel de bestaande kennis op het gebied van de vermindering van de duurzaamheid te inventariseren, en de ontbrekende kennis te signaleren. Hieruit worden voorstellen voor verder onderzoek afgeleid.

Met vermindering van de duurzaamheid wordt in dit verband bedoeld het verminderen van de gewenste eigenschappen van de materialen van rioolleidingen door fysische en chemische inwerking van het milieu in en om het systeem. Onvoldoende functioneren van leidingen als gevolg van ongelijke zetting en onverwachte belastingen blijven buiten beschouwing.

Gezien de historie van het Nederlandse rioolnet is informatie gezocht over de volgende materialen:

- beton (incl. cementsoort, ongewapend en gewapend),
- metselwerk,
- kunststof,
- en voegmaterialen.

Het milieu in en om het rioolsysteem dat voor zo ver mogelijk is betrokken in het onderzoek omvatte:

- hemelwater,
- vuilwater,
- grond(water), inclusief verontreinigingen,
- micro-organismen,
- de temperatuur van het rioolmilieu.

Dit onderzoek is gebaseerd op aanwezige kennis bij enkele grote rioolbeheerders, publicaties over recent Duits onderzoek naar aantastingsmechanismen, en de verder relevant geachte literatuur. Hiertoe is onder andere een systematische literatuurrecherche verricht.

De literatuur die in hoofdstuk 6 wordt genoemd bevat naast artikelen waar in de tekst van het rapport naar wordt verwezen, ook stukken die als achtergrondinformatie zijn gebruikt.

2 DOOR DE LITERATUUR BESTREKEN GEBIED

Zonder hier op de inhoud van de onderzochte literatuur in te gaan (zie hiervoor hoofdstuk 3) kan het bestreken gebied globaal beschreven worden als:

- beton, met de nadruk op aantasting van de cementsteen door "Biogene Zwavelzuur Aantasting" (BZA);
- chemische bestrijding van BZA;
- rioolconstructies en -gebruiksregels om BZA te vermijden;
- beschermingsmaatregelen tegen BZA, zoals coaten en bedekken met folies en platen.

Slechts summier of weinig diepgaand is er literatuur aangetroffen over:

- metselwerk;
- de invloed van de temperatuur;
- betonsamenstelling (cementsoort!) en BZA;
- levensduurschattingen;
- aantasting van (materialen voor) voegen tussen buizen.

Vrijwel geen informatie die specifiek op riolen betrekking heeft, is aangetroffen over:

- aantasting van beton onder de waterlijn, bijv. door (illegale) lozing van speciale stoffen;
- aantasting van beton door grondwater (buitenzijde!);
- aantasting van wapeningsstaal;
- aantastingsmechanismen van kunststof als buismateriaal;
- de invloed van hemelwater en de problematiek van gescheiden, versus gemengde stelsels van hemelwater- en rioolwaterafvoer.

Gesprekken met enkele beheerders leverden de volgende van belang geachte onderwerpen op:

- aantasting door grondwater;
- invloed van de temperatuur (die kan plaatselijk sterk verschillen);
- relatie tussen diverse aantastingsprocessen en eenvoudige kengrootheden als vullingsgraad, stroomsnelheid en chemische samenstelling van het rioolwater;
- tegen aantasting bestand zijnde mortel voor de reparatie van de voegen in bestaand metselwerk;
- voorspellen van de resterende levensduur;

- de invloed van de cementsoort.

Van minder groot belang zijn volgens de beheerders aantasting onder water en illegale lozingen.

De omvang van de als zodanig waargenomen schade als gevolg van chemische aantasting loopt sterk uiteen. In Rotterdam spreekt men van enkele gevallen in jaren, in Amsterdam wordt dit regelmatig gesignaleerd. Naar verluidt komen in het land deze schades toch nogal eens voor, vooral waar afvalwater over enige afstand naar regionale zuiveringsinstallaties wordt getransporteerd. Er moet rekening mee worden gehouden, dat het aantal schadegevallen in de toekomst zal kunnen toenemen. Dit kan worden veroorzaakt door enerzijds intensievere inspectie, waardoor het aantal waarnemingen van schade toeneemt. Anderzijds moet rekening worden gehouden met de mogelijkheid dat stelsels met het oog op verwachte groei worden overgedimensioneerd, waardoor vergelijkbare aantasting kan ontstaan als in Hamburg.

3 INHOUD ONDERZOCHE LITERATUUR

3.1 Vermindering van de duurzaamheid van beton door biogene zwavel-zuur-aantasting (BZA)

3.1.1 Inleiding

Biogene zwavelzuuraantasting (BZA) overheerst sterk in de onderzochte literatuur als aantastingsmechanisme dat in de praktijk aanleiding geeft tot grote schade. Deze schade kan optreden op onverwachte tijd en plaats. Het is een ingewikkeld mechanisme, waarbij veel aspecten een rol spelen. Hieronder worden achtereenvolgens het mechanisme, de bepalende parameters en de mogelijke tegenmaatregelen besproken.

3.1.2 Het mechanisme van BZA

Reeds sinds circa 1945 is het mechanisme van BZA globaal bekend [Pomeroy 1980, Parker 1950]. Kwalitatief kan het als volgt beschreven worden. Het rioolwater bevat vrijwel steeds opgeloste zwavelverbindingen. Deze kunnen worden omgezet in sulfide op de volgende wijzen.

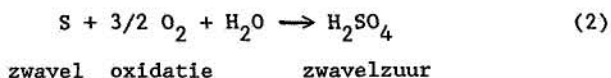
- a. Op de buiswand onder water bevindt zich een slijm laag, waarvan ten minste een gedeelte zuurstofarm is (anaeroob). In dit anaerobe laagje wordt sulfaat gereduceerd tot sulfide door een bacteriesoort, namelijk *Vibrio desulfuricans* [Pomeroy, 1980], waarna het sulfide het rioolwater in diffundeert. Het kan door aanwezige zuurstof weer geoxideerd worden tot sulfaat of thiosulfaat en is dan onschadelijk. Een deel van het sulfide kan als H_2S -gas (waterstofsulfide, zwavelwaterstof, een zeer giftig gas met de bekende geur van rotte eieren) vrijkomen in de riool atmosfeer. Dit sulfidevormende proces is vrij goed bestudeerd (zie onder). De betreffende reactievergelijking luidt:



sulfaat reductie sulfide

- b. Het tweede proces waardoor sulfide kan ontstaan in rioolwater is de afbraak van eiwitten, (en speciaal de eiwitbouwstenen cysteine en methionine) door microben. Het leidt tot vorming van H_2S en organische (poly)sulfiden. Dit proces is minder goed bekend dan de reductie in de anaerobe slijmhuid. Het schijnt weinig beïnvloedbaar te zijn door maatregelen van buitenaf [Bock 1983].
- c. Apart onderscheiden kan worden de vorming van sulfide in zand- of slibachtige afzettingen op de bodem van riolen. Het mechanisme is waarschijnlijk hetzelfde als bij a.

Het volgens boven beschreven processen ontstane H_2S (en organische polysulfiden) kan in het rioolwater worden geoxideerd door opgeloste zuurstof, waarbij reactie(1) in omgekeerde richting verloopt. H_2S kan echter ook via de rioolatmosfeer opgenomen worden in de condenslaag die zich op het bovenwatergedeelte van de buis bevindt. Er is een condenslaag aanwezig bij relatieve vochtigheden van meer dan 85% [Thistlethwayte, 1979]. Er wordt aangenomen dat H_2S en andere sulfiden (bij aanwezigheid van zuurstof) in de condenslaag of in de atmosfeer omgezet worden door chemische oxidatie (dat wil zeggen zonder tussenkomst van microben) tot elementaire zwavel (S). Volgens de meest recente onderzoeken is deze elementaire zwavel de belangrijkste voedingsbron voor de aanwezige zwaveloxiderende bacteriën. Van deze bacteriën bestaan diverse soorten. Zij oxideren zwavel met zuurstof tot zwavelzuur, en onttelen daaraan hun energie, volgens de reactievergelijking:

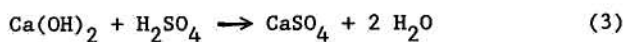


In de literatuur bestaat overeenstemming over het volgende globale verloop van het aantastingsproces op de buiswand.

De bacteriesoorten *Thiobacillus intermedius* en/of *T. novellus* produceren zwavelzuur in lage concentraties. Hun aantal vermindert sterk wanneer hierdoor de pH van het condensvocht daalt beneden 6. Tegelijkertijd gaat een andere bacteriesoort, *Thiobacillus neapolitanus*, domineren, en de aantasting wordt voortgezet. De volgende en laatste fase in de vorming

van zwavelzuur, vanaf pH < 5 wordt beheerst door Thiobacillus thiooxidans, ook wel T. concretivorus (betoneter) genoemd, die een pH van circa 1,0 kan overleven.

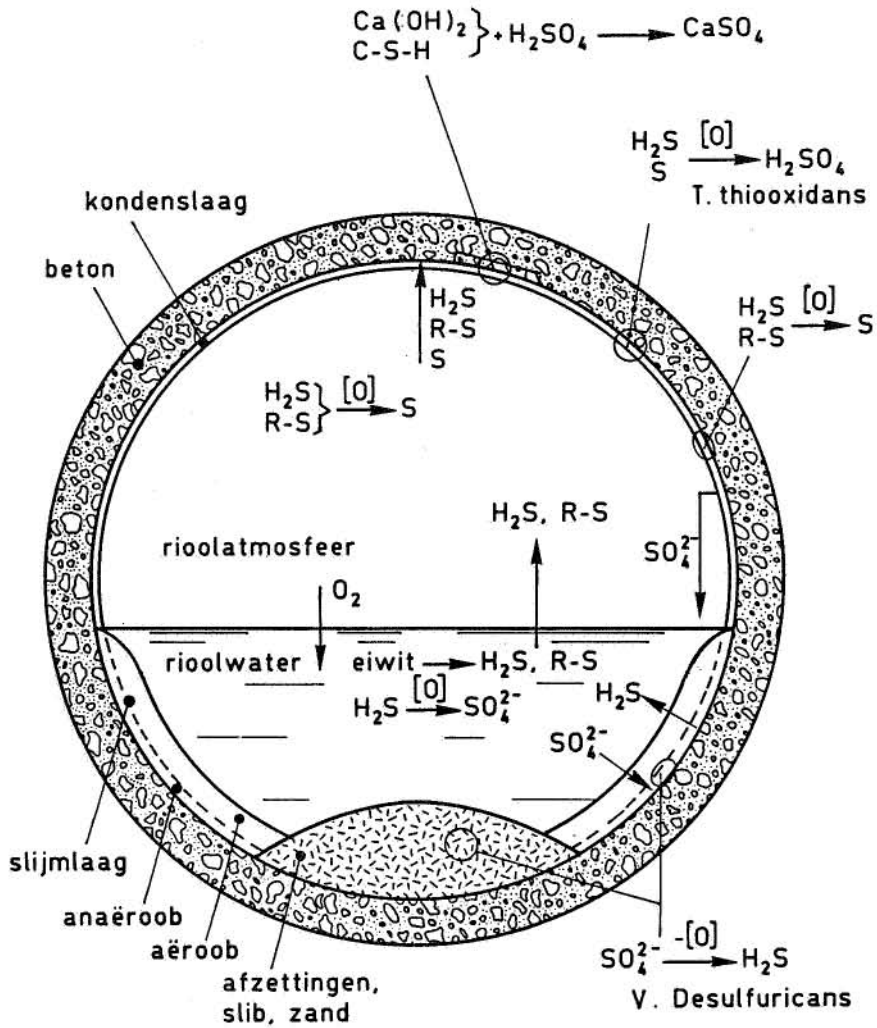
De schade aan betonnen rioolbuizen wordt veroorzaakt doordat het gevormde zwavelzuur reageert met de alkalische bestanddelen van het beton, bijvoorbeeld met kalk, volgens de reactievergelijking:



kalk zwavelzuur gips (=calciumsulfaat).

Niet alleen de kalk, maar ook de cementlijm (het calciumsilicaathydraat-gel, afgekort C-S-H), en eventueel alkalisch toeslagmateriaal, worden door het zwavelzuur omgezet. Vooral T. thiooxidans kan zoveel zwavelzuur produceren dat een betonbuis binnen relatief korte tijd door het zuur een sterke vermindering van de wanddikte kan vertonen. Het dan optredende schadebeeld is: oplossen van de cementsteen, "uitgewassen grindeffect", groei van (witte) gipskristallen, uiteenvallen van de buitenste laag beton. Het gevormde calciumsulfaat valt "uiteindelijk" weer in het rioolwater waardoor men de zwavelkringloop als gesloten kan beschouwen.

Een schematische voorstelling van de processen bij biogene zwavelzuuraantasting van beton wordt weergegeven in figuur 1.



Figuur 1 Schematische voorstelling van processen bij biogene zwavelzuur-aantasting van een betonnen rioolbuis

[O] oxidatie	H_2S zwavelwaterstof
-[O] reductie	R-S organisch (poly)sulfide
SO_4^{2-} sulfaat	S elementaire zwavel

3.1.3 Parameters die BZA bepalen

3.1.3.1 Sulfidevorming

De parameters die de sulfidevormende processen bepalen, zijn verschillend. Hieronder worden zij apart behandeld.

a. sulfidevorming in de anaerobe slijm laag

Dit mechanisme behoeft allereerst een anaerobe slijm laag. Indien een slijm laag aanwezig is, is meestal wel een deel anaeroob. Een slijm laag is echter afwezig als de afschuifspanning hoog is door een hoge watersnelheid. Thistlethwayte [1979] geeft een formule om de gemiddelde afschuifspanning r_{mW} te berekenen:

$$r_{mW} = \rho * I_s * r_{hy} * g \quad (N/m^2) \quad (4)$$

Hierin zijn: ρ de dichtheid van het afvalwater in kg/m^3 ,
 I_s het verval,
 r_{hy} de hydraulische straal (m), en
 g de zwaartekrachtversnelling (m/s^2).

Boven een afschuifspanning van $3,4 N/m^2$ voor vrijverval riolen en $3,9 N/m^2$ voor persleidingen zal minder dan 15% van de wand bedekt zijn met een slijm laag. Daarbij stelt de auteur, dat als minder dan 15% van de bevochtigde wand met slijm is bedekt, sulfidevorming uitblijft.

Volgens diverse auteurs is vrijwel steeds voldoende sulfaat aanwezig als voedingsbodem voor sulfideproducerende bacteriën. Zo meldt Seyfried [1982] sulfaatgehalten over een uitgebreid rioolnet in Hamburg tussen 40 en 110 mg sulfaat per liter rioolwater. Dit is volgens reactievergelijking (1) voldoende voor de vorming van 13 tot 36 mg sulfide per liter (bij volledige omzetting).

b. sulfidevorming uit eiwitafbraak

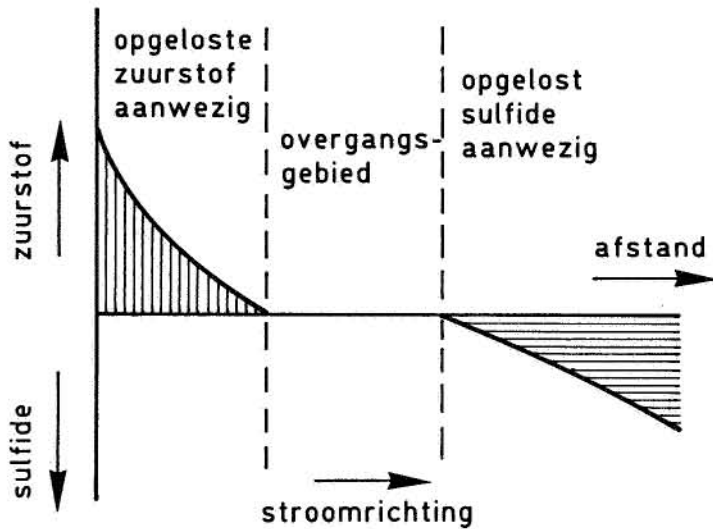
Dit proces zal vermoedelijk overal en altijd optreden in rioolwater. De gevormde hoeveelheid sulfide zal afhangen van de eiwitconcentratie. [Baubehörde Hamburg 1983] geeft als typische eiwitconcentratie in stedelijk afvalwater 100 tot 500 mg per liter. Boon [1978] meldt dat huishoudelijk afvalwater gewoonlijk 3 tot 6 mg zwavel in eiwitten per liter bevat. Door microbiologen wordt het proces van eiwitafbraak als niet beïnvloedbaar beschouwd. Het verloop zal uiteraard wel van de temperatuur afhankelijk zijn.

c. sulfidevorming in afzettingen

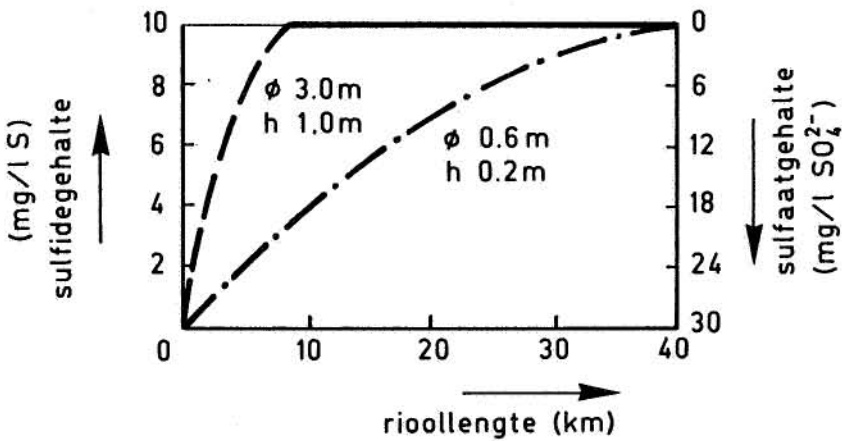
Sulfidevorming kan plaatsvinden in afzettingen op de bodem van het riool. De meningen hierover lijken te verschillen. Klose [1981] meldt dat afzettingen een onbelangrijke bron zijn voor sulfidevorming op basis van lage aantallen bacteriën hierin. Führbötter [1982] meent echter dat de aanzet tot sulfidevorming wel degelijk vanuit afzettingen wordt gegeven, vooral wegens de veel langere verblijftijd van materie in afzettingen, vergeleken met stoffen of deeltjes die met het water meestromen.

De vorming van sulfide in het water als functie van riool(water)parameters is beschreven in een aantal formules. De achterliggende gedachte is de volgende. Het rioolwater in een vrijverval leiding bevat aanvankelijk een duidelijk meetbare hoeveelheid zuurstof (het water is dus aeroob), die daalt naarmate het water langer in de leiding verblijft door het zuurstofverbruik van de afvalstoffen. Op een zekere afstand van het begin zal het water zuurstofarm (anaeroob) zijn, en gaat netto sulfidevorming beginnen. Als zuurstofgehalte waarboven alle H_2S zou worden geoxideerd, geldt ongeveer 1,0 mg O_2 /liter. Schematisch is het bovenstaande geschetst in figuur 2.

Het aerobe gedeelte kan echter ook de gehele vrijverval leiding beslaan, als er genoeg zuurstof in het water is opgelost of wordt opgelost. Daartoe zou het water voldoende turbulent moeten stromen, teneinde door maximaal contact met de lucht zuurstof te kunnen opnemen. Vaak is dit onvoldoende het geval, zodat na enige tijd en afstand sulfidevorming optreedt.



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



Figuur 3 Berekende sulfideontwikkeling door de reductie van sulfaat, voor twee verschillende buisdiameters. De vullingsgraad is steeds 1/3. Volgens Thistlethwayte [1979]

De afname van het sulfaatgehalte en de toename van het sulfidegehalte volgens reactievergelijking (1) worden aangegeven in figuur 3. De x-as van de figuur geeft de afstand tot het begin van het riool aan, de linker y-as de toename van de sulfideconcentratie, en de rechter y-as (van beneden naar boven gelezen) de afname van de sulfaatconcentratie. In de figuur is het concentratieverloop aangegeven in twee verschillende riolen, namelijk een met een diameter van 3,0 meter en een vloeistofspiegel op 1,0 m; en een buis met een diameter van 0,6 meter met het vloeistofniveau op 0,2 m. De vullingsgraad in beide is dus 1/3. In de kleine buis kan het rioolwater meer zuurstof opnemen (per m³) dan in de grote, en dus gaat de netto sulfide opbouw in de kleine buis langzamer.

De zogenaamde Z-formule van Pomeroy is wellicht de bekendste formule om de kans op sulfidevorming (Z_P) in vrijverval riolen te schatten.

$$Z_P = \frac{3 * BZV * 1,07^{(T-20)}}{S^{1/2} * Q^{1/3}} * \frac{P}{b} \quad (5)$$

Waarin BZV het biochemisch zuurstofverbruik (mg/l),

T de temperatuur (°C),

Q de afvalwaterstroom (l/s),

P/b de verhouding tussen bevochtigd oppervlak en oppervlakte van de stroom en

S het verval van de leiding.

Pomeroy onderscheidt de uitkomst van de formule in vijf categorieën van toenemende kans op aanwezigheid van sulfide, stankvorming en aantasting van beton. Waar de Z-waarde een grote kans op aantasting aangeeft, moet verder onderzoek worden gedaan [Pomeroy, 1980].

Voor het schatten van de aantasting in vrijverval leidingen beschouwt Seyfried [1982] de Z-formule van Pomeroy als geschikt, mits geen sulfide aanwezig was aan het begin van de leiding. Deze vergelijking van Pomeroy komt beter overeen met waarnemingen dan de (hier niet gegeven) vergelijking van Thistlethwayte. De laatste geeft hogere sulfideconcentraties dan in de praktijk gemeten zijn, dus te pessimistische schattingen. Seyfried waarschuwt echter voor generaliseren zonder verder onderzoek.

In drukleidingen kan (onder normale omstandigheden) geen zuurstof oplossen omdat die volledig gevuld zijn. Het water in drukleidingen wordt snel anaeroob, en sulfidevorming treedt op.

Boon [1978] geeft een formule voor de gemiddelde concentratie sulfide C_S in een persleiding:

$$C_S = 0,0152 * t * CZV * \frac{(1 + 0,0004 * D)}{D} * 1,07^{(T - 20)} \quad (6)$$

Waarin t de verblijftijd (minuten),
 CZV het chemisch zuurstofverbruik (mg/l),
 D de middellijn (mm), en
 T de temperatuur (C).

Heinsdijk en Van Geest [1983] hebben sulfideconcentraties aan het einde van persleidingen gemeten en vergeleken met de uitkomsten van de formule van Boon, waarbij de overeenstemming redelijk goed is.

Hvitved-Jacobsen en Halkjaer Nielsen [1986] hebben een soortgelijke formule ontwikkeld en geevalueerd voor droog- en natweer situaties in een gemengd riool. Zij vinden een goede correlatie tussen het model en de gemeten sulfidegehalten bij droog weer, en een redelijke correlatie bij nat weer.

Seyfried [1982] heeft formules van Pomeroy en Thistlethwayte voor persleidingen, die hier niet worden weergegeven, onderling vergeleken. Hij stelt vast dat er aanzienlijke verschillen tussen de uitkomsten voorkomen, waarbij lagere uitkomsten optreden, dan in de praktijk gemeten zijn. Men moet dus voorzichtig zijn met het toepassen.

In alle formules en in de achterliggende beschouwingen wordt het belang van de temperatuur benadrukt. Een hogere temperatuur betekent een hogere reactiesnelheid (snellere sulfidevorming, eventueel snellere oxidatie van sulfide), maar ook een verminderde oplosbaarheid van zuurstof (en H_2S). De aantasting is daardoor waarschijnlijk sterker bij hogere temperatuur. De uitdrukking van de invloed van de temperatuur geschiedt echter steeds in de vorm zoals in de formules (5) en (6), middels een eenvoudige exponentfaktor. Deze betekent, dat per graad temperatuurstijging

de sulfidevorming 7% toeneemt. Dit getal is gebaseerd op enkele metingen van Pomeroy, die de werkelijkheid waarschijnlijk slechts globaal benaderen. Het lijkt erop dat hier geen verder systematisch onderzoek naar is verricht.

Dat de invloed van de temperatuur te simpel wordt voorgesteld, wordt geïllustreerd door de onjuistheid van de jarenlang algemeen geaccepteerde opvatting dat BZA vrijwel uitsluitend in de warme klimaten zou optreden. De grote schade in Hamburg in de jaren zeventig heeft aangetoond dat ook bij gematigde temperaturen BZA tot zeer zware aantasting kan leiden.

3.1.3.2 Overdracht naar de atmosfeer

Nadat sulfide in het rioolwater is gevormd, kan overdracht aan de atmosfeer optreden. Gezien de oplosbaarheid van H_2S in water zou een concentratie van 1 mg/l in de vloeistof overeenkomen met 260 ppm (v/v, dat wil zeggen microliter gas per liter lucht) H_2S in de atmosfeer [Pomeroy 1980]. In een riool zijn er echter twee complicaties.

- a. Het percentage van de totale hoeveelheid sulfide in de vloeistof dat als H_2S voorkomt, hangt af van de pH. Bij hogere pH bevindt het zich in de vorm van HS^- , of zelfs S^{2-} . Bijv. bij pH 8 is 10% van het sulfide beschikbaar als H_2S , bij pH 7 de helft, bij pH 6 90%.
- b. De concentratie in de atmosfeer zal lager kunnen zijn dan de evenwichtswaarde, door bv. ventilatie, maar ook door absorptie van het gas in het vocht van de condenslaag op de buiswand.

Van groot belang lijken grootte en vorm van het kontaktoppervlak water/-lucht te zijn. Diverse auteurs waarschuwen voor turbulenties in het rioolwater, omdat juist daardoor de opgeloste sulfiden in grote hoeveelheden vrijkomen.

Een door Pomeroy [1980] als in het algemeen toelaatbaar beschouwde waarde van 0,1 mg H_2S per liter vloeistof zou bij evenwicht overeenkomen met 26 ppm (v/v) in de atmosfeer. Hij stelt er overigens bij dat 0,01 mg H_2S per liter gecombineerd met sterke turbulentie ook tot ernstige aantasting kan leiden. De evenwichtsconcentratie in de atmosfeer zou dan 2,6 ppm zijn.

Seyfried [1982] heeft in een groot rioolnet in Hamburg vastgesteld dat er een relatie bestaat tussen het gehalte vluchtige zwavelverbindingen in de atmosfeer en de aantastingsgraad. De resultaten hiervan worden weergegeven in tabel 1. Zij komen hierop neer, dat er vanaf circa 5 ppm vluchtige zwavelverbindingen ernstige aantasting kan optreden. De pH op het beton daalt dan tot beneden 6. Beneden 1 ppm vluchtige zwavelverbindingen trad geen aantasting op. Er bleek echter aanzienlijke spreiding in de samenhang tussen vluchtige zwavelverbindingen in de atmosfeer en de aantasting te zijn. Het voorspellen van de aantasting van beton aan de hand van 'zwavel' in de rioollucht lijken hierdoor erg onzeker.

Tabel 1 Relatie tussen de aantastingsgraad na ca. 10 jaar, de concentratie vluchtige zwavelverbindingen in de atmosfeer en de pH in het condensvocht in Hamburgse riolen. Verdere gegevens: CZV 470 - 870 mg/l; BZV 150 - 450 mg/l; T = 17 - 19°C. Bron [Seyfried 1982]

aantastingsgraad 4 = sterk, 0 = zwak	vluchtige zwavel- verbindingen (ppm)		pH in condensvocht
	gemidd.	max.	
4	20	47	1,5 - 6,0
4	8	24	1,0 - 6,5
4	4	12	
2	2	6	5,6 - 7,4
1	3	8	ongeveer 7,0
0	0,2	0,8	6,0 - 7,5

Er zij hier op gewezen dat turbulentie bij anaeroob, sulfidehoudend water een funeste uitwerking kan hebben. Eerder in deze tekst werden turbulenties aanbevolen om het zuurstofgehalte van aerob water op peil te houden. Bij het ontwerp van rioolnetten moet hier terdege rekening mee worden gehouden. Waar het water hoogstwaarschijnlijk aerob zal zijn, moet zoveel mogelijk zuurstof worden ingebracht, door turbulenties. Waar de kans bestaat op anaerobie (vooral aan de uitmonding van drukleidingen) moet turbulentie worden vermeden. Het is daar weer wel mogelijk om bewust te ontgassen door sterke gedwongen turbulentie, maar

dan moeten resistente materialen worden toegepast (en afgasbehandeling is noodzakelijk).

Wanneer H_2S en organische (poly)sulfiden in de rioolatmosferafeer zijn aangekomen, kunnen zij aldaar chemisch worden geoxideerd. De literatuur verstrekt hierover weinig gegevens, maar het is bekend dat een snelle oxidatie van H_2S tot elementaire zwavel kan optreden, terwijl de oxidatie van organische sulfiden langzamer zou verlopen. Waarschijnlijk is dit verschil in oxidatiesnelheid de oorzaak van het feit dat men in de Hamburgse riolen (grote middellijn tot 3,5 m) geen H_2S , maar wel organische sulfiden aantrof [König 1978, 1982].

3.1.3.3 Zwavelzuurvorming

Het proces waardoor zwavelzuur ontstaat op de betonwand is reeds in 3.1.2 beschreven. Het onderzoek door Bock en medewerkers geeft aan dat de ernst van het aantastingsproces gekarakteriseerd kan worden aan de hand van de pH van het condensvocht op de wand, en het aantal Thio-bacilli thiooxidans per mg eiwit aldaar. Men onderscheidt zwakke, matige en sterke aantasting [Baubehörde Hamburg 1983]. Een en ander is in tabel 2 weergegeven.

Schremmer [1978] beschrijft experimenten waarbij 's zomers door de hogere temperatuur een ruim twee keer zo hoge zwavelzuurconcentratie in het onderzochte riool ontstond dan 's winters. De invloed van de zwavelwaterstofconcentratie op de vorming van zwavelzuur was gering, maar beneden een drempelwaarde van 1 ppm H_2S in de atmosfeer zou het zuur veel langzamer gevormd worden. Hij noemt een veilige grens 0,5 ppm. De waarde van 1 ppm vluchtige zwavelverbindingen wordt ook vermeld bij Seyfried [1982], zie verder 3.1.3.2.

Tabel 2 Van belang geachte grootheden, ernst van aantasting en te nemen maatregelen, volgens [Baubehörde Hamburg 1983]. De aantastingsgraad komt niet overeen met die volgens DIN 4030. Schattingen zijn gebaseerd op experimenten en ervaringen uit de praktijk

pH van kondens- vocht	aantal thioox./ mg eiwit	aantas- tings- graad	afname wanddikte	renovatie nodig na (jaar)	opmerkingen
13-----					
					alkalische beton
8,5-----					
	0 - 10 ²	zwak	afzanden	>80	gecarbonateerde ,,
6,0-----					
	10 ³ - 10 ⁵	matig	<0,5 mm/j	>40	
3,0-----					
	10 ⁶ - 10 ⁸	sterk	>0,5 mm/j	>5	
1,0-----					
Aantastingsgraad		Te nemen maatregelen			
zwak		dichte beton is voldoende			
matig		extra wanddikte ten behoeve van opoffering, kalksteen als toeslagmateriaal, speciale betonsamenstellingen			
sterk		afsluiten van het beton met een bekleding			

Opmerking: Het aantal T.thiooxidans cellen per mg eiwit is een door microbiologen gebruikte maat voor de aanwezigheid van een bacteriesoort.

Enkele auteurs geven formules waarmee de aantastingssnelheid geschat zou kunnen worden. Thistlethwayte [1979] noemt de aantastingssnelheid relatief constant. Hij vond gemiddeld in een grote 50 jaar oude betonnen buis een waarde van 3 mm per jaar, de maximale waarde zou 6 mm/jaar zijn. Onder zekere aanames kan een formule worden opgesteld (alle H_2S wordt omgezet in zwavelzuur, alle zuur reageert met beton, het toeslagmateriaal reageert niet) voor een gemiddelde aantastingssnelheid R:

$$R = \frac{20 \cdot 10^6 \cdot N_{H_2S}}{\kappa \cdot \rho} \quad (\text{mm/jaar}) \quad (7)$$

Waarin N_{H_2S} = de geabsorbeerde flux H_2S ($\text{kg/m}^2/\text{uur}$),
 κ = het cementaandeel (m/m) en
 ρ = de volumieke massa van het beton (kg/m^3).

De sulfideflux N zou berekend kunnen worden aan de hand van de concentratie H_2S in de atmosfeer.

Meestal zal R kleiner zijn dan berekend met (7), door verlies van zwavelzuur naar het rioolwater, en door ventilatie (verlies van H_2S).

Direct boven de waterlijn zou R maximaal een factor 2,5 groter kunnen zijn. De uitkomst hangt sterk af van de gebruikte waarde voor de H_2S -concentratie.

Een andere formule voor de aantastingssnelheid wordt gegeven in het EPA Manual [1974], afkomstig van Pomeroy. Hierin wordt rekening gehouden met de hoeveelheid alkali in beton, in cement en in het toeslagmateriaal. Volgens deze benadering is kalksteentoeslag beter dan kwarts, en portlandcement beter dan hoogovencement. Zie ook Kienow [1979].

Blijkens een tussentijds rapport is men in Hamburg van mening dat aantastingsberekeningen niet met enige zekerheid gemaakt kunnen worden aan de hand van H_2S metingen in de atmosfeer. Naast redenen van onzekerheid over de uitwisseling geldt hierbij ook dat de schommelingen door het jaar heen vrij groot zijn [Baubehörde Hamburg 1983]. Deze opvatting staat dus tegenover die van Thistlethwayte.

Volgens Bock [1983] voldoen de formules van Pomeroy en Thistlethwayte niet, omdat zij met het biogene karakter van het zuurvormende proces onvoldoende rekening zouden houden. Deze opmerking zou nader gepreciseerd moeten worden. Het lijkt overigens ook een nadeel dat de invloed van de temperatuur en de beluchting in de formules niet in rekening gebracht wordt.

3.1.4 Maatregelen tegen BZA

Gezien het grote aantal factoren dat van invloed is op BZA, is het in principe mogelijk op zeer veel verschillende manieren in te grijpen in het aantastingsproces. Hieronder worden enkele hoofdgroepen van mogelijke maatregelen onderscheiden. Zij hebben betrekking op:

- het zwavelgehalte van het rioolwater;
- de diverse stroomgrootheden;
- de vorming van sulfide in het water;
- de overdracht van sulfide via de atmosfeer;
- de zwavelzuurvorming zelf;
- de betoneigenschappen.

Het bekleden van het beton komt aan de orde in 3.1.5.

3.1.4.1 Het zwavelgehalte van het rioolwater

Gezien het feit dat in huishoudelijk afvalwater zowel sulfaat als zwavelhoudende eiwitten ruim voorhanden zijn zal het BZA-proces niet beperkt worden door het zwavelaanbod. Wel is uit de ervaring bij IBBC-TNO gebleken dat wanneer stoffen worden geloosd die zeer veel zwavel bevatten (bv. mest), de aantasting plaatselijk zeer sterk kan zijn. Het gaat hier dan vermoedelijk om illegale lozingen.

3.1.4.2 Diverse stroomgrootheden

Het gaat hier vooral om het vermijden van een lange verblijftijd van het afvalwater in een rioolnetwerk. In de praktijk zal het in veel gevallen zeer moeilijk zijn om de verblijftijd te beperken tot enkele uren.

Het rioolontwerp en het rioolbeheer kan er wel op gericht zijn deze zo kort mogelijk te houden. Hiertoe moet steeds een voldoende groot verval optreden en moeten afzettingen en verstoppingen worden vermeden (zie 3.1.3.1 c), evenals 'doodlopende' buizen.

Door het handhaven of periodiek toepassen (doorspoelen) van een hoge stroomsnelheid kan een slijmlaag vermeden worden (zie 3.1.3.1 a).

Het optreden van turbulenties door het vallen van rioolwater mag alleen daar plaatsvinden, waar het water zeker aeroob is. Indien turbulenties onvermijdelijk zijn in (mogelijk) anaeroob water, is het verstandig om beschermingsmaatregelen te nemen.

3.1.4.3 Sulfidevorming in het water

Sulfidevorming in rioolwater kan worden vermeden door hydraulische maatregelen (zie boven), door het aeroob houden van het water (eventueel met chemicaliën), door neerslaan van het sulfide, en door vernietigen van de microben in de slijmlaag.

Het water kan aeroob gehouden worden door lange persleidingen te vermijden. Bij het ontwerp van een persleiding kan men eventueel controleren of anaerobie en netto sulfidevorming zullen optreden, door berekening met formules (met de nodige voorzichtigheid), zie Seyfried [1982] en Kienow [1982].

Het toevoegen van oxidatiemiddelen kan ervoor zorgen dat het eenmaal gevormde sulfide weer geoxideerd wordt. De meest gebruikte middelen worden hieronder besproken.

- a. injectie van technische zuurstof, toegepast aan het begin van een persleiding. Volgens Boon [1978] moet overal in de persleiding ten minste 0,2 mg/l zuurstof opgelost zijn, om de sulfidevorming te belemmeren. De oplosbaarheid neemt af met toenemende temperatuur. In 1978 werkten in Groot-Brittannië 50 installaties op grote schaal op basis van injectie van zuurstof.

b. toedienen van waterstofperoxide. Dit gebeurt 10 tot 20 minuten (of 300 tot 400 m) stroomopwaarts van het einde van de persleiding [Zietz 1978], [Schwarzer 1978], [Heinsdijk en Van Geest 1983]. Een overmaat peroxide ten opzichte van sulfide is overbodig, de optimale pH ligt rond 7 (liefst steeds beneden 8).

c. gebruik van chloor en hypochloriet (bleekwater). Meestal wordt hypochloriet gebruikt, toegediend 1 tot 10 minuten voor het einde van de drukleiding. De optimale pH ligt rond 8, en grote overmaat dient te worden vermeden in verband met de vorming van gechloreerde koolwaterstoffen.

Andere methoden om te voorkomen dat gevormd sulfide in de rioolatmosferafeer terechtkomt, worden hieronder opgesomd:

d. het neerslaan van sulfide met ijzer(II)zouten (zouten van tweewaardig ijzer, ferrozouten). Zietz[1978] geeft aan dat ijzersulfide reeds neerslaat bij ijzerconcentraties, waarbij ijzerfosfaat of -carbonaat nog niet neerslaan. De pH mag niet onder 6,5 dalen. Het ijzerzout wordt aan het einde van een persleiding toegediend. Het is wellicht interessant om te onderzoeken of hiervoor drinkwaterslib als ijzer(II) bron toegepast kan worden. Dit slib komt vrij bij de bereiding van drinkwater, en is vermoedelijk tegen geringe kosten verkrijgbaar.

Griffiths [1981] beschrijft als goede en goedkope methode om sulfide uit persleidingen te bestrijden het toevoegen van ijzer(III)sulfaat (een driewaardig ijzer- of ferrizout) en salpeterzuur.

e. toevoegen van kalkhydraat om de pH te verhogen. Boon [1978] vermeldt het toevoegen van alkali in de vorm van kalkhydraat als methode om het eenmaal gevormde sulfide in de oplossing te houden (door de hoge pH wordt voorkomen dat H_2S ontwijkt, zie 3.1.3.2). Verder zou alkali de sulfaatreducerende bacteriën doen afsterven. Een schokbehandeling met een relatief hoge concentratie is dan noodzakelijk. Hij noemt deze methode duurder dan andere, terwijl het blokkeren van de afvoer door neerslag van calciumcarbonaat voorkomen moet worden.

König, Pescher en Teunissen [1983] beschrijven het bestrijden van stank die voortkomt uit anaërobie in (lange) persleidingen in Kleef met kalkmelktoevoeging. Zij gaan uit van het verhogen van de pH naar

9, waardoor vrijwel geen zwavelwaterstof meer voorkomt, omdat alle sulfide dan gebonden is als HS^- .

- f. Het bestrijden van sulfaatreducerende bacterien door chloorbenzeen en dergelijke wordt door Zietz afgeraden vanwege de hoge benodigde concentratie, en de hoge kosten.

Inventarisatie door Zietz [1978, 1979] wijst uit dat neerslaan met ijzerverbindingen een goedkopere methode zou zijn om sulfide inactief te maken dan oxidatie met peroxide of chloor. De diverse methoden zijn in tabel 3 weergegeven, met de auteur, de gebruikte dosis, en een globale indicatie van de kosten, waarbij zoveel mogelijk rekening gehouden is met vaste en variabele kosten.

Tabel 3 Methoden van sulfidebestrijding, dosis en kosten in guldens bij diverse auteurs

middel	Hfl/m ³	dosis	auteur
H ₂ O ₂	0,06	1,8 g/g H ₂ S	Zietz [1978]
	0,03	~ 8 g/m ³	Zietz [1979]
	0,04	~10 g/m ³	Heinsdijk [1983]
	0,30	~80 g/m ³	Griffiths [1981]
O ₂	0,08	15-25 g/m ³	Zietz [1978]
Cl ₂ , NaClO	0,05	3,4 g/g H ₂ S	idem
	0,02	13 g/m ³	Zietz [1979]
Fe(II)sulfaat	0,02	8 g/g H ₂ S	Zietz [1978]
	0,003	~100 g/m ³	Zietz [1979]
		FeSO ₄ ·7H ₂ O	
Fe(III)sulfaat + HNO ₃	0,023	48 g Fe +	Griffiths [1981]
		72 g NO ₃ /m ³	
kalkmelk	0,015	70 g CaO/m ³	König [1983]
chloorbenzol	ca. 2	85 g/m ³	Zietz [1978]

N.B. In de kolom 'dosis' staat al naar gelang de opgave de dosis per gram waterstofsulfide of per kubieke meter rioolwater.

3.1.4.4 Overdracht van sulfide via de atmosfeer

De overdracht van sulfide uit de vloeistof naar de atmosfeer wordt beïnvloed door turbulentie. Die moet, zoals eerder opgemerkt, tot een minimum beperkt worden door een goede detaillering bij het ontwerp.

De hoeveelheid sulfide die via de atmosfeer de betonwand bereikt, kan worden verminderd door rigoreuze ventilatie (en afgasbehandeling). In kleine buizen, met veel huisaansluitingen, veel schachten en een relatief goede ventilatie, is de kans op aantasting naar de Hamburgse ervaring gering. In Hamburg treedt sneller aantasting op bij grotere verzameliolen met minder schachten en minder ventilatie [Ewert et al. 1986].

3.1.4.5 Zwavelzuurvorming

Over de invloed van diverse factoren op de vorming van zwavelzuur op de betonwand is de literatuur weinig duidelijk. Er is ongetwijfeld een invloed van de temperatuur, maar dat geeft weinig gelegenheid tot tegenmaatregelen. De alkaliteit van het betonoppervlak zou invloed kunnen hebben op de 'initiatie' van bacteriele werking, maar heeft vermoedelijk weinig invloed op het eenmaal werkende aantastingsmechanisme. Er zijn enkele verwijzingen naar sproeien van de wand of geheel vullen van de buis als remedie tegen BZA. De merites hiervan zijn onduidelijk [Henckens, Van Hulst 1983].

3.1.4.6 Betoneigenschappen

Over de invloed van de betonsamenstelling is de literatuur niet eenduidig. Zoals eerder vermeld geven diverse auteurs zeer verschillende formules voor de aantastingssnelheid. Het effect van de cementsoort en het type toeslagmateriaal is nog niet goed bekend.

Crennan et al [1978] geven als uitkomst van onderzoek aan asbestcementbuizen dat aluminiumcement een veel hogere weerstand tegen aantasting zou hebben dan portlandcement. De duurzaamheid van aluminiumcement is naar de ervaring bij TNO echter beperkt [Polder 1985].

Langdurig onderzoek in de jaren zestig en zeventig bij TNO naar de aantasting van beton door kunstmatig rioolwater en verdund zwavelzuur wees op een zekere invloed van de wijze van verdichten. Gecentrifugeerd beton

bleek beter bestand dan getrild beton. Over de verschillen tussen de cementsoorten konden geen conclusies worden getrokken [Wessels Boer 1974].

Voor de Nederlandse praktijk is de keuze tussen portland- en hoogovencement van groot belang. Volgens de benadering die de nadruk legt op de alkaliteit is portlandcement beter dan hoogovencement bestand tegen BZA. Er is een aanwijzing uit het werk van de groep van Bock hiervoor [Sand et al 1983]. Daarentegen concludeert men gewoonlijk uit de betere bestandheid van hoogovencement tegen sulfaataantasting dat hoogovencement óók beter bestand is tegen BZA. In Nederland leidt deze conclusie gauw tot een keuze voor hoogovencement voor beton in riolen [CUR 1979].

3.1.5 Bescherming van beton tegen BZA

Een artikel van Bunge en Siebert [1983] somt een aantal bekledingsmaterialen en hun verwerking op. Daarnaast is informatie verkregen uit gesprekken met beheerders van het rioolnet van Hamburg. Hieruit blijkt dat men daar veelal kiest voor duurzame bekleding van beton op plaatsen waar aantasting is opgetreden, of waar die verwacht kan worden [Ewert, Zapel, Hoppel 1986]. Men heeft in de afgelopen jaren een grote serie proeven gedaan met diverse materialen. Hieronder volgt een opsomming van materialen en de daarmee opgedane ervaring. Het gaat hier in principe steeds om zowel renovatie als nieuwbouw.

Coatings van epoxyhars etc. worden in Hamburg niet meer toegepast omdat zij onvoldoende betrouwbaar zijn gebleken. Zij vertonen een te geringe levensduur door fouten in de coating en door blaasvorming. Een dergelijke opvatting is vrij algemeen in de onderzochte literatuur. Zie ook CUR-rapport 96 [1979]. Het blijkt zeer moeilijk de vereiste dikte van minimaal 2 mm over het hele oppervlak van het beton te garanderen. Oplosmiddelvrije primers en coatings zijn noodzakelijk, de voorbereiding van het beton is kritisch en het hele coatingsysteem is niet erg goedkoop meer door alle vereisten.

Polyethyleen met hoge dichtheid (HDPE) wordt niet toegepast omdat proeven een te geringe mechanische sterkte uitwezen. Het materiaal zou na deze experimenten wel verbeterd kunnen zijn.

Polyvinylchloride (PVC) is uitgebreid beproefd. Het kan in principe goed voldoen als betonbescherming. Het bleek bij renovatie echter dat de verankering in het beton kritisch was. Zelfs harde PVC platen behoeven tenminste op vier plaatsen rond de omtrek verankering, zo bleek in een riool waar sterke golfslag optrad. Het aan elkaar lassen, ofwel het aan elkaar klemmen van de platen wordt onvoldoende betrouwbaar geacht door de grote gevoeligheid voor de kwaliteit van de uitvoering. PVC wordt om deze redenen in Hamburg niet meer als bekledingsmateriaal toegepast.

In Hamburg wordt bij renovatie meestal glasvezelversterkte kunststof (GVK) als bekleding voor beton toegepast. Het is in alle gewenste vormen en profielen te verkrijgen, omdat GVK schaaldelen tegenwoordig volgens een wikkelprocedure op een mal worden vervaardigd, waarbij de glasvezels worden gebonden met een kunsthars (meestal een polyester).

Bij renovatie met schaaldelen wordt het schaaldeel ingebracht en de ruimte tussen beton en schaaldeel wordt opgevuld met een speciale mortel. Het verlies aan waterafvoercapaciteit door vermindering van de doorsnede wordt goedge maakt door het gladde oppervlak, zo stelde men. Zie hierover ook Boerlage [1985].

Bij kelders, schachten etc., waar niet met schaaldelen kan worden gewerkt, worden platen aangebracht, waarna de voegen met pure hars (dus zonder vezels) worden ingespoten. Dit wordt beschouwd als een voldoende betrouwbare wijze van het afdichten van voegen.

Ook voor nieuwbouw worden vooral GVK-buizen toegepast waar men aantasting verwacht.

Men werkt in Duitsland op dit moment aan een norm die de duurzaamheid van GVK moet garanderen.

Over de werkwijze bij renovatie merkte men het volgende op. Bij de bekleding van buizen met grotere diameters worden de platen vaak slechts aangebracht op de bovenste 270° van de omtrek van de buis. Het onbedekte gedeelte blijft voortdurend onder water, en wordt niet aangetast. Ook hoeft men hierdoor bij het inspecteren en schoonmaken met wagentjes etc. niet bang te zijn voor beschadiging van de bekleding.

De kleur van de bekledingsmaterialen moet zo licht mogelijk zijn, vanwege het werkklimaat in het riool en om fouten zo goed mogelijk te kun-

nen waarnemen. Deze eis staat haaks op de wens bij fabricage om een donkere kleur te gebruiken in verband met bescherming tegen UV-straling bij de opslag van schaaldelen, platen of buizen die soms langdurig kan zijn.

3.2 Aantasting van beton door andere mechanismen dan BZA

Hier moet speciaal worden genoemd de agressieve werking van grond en grondwater. Sommige bodems bevatten zuur water, voornamelijk door de aanwezigheid van veenzuren etc. De Duitse normen DIN 4030/DIN 1045 (BRD) en TGL 11357 (DDR) geven een klassificatie van de agressiviteit van bodem en water, op basis van de pH en diverse opgeloste stoffen. Vooral de TGL is zeer uitgebreid, doordat o.a. ammonium-, sulfaat-, carbonaat- en magnesiumionen in de beoordeling worden betrokken, evenals de stroming van het grondwater. Tabel 4 geeft een kort overzicht van de pH van het grondwater, de agressiviteit en de te nemen maatregelen volgens DIN 4030/DIN 1045.

Tabel 4 Beoordeling van de agressiviteit van grondwater op basis van de pH, en te nemen maatregelen voor duurzame beton volgens DIN 4030/DIN 1045

pH	agressiviteitsklasse	maatregelen
6,5 - 5,5	zwak	wcf < 0,60 wid < 50 mm
5,5 - 4,5	sterk	wcf < 0,50 wid < 30 mm
< 4,5	zeer sterk	bescherming (coating, bekleding)
		wcf < 0,50 wid < 30 mm

wcf is de water-cement verhouding,

wid is de waterindringdiepte bepaald volgens DIN 1048

3.3 Vermindering van de duurzaamheid van voegmaterialen

Reeds sinds 1974 is bekend dat polysulfide (thiokol) voegmaterialen kunnen worden aangetast door anaerobe bacteriën. De aantasting vindt steeds plaats onder de waterlijn, en kan in enkele jaren tot 20 mm diepte de voeg geheel doen verdwijnen [Schremmer 1985]. Bij proeven bleek in 1 tot 2 jaar in vuilwater een massaverlies van 40% op te kunnen treden, vooral bij polysulfide en natuurrubber voegmateriaal. Polyurethaan en synthetische rubbers verloren geen massa. De testmethoden worden verder ontwikkeld, vooral op microbiologisch gebied.

Bij het Kunststoffen en Rubber Instituut TNO is onderzoek gedaan naar microbiologische aantasting van natuurrubber in leidingwater. Hieruit is gebleken dat het goed mogelijk is een (natuur)rubbermengsel door bepaalde toevoegingen resistent te maken tegen bacteriële aantasting. De resultaten van dit onderzoek zijn niet gepubliceerd.

3.4 Vermindering van de duurzaamheid van kunststof buizen

Sommige soorten verontreiniging van de bodem, vooral aromatische en olieachtige (organische) stoffen, zouden de duurzaamheid van kunststof buizen (gedacht wordt aan PVC) kunnen verminderen. Er kan sprake zijn van aantasting aan de buitenzijde, wanneer een dergelijke buis in verontreinigde grond ligt. Ook kan aantasting optreden wanneer water uit verontreinigde grond (bv. bij saneringsoperaties) door kunststofbuizen wordt getransporteerd. Er is een dergelijk geval bekend.

4 DISCUSSIE EN ONTBREKENDE KENNIS

4.1 Beton

Uit de onderzochte literatuur mag worden afgeleid dat het mechanisme van biogene zwavelzuuraantasting van beton kwalitatief vrij volledig, en kwantitatief slechts ten dele begrepen wordt (zie 3.1.2).

Er mag worden aangenomen dat het mogelijk is het optreden van aantasting globaal te voorspellen door berekeningen op basis van rioolparameters (hydraulisch, chemisch, etc.) (3.1.3).

De diverse bronnen staan nauwelijks stil bij de technieken waarmee relevante grootheden als zuurstofgehalte, stroomsnelheid etc. worden bepaald. De indruk bestaat dat hiertoe over het algemeen primitieve methoden worden gebruikt, die met de huidige stand van de analytische chemie en de elektronika sterk verbeterd zouden kunnen worden.

De optredende aantastingssnelheid, en vooral de relatie daarvan tot de betonsamenstelling is niet goed bekend (3.1.3). Hierbij wordt opgemerkt dat lopend, nog niet gerapporteerd onderzoek in Hamburg hierover waarschijnlijk nuttige informatie kan opleveren.

Vergelijkende studies over bekledingsmaterialen voor beton zijn niet aangetroffen. Vooral de economische aspecten van diverse materialen en de wijze van aanbrengen zijn sterk onderbelicht (3.1.5). De duurzaamheid van coatings wordt over het algemeen negatief beoordeeld in de literatuur en naar de ervaring van rioolbeheerders (3.1.5).

Er lijkt door gebrek aan overeenstemming tussen auteurs geen eenvoudig advies gegeven te kunnen worden over het toepassen van chemische sulfidebestrijdingsmethoden (3.1.4).

De aantasting van betonnen rioolbuizen door het omringende grondwater is niet apart aangetroffen in de onderzochte literatuur. Uiteraard zijn de beoordeling volgens DIN 4030 en TGL 11357 [Liesche, Paschke 1969] van toepassing. Op basis hiervan kan de bescherming van de buitenzijde van betonnen buizen waarschijnlijk afdoende worden verzorgd (3.2).

4.2 Andere materialen

Het is niet duidelijk of de duurzaamheid van elastische voegmaterialen in de praktijk tekortschiet. Er is een geïsoleerde melding van aantasting van enkele soorten.

De vermindering van de duurzaamheid van kunststof (PVC) buizen door organische stoffen in een sterk vervuild milieu is in de onderzochte literatuur niet beschreven. Dit aspect kan voor het specifieke terrein van de bodemsanering van groot belang zijn. Voor de reguliere riolering is deze aantastingsvorm wellicht van minder belang.

5 VOORSTELLEN VOOR VERDER ONDERZOEK

5.1 Nader onderzoek naar de aantasting van beton

Bij deze serie onderzoeken wordt uitgegaan van beton als buismateriaal, zonder verdere beschermende maatregelen. Het gaat dan om het voorspellen van het optreden van aantasting en de bepaling van de restlevensduur. Onderzocht moet worden de invloed daarop van de betonsamenstelling. Verder wordt de geldigheid van voorspellende formules nader bekeken voor de Nederlandse situatie, waarbij op voorhand zelfs nog niet vaststaat dat een enkel model voor alle riolen in Nederland zal gelden. Wanneer door evaluatie van de formules de belangrijkste parameters die de aantasting bepalen (hydraulisch, chemisch, fysisch) bekend zijn, moet worden nagegaan hoe die het beste gemeten kunnen worden. Het doel van deze serie onderzoeken is het voorspellen van de plaats en de snelheid van de aantasting, zodat de financiële middelen voor onderhoud en renovatie zo efficiënt mogelijk kunnen worden aangewend. De verschillende onderzoeksvoorstellen worden hieronder kort omschreven.

5.1.1 Onderzoek naar de aantastingssnelheid van beton als functie van de betonsamenstelling (cementsoort, -gehalte, type toeslagmateriaal, dichtheid, toevoegingen etc.), gegeven 'matige' respectievelijk 'sterke' aantasting (volgens de indeling van tabel 2). Een dergelijk onderzoek is dringend nodig gezien de verschillen van inzicht in de literatuur over hoogovencement en portlandcement als beste cementsoort voor toepassing in riolen, resp. over kwarts en kalksteen als beste toeslagmateriaal. De kosten van dit onderzoek worden geschat op f 250.000, en de looptijd ervan op twee jaar.

5.1.2 Nader onderzoek naar de geldigheid van diverse formules die sulfidevorming en aantasting voorspellen. Hierbij wordt naar verschillende omstandigheden gekeken (omgevingscondities, gescheiden of gemengd stelsel, rioolwatersamenstelling etc). Er wordt gestreefd naar een of enkele rekenkundig(e) model(len) waarmee globaal de aantasting van beton in riolen voorspeld kan worden. De kosten van dit onderzoek worden geschat op f 300.000, en de looptijd op vier jaar.

- 5.1.3 Het zoeken naar en eventueel modificeren van moderne, wellicht geautomatiseerde meetmethoden voor de belangrijke aantastingsparameters. Het zal hier gaan om sensoren voor sulfide, zuurstof, pH, stroomsnelheid en dergelijke. Aan de meetinstrumenten worden eisen gesteld in de zin van eenvoudige bediening (bijv. door personeel van Openbare Werken). Een andere mogelijkheid bestaat in apparatuur die aan een inspectievehikel kan worden bevestigd. De apparatuur moet bestand zijn tegen het rioolmilieu.

De kosten van dit onderzoek worden geschat op f 250.000, en de looptijd op twee jaar.

5.2 Nader onderzoek naar beschermings- en bestrijdingsmaatregelen

Het betreft hier enkele voorstellen voor nader onderzoek naar economische en technische aspecten van het beschermen van beton als buismateriaal respectievelijk van het (chemisch) bestrijden van sulfidevorming in persleidingen en vrijval riolen. Hierbij wordt betrokken de levensduur van installaties en materialen en het benodigde onderhoud gedurende de levensduur. Tevens wordt een voorstel gedaan voor onderzoek naar de aantasting van afdichtingsmaterialen.

Hieronder worden de voorstellen kort uiteengezet.

- 5.2.1 Onderzoek naar de economische en duurzaamheidsaspecten van verschillende bekledingsmaterialen (linings in nieuwe buizen en als renovatietechniek), waarbij voor de verschillende materialen naar de bedrijfszekerheid, de uitvoeringsgevoeligheid en de duurzaamheid gekeken wordt. De kostensoorten (aanleg, onderhoud, vervanging) in het verloop van de levensduur zullen worden aangegeven.

De kosten van dit onderzoek worden geschat op f 150.000, en de looptijd op twee jaar.

- 5.2.2 Onderzoek naar de werkzaamheid en de technische en economische aspecten van diverse methoden om sulfidevorming te bestrijden. Voor Nederlandse omstandigheden zal een vergelijking worden gemaakt tussen zuurstofinjectie, waterstofperoxide- en ijzer-toediening en van verder van belang geachte methoden. Hiertoe

worden ervaringen uit binnen- en buitenland bestudeerd. Schadelijke bijwerkingen als corrosie van staal door zuurstof etc. zullen in de beschouwing worden betrokken. Ook hier zullen de kosten in de loop van de levensduur van installaties worden bepaald.

De kosten van dit onderzoek worden geschat op f 125.000, en de looptijd op twee jaar.

- 5.2.3 Nader onderzoek naar de mechanismen bij aantasting van afdichtingsmaterialen is gewenst, en vooral naar het functioneren van de afdichting op langere termijn. De achtergrond hiervan is de indruk dat veel schade in de praktijk voortkomt uit in- en exfiltratie door slechte afdichting, die verzakkingen en vervuiling van het milieu kunnen veroorzaken.

De kosten van dit onderzoek worden geschat op f 125.000, en de looptijd op twee jaar.

5.3 Kosten en tijdsduur van de voorgestelde onderzoeken

De kosten en de tijdsduur van de voorgestelde onderzoeken zijn geschat. Gezien de aard van de verschillende deelonderzoeken bestaat er een logische volgorde van uitvoeren. Zo moet het onderzoek naar de bepalende parameters in de berekeningsmodellen voldoende gevorderd zijn, voordat naar geschikte meetmethoden gezocht kan worden. Zouden alle onderdelen worden uitgevoerd, dan kan gerekend worden op de volgende verdeling.

<u>kosten in kfl</u>	<u>jaar</u>	<u>eerste</u>	<u>tweede</u>	<u>derde</u>	<u>vierde</u>	<u>totaal</u>
5.1.1 betonsamenstelling	125	125	-	-		250
5.1.2 modelbouw	75	75	100	50		300
5.1.3 meetmethoden	-	-	100	150		250
5.1 BETON	200	200	200	200		800
5.2.1 bekleding	75	75				150
5.2.2 bestrijding	50	75				125
5.2.3 afdichtingen	75	50				125
5.2 BESCHERMING	200	200				400

Daar de hier gegeven bedragen en tijdsduren een schatting weergeven, moet rekening gehouden worden met een zekere vrijheid bij de besteding binnen het totale onderzoeksprogramma.

REFERENTIES

- [1] Schwefelwasserstoff-Korrosion bei zementgebundenen Werkstoffen, Internationale Workshop 8-9 juni 1978, München, Technisch-wissenschaftliche Schriftenreihe der ATV, Bd. 7, 1978.
- [2] Korrosion in Abwasseranlagen, Documentatie EWPCA - State of the Art Seminar, 28-29 januari 1982, Hamburg, EWPCA Secretariaat 1982.

ABRAHAM J., PEJCHOTA ZD. en PEKARKOVA K., 1978, Verfolgung der Betonschädlichkeit von Medium in dem prager Entwässerungsnetz, [1], pag. 93.

BARNES F.B., 1978, Melbourne Experience of Hydrogen Sulphide Corrosion and Present Practice for Prevention of Attack, [1], pag. 105.

BAUBEHORDE HAMBURG, 1983, Biogene Schwefelsäurekorrosion in teilgefühlten Abwasserkanälen aus Zementgebundenen Baustoffe-katalog der Einflussmöglichkeiten, Demoobjekt H. Sammlersystem.

BERG N., 1982, Sewage treatment plants in Norway; analysis of odourous compounds [2], pag. 137.

BIELECKI R., 1982, Die Entwicklung der Forschung über die Korrosion in Abwasseranlagen seit dem H₂S-Workshop 1978, [2], pag. 5.

BOCK E., en SAND W., 1978, Biogene Schwefelsäurebildung in Abwasserkanälen, [1], pag. 147.

BOCK E., MILDE K., SAND W. en EBERT A., 1982, Die Bedeutung der Thiobacillen bei der Schwefelsäurekorrosion in Abwasserkanälen, [2], pag. 25

BOCK E., 1983, Biogene Schwefelsäurekorrosion in Abwasserkanälen, Schlussbericht (1979-1983), Hamburg.

- BOERLAGE S., 1985, Innovatie in rioolrenovatie, I² Bouwk. + Civ. T. (12), pag. 35.
- BOON A.G., 1978, Consequences and avoidance of septicity in sewers, [1], pag. 117.
- BUNGE D. en SIEBERT R., 1983, Korrosionsschutz mit Kunststoffen bei Neubau und Sanierung von Abwasserkanälen in Hamburg, Kunststoffe im Bau, 18, pag. 16.
- BUNDIES J., 1978, Einige Gesichtspunkte zum Betonschutz durch Kunststoffbeschichtungen, [1], pag. 223.
- BURGMAN H., 1979, Veldonderzoek toestand beton in relatie met afvalwater, NVA Symposium 25-4-1979, Rioolstelsel, aantastings- en stankproblemen.
- CRENNAN J.M., SIMPSON J. en PARKER C.D., 1978, Influence of cement composition on the resistance of asbestos cement sewer pipes to H₂S corrosion, [1], pag. 183.
- CUR VB, 1979, Beton en Afvalwater, CUR Rapport 96, Zoetermeer.
- CZERNIN W., 1968, Cementchemie in de bouwwereld, Verkoopassociatie Nederlands Cement.
- DAM B.G. ten, 1985, Rioolleidingen/programmavoorstellen voor op innovatiegericht onderzoek, IBBC-TNO rapport BI-85-107.
- DARR G.M., 1978, Der Einfluss der Temperatur von aggressiven Lösungen auf der Korrosionsfortschritt von Beton [1], pag. 51.
- DARTSCH B., 1983, Duurzaamheid en instandhouding van bouwwerken, Beton (BRD) 5, pag. 170-174.
- DEKKER T.T., 1978, Organische Beschichtungen auf Beton oder Asbestzement bei Abwassersysteme, [1], pag. 213.
- DIEDERICH H., 1978, Korrosionsschutz in Abwasseranlagen, [1], pag. 229.

- DIN 4030, 1969, "Beurteilung betonangreifender Wasser, Boden und Gase".
- DORUSSEN H.L., 1980, Aantasting van beton bij transport en zuivering van afvalwater, Cement XXXII, 9, pag. 532.
- EICK H., 1978, Asbestzement als Abwasserkanalrohr, [1], pag. 171.
- EPA MANUAL, 1974, Process design manual for sulfide control in sanitary sewerage systems, U.S. Environmental Protection Agency.
- EWERT G.-D., ZAPEL en HOPPEL, 1986, Baubehörde Hamburg, gesprekken op 10 april 1986, Hamburg, memo 86-18-bm-RP IBBC-TNO.
- FEIJEN Th. A., 1986, Bouwkundige aspecten van de AWZI Dokhaven, Cement 1, pag. 15-18.
- FUHRBOTER A., 1982, Korrosion in Abwasseranlagen, [2], pag. 61.
- GARTNER G., 1977, Korrosiebescherming van betonbuizen voor rioleringswerken, GWF Wasser/Abwasser 118 H2, pag. 69-71.
- GRIFFITHS I.W., 1981, Sulphide control in Rising Mains, Wat. Pollut. Control, pag. 644.
- HAENDEL H., 1978, Beobachtete Schadenbilder und Betriebsbedingungen an den Schadenstellen, [1], pag. 113.
- HEINSDIJK M.A. en GEEST G.A.P. van, 1983, Stankbestrijding op afvalwaterzuiveringsinrichtingen, Tijdschr. Becewa, 72, 113.
- HENCKENS M.L.C. en Hulst J.G.A. van, 1983, Corrosie bij rioolwaterzuiveringsinstallaties, Cement 25 (1), 24-29.
- HOLMSTROM H., HULTMAN B. en NYBERG F., 1978, Practical experience of hydrogen sulfide formation and sulfuric acid corrosion in Sweden, [1], pag. 85.
- HOWE H.O., Untersuchung des Korrosionsmechanismus, [1], pag. 159.

- HVITVED-JACOBSEN T. en HALKJAER NIELSEN P., 1986, The impact of wet weather flow on the hydrogensulphide formation in combined sewers, Conference Urban storm water quality and effects upon receiving waters, Wageningen.
- KIENOW K.K., 1979, Concrete interceptor sewer corrosion protection- A state of the art report, Proc. Third Intern. Conf. Internal and External Protection of Pipes.
- KIENOW K.E., POMEROY R.D. en KIENOW K.K., 1982, Prediction of sulfide buildup in sanitary sewers, J. Envir. Eng. Div. ASCE 108 EE5, 941.
- KLOSE N., 1981, Sulfidprobleme und deren Vermeidung in Abwasseranlagen, Betonverlag, Düsseldorf, 84 pp.
- KONIG W.A. en STOLTING K.R., 1978, Chemisch onderzoek van de atmosfeer en afvalwater in een diepliggende grote rioolkelder, [1], pag. 9.
- KONIG W.A., RINKEN M., SIEVERS S. en AIDIN M., 1982, Schwefelverbindungen Verursachterbron Betonkorrosion?, [2], pag. 13.
- KONIG W., PESCHEN N. en TEUNISSEN W., 1983, Schwefelwasserstoffbindung durch Fällung mit Kalkmilch, Korrespondenz Abwasser 30/4, 249.
- KUYPER J.S., 1978, Comments about research done in The Netherlands in connection with corrosion of concrete caused by wast water discharges, [1], pag. 63, Zie ook: CUR rapport 96, Beton en afvalwater, 1979.
- KWANT F.J., 1979, Anaerobe processen in transportstelsels, stank en aantasting, NVA Symposium 25-4-1979, Rioolstelsel, aantastings- en stankproblemen.
- LEA F.F., 1970, Hoofdstuk 12. De werking van zuur- en sulfaathoudend water op portlandcement, Chemistry of cement and concrete, pag. 338.
- LIESCHE H. en PASCHKE K.H., 1969, Beton in agressief water, Berlijn.

- LOCKER F.W., 1967, Chemische aantasting van beton, Beton (BRD), Herstell + Verw. pag. 17, 47.
- MAIDL B. en STEIN D., 1982, Bauverfahrentechnische Aspekte zur Herstellung Korrosionssicherer Abwasserkanäle, [2], pag. 81.
- MEISCHKE J.C., 1970, Het beschermen van beton tegen aantasting, Cement XX, 12, pag. 569-75.
- MILDE K., SAND W., WOLFF W. en BOCK E., 1983, Thiobacillus uit de aangetaste betonwanden van het Hamburgse rioleringsstelsel, J. General Microbiol 129, 1327.
- MULLER W. en GRESCHUCHNA R., 1980, Verbetering in de toestand van gemeentelijke en industriële rioolstelsel door actieve en passieve corrosiebescherming, W.W.T. 10.
- PARKER C.D., 1950, Mechanics of corrosion of concrete sewers by hydrogen sulfide, Proc. Conf. Austr. Sew. Anth. Melbourne, pag. 1477.
- PILZ D., 1978, Methoden und Auswahlkriterien für den Korrosionsschutz von Beton in Abwassersammlern, [1], pag. 203.
- POMEROY R.D., 1980, The problem of hydrogen sulphide in sewers, Feugres nr. 6, 2-31.
- POLDER R.B., 1985, Aluminiumcement, notitie over de duurzaamheid, Memo 85-10-bm-RP, IBBC-TNO.
- SAND W., MILDE K. en BOCK E., 1983, Simulation of concrete corrosion in an strictly controlled H₂S breeding chamber, Int. Symp. on Biohydrometallurgy 1-4 mei 1983, Cagliari Italy.
- SCHOLLER F., 1978, Einwirkung von Sulfidlösungen auf Zementgebundene Werkstoffe, [1], pag. 111.
- SCHOLZ H., 1978, Kurze Ausführungen über das Verhalten von Mörteln mit verschiedenen hydraulische Bindemittel bei Einlagerung in Na₂SO₄ Lösung, [1], pag. 55.

- SCHREMMER H., 1978, Bildung der Schwefelsäure in Abhängigkeit von H_2S -Gehalt und von der Temperatur in Abwasseranlagen, [1], pag. 15.
- SCHREMMER H., 1985, Biogene Materialzerstörung in Abwasseranlagen, Forum Städte-Hygiene 36, pag. 283.
- SCHWARZER H., 1978, Beseitigung von Schwefelwasserstoff durch Wasserstoff-peroxid, [1], pag. 181.
- SEYFRIED C.F., 1978, Untersuchungen von Korrosionsschäden in einem Abwassersammler, [1], pag. 37.
- SEYFRIED C.F., 1982, Das Milieu in korrosionsgefährdeten Abwassersammlern aus der Sicht der Siedlungswasserwirtschaftlers, [2], pag. 101.
- SHIVELY J.M., 1982, Inhibition of the Thiobacilli, [2], pag. 127.
- SPRINGENSCHMID R. en LETSCH R., 1978, Schutz von Beton durch Überzüge - Anforderungen an Untergrund und Überzug - Anwendungstechniken, [1], pag. 193.
- THISTLETHWAYTE D.K.B., 1972, The control of sulphide in sewerage systems, Butterworths, Sydney; Sulfide in Abwasseranlagen, Duitse vert. door N. Klose, Betonverlag 1979.
- WAGNER R., 1979, Messung der Schwefelwasserstoff- Bildung durch Bakterien-schlämme, Vom Wasser 53, 107-119.
- WEIGLER H. en SIGMULLER E., 1967, Bescherming van beton tegen chemische aantasting (verkort ACI 515 rapport "Richtlijnen voor bescherming van beton tegen chemische aantasting door middel van coatings en andere corrosiebestendige materialen"), Beton, Herstellung, Verwendung 17, pag. 293 en 331.
- WESSELS BOER R., 1974, De chemische aantasting van beton door enkele agressieve vloeistofmilieus, IBBC-TNO rapport BI-74-60.
- WIERIG H.J., 1978, Chemischer Angriff auf zementgebundene Baustoffe, [1], 27.

WIERIG H.J. en NELSKAMP H., 1982, Betontechnologische Untersuchungen in Abwasseranlagen, [2], pag. 41.

ZIETZ U., 1978, Die Anwendung chemischer Verfahren zur Vermeidung von Geruchs- und Korrosionsproblemen in Abwassertransportleitungen, [1], pag. 125.

ZIETZ U., 1979, Die Beseitigung von geruchsaktiven Schwefelwasserstoff aus dem Abwasser von Klaranlage, GWF - Wasser/Abwasser, 120, 259.

AANTEKENINGEN

AANTEKENINGEN

AANTEKENINGEN

AANTEKENINGEN

COMMISSIE VOOR HYDROLOGISCH ONDERZOEK TNO

RAPPORTEN EN NOTA'S

- No. 1. Tweede rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische Verwerking van
hydrologische gegevens TNO.
Januari 1977.
- No. 2. Verslag en aanbevelingen
van de ad hoc-Groep Grondwatermodellen en Computerprogrammatuur
TNO.
Juli 1978.
- No. 3. De droogte in 1976.
Een samenvatting en overzicht van de over de droogte van 1976
verschenen literatuur - (P.K.M. v.d. Heijde).
Augustus 1978.
- No. 4. Nederlandse activiteiten in internationaal hydrologisch
verband.
Lezingserie, gehouden op 25 april 1978 te Delft, aangevuld met
(schematische) overzichten van internationale organisaties en
een overzicht van hun vertegenwoordigers in Nederland.
Augustus 1978.
- No. 5. Waterkwaliteit in grondwaterstromingsstelsels.
Een verslag van de Workshop op 1 en 2 april 1980 te Wageningen
- (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen en een
inventarisatie van het onderzoek in Nederland.
Augustus 1980.
- No. 6. Derde Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Archivering en Automatische verwerking van
hydrologische gegevens TNO.
Februari 1981.
- No. 7. Overzicht van de wensen van hydrologen en waterbeheerders ten
aanzien van het operationele regenwaarnemingennet van het KNMI
- J.C. Hooghart.
Oktober 1981.
- No. 8.*) Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep
Hydrologische Terminologie.
- 8a. I. Water in de onverzadigde zone
II. Water in de verzadigde zone
Januari 1982.
- 8b. III. Atmosferisch water
Juni 1983.
- 8c. IV. Oppervlaktewater
Maart 1985.

*) Verouderd, zie nieuwe uitgave R + N no. 16.

- No. 9. Waterkwaliteit en waterkwantiteit in het IJsselmeergebied.
Een verslag van de 2e CHO-studiebijeenkomst op 2 en 3 november 1981, De Eemhof, Zuidelijk Flevoland - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen.
Februari 1982.
- No. 10. Rapport en aanbevelingen
van de Contactgroep Grondwatermodellen, CHO-TNO.
April 1982.
- No. 11. Inventarisatie Grondwaterkwaliteitsmodellen. f 30,--.
L.J.M. Boumans.
Oktober 1982.
- No. 12. Grondwaterkwaliteit in relatie met onderzoek en beleid.
Een verslag van de 3e CHO-studiebijeenkomst op 15 maart 1983 te Wageningen - (J.C. Hooghart), aangevuld met discussiebijdragen.
Juni 1983.
- No. 12a. Voorlopig overzicht van inventarisaties waarin grondwater-
(kwaliteits)modellen voorkomen of hiermee in verband staan.
J.C. Hooghart.
Januari 1984.
- No. 13. Vergelijking van modellen voor het onverzadigd grondwater-
systeem en de verdamping.
Een verslag van de 4e CHO-studiebijeenkomst op 24 oktober 1984
in samenwerking met de Studiegroep Hupselse Beek -
(J.C. Hooghart).
Maart/april 1985.
- No. 14. Meten, meetnetten en optimale meetnetontwerpen ten dienste van
het waterbeheer. f 15,--.
Een verslag van:
- Voorjaarsbijeenkomst van de KIVI Sectie Waterbeheer:
"Meten voor waterbeheer", mei 1984.
- Colloquium van de Studiegroep Statistiek in de hydrologie
CHO-TNO: "Meetnetontwerp en optimalisatie", november 1984.
- No. 15. Het hydrologisch systeem in het grensgebied Luik-Maasbracht.
f 15,--.
Le système hydrologique dans la région frontalière
Liège-Maasbracht.
Een verslag van de 5e CHO-studiebijeenkomst op 13 december 1985
in samenwerking met de Nationale IHP-comité's van België en
Nederland en de Contactgroep Hydrologie van het Nationaal Fonds
voor Wetenschappelijk Onderzoek uit België - (J.C. Hooghart).
April 1986.
- No. 16. Verklarende Hydrologische Woordenlijst van de Gespreksgroep
Hydrologische Terminologie, waarin opgenomen de hoofdstukken:
I Algemene termen
II Atmosferisch Water
III Water in de onverzadigde zone
IV Water in de verzadigde zone
V Oppervlaktewater
Oktober 1986, hernieuwde uitgave.

- No. 17. Duurzaamheid rioolleidingen; een literatuurstudie naar aantastingsmechanismen. f 15,--.
R.B. Polder.
Februari 1987.
- No. 18. Ruimtelijke variabiliteit van bodem en water. f 15,--.
Een verslag van de 6e CHO-studiebijeenkomst op 22 oktober 1986 - (J.C. Hooghart)
Februari 1987.

De Rapporten en Nota's zijn in het Nederlands (no. 15 ook gedeeltelijk Frans).

De prijs van no. 11 bedraagt f 30,-- en van nrs. 14, 15, 17 en no. 18: f 15,--; de overige nummers zijn voorlopig gratis aan te vragen (prijswijzigingen voorbehouden).

De rapporten zijn te verkrijgen bij: CHO-TNO
Postbus 297
2501 BD S GRAVENHAGE

