

## Vakgroep Chemische Technologie

Verslag behorende  
bij het fabrieksvoorontwerp  
van

A.A. van de Graaf

---

P.A. van Reeuwijk

---

onderwerp:

Een fysisch en een biotechnologisch  
proces voor grondwaterzuivering

---

adres: A.A. van de Graaf  
van Hassletlaan 569  
2625 JK Delft

P.A. van Reeuwijk  
Ghijseland 109  
3161 VJ Rhon

opdrachtdatum: nov 1987

verslagdatum: mei 1988

ONTWERP  
VAN EEN FYSISCH EN EEN BIOTECHNOLOGISCH PROCES  
VOOR GRONDWATERZUIVERING



Procesontwerp: 2739

Astrid van de Graaf  
Peter van Reeuwijk

TU Delft  
Mei 1988

## SAMENVATTING

Dit verslag van een fabrieksvoorontwerp beschrijft twee processen voor de zuivering van grondwater verontreinigd met aromaten en minerale olie.

Als modelstoffen voor het te beschouwen type verontreiniging worden de volgende stoffen genomen: benzeen, xyleen, toluen, pentaan, hexaan, heptaan, octaan, nonaan en decaan.

Het eerste proces is een fysisch proces, waarin het grondwater in een stripkolom met lucht als absorptiemiddel van de verontreinigingen wordt ontdaan, waarna de laatste resten met een actief koolfilter worden verwijderd om zo aan de gestelde eisen te voldoen. De luchtstroom wordt gereinigd met behulp van een compostfilter.

Het tweede proces is een biotechnologisch proces, bestaande uit twee bioreactoren, waarin het grondwater met behulp van microorganismen (*Pseudomonas*) en actief koolpoeder in een aerob milieu, gezuiverd wordt.

De te verwerken grondwaterstroom bedraagt 250 m<sup>3</sup>/dag over een periode van 2 jaar. In deze periode wordt totaal 410 kg verontreiniging uit het grondwater gehaald; een hoeveelheid die aangetroffen kan worden bij de reiniging van grondwater onder een benzinstation.

Per m<sup>3</sup> gereinigd water bedragen de kosten fl. 5,41 en fl. 6,45, respectievelijk voor het fysisch en het biotechnologisch proces. Dit is voor beide processen hoger dan de kosten die uit de praktijk bekend zijn. In combinatie met de grotere mobiliteit van het fysisch proces, lijkt deze variant aantrekkelijker.

## INHOUDSOPGAVE

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | INLEIDING .....                              | 1  |
| 2  | UITGANGSPUNTEN VOOR HET ONTWERP .....        | 3  |
| 3  | BESCHRIJVING VAN DE PROCESSEN .....          | 6  |
| 4  | PROCESCONDITIES .....                        | 9  |
|    | 4.1 Voorbehandeling .....                    | 9  |
|    | 4.2 Het fysisch proces .....                 | 9  |
|    | 4.2.1 Inleiding .....                        | 9  |
|    | 4.2.2 De stripkolom .....                    | 9  |
|    | 4.2.3 Het compostfilter .....                | 10 |
|    | 4.2.4 Het actief koolfilter .....            | 11 |
|    | 4.3 Het biotechnologisch proces .....        | 12 |
|    | 4.3.1 Inleiding .....                        | 12 |
|    | 4.3.2 Kinetiek .....                         | 12 |
|    | 4.3.3 Adsorptie .....                        | 14 |
|    | 4.3.4 Zuurstofconsumptie en overdracht ..... | 14 |
|    | 4.3.5 Overige condities .....                | 15 |
| 5  | MOTIVERING VAN KEUZE VAN DE APPARATUUR ..... | 17 |
|    | 5.1 Voorbehandeling .....                    | 17 |
|    | 5.1.1 Inleiding .....                        | 17 |
|    | 5.1.2 Bezinkbak/egaliserings tank .....      | 17 |
|    | 5.1.3 Precipitatie eenheid .....             | 17 |
|    | 5.1.4 Zandfilter .....                       | 18 |
|    | 5.2 Het fysisch proces .....                 | 19 |
|    | 5.2.1 Inleiding .....                        | 19 |
|    | 5.2.2 Stripkolom .....                       | 19 |
|    | 5.2.3 Compostfilter .....                    | 21 |
|    | 5.2.4 Actief koolfilter .....                | 21 |
|    | 5.3 Het biotechnologisch proces .....        | 22 |
|    | 5.3.1 Inleiding .....                        | 22 |
|    | 5.3.2 De bioreactor .....                    | 23 |
|    | 5.3.3 De bezinkbak .....                     | 27 |
|    | 5.4 Pompen .....                             | 29 |
|    | 5.5 Compressoren .....                       | 33 |
|    | 5.6 veiligheidsaspecten .....                | 35 |
| 6  | MASSA EN WARMTEBALANSEN .....                | 36 |
| 7  | OVERZICHT SPECIFICATIE APPARATUUR .....      | 42 |
| 8  | KOSTENANALYSE .....                          | 49 |
| 9  | CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN .....            | 55 |
| 10 | SYMBOLENLIJST .....                          | 57 |
| 11 | LITERATUUR .....                             | 60 |

## BIJLAGEN

|   |  |     |
|---|--|-----|
| A | Algemene aspecten van grondwater en sanering .....                                 | 64  |
| B | Grondwaterreinigingstechnieken .....   | 73  |
| C | Artikel NRC-Handelsblad .....  | 81  |
| D | ABC normen voor bodem en grondwater .....  | 82  |
| E | Polanyi adsorptie potentiaal theorie .....   | 83  |
| F | Microbiële degradatie van koolwaterstoffen en aanhechting<br>aan actief kool ..... | 86  |
| G | Kinetiek .....   | 88  |
| H | Bepaling van de adsorptie isotherm van PAC .....                                   | 93  |
| I | Programma voor de berekeningen (fysisch proces) .....                              | 95  |
| J | Het PACT systeem .....   | 113 |
| K | Berekening van roersnelheid en gasdebiet .....                                     | 114 |
| L | Chemiekaarten van de aanwezige verbindingen .....                                  | 116 |
| M | Massa- en warmtebalansen .....   | 118 |

## 1. INLEIDING

Grondwater is de voornaamste bron van het drinkwater. Tweederde deel van het drinkwater wordt uit grondwater bereid. Verder wordt grondwater gewonnen om te gebruiken als industriewater en voor de beregening in de landbouw. [4]

Al meer dan tien jaar staat vast dat het grondwater op een onaanvaardbare wijze vervuild wordt. De intensieve landbouw, de industrie en de huishoudens dragen bij tot het kwaliteitsverlies. De bedrijven die voor de drinkwatervoorziening zorgen krijgen meer en meer problemen met de kwaliteit van het grondwater. Dit heeft al geleid tot sluiting van diverse drinkwaterputten als gevolg van nitraatvervuiling, vervuiling door bestrijdingsmiddelen, of vanwege de aanwezigheid van oplosmiddelen. [4] De rol van de overheid in het waterbeheerbeleid wordt kort vermeld in bijlage A.

Het gevaar van verspreiding van de verontreinigingen door grondwaterstroming kan verholpen worden door het grondwater te beheersen door onttrekking en zuivering gevolgd door infiltratie van het gezuiverde water (bijlage A). De drinkwaterwinning wordt zodoende op lange termijn veilig gesteld. Tevens kunnen haarden van verontreinigingen in gevoelige gebieden waar geen verspreiding mag voorkomen verwijderd worden.

De grond voor onttrekkingssystemen moet goed doorlaatbaar zijn. In de praktijk betekent dit dat toepassing slechts mogelijk is bij zandige grond. Hetzelfde geldt voor de infiltratie systemen. Infiltratie wordt toegepast om geen ontoelaatbare gevolgen voor de omgeving op te leveren (bijlage A). Schade kan ondermeer ontstaan, doordat als gevolg van de dalende grondwaterstand teruglopende gewasopbrengst optreedt.

Een grondwaterzuiveringssysteem bestaat uit twee delen te weten het onttrekkingssysteem en het zuiveringssysteem. In bijlage A wordt aandacht besteed aan de onttrekkingssystemen van grondwater aangezien deze afhankelijk zijn van de bodemopbouw. Voorts een korte beschouwing over de mogelijke zuiveringssystemen.

Door de Dienst Binnenwateren/RIZA is op 2 mei 1986 de workshop 'grondwaterreiniging bij bodemsanering' georganiseerd. Op basis van een inventarisatie zijn ten aanzien van de nu toegepaste grondwaterzuiveringstechnieken ondermeer de volgende conclusies te trekken:

- er wordt geen biologische zuivering op locatie toegepast
- er is weinig aandacht voor luchtmissies (luchtstrippen)

Deze conclusies hebben geleid tot de volgende stellingen:

1. De biologische behandeling van verontreinigd grondwater op de bronlocatie verdient een grotere belangstelling.
2. Er dient aandacht te worden besteed aan de behandeling van afgassen bij het luchtstrippen van verontreinigd grondwater. [5]

Uitgaande van de eerste stelling is in overleg met de vakgroep BPT (bioprocestechnologie) en IWACO (adviesbureau) het idee ontstaan om een

biologisch zuiveringsproces te ontwerpen. Dit proces zal vervolgens vergeleken worden met een referentieproces op basis van kostprijs. Als eis geldt dan dat beide processen een zelfde effluent kwaliteit bereiken. Er zijn veel zuiveringstechnieken mogelijk. In bijlage B worden de technieken waarmee praktijkervaring is opgedaan beschreven waarbij de kenmerken voor elk techniek vermeld worden.

**Voordelen van biologische reiniging:**

- Er vindt afbraak plaats van de milieu-onvriendelijke stoffen tot componenten die kunnen worden opgenomen in de natuurlijke kringloop (mineralisatie). Dit in tegenstelling tot de overige toegepaste technieken, waarbij concentrering en/of verplaatsing naar een ander milieucompartiment plaatsvindt.
- Bij langdurige saneringen lijkt biologische reiniging kostentechnisch aantrekkelijk vanwege de hoge investeringen maar lage exploitatiekosten.

**Nadelen van biologische reiniging:**

- Saneringen zijn veelal kortlopende projecten; adaptatie van een biologisch systeem aan het grondwater vergt veel tijd.
- Weinig operationele kennis aanwezig; veel laboratoriumschaal onderzoek noodzakelijk.
- Effluentkwaliteit moeilijk aan te geven. [5]

Biologische technieken zijn, evenmin als andere sanerings-technieken, niet universeel toepasbaar. Die toepasbaarheid is vooralsnog beperkt tot de afbraak van organische verbindingen. Een algemeen beeld van vervuilingbronnen van het grondwater wordt gegeven in bijlage A. Gezien de beperking van het biologische proces zal het toepassingsgebied liggen bij met olie en benzine verontreinigd grondwater wat onder vele tank- en pompstations en andere opslagplaatsen voor zal komen. Een recent artikel in het NRC (bijlage C) vermeldde dat onder vrijwel elk benzine-pompstation zich een vette bel, een mengsel van water, benzine en olieresten bevindt.

Als referentie systeem wordt een fysisch proces ontworpen namelijk een luchtstripper gevolgd door een actief koelfilter. De lucht wordt daarna gereinigd met een compost-filter. Deze techniek wordt in de praktijk al veelvuldig toegepast. [1]

In dit verslag wordt de verwijdering van opgeloste benzine verontreinigingen door middel van een fysisch en een biotechnologisch proces naast elkaar gezet. Aan de voorbehandeling van het grondwater zal verder weinig aandacht worden besteed, daar deze voor beide processen gelijk is.

## 2 UITGANGSPUNTEN VOOR HET ONTWERP

Bij het ontwerpen van het fysische en het biotechnologische zuiveringsproces zijn de volgende gezamenlijke uitgangspunten gebruikt:

- \* Het zuiveringssysteem moet 250 m<sup>3</sup> grondwater per dag kunnen verwerken.
- \* Het systeem is 24 uur per dag in gebruik.
- \* De looptijd van het zuiveringsproject is 2 jaar. Het zuiveringsproces is 600 dagen in bedrijf.
- \* De vervuiling komt in opgeloste vorm voor in het grondwater.
- \* De influentconcentratie van de verontreiniging in het grondwater bij aanvang van het proces staat vermeld in Tabel 2.1. Deze samenstelling werd door IWACO geleverd als zijnde een mogelijke samenstelling voor de verontreiniging in het grondwater die veroorzaakt is door weglekken van benzine en minerale olie. De samenstelling van de minerale olie wordt beperkt door de oplosbaarheid van de n-alkanen.

TABEL 2.1 De influentconcentratie van de vervuiling in het grondwater aan het begin van het zuiveringsproces

| stof                                    | Mw<br>(kg/kmol) | influent<br>concentratie<br>(10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>3</sup> ) | oplosbaarheid<br>in water [13]<br>(10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>3</sup> ) | B-norm<br>(10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>3</sup> ) |
|---|-----------------|---|---|---|
| Benzeen C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>   | 78.11           | 10.0  | 1800.0  | 1 10 <sup>-3</sup>                              |
| Tolueen C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>   | 92.13           | 5.0   | 538.0   | 15 10 <sup>-3</sup>                             |
| Xyleen C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>   | 106.16          | 5.0   | 188.0   | 20 10 <sup>-3</sup>                             |
| Totaal aromaten:                        |                 | 20.0  |   | 30 10 <sup>-3</sup>                             |
| Pentaaan C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> | 72.15           | 1.28  | 38.5  |   |
| Hexaaan C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>  | 86.16           | 1.28  | 13.0  |   |
| Heptaaan C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> | 100.21          | 1.28  | 3.0   |   |
| Octaaan C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>  | 114.23          | 0.70  | 0.7   |   |
| Nonaan C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>   | 128.26          | 0.45  | 0.45  |   |
| Decaaan C <sub>10</sub> H <sub>22</sub> | 142.29          | 0.01  | 0.01  |   |
| Minerale olie:                          |                 | 5.0   |   | 200 10 <sup>-3</sup>                            |

- \* De vermindering van de benzeenconcentratie is bepalend voor de beide processen omdat deze aan de hoogste eis moet voldoen. De processen die zich in de grond afspelen, zoals grondwaterstroming, verspreiding, adsorptieprocessen, liggen buiten het kader van dit proces. Aangenomen wordt dat de influentconcentratie van benzeen in de grond terug loopt tot de B-norm (figuur 2.1). Op dat moment is het zuiveringsproces voltooid.



- \* Na behandeling moet de concentratie van de verontreiniging in het grondwater minimaal voldoen aan de B-norm (Bijlage D).
- \* Verder bevat het grondwater stoffen die niet als verontreiniging kunnen worden aangemerkt, maar in een aantal zuiveringsstappen kunnen leiden tot verstoringen en lager of hoger chemicaliën verbruik. Deze nevenverontreinigingen staan vermeld in Tabel 2.2. [12]

TABEL 2.2 Concentraties van nevenverontreinigingen.

| nevenverontreinigingen       | concentratiegebied<br>(mg/l) |
|------------------------------|------------------------------|
| Zwevende stof                | 0 - 10.000                   |
| Colloïdale bestanddelen      | 0 - 10.000                   |
| Ferro- en ferri verbindingen | 0 - 20                       |
| Sulfiden                     | 0 - 20                       |

- \* Het geohydrologisch systeem is zandgrond. Onttrekking en infiltratie van het grondwater kan goed verlopen door de goede doorlaatbaarheid van dit bodemtype.
- \* Geen van de stromen is corrosief. De apparaten kunnen van roestvrijstaal gemaakt worden.

De twee type zuiveringsprocessen lopen tot aan de stripkolom cq. bioreactor parallel. Het voorbehandelingsgedeelte wordt voor verder berekeningen buiten beschouwing gelaten. De kosten schatting voor deze processen wordt uit de literatuur gehaald.

- \* De fysische constanten van de uitgangsstoffen- en stromen staan in Tabel 2.3.

TABEL 2.3 De fysische constanten voor de zuiveringsprocessen.

$$\begin{array}{ll}
 \eta_{\text{water}} = 1.271 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s} & \rho_{\text{water}} = 1000 \text{ kg/m}^3 \\
 \eta_{\text{lucht}} = 1.75 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s} & \rho_{\text{lucht}} = 1.336 \text{ kg/m}^3 \\
 T_{\text{water}} = 11 \text{ }^\circ\text{C} & c_{\text{pw}} = 4.2 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \\
 T_{\text{lucht}} = 11 \text{ }^\circ\text{C} & c_{\text{pg}} = 1 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \\
 g = 9.81 \text{ m/s}^2 & \\
 \kappa = cp/cv = 1.4 & \text{ [16]}
 \end{array}$$

Het biotechnologische proces:

- \* De kinetiekparameters, de gegevens van het actief koolpoeder (PAC) en verdere uitgangsgegevens voor het biotechnologische proces staan in Tabel 2.4.

TABEL 2.4 De uitgangsggegevens voor het biotechnologische proces.

|  |   |  |
|--|---|--|
| <u>Kinetiek:</u>   | $\mu_{\max} = 0.01 \text{ hr}^{-1}$ [14]  | $Y_{sx} = 0.5 \text{ C-molX/C-mols}$ [14]                      |
|  | $K_s = 1.5 \text{ mg/l}$ [14]             | $C_{O_2}^* = 10.90 \text{ mg O}_2/\text{l}$ [16]               |
| Elementair samenstelling biomassa: $\text{CH}_{1.8}\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.2}$ |   |  |
| <u>PAC:</u>  | $d_p = 120 \cdot 10^{-6} \text{ m}$       | $v_s = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (w% = 20 %) [17]           |
|  | $\rho_{\text{PAC}} = 1400 \text{ kg/m}^3$ | $c_{\text{pkool}} = 1.2 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ |
|  | $\Phi_{v_4} : \Phi_{v_5} = 1:1$ [15]      | $\Phi_{v_4} = 10.42 \text{ m}^3/\text{hr}$                     |

\* Als hulpstof voor de omzetting wordt gebruikt gemaakt van kunstmest NPK

#### Afvalstromen:

Bij de processen komen emissies van slib of andere bijproducten vrij die of geregeneerd kunnen worden of afgevoerd moeten worden. Tabel 2.5 geeft een overzicht van de bijproducten die ontstaan bij de zuiveringsprocessen [18].

TABEL 2.5 Bij de zuiveringsprocessen vrijkomende bijproducten.

| Zuiveringstechniek                           | Residu   | Gasemissies  |
|--|--|--|
| <b>Voorbehandeling:</b>                      |  |  |
| Dichtheidscheiding                           | Er ontstaat een mineraal slib, de hoeveelheid afhankelijk van het zwevend stof gehalte influent  | -  |
| Chemische precipitatie                       | Er ontstaat een anorganisch slib   | -  |
| <b>Fysische zuiveringsgedeelte:</b>          |  |  |
| Strippen                                     | geen residu  | Vluchtige verbindingen die in gekanaliseerde luchtstroom gemakkelijk tegen te houden zijn door een compostfilter |
| Adsorptie aan actief kool (granulair)        | Uitgewerkte kool kan geregeneerd worden waarbij verminderde activiteit kan optreden  | -  |
| Compostfilter                                | Compost  |  |
| <b>Biotechnologische zuiveringsgedeelte:</b> |  |  |
| Mengslib (slib en poederkool)                | Er ontstaat slib met poederkool dat thermisch of mbv natte luchtoxidatie te regenereren is. Zonder regeneratie moet het slib afgevoerd worden. | Door minimalisering van de luchtstroom wordt emissie van de vluchtige verbindingen vermeden.                     |

### 3 BESCHRIJVING VAN DE PROCESSEN

Het voorbehandelings gedeelte van het fysisch en biotechnologisch zuiveringsproces is gelijk. Na beschrijving van de voorbehandeling volgt respectievelijk het fysische en het biotechnologische gedeelte. De nummering van het voorbehandelings gedeelte is niet geheel gelijk. Daar waar onduidelijkheid zou kunnen optreden wordt tussen haakjes (fys) voor het fysische en (bio) voor het biotechnologische proces vermeld.

#### 3.1 De voorbehandeling

Met behulp van een pomp (P1) wordt het vervuilde grondwater opgepompt naar een buffervat (V2). Het level-control zorgt er voor dat er genoeg water aanwezig is om de uitgaande stroom van V2 te waarborgen. Hier worden tevens aanwezige vaste deeltjes afgescheiden. Vanuit V2 gaat de waterstroom naar een geroerde tank (V3) waar de benodigde chemicaliën voor de verwijdering van ongewenste metaalionen worden toegevoegd. Een pH-control zorgt voor de juiste omstandigheden voor de vorming van hydroxiden. In bezinkbak (V4) worden de hydroxiden verwijderd.

Pomp P5 stuurt de waterstroom vervolgens door een zandfilter (fys M6, bio M8) waar de laatste resten hydroxide worden tegengehouden. Een flow-control garandeert een constante stroom na deze voorbehandeling.

#### 3.2 Het fysisch proces

Na de voorbehandeling volgt een stripkolom (T7) die de verontreinigingen uit de waterstroom haalt en een grotendeels gezuiverde waterstroom levert. Deze waterstroom gaat met behulp van een pomp (P10) naar een actief koolfilter (M11) om de laatste restjes uit het water te halen. De gezuiverde waterstroom wordt weer terug gepompt in de grond om een te grote verstoring van het grondwaterniveau tegen te gaan.

Bij de stripkolom wordt gebruik gemaakt van lucht om de verontreinigingen uit de waterstroom te halen. Deze lucht wordt aangevoerd door een compressor (C8). Aan de andere kant wordt de nu verontreinigde luchtstroom door een compostfilter (M9) geleid om de verontreinigingen te verwijderen.

De in bedrijf stelling van het fysisch gedeelte van het proces omvat eigenlijk alleen het aanzetten van de apparatuur. Hoewel dit inhoudt dat de concentratie in de luchtstroom in eerste instantie veel lager is dan waar het compostfilter voor ontworpen is, kan dit probleem opgevangen worden door ervoor te zorgen dat er genoeg microorganismen aanwezig zijn om de verontreinigingen af te breken op het moment dat de concentratie op het niveau is waarop het compostfilter is ontworpen. Dit houdt in dat er meer microorganismen geënt worden dan eigenlijk nodig zijn, zodat er gecompenseerd wordt voor het afsterven tijdens de opstartfase.

Het fysisch gedeelte is ook in andere processen te gebruiken. Het mogelijk is bij een gegeven kolomgrootte van de strip-kolom de andere parameters te wijzigen. Een eventueel hogere concentratie in de

vloeistofstroom zou betekenen dat het koolfilter vaker vervangen moet worden, terwijl een gewijzigde gasstroom inhoudt dat het compostfilter anders beënt dient te worden. Er zal echter wel rekening gehouden moeten worden met het feit dat het actief koolfilter tijd moet hebben om de verontreinigingen te adsorberen, oftewel de vloeistofstroom mag niet te groot worden, hoewel dit ook op te vangen is met de frequentie van het vervangen van de actief kool. Een zelfde verhaal geldt ook voor het compostfilter. In dit geval zijn de eisen zelfs iets strenger, omdat hier geen sprake is van vervangen van de compost. De gasstroom mag dus niet veel groter worden om te voorkomen dat de geloosde hoeveelheden verontreiniging te groot wordt.

### 3.3 Het biotechnologisch proces

Na de voorbehandeling volgt nu een bioreactor (R9) waar de verontreinigingen aeroob afgebroken worden door microorganismen. Hier wordt het vervuilde grondwater in de volumeverhouding 1:1 gemengd met de recycle stroom uit de bezinkbak (V13) die 658 kg/m<sup>3</sup> koolpoeder bevat. Tevens bevat deze stroom de microorganismen. Door de aanwezigheid van actief koolpoeder worden de verontreinigingen geconcentreerd waardoor de microorganismen maximaal kunnen groeien en de stoffen sneller verwijderd worden. In de eerste bioreactor wordt het grootste gedeelte van de verontreiniging in een verblijftijd van 2 uur omgezet.

De kool wordt constant ververst door steeds wat nieuw koolpoeder toe te voeren. In een geroerde tank (V6) wordt de kool met een deel van de voorbehandelende waterstroom gemengd en met behulp van een pomp (P7) weer aan de waterstroom toegevoegd. Deze procedure voorkomt dat het actief koolpoeder in de bioreactor gaat drijven. Tevens wordt aan de tank V6 de nutriënten - kunstmest en bitterzout - die de microorganismen nog extra nodig hebben toegevoerd. Door de voorbehandeling is de pH van het grondwater aanzienlijk verhoogd. Een pH-control zorgt ervoor dat de pH op de goede waarde komt voor de biologische afbraakreactie. De minimaal benodigde hoeveelheid lucht voor de afbraak van de verontreinigingen wordt door compressor (C10) aangevoerd.

In de tweede bioreactor (R11) wordt de rest van de verontreiniging afgebroken in een verblijftijd van 1 uur. De lucht wordt door compressor (C12) aangevoerd. De afgevoerde lucht van beide reactoren bevat geen verontreinigingen zodat deze niet verder behandeld hoeven te worden.

De kool wordt in de bezinkbak V13 afgescheiden van het grondwater en met behulp van een slurriepomp (P14) naar de eerste bioreactor R9 teruggevoerd. Het gezuiverde en beluchte grondwater wordt weer in de grond geïnfilterd. Door de aanwezigheid van zuurstof kunnen de microorganismen in de grond verder gaan met hun werk c.q. zuivering.

Bij het in bedrijf stellen van het biotechnologische gedeelte van het zuiveringsproces zullen de beide bioreactoren R9, R11 en de bezinkbak met het actief koolpoeder en grondwater gevuld moeten worden. De actief koolpoeder slurrie wordt beënt met de benodigde hoeveelheid microorganismen (*Pseudomonas*). Nadat goed gemengd is kan de continue doorvoer beginnen.

De mate van vervuiling van het grondwater verschilt per locatie. Bij hogere vervuilingsgraad zal de ent aan microorganismen verhoogd moeten worden om een verblijftijd van 2 uur te handhaven of de doorstroom snelheid

moet verlaagd worden om meer tijd voor de omzetting te verkrijgen. De nutriënten kunnen naar behoefte gedoseerd worden. Verder zou het aktiefkoolpoeder als een soort buffer kunnen fungeren. Bij hogere concentraties blijft de verontreiniging door adsorptie in het systeem, zodat de microorganismen meer tijd voor de omzetting hebben.

Voor de regeling van het proces zijn enkele pH, niveau en flowregelingen in het processchema opgenomen. Er is echter niet geprobeerd de regeling van het proces volledig op te nemen in dit schema. In verschillende stromen zouden op elkaar afgestemde flowregelingen moeten zijn. Voor als nog wordt volstaan met de in de tekening opgenomen regelingen.

## 4 PROCESCONDITIES

### 4.1 De voorbehandeling

Aangezien de voorbehandeling voor beide processen gelijk is, zal dit deel niet meegenomen worden bij het vergelijken van de processen. Dit houdt dan ook in dat de procescondities uiterst kort beschreven worden.

Voor de voorbehandeling geldt dat deze isotherm verloopt bij een temperatuur van 11 °C.

De precipitatie verloopt bij een pH van 8.5 tot 10.5 [18]. Deze pH wordt in stand gehouden door middel van een pH-control die de toegevoegde hoeveelheid loog regelt.

### 4.2 Het fysisch proces

#### 4.2.1 Inleiding

Ook dit systeem wordt isotherm verondersteld bij een temperatuur van 11 °C. Er wordt bij atmosferische druk gewerkt. Op grond hiervan zijn de evenwichtsgegevens in Tabel 4.1 gebruikt.

Tabel 4.1 Evenwichtsgegevens verontreinigende stoffen [19, 20, 21, 22]

| component | Henry<br>MPa | Dl<br>$10^{-10} \text{m}^2/\text{s}$ | Dg<br>$10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ |
|-----------|--------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| benzeen   | 16.87        | 6.8270                               | 8.681                               |
| tolueen   | 16.87        | 6.0264                               | 7.757                               |
| xyleen    | 16.87        | 5.4351                               | 7.124                               |
| n-pentaan | 3662         | 6.0203                               | 8.276                               |
| n-hexaan  | 3852         | 5.4305                               | 7.414                               |
| n-heptaan | 402          | 4.9732                               | 6.723                               |
| n-octaan  | 8441         | 4.6061                               | 6.283                               |
| n-nonaan  | 4364         | 4.3033                               | 5.727                               |
| n-decaan  | 62150        | 4.0483                               | 5.262                               |

#### 4.2.2 De stripkolom

Een veel gebruikt apparaat voor desorptie is een gepakte kolom (fig 4.1). Het geheel bestaat uit een cilindrische kolom, of toren, voorzien van een gasinlaat en een verdeelruimte aan de onderkant; een vloeistofinlaat aan de bovenkant; gas- en vloeistofuitlaten, respectievelijk aan boven- en onderkant en een ondersteunde vulling van inerte vormen, de pakking. De ondersteuning dient een open structuur te hebben, zodat er geen flooding optreedt bij deze plaat. Flooding is het verschijnsel dat de vloeistof geen kans krijgt om verder te stromen omdat de gassnelheid te groot is en het gas daardoor de vloeistof tegenhoudt.

De binnenkomende vloeistof die eigenlijk een oplossing is, wordt verdeeld over de pakking door middel van een verdeler en bevochtigt het oppervlak van de pakking zo gelijkmatig mogelijk. Het schone gas komt de verdeelruimte binnen onder de pakking en stroomt naar boven door de vrije ruimten in de pakking, tegen de vloeistofstroom in. De pakking zorgt voor

een groot contact-oppervlak en dus een goed contact tussen de beide fasen. De opgeloste stof in de vloeistof wordt geabsorbeerd door het schone gas dat de kolom in komt en een verrijkt gasmengsel verlaat de bovenkant. De oplossing wordt steeds minder geconcentreerd naarmate de vloeistof door de kolom naar beneden stroomt en een lage concentratie verlaat de onderkant van de kolom door de vloeistofuitlaat.

Er zijn vele soorten kolompakking uitgevonden en een heel aantal wordt regelmatig gebruikt. Pakkingen worden onderverdeeld in losgestorte pakkingen en pakkingen die (zorgvuldig) gestapeld worden. In dit geval is er gekozen voor een losgestorte pakking van metalen Pall-ringen.

Het voordeel van metalen ringen boven kunststof ringen is dat de metalen ringen niet aangetast worden door de chemische stoffen (aromaten, alkanen) die in de waterstroom aanwezig zijn. De keuze is op Pall-ringen gevallen vanwege de grote porositeit, de hoge pakkingsfactor, en dus lage drukval, in combinatie met een redelijke prijs.

De ringen zijn veel minder dan 40 keer de kolomdiameter, zodat er geen kans is dat de vloeistof langs de wand van de kolom gaat stromen in plaats van door de pakking. Om verdere problemen met de stromen te voorkomen wordt er in de kolom nog een herverdelers aangebracht om een goede verdeling van de vloeistof over de pakking te bewerkstelligen.

De kolom is ontworpen op een vloeistofsnelheid van ongeveer 8 mm/s, zodat er geen problemen optreden met de verdeling van de vloeistof. Ook wordt een gebied gewerkt waar er geen problemen met stuw-effecten optreden.

Op grond van bovenstaande afwegingen is de kolom voorzien van een losgestorte pakking van 38 mm metalen Pall-ringen. Deze pakking heeft een pakkingsfactor ( $F_p$ ) van 140 [23].

Onder de gekozen omstandigheden zijn de evenwichten te beschrijven met behulp van de wet van Henry:

$$p_i^* = H_i \cdot p \quad (4.1)$$

$$y_i^* = H_i \cdot p \quad (4.2)$$

Aangenomen is dat de concentraties dusdanig laag zijn dat stromen constant verondersteld kunnen worden, dat de verschillende componenten elkaar niet beïnvloeden bij adsorptie en dat de Henry-coëfficiënten van benzeen, toluen en xyleen gelijk zijn.

De kolom is ontworpen op een ingaande benzeen-concentratie van 0.01 kg/m<sup>3</sup> en een uitgaande concentratie van 5 · 10<sup>-6</sup> kg/m<sup>3</sup>. Met deze gegevens is de kolom vrijwel bepaald, omdat ook de vloeistofstroom vastligt. De enige variabele die overblijft is de luchtstroom. Hiervoor is een vloeistof/gas-verhouding gekozen van 200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> hetgeen een gasstroom levert van 0.58 m<sup>3</sup>/s, zodat de concentraties in de lucht geschikt zijn voor het compostfilter, en tevens de afmetingen van de kolom enigszins reëel blijven.

#### 4.2.3 Het compostfilter

Voor het reinigen van gasstromen wordt bij grondwaterz vaak gebruik gemaakt van compostfilters.

Het compostfilter is opgebouwd uit de volgende [24]:

- Compost: dit vormt de ecologie voor de microorganismen en voorz

van de benodigde essentiële zouten en nutriënten. Deze zijn hierin van nature aanwezig.

- Polystyreenkorrels: aanwezig met als doel het geheel een goed doorlatende structuur te geven, zodat een geringe drukval kan worden gehaald.
- Mergel: dit heeft een zuurbufferende werking.
- Water: het materiaal dient een vochtigheid van ongeveer 50% te hebben.
- Microorganismen: hiermee wordt het filtermateriaal geënt, zodat de verontreinigingen afgebroken worden.

Het compostfilter kan maximaal  $350 \text{ m}^3 \text{ lucht/m}^2 \text{ compost.hr}$  verwerken.

Figuur 4.2 geeft de samenstelling van het filtermateriaal weer.

#### 4.2.4 Het actief koolfilter

Nadat de stripkolom de verontreinigingen voor het grootste deel uit de vloeistofstroom heeft gehaald, is er nog een kleine hoeveelheid over die ook verwijderd moet worden. Hiervoor wordt een actief koolfilter gebruikt.

Een koolfilter bestaat uit een bed van actief koolkorrels die gestort zijn op een zeef of een geperforeerde plaat. De vloeistof komt van boven af de kolom in. Als de kolom van onderaf wordt aangestroomd is er een grote kans op fluidisatie met als gevolg attritie en verlies van adsorberend materiaal. Hoewel adsorptie-eenheden meestal uit meerdere filters bestaan, is er hier maar een enkel filter in gebruik, omdat de enige functie een laatste reiniging is en het filter daarom niet zo vaak vervangen hoeft worden. Het koolfilter is gevuld met een CAL-type actief kool met een intern oppervlak van  $1140 \text{ m}^2/\text{g}$  kool en  $D = 3 \text{ mm}$  [25], de porositeit van de pakking is 0.38 en de inwendige porositeit van de kool is 0.64. De dichtheid bedraagt  $500 \text{ kg/m}^3$  kool [26].

Aangenomen is dat onder de gekozen omstandigheden 90% van de kool gebruikt is voordat de pakking vervangen moet worden. De evenwichtsgegevens zijn te vinden in bijlage E, waar ook de oorsprong van de gegevens vermeld is.

*Plantsoek  
"Jillans"*



### 4.3 Het biotechnologisch proces

#### 4.3.1 Inleiding

Alvorens er sprake kan zijn van enige biologische afbraak moet het juiste microorganisme aanwezig zijn. Niet ieder microorganisme is namelijk in staat koolwaterstoffen als alkylbenzenen en n-alkanen te degraderen. Het gewenste microorganisme moet aan de volgende voorwaarden voldoen:

- Het moet in staat zijn de verontreiniging af te breken tot  $\text{CO}_2$  en  $\text{H}_2\text{O}$ .
- Het moet zich kunnen hechten aan actief koolpoeder (PAC).

In de literatuur komt de bacterie soort *Pseudomonas* als de meest veelzijdige bacterie die benzine componenten afbreekt naar voren. Gibson et al. [27] toonden aan dat *Pseudomonas putida* benzeen en toluen kan afbreken. De snelheid waarmee toluen en benzeen geoxideerd worden is gelijk. Higgins en Gilbert [28] noemen naast deze soort ook *P. aeruginosa* bij de afbraak van benzeen en alkyl-benzenen. De bacterie *P. ovorans* is zeer uitgebreid onderzocht voor groei op n-alkanen [28,29]. De gevolgde afbraakroutes staan vermeld in bijlage F.

Naast vele andere bacteriën is *Pseudomonas* in staat om zich aan actief kool te hechten [30].

#### 4.3.2 Kinetiek

Adsorptie van de organische componenten aan het actief koolpoeder is initieel een sneller proces dan biodegradatie. Daarnaast biedt het PAC ook adsorptie plaatsen voor microorganismen en andere nutriënten. Door adsorptie hebben de microorganismen toegang tot een lokaal hogere substraatconcentratie [31].

Li and DiGiano [32] stelde vast dat de hogere specifieke groeisnelheid afhankelijk was van de geadsorbeerde substraatconcentratie. Er trad een maximale specifieke groeisnelheid op boven een bepaalde hoeveelheid geadsorbeerd substraat. Ze vermeldde echter niet waar deze grens lag.

Microscopische observaties toonde dat meer bacteriën aan het oppervlak gehecht zijn dan vrij in suspensie. Zobell meldt dat beide organische stoffen en microorganismen geadsorbeerd moesten zijn aan het kooloppervlak om degradatie te laten plaatsvinden. [33].

Een recent artikel van Chudyk en Snoeyink [31] over de interactie tussen biodegradatie en adsorptie van lage concentraties (1 mg/l) fenol vermeldt dat grote mate van bioregeneratie (zie ook H5.3) optreedt.

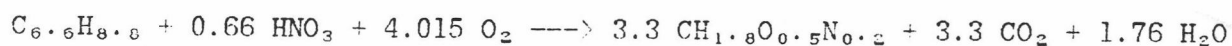
Voor het opgestelde kinetiek model voor afbraak van de organische componenten zijn de volgende aanname gedaan:

- Door attritie en adsorptie is de verdeling van het microorganisme over de vloeistof fase en vaste fase als 1:10.
- Er vindt complete bioregeneratie plaats; dwz alle geadsorbeerde organische componenten worden in een circulatieloop volledig omgezet.
- Er vindt volledige omzetting plaats naar biomassa, kooldioxide en water.
- Er vindt geen co-metabolisme plaats. Co-oxidatie betekent dat het microorganisme het substraat omzet naar een of meer intermediären maar

niet in staat is te groeien ten kost van deze reactie of de component verder af te breken. [15]

- Alle organische componenten worden simultaan afgebroken; hierdoor blijft benzeen als enig component over als criterium voor de effluent-concentratie. Kort: 25 mg/l organische componenten wordt afgebroken tot  $10^{-3}$  mg/l.
- De microorganisme die vrij in suspensie zijn vormen de ent cq. de beginconcentratie aan biomassa voor de bioreactor.
- De geadsorbeerde microorganisme uit de recyclestream doen niet mee aan de omzetting maar zijn erom de stevige ent in stand te houden.

Er van uitgaande dat elk verontreinigingsoort even snel afgebroken wordt, kan een gemiddelde reactievergelijking voor omzetting in biomassa, kooldioxide en water opgesteld (bijlage G) worden:



Waarvoor geldt dat:  $M_w = 88.0$  ;  $Y_{sx} = 0.92$  gX/gS en  $Y_{ox} = 0.63$  gX/gO<sub>2</sub>

Als alle andere nutriënten in voldoende mate aanwezig zijn zijn de organische componenten het enige substraat dat de groei limiteerd. De specifieke groeisnelheid is dan afhankelijk van de substraat concentratie en voldoet aan de Monodvergelijking [34]:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{C_s}{K_s + C_s} \quad (4.3)$$

De biomassaproductiesnelheid wordt gegeven door:

$$\frac{dC_x}{dt} = r_x = \mu \cdot C_x \quad (4.4)$$

De substraatconsumptiesnelheid door:

$$\frac{dC_s}{dt} = r_s = \frac{r_x}{Y_{sx}} \quad (4.5)$$

Waarbij de ruwe aanname gedaan wordt de maintenance te verwaarlozen. De hoeveelheid aanwezige biomassa bepaald de substraatconsumptie.

*ingedrukt  
lage conc?*

# In de eerste bioreactor wordt door adsorptie de lokale substraatconcentratie voor de microorganisme zo verhoogd dat aangenomen kan worden dat  $K_s \ll C_s$  geldt. Vergelijkingen (4.4 en 4.5) kunnen dan vereenvoudigd worden tot:

$$r_x = \mu_{\max} \cdot C_x \quad (4.6)$$

$$r_s = \frac{\mu_{\max}}{Y_{sx}} \cdot C_x \quad (4.7)$$

In deze eerste bioreactor wordt de substraat concentratie van 25 mg/l naar 1 mg/l verlaagd. De berekening van de hoeveelheid biomassa die in de recycle stream aanwezig moet zijn staat in bijlage G. Door het verdunnende effect is de  $C_s = 0.5$  mg/l.

# In de tweede bioreactor wordt de substraat concentratie verlaagd van 0.5 mg/l naar  $10^{-3}$  mg/l, de B-norm. De substraatconcentratie is nu dusdanig laag dat vergelijking (4.3) gebruikt moet worden. Daar de substraatconcentratie op het kool niet bekend is wordt aangenomen dat de specifieke groeisnelheid in deze reactor met een factor 12 verlaagd wordt. ( $\mu = 0.00083 \text{ hr}^{-1}$ ), dit betekent eveneens dat  $C_s \ll K_s$ .

#### 4.3.3 Adsorptie

Adsorptie van de organische componenten zal voornamelijk daar plaatsvinden waar zich geen microorganismen bevinden. Uitgaande van de maximaal benodigde hoeveelheid biomassa in het begin van de looptijd van het zuiveringsproces is de bedekkingsgraad van het koolpoeder door microorganismen berekend (bijlage G). Van de 30 w% PAC in de bioreactoren is maximaal 45% bezet door microorganismen wat ook in de tijd zal afnemen.

De adsorptie isotherm die voor het PAC gebruikt is wordt in bijlage H beschreven. Om de concentratie van 25 mgS/l te verlagen naar 1 mgS/l zou 200 mg PAC/l nodig zijn. Deze hoeveelheid hoeft niet per binnen komende liter toegevoerd te worden daar bioregeneratie plaatsvindt. Met een gewichtspercentage van 30 % zitten we aan de ruime kant.

#### 4.3.4 Zuurstofconsumptie en overdracht

##### **Zuurstofconsumptie**

Uit de gemiddelde reactievergelijking voor de omzetting van substraat volgt dat voor de omzetting van 1 gram  $C_{6.6}H_{8.8}$  1.4516 gram  $O_2$  nodig is. De zuurstofconsumptiesnelheid  $r_{O_2}$  - ook wel Oxygen Uptake Rate (OUR) genoemd - kan als volgt worden beschreven:

$$OUR = r_{O_2} = \frac{r_x}{Y_{ox}} \text{ of } 1.4516 \cdot r_s \quad [\text{mg } O_2/\text{l.hr}] \quad (4.8)$$

Voor de eerste bioreactor R9 in het begin van het proces is de OUR 8.71 mg  $O_2$ /l.hr. Voor de tweede bioreactor R11 is de OUR 1.4516 mg  $O_2$ /l.hr.

##### **Zuurstofoverdracht**

De zuurstofoverdrachtsnelheid - de Oxygen Transfer Rate (OTR) - van uit de gasfase wordt bepaald door twee factoren: de stofoverdrachtscoefficient en het concentratie verschil.

$$OTR = k_1 a * (C_{O_2,L}^* - C_{O_2,L}) \quad (4.9)$$

De  $k_1 a$  in een geroerde tank is de overall stofoverdrachtcoefficient die afhankelijk is van de vermogensinput (P/V) voor roeren, van de gassnelheid ( $v_g$ ) en van de rangschikking in de tank (baffles, roerconfiguratie en locatie van de sparger). [35]

Om geen  $O_2$ -limitatie te laten optreden moet  $OTR \gg OUR$ . Daar de luchttoevoer minimaal moet zijn moet aan de volgende voorwaarde voldaan worden:

$$OUR = OTR \quad (4.10)$$

Het is tevens van belang om de  $O_2$ -concentratie niet hoger te houden dan minimum nodig voor behandeling. Painter [15] ondervond dat de  $O_2$ -opnamesnelheid bij een  $O_2$ -concentratie van 8 mg/l 99 % is van de maximale waarde, bij 2 mg/l is dat 95 % en bij 1 mg/l 90 %. Kinetisch is er geen voordeel om de  $O_2$ -concentratie boven de 2 mg/l te houden. Een  $O_2$ -concentratie van 4 mg/l gaf weinig verschil in afbraaksnelheid bij verschillende verblijftijden. Aangenomen wordt dat de  $O_2$ -concentratie in het medium 4 mg/l moet zijn. Er geldt dus:

$$OTR = k_1 a \cdot (C_{O_2}^* - 4) \quad (4.11)$$

Met behulp van vergelijking 4.8, 4.10 en 4.11 kan de benodigde  $k_1 a$  berekend worden:

$$\begin{aligned} \text{Eerste bioreactor R9 :} & \quad k_1 a = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ (s}^{-1}\text{)} \\ \text{Tweede bioreactor R11:} & \quad k_1 a = 5.8 \cdot 10^{-5} \text{ (s}^{-1}\text{)} \end{aligned}$$

#### 4.3.5 Overige condities

##### \* Nutriënten

Naast de verontreiniging die als koolstofbron dient heeft het microorganisme nog andere essentiële elementen nodig om te groeien nl. stikstof, fosfor en enkele sporelementen zoals K, Ca, Zn, Fe en Mn. De optimale gewichtsverhouding C:N:P varieert per organisme maar zal bij benadering 100:10:2 zijn. [36]

Bij behandeling van petrochemisch afvalwater bleek extra toevoeging van N en P noodzakelijk. [37] Bij biologische grondwaterbehandeling was het ook nodig om nitraat en fosfaat als extra voedingsstof toe te voegen (bijlage C).

De goedkoopste stikstof/fosfaat bron is kunstmest wat tevens ook kalium bevat. De samenstelling hiervan in g/g mest is:

12% N als nitraat

10% P als  $P_2O_5$

18% K als  $K_2O$

rest Ca vulmiddel.

Tevens wordt magnesium in de vorm van de meststof bitterzout toegevoegd. Andere sporelementen worden geacht in voldoende mate aanwezig te zijn. In bijlage G wordt berekend hoeveel NPK en bitterzout er nodig is.

##### \* pH

De pH is een van de primaire limiterende factoren voor de degradatie. In het algemeen is een pH van 6-8 nodig voor biologische oxidatie. Beneden pH 6 treedt geen merkbare afbraak op. [37] Daar pH in de precipitatie stap boven de 8 gekomen is zal er een pH-aanwezig moeten zijn om deze te verlagen naar 7.

### \* Temperatuur

De optimale temperatuur voor microorganismen ligt tussen de 20 en 40 °C afhankelijk van de soort. [37] In dit proces is de temperatuur 11 °C omdat het ondoenlijk is om zoveel water op te warmen. Elk temperatuurstijging door vermogensinput, beluchting of seizoenomstandigheden is meegenomen en zal de reactiesnelheid bevorderen. De gebruikte kinetiek parameters zijn afkomstig van een actief slib installatie die bij lage temperatuur benzeen afbreekt.

### \* Inhibitors

Groei van bacteriën kan geremd worden door de aanwezigheid van zouten van een aantal metalen zoals Cu, Pb, Zn, Ni en Cr en door cyanide, thiocynaat en bepaalde organische stoffen. Deze inhibitie kan op verschillende manieren plaats vinden:

- door reactie met het enzym; het enzym is hierdoor niet meer voor het substraat toegankelijk,
- door metaalreactie met de -SH groep van het enzym,
- door verwijdering van essentiële metalen uit het enzym complex,
- door blokkering van het aanvoer kanaal in de celwand,
- door het verstoren van de celwandstructuur.

Chemische reacties bijvoorbeeld precipitatie met andere stoffen in het water of met de biomassa zelf kan de concentratie van de inhibitor verlagen. [15]

In ieder geval is het noodzakelijk dat het behandelingssysteem voor de bioreactor de nodige metalen en andere storende stoffen verwijderd om het biotechnologische proces niet te verstoren.

## 5 MOTIVERING VAN KEUZE VAN DE APPARATUUR

### 5.1 De voorbehandeling

#### 5.1.1 Inleiding

Het eerste deel van beide processen verloopt op gelijke wijze. Het verontreinigde grondwater wordt opgepompt en in een bezinkbak van meegekomen vaste bestanddelen ontdaan. Deze bezinkbak fungeert meteen als egalisatietank om een constante stroom in de rest van het proces te garanderen. Om aanwezige metaal-ionen te verwijderen worden in een tank de benodigde chemicaliën toegevoegd om tot een precipitatie van hydroxiden te komen. Deze hydroxiden worden vervolgens in een tweede bezinkbak afgescheiden. De rest van het proces wordt beschermd door een precipitatie-stap gevolgd door een zandfilter om eventuele resten van de hydroxide-vlokken uit de vloeistofstroom te halen. Na de voorbehandeling wordt aangenomen dat de vloeistofstroom alleen nog maar de opgeloste organische stoffen bevat.

#### 5.1.2 De bezinkbak/egalisatietank (V2)

Als het grondwater wordt opgepompt bevat het nog een hoeveelheid vaste stof (zie Tabel 2.2). Deze wordt eerst verwijderd om complicaties in het verdere proces te voorkomen.

Verder moeten fluctuaties in de hoeveelheid opgepompt grondwater zoveel mogelijk worden opgevangen om een constante stroom in de rest van het proces te waarborgen. Hiertoe wordt gebruikt gemaakt van een bezinkbak zonder overloop. Het water wordt op een bepaald niveau afgetapt. Een level-control zorgt ervoor dat het waterpeil in de tank niet beneden het aftap-punt komt.

#### 5.1.3 De precipitatie-eenheid (V3,V4)

Deze eenheid bestaat uit een geroerd vat en een precipitatie tank. In het geroerde vat worden de benodigde chemicaliën (NaOH, FeCl<sub>3</sub>) gemengd met de grondwaterstroom. Met behulp van een pH-control wordt een pH van 8.5 à 10.5 gewaarborgd, zodat de aanwezige metaal-ionen (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) hydroxiden vormen. De opgeloste organische verontreinigingen worden in deze stap ongemoeid gelaten.

Vervolgens wordt de vloeistofstroom door een precipitatie tank gestuurd waar de hydroxiden bezinken en afgevoerd kunnen worden. Uit de overloop van de precipitatie tank wordt de stroom afgevoerd naar de rest van het proces.

Deze stap is nodig om te voorkomen dat de stripkolom dichtslibt als de hydroxiden zich daar zouden vormen [11]. Dit zou gebeuren doordat de metaal-ionen reageren met de zuurstof uit de strip-lucht. Ook het biologisch systeem moet op deze wijze beschermd worden.

#### 5.1.4 Het zandfilter (fys M6, bio M8)

Om te voorkomen dat eventuele hydroxide-resten het vervolg van het proces bereiken, wordt een zandfilter toegepast in de waterstroom. De functie van de zandfilter is dus het waarborgen van de vloeistofkwaliteit voor de rest van het proces. Om een constante stroom te behouden, wordt het filter van onder naar boven doorstroomd, zodat het hele filter vol vloeistof blijft. Op dit punt zorgt een flow-control voor de gewenste stroom.

## 5.2 Het fysisch proces

### 5.2.1 Inleiding

Na de algemene voorbehandeling volgt er in dit geval een stripkolom. De hier ontstane stromen worden beide verder gereinigd door middel van een actief koolfilter in de waterstroom en een compostfilter in de luchtstroom. Deze methode wordt ook in de literatuur beschreven [12] en voorkomt dat de verontreinigingen alleen maar van het grondwater naar de lucht verplaatst worden.

### 5.2.2 De stripkolom (M6)

De stripkolom zorgt ervoor dat de verontreinigingen uit het water in de lucht terecht komen. Op deze manier worden de slechtere adsorptie-eigenschappen van de stoffen in water (bijlage E) vermeden.

De kolom is voorzien van een losgestorte pakking van 38 mm metalen Pall-ringen. De kolom is zo ontworpen dat de benzeen-concentratie wordt teruggebracht van de beginwaarde naar  $5 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3$  water. De berekening van de kolomgrootte is uitgevoerd met behulp van bijlage I.

Voor de dimensionering van de kolom is gebruik gemaakt van een aantal vergelijkingen [23]. De hoogte van een evenwichtstrap wordt bepaald door

$$H_{ox} = H_x + \frac{H_y}{S} \quad (5.1)$$

hierin is de axiale menging verwaarloosd

$$H_x = 0.00029 u_1^{0.27} \frac{D_r^{0.33}}{D_1^{0.5} g^{0.167}} \quad (5.2)$$

$$H_y = 0.00044 \frac{u_g D_r \rho_g^{0.4}}{\eta_g} \quad (5.3)$$

$$S = m \frac{G}{L} \quad (5.4)$$

De diameter van de kolom werd bepaald door middel van figuur 5.1. Hiermee wordt een dimensieloze groep als functie van de flowparameter gegeven

$$\text{dim. grp.} = \lambda \left( \frac{F}{g} \right)^{0.5} \left( \frac{\eta_1}{\eta_g} \right)^{0.05} \quad (5.5)$$

$$\varphi = \frac{u_1}{u_g} \left( \frac{\rho_1}{\rho_g} \right)^{0.5} \quad (5.6)$$

$$\lambda = u_g \left( \frac{\rho_g}{\rho_1} \right)^{0.5} \quad (5.7)$$



Deze waarde van  $\lambda$  geldt voor de floodinggrens. Met behulp van figuur 5.2 kan het percentage van de floodinggrens bepaald worden, om zo de stuwgrens te krijgen.  $\lambda$  wordt nu gecorrigeerd

$$\lambda_{\text{stuw}} = \lambda \frac{\text{percfl}}{100} \quad (5.8)$$

Vergelijking (5.7) levert nu  $u_g$  op.

Als  $u_g$  bekend is, kan de diameter van de kolom bepaald worden uit

$$d_{\text{kol}} = \left( \frac{4 \varphi_{v,g}}{\pi u_g} \right)^{0.5} \quad (5.9)$$

De lengte van de kolom wordt bepaald door

$$L = H_{\text{ox}} \cdot N_{\text{ox}} \quad (5.10)$$

$$N_{\text{ox}} = \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{uit}}}{\Delta C_{\text{ln}}} \quad (5.11)$$

$$\Delta C_{\text{ln}} = \frac{(C_{\text{in}} - C_{\text{in}}^*) - C_{\text{uit}}}{\ln\left(\frac{C_{\text{in}} - C_{\text{in}}^*}{C_{\text{uit}}}\right)} \quad (5.12)$$

$$C_{\text{in}}^* = \frac{C_{\text{in}}}{S} \quad (5.13)$$

Aangezien de lengte van de kolom nu vastligt, kan nu ook voor de andere componenten de uitgaande concentratie berekend worden.

Hiertoe wordt eerst voor iedere component met behulp van de vergelijkingen (5.1 - 5.5) de  $H_{\text{ox}}$  berekend. Vergelijking (5.10) levert dan  $N_{\text{ox}}$  op voor iedere component.

Uit vergelijking (5.11) kan nu de uitgaande concentratie berekend worden.

Ook hier is er weer sprake van een aantal aannamen en wel met betrekking tot de evenwichtsgegevens van de verschillende componenten. Voor de helling van de evenwichtslijn van toluen en xyleen wordt aangenomen dat deze gelijk is aan die van benzeen. Voor nonaan en decaan werden de Henry-coëfficiënten afgeleid uit de dampdruk en oplosbaarheid bij 11°C.

Tot nu toe is er alleen nog maar aandacht besteed aan de vloeistofstroom, maar het zal duidelijk zijn dat de verontreinigingen in de gasstroom terecht komen.

Om de concentratie in deze stroom te bepalen, zal een massabalans opgesteld moeten worden. Voor iedere component geldt:

$$C_{\text{gas}} = (C_{\text{in}} - C_{\text{uit}}) \frac{P_1 \varphi_{v,g}}{\varphi_{v,l}} \quad (5.14)$$

Hiermee zijn alle stromen bepaald.

De drukval over de kolom wordt berekend aan de hand van de holdup ( $h_1$ ):

$$h_1 = 1.22 \left( \frac{u_1^2}{d_r g} \right)^{1/3} \quad (5.15)$$

Dit verband geldt voor Pall-ringen.

$$\frac{\Delta p}{H} = 0.40 F_P F^2 \quad (5.16)$$

Hierin is  $F_P$  de pakkingsfactor (is  $140 \text{ m}^{-1}$  zie fig. 5.3) en  $F$  de belastingsfactor:

$$F = u_g \rho_g^{0.5} \quad (5.17)$$

De drukval wordt dan berekend uit:

$$\frac{\Delta p_{\text{nat}}}{\Delta p_{\text{droog}}} = (1 - 2.6h_1)^3 \quad (5.18)$$

### 5.1.3 Het compostfilter (M9)

De verontreinigingen worden door de stripkolom uit het water naar de lucht verplaatst. Het is nu natuurlijk niet de bedoeling dat ze gewoon geloosd worden, vandaar dat er een compostfilter in de luchtstroom geplaatst is. Het filter bestaat uit een kolom gevuld met compost. Dit materiaal dient als voedingsbodem voor microorganismen die de verontreinigingen afbreken uit de luchtstroom. Het geheel wordt besproeid om de compost vochtig te houden en op die manier het leefmilieu van de microorganismen in stand te houden. Zou dit niet gedaan worden, dan zou door de grote luchtstroom het compost al snel uitdrogen.

Het filter heeft een oppervlak van  $6 \text{ m}^2$  en een hoogte van  $1 \text{ m}$ , met deze afmetingen is het geschikt om de beginconcentraties te verwerken. Dit komt neer op een verblijftijd van iets meer van  $10 \text{ s}$ .

Aangezien de concentraties verlopen in de tijd, zal de hoeveelheid microorganismen die aanwezig zijn in het compostfilter, ook afnemen. Dit komt doordat er een tekort aan voedingsstoffen optreedt op het moment dat de concentratie vermindert. Een deel van de microorganismen zal dus afsterven.

### 5.1.4 Het actief koolfilter (M11)

Het actief koolfilter verwijdert de laatste resten van de verontreinigingen. Er is uitgegaan van een volume van  $1 \text{ m}^3$ . Uitgaande van een lengte/diameter-verhouding  $\approx 5$  om een gunstige doorbraak te verkrijgen, zodat het actief kool voor 90% gebruikt wordt, komt dit neer op de volgende afmetingen:

$$H = 3 \text{ m}$$

$$D = 0.65 \text{ m}$$

De verblijftijd is in dit geval  $346 \text{ s}$ , hetgeen voldoende moet zijn voor het instellen van de evenwichten. Omdat de concentraties in de loop van de tijd veranderen, worden de geadsorbeerde hoeveelheden berekend berekend aan de hand van de evenwichtsgegevens die op het beschouwde tijdstip gelden. Op deze manier is desorptie in rekening gebracht.

Bij het vaststellen van het aantal bedrijfsdagen is er rekening mee gehouden dat het filter vervangen zal moeten worden. Omdat dit niet zo vaak hoeft te gebeuren is er geen tweede parallel geplaatste filter aanwezig, maar wordt de installatie hiervoor stilgelegd. In bijlage I is aangegeven wanneer het filter vervangen moet worden.

## 5.3 Het biotechnologische proces

### 5.3.1 Inleiding

In het Handboek voor bodemsaneringstechnieken [18] worden twee processen beschreven voor het verwijderen van organische componenten uit water:

#### A. Biologisch/adsorptie aan actief kool proces.

Het zuiveringsproces (figuur 5.4a) is geschikt voor de behandeling van water met hoge concentraties organische componenten. Chemische coagulatie en pH-regeling zijn nodig ten behoeve van de verwijdering van zware metalen mede ter bescherming van het biologische systeem.

Door middel van biologische behandeling worden de organische componenten ten behoeve van ontlasting van het erop volgende adsorptieproces gereduceerd. De actief koolfilters worden toegepast om de moeilijk afbreekbare organische residuen te verwijderen.

Dit zuiveringssysteem is afhankelijk van het functioneren van de biologische stap, vrij effectief en relatief goedkoop. Een bezwaar van dit systeem kan evenwel het vrijkomen van vluchtige verbindingen zijn gedurende het beluchten met daaruit voortvloeiend de mogelijkheid van luchtverontreiniging.

Als residu komen bij dit systeem chemisch slib, biologisch slib en actief kool vrij. Actief kool kan geregenereerd worden, terwijl het slib afgevoerd zal moeten worden.

#### B. Adsorptie aan actief kool/biologisch proces.

Het schema van figuur 5.4b bestaat uit dezelfde eenheden echter met het verschil dat nu actief koolfiltratie voor biologische afbraak plaatsvindt en wel ter bescherming van het biologische systeem tegen hoge concentraties aan toxische bestanddelen.

De verwijdering is aanvankelijk 100%, terwijl binnen een bepaalde band van verontreinigingen de hoogte van de toegestane organische belasting van het biologische systeem van invloed is op de lengte van de run van de actief koolfilter en daarmee bepalend voor de kosten van deze zuiveringsstap. Chemische coagulatie, bezinking en filtratie voorkomen te snelle verliezen aan drukhoogte en kunnen het doorslagpunt verleggen.

Bij aanwezigheid van meer organisch materiaal zal, tengevolge van accumulatie, het actief koolfilter eerder verzadigd zijn. Verwijdering door biologische processen zal daarom in het algemeen goedkoper zijn.

In beide processen zorgen twee systemen achter elkaar voor de verwijdering van de verontreiniging. Combinatie van deze systemen in een proces is een betere oplossing. Het schema van figuur 5.4c geeft de biofysische behandeling weer, waarbij het actief slibproces gecombineerd wordt met behandeling in een procesreactor met behulp van actief koolpoeder. Dit systeem is eenvoudiger dan de vorige systemen bij gelijke kwaliteit van het effluent. Voornaamste voordeel is het goedkoper zijn van poederkool in vergelijking met korreligkool en een vermindering van het aantal fysische stappen. Ten behoeve van het voorkomen van stagnatie bij het zuiveringsproces kan aan het begin een bufferbassin geplaatst.

De laatste tien jaar is er veel onderzoek verricht naar het mechanisme van actief koolpoeder in een actief slib systeem (zie ook bijlage I). Het simpel optellen van het effect van kooladsorptie en biologische activiteit lijkt onwaarschijnlijk. Veel onderzoekers hebben een schijnbaar synergisme waargenomen. Dit betekent dat het totale effect van kooladsorptie en biologische oxidatie samen groter is dan de som van deze effecten elk afzonderlijk genomen. De bron van dit synergetisch effect vindt zijn bijdrage in [33]:

1. stimulering van de biologische activiteit door:
  - verwijdering van remmende of toxische stoffen
  - concentrering van nutriënten
2. bioregeneratie van de adsorptie capaciteit van het actief kool.

Het relatieve belang van dit effect hangt grotendeels af van de karakteristieken van het afvalwater en de aard van het microorganisme dat de biomassa vormt. Bioregeneratie en verwijdering van remmende en toxische stoffen leveren in het algemeen de belangrijkste bijdragen. De stimulering van biologische activiteit door concentrering van de nutriënten is alleen relevant in behandeling van water met lage concentratie aan vervuiling. [33]

Dit laatste argument is voor de keuze van het biotechnologische proces het belangrijkste punt geweest. Nu kan zelfs bij lage concentraties aan verontreiniging met hoge specifieke groeisnelheid van het microorganisme gewerkt worden. Tevens kan nu de verblijftijd en dus het reactorvolume laag gehouden worden. Door het optreden van (bio)regeneratie van het koolpoeder hoeft dit nauwelijks verversst te worden, tevens scheelt dit in slibpoeder emissies. Voor verversing van het actief koolpoeder, dat gedurende de looptijd zal slijten, kan als indicatie genomen worden dat het in de looptijd van het proces 1 keer helemaal verversst wordt.

Om te voorkomen dat het koolpoeder gaat drijven in de bioreactor moet het in de vorm van een suspensie onder roeren aan het proces toegevoegd worden. [13, 40]. In het proces bevindt zich totaal 23.3 ton koolpoeder. Als dit in de looptijd van 600 dagen 1 maal verversst wordt betekend dit:

38.83 kg/dag = 1.618 kg/hr. De volume toename door toevoegen van het kool aan de toevoerstroam  $\Phi_{v4}$  naar de bioreactor R9 bedraagt:  $1.1557 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$ . Dit kan ten opzichte van de  $10.42 \text{ m}^3/\text{hr}$  verwaarloosd worden. Van de hoofdstroam  $\Phi_{v2}$  wordt  $0.42 \text{ m}^3/\text{hr}$  afgetapt om het kool in de geroerde tank V6 te mengen. Met een volume voor V6 van  $1 \text{ m}^3$  heeft de kool 2.38 hr de tijd om te bevochtigen. Ongeveer 4 % van de verontreiniging heeft door deze procedure de kans om aan het (verse) kool te adsorberen. De rest zal door het recirculerende kool geadsorbeerd worden.

Nu het idee van het proces gekozen is moeten de onderdelen verder uitgewerkt worden.

### 5.3.2 De bioreactor (R9,R11)

In de aerobe bioreactor bevinden zich drie fasen:

- de vaste fase: het koolpoeder met geadsorbeerde microorganismen en organische componenten
- de vloeistof fase: het grondwater met microorganismen en organische componenten

- de gas fase: lucht waaruit de zuurstof wordt overgedragen naar de vloeistof fase.

Het grondwater wordt continu toe- en afgevoerd wat het meest voor de hand liggend is voor langdurige toepassing. Dit geldt ook voor het koolpoeder met microorganismen dat continu uit de bezinkbak toegevoerd wordt. De microorganismen moeten continu toegevoerd worden (continu enten) omdat anders het systeem beperkt zou worden door het uitspoelen van het microorganisme (groeisnelheid < verdunningsnelheid). De gewenste behandelingsnelheid van het grondwater kan dan niet gehaald worden.

De lucht voorziet de microorganismen in hun zuurstofbehoefte nodig voor de afbraakreactie. Tevens moet de luchttoevoer zo laag mogelijk gehouden worden om het strippen van de organische componenten uit het water te minimaliseren.

Om een goed contactproces en stofoverdracht te verkrijgen tussen de drie fasen en aanverwanten, is het noodzakelijk dat het systeem goed gemengd is. In figuur 5.5 staan een drietal aerobe tank fermentoren [35]. Het is duidelijk dat de air-lift reactoren niet in aanmerking komen. De ingebrachte lucht dient tevens als mengsysteem waardoor om het gewenste mengvermogen te krijgen veel extra lucht toegevoerd moet worden in verhouding met wat nodig is voor de omzetting van de organische componenten. Het stripeffect zou hierdoor verhoogd worden. Minimaliseren van de luchttoevoer kan alleen als er een extra roersysteem wordt toegevoegd om het koolpoeder te suspenderen en de zuurstofoverdracht van de minimale luchtstroom te verbeteren.

Gekozen wordt voor een standaard geroerde tank met keerschotten en een aparte beluchter (figuur 5.6). De vier keerschotten zorgen ervoor dat geen roterende stroming optreedt. Een vlakke bodem is ongunstig daar aan de randen gemakkelijk dode zones ontstaan, waar vaste stof zich kan ophopen. Een ronde bodem is daarom gewenst. [41]

Frijlink [42], die onderzoek verricht heeft in geroerde driefase reactoren, heeft een vergelijking gemaakt van radiale, opwaartse en neerwaartse stroming veroorzakende roerders in een 12 vol% (=25 mass%) zand-water suspensie. De radiale roerders (D6F, fig 5.7) bleken het meest economisch en vertoonden slechts een kleine toename van de benodigde roerdersnelheid voor complete suspensie.

Een sparger als beluchtingsapparaat voor een geroerde tank vereist minder vermogensinput (P/V) dan een geperforeerde of poreuze plaat [35]. De sparger is geplaatst op 0.1 T. (Twee roerders aan een as verhoogt de OTR maar gaat ten koste van het vermogen. Hetzelfde geldt voor de toename van de roerderdiameter tov de tankdiameter.)

De verblijftijd in de eerste tank is op 2 uur gesteld, om de afmeting beperkt te houden. Deze korte verblijftijd voor een biologisch proces vergt echter wel een stevige biomassa ent die door de recirculatiestroom geleverd moet worden. Daar  $\Phi_{v_4} : \Phi_{v_5} = 1$  en gesteld is dat  $H=T$  volgt:

$$V_e = \tau_e * \Phi_{v_7} = \tau_e * (\Phi_{f_4} + \Phi_{r_5}) = 41.68 \text{ m}^3$$

$$V_e = \pi/4 * T_e^3 \quad \longrightarrow \quad T_e = 3.758 \text{ m}$$

Voor de tweede tank die eigenlijk als een soort polishing stap fungeerd om de laatste restjes verontreiniging eruit te halen wordt de verblijftijd op 1 uur gesteld. Hieruit volgt:

$$V_{11} = \tau_{11} * \Phi_{10} = 20.84 \text{ m}^3$$

$$V_{11} = \pi/4 * T_{11}^3 \quad \longrightarrow \quad T_{11} = 2.983 \text{ m}$$

### Suspendering

Het meest gebruikte criterium voor suspenderen van vaste deeltjes in een vloeistoffase is het minimum suspenderings criterium van Zwietering. Het minimaal benodigde toerental van de turbine roerder om de vaste deeltjes niet langer dan 1 seconde op de bodem te laten rusten voorzij opgewerveld worden wordt gegeven door de relatie van Zwietering [43]

$$N_{\min} = 7.5 \frac{v^{0.1} \cdot dp^{0.2} \cdot g \cdot \frac{\rho_s - \rho_l}{\rho_l}^{0.45} \cdot \frac{\text{ms}}{\text{ml}} \cdot 100^{0.13}}{D^{0.85}} \quad (5.19)$$

Gezien het kleine dichtheidsverschil tussen water en actief kool ( $\Delta\rho = 400 \text{ kg/m}^3$ ) zal volgens fig 5.8 [41] slechts zacht geroerd hoeven te worden (ca.  $5.0 \text{ min}^{-1} = 0.08 \text{ s}^{-1}$ ).

Het verschil tussen beluchte en onbeluchte systemen, is dat er meer energie nodig is om deeltjes in suspensie te houden als er belucht wordt. Beginnend met een gasdebiet van nul, zal de roersnelheid verhoogd moeten om dezelfde mate van suspendering te houden (fig 5.9). [42] Warmoeskerken (1986) stelde vast dat de hydrodynamische condities van de roerder bepaald worden door drie onafhankelijke variabelen nl, het gasdebiet, de roersnelheid en de roerderdiameter die karakteriserend is voor de geometrie. Samen vormen deze variabelen het dimensieloze flowgetal:

$$Fl = \frac{\Phi_g}{N D^3} \quad (5.20)$$

In figuur 5.7 zijn de vermogensinputs voor minimumsuspendering als functie van het flowgetal uitgezet.

Het verband wordt gelegd met de afname in het vermogenskental bij beluchting. In het drie fase systeem kan dan de vermogensinput door de roerder beschreven worden met:

$$P_g = P_o^* \rho_l N^3 D^5 \quad (5.21)$$

waarbij  $P_o^*$  staat voor alle optredende effecten (beluchting, deeltjes).

### Schaalvergroten

Uit de vergelijking van Zwietering (5.19) kan een simpele relatie voor opschalen afgeleid worden:  $N_{js} D^{0.85} = \text{constant}$ . Uit de vergelijking voor de vermogensinput volgt dat het vermogen per volume eenheid  $P/V$  evenredig is met  $N^3 D^2$  wat resulteerd in

$$P/V \sim D^{-0.55} \quad (5.22)$$

Echter van deze relatie bestaan verschillende variaties in de literatuur, waarbij de exponent van D varieert van -1 (constante tipsnelheid) tot 0.5 ( $Fr = \text{constant}$ ). Vele beschouwen constante P/V een veilige regel voor opschalen terwijl andere van Zwietering's resultaat (5.22) als erg conservatief beschouwen. [42]

In de literatuur over drie fasen systemen is het tegenwoordig gebruikelijk het schaaffect aan te geven door middel van een exponentiele functie (Cheremisinoff; Harnby et al. 1986) [44];

$$\frac{(P/V)_{gr}}{(P/V)_{kl}} = \left( \frac{V_{gr}}{V_{kl}} \right)^q \quad (5.23)$$

Het quotient aan de linkerkant van het gelijkteken heet het schaaffect, aan de rechterkant de schaafactor (betrokken op het volume). Het schaaffect is het veranderen van P/V bij minimale suspending bij geometrisch gelijkvormig schaalveranderen. Een q van -0.14 is vastgesteld door Kleijntjens [44] voor geroerde drie fasen systemen, onafhankelijk van de slurrieconcentratie. De negatieve q geeft aan dat er een schaaffect bestaat waardoor er minder vermogen per volume nodig is op grotere schaal.

#### Correctie

In het proefschrift van Frijlink [42] wordt gewerkt met zand met een smalle deeltjes verdeling rond de 0.120 mm. Daar de door ons gebruikte kooldeeltjes lichter zijn dan zand zal het specifiek vermogen P/V nodig om het kool te suspenderen ook minder zijn.

De neerwaartse kracht op het deeltje veroorzaakt door het zwaartekracht veld is [43]:

$$F_{\downarrow} = \frac{\pi}{6} * dp^3 * \Delta\rho * g \quad (5.24)$$

Het specifiek vermogen geleverd door de roerder levert de kracht voor het suspenderen:  $F_{\uparrow}$ . Daar de diameter van de kool en zand deeltjes gelijk zijn bepaald alleen het dichtheidsverschil van de deeltjes ten opzichte van elkaar het verschil in bezinking. Als  $F_{\downarrow}$  verminderd zal om de deeltjes te suspenderen de  $F_{\uparrow}$  evenredig kunnen verminderen. De volgende factor wordt genomen om de (P/V) te verminderen:

$$f = \frac{F_{\downarrow} \text{ kool}}{F_{\downarrow} \text{ zand}} = \frac{\Delta\rho \text{ kool}}{\Delta\rho \text{ zand}} = \frac{400}{1400} = 0.286 \quad (5.25)$$

$$(P/V)_{\text{kool}} = f * (P/V)_{\text{zand}} \quad (5.26)$$

#### De beluchting

De gewenste grootte van de  $k_1 a$  voor een goed verloop van de omzetting staat vermeld bij de procescondities. De invloed van de slurriedichtheid, de roersnelheid en het gasdebiet op de  $k_1 a$  staat vermeld in figuur 5.10. Het effect van de slurriedichtheid van dit soort deeltjes op de  $k_1 a$  is zeer gering, zodat voor 23 vol% slurrie de lijn doorgetrokken kan worden.

#### Berekening van de roersnelheid en het gasdebiet

Voor verwerking van de gevonden gegevens moet aan de volgende eisen worden voldaan:

- \* zodanige roersnelheid dat er sprake is van suspendering
- \* zodanige gassnelheid dat aan de OUR voldaan wordt en het stripeffect verwaarloosbaar is. ( R9 :  $k_1 a = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$   
R11:  $k_1 a = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  ; zie H4.2.4)

In bijlage K wordt voor beide bioreactoren de roersnelheid en gasdebiet (+ gasholdup) berekend. Samengevat volgt voor beide bioreactoren:

|                                | Bioreactor 1        | Bioreactor 2        |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| $v_z$ (m/s)                    | $7.8 \cdot 10^{-6}$ | $3.9 \cdot 10^{-6}$ |
| $\Phi_g^g$ (m <sup>3</sup> /s) | $8.6 \cdot 10^{-5}$ | $2.7 \cdot 10^{-5}$ |
| $P/V$ (W/m <sup>3</sup> )      | 58.0                | 64.0                |
| P (W)                          | 2421.2              | 1334.0              |
| N (s <sup>-1</sup> )           | 0.387               | 0.464               |
| D (m)                          | 1.504               | 1.193               |

### 5.3.3 De bezinkbak (V13)

Een veel gebruikte constructie voor het afscheiden van vaste deeltjes uit vloeistoffen in gebruik bij waterzuivering en o.a. de mijn industrie [43] is de indikker (figuur 5.11)

In de bezinkbak wordt de slurrie uit de tweede bioreactor ingedikt van 329 kg PAC/m<sup>3</sup> naar 648 kg PAC/m<sup>3</sup>.

|             | kool<br>concentratie<br>kgPAC/m <sup>3</sup> | gewichts<br>percentage<br>% | volume<br>percentage<br>% |
|-------------|--|-----------------------------|---------------------------|
| $\Phi_{v9}$ | 329  | 30                          | 23.5                      |
| $\Phi_{v5}$ | 658  | 55.4                        | 47.0                      |

De vloeistoffase, die met de vaste stof meegaat, is qua samenstelling identiek aan de overloop, die vrij is van vaste stof.

De belangrijkste ontwerpparameter voor de bezinker is de bezinksnelheid van de af te scheiden deeltjes:  $v_z$ . In het steenkoolverslag [17] werd een bezinksnelheid van  $10^{-3} \text{ m/s}$  voor een koolslurrie van 20 gewichts% vermeld ( $d_p = 0.120 \text{ mm}$ ). Voor de gezamenlijke bezinksnelheid van een zwerm deeltjes van uniforme deeltjesgrootte geldt de relatie van Richardson en Zaki:

$$v_z = v_p \cdot (1-\varphi)^n \quad \text{met } n = 2.4 \quad (5.27)$$



Met behulp van deze relatie en de gegeven bezinksnelheid bij 20 w% slurrie kan de bezinksnelheid van een deeltjes bepaald worden:  $v_p = 1.4875 \cdot 10^{-3}$  m/s. Vervolgens kan een curve opgesteld worden waarin de bezinksnelheid tegen de slurrieconcentratie wordt uitgezet.

Voor het ontwerp van een continu indikker is een batchfluxcurve nodig [45, 46]. De deeltjesflux  $\psi$  is de hoeveelheid deeltjes dat een oppervlakte eenheid per tijdseenheid paseerd. Deze stroom van vaste stof kan berekend worden door op ieder punt de bezinksnelheid met de vaste stof concentratie te vermenigvuldigen:

$$\psi = v_z * C_{PAC} \quad \text{kg/m}^2\text{s} \quad (5.28)$$

Grafisch uitgedrukt als een functie van de concentratie vaste stof in figuur 5.12 (Bijlage K). Volgens de methode van Yoshioka wordt uit deze curve voor een gegeven bodem concentratie vaste stof de maximale bodemflux gehaald, waaruit het benodigde oppervlakte van de bezinkbak berekend kan worden. Op het punt  $C_{pac} = 658$  kg/m<sup>3</sup> wordt een raaklijn aan de curve getrokken waardoor op de verticale as de benodigde vastestofstroom af te lezen is. Daar geldt:

$$\psi = -\frac{\Phi v_g}{A_b} * C_{PAC_g} \quad (5.29)$$

kan met vergelijking 5.29 het oppervlak van de bezinkbak berekend worden. Uit de curve volgt:

$$\psi = 0.47 \text{ kg/m}^2\text{s} \quad \text{met} \quad \Phi v_g = 20.84 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$C_{PAC_g} = 329 \text{ kg/m}^3$$

zodat:  $A_b = 4.15 \text{ m}^2$  (D = 2.3 m)

Voor de hoogte H wordt een standaard waarde genomen van 2 m. Hiermee ligt ook het volume vast evenals de verblijftijd:

$$V_b = 8.3 \text{ m}^3 \quad \tau = 0.398 \text{ hr}$$

## 5.4 Pompen

### Berekening van de vloeistofpompen [47]

De met water in contact komende delen van de pomp zijn gemaakt van roestvrij staal. De leidingen zijn gemaakt van kunststof (PE). Gekozen is voor centrifugaalpompen, vanwege de betrekkelijk eenvoudige constructie en compacte afmetingen, waardoor ze bij vloeistoffen met lage viscositeit in het algemeen goedkoper zijn dan bijv. verdringingspompen. Na elke pomp is standaard een afsluiter geplaatst.

Het bruto vermogen van de pomp wordt berekend volgens:

$$P = \frac{\Phi_a}{\eta} \quad (5.30)$$

waarin:  $\eta$  = rendement (-)  
 $\Phi_a$  = netto pompvermogen (W)

Voor het rendement  $\eta$  geldt:

$$\eta = \eta_{\text{hydr}} * \eta_{\text{vol}} * \eta_{\text{mech}} \quad (5.31)$$

waarin:  $\eta_{\text{hydr}}$  = hydraulisch rendement = 0.8  
 $\eta_{\text{vol}}$  = volumerendement = 0.98  
 (afh. van de capaciteit)  
 $\eta_{\text{mech}}$  = mechanisch rendement = 0.8

Dit levert een waarde voor  $\eta$  van  $\eta = 0.63$

Voor het netto pompvermogen  $\Phi_a$  geldt:

$$\Phi_a = \Phi_v * \Delta p \quad (5.32)$$

waarin:  $\Phi_v$  = vloeistofdebiet (m<sup>3</sup>/s)  
 $\Delta p$  = drukverschil (N/m<sup>2</sup>)

Voor het drukverschil over de pomp geldt:

$$\Delta p = \rho_l g \Delta h + \sum K_w * 0.5 \rho_l \langle v \rangle^2 + 4f \frac{L}{d_i} * 0.5 \rho_l \langle v \rangle^2 \quad (5.33)$$

waarin:  $\Delta p = p_{\text{pers}} - p_{\text{zuig}}$  (N/m<sup>2</sup>)

$\rho_l$  = soortelijke massa (kg/m<sup>3</sup>)  
 $g$  = valversnelling (m/s<sup>2</sup>)  
 $\Delta h$  = opvoerhoogte (m)  
 $f$  = frictiefactor (-)  
 $L$  = lengte transportbuis (m)  
 $d_i$  = buisdiameter (m)  
 $\langle v \rangle$  = gemiddelde vloeistofsnelheid (m/s)  
 $K_w$  = weerstandsgetal (-)

De frictie factor  $4f$  wordt na berekening van het Reynolds getal uit figuur 5.13 gehaald

$$Re = \frac{\rho_l \langle v \rangle d_i}{\eta} \quad (5.34)$$

Om te voorkomen dat in de transportleidingen door onvoldoende menging vaste stof neerslaat, moet de stroming volledig turbulent zijn. Dit betekent dat  $\langle v \rangle$  minimaal 1 m/s moet zijn [47]

#### De pomp (voorbehandeling) P1

Deze pomp pompt het grondwater op naar het buffervat V1. De gegevens voor het berekenen van het pompvermogen zijn:

$$\begin{aligned} \rho_l &= 1050 \text{ kg/m}^3 && \text{(aanname)} \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\ \Delta h &= 10 \text{ m} \\ \Phi_v &= 10.42 \text{ m}^3/\text{hr} = 2.984 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

Daar  $\langle v \rangle$  minimaal aan 1 m/s moet voldoen, geldt voor de diameter van de toevoerpijp:

$$\begin{aligned} d_i^2 &= \frac{\Phi_v}{\pi/4 \langle v \rangle} && \rightarrow d_i = 6.0 \text{ cm} \\ \eta &= 1.0 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} && \text{(aanname)} \\ Re &= 6.3 \cdot 10^4 && \rightarrow 4f = 0.02 \\ L &= 20 \text{ m} \\ \sum Kw &= 0.2 \text{ (afsluiter open)} \\ &+ 3 * 0.5 \text{ (90}^\circ \text{ bocht, lang)} = 1.7 \end{aligned}$$

Uit vergelijking 5.33 volgt dan:  $\Delta p = 1.07 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Uit vergelijking 5.32 volgt dan:  $\Phi = 311 \text{ W}$

Uit vergelijking 5.30 volgt dan:  $P^a = 493 \text{ W}$

#### De pomp (voorbehandeling) P5

Deze pomp transporteert de stroom uit de overloop van de bezinkbak V4 door het zandfilter M6(fys) M8(bio).

De gegevens voor het berekenen van het pompvermogen zijn:

$$\begin{aligned} \rho_l &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\ g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\ \Delta h &= 5 \text{ m} \\ \Phi_v &= 10.42 \text{ m}^3/\text{hr} = 2.894 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\ d_i &= 6.0 \text{ cm} \\ \langle v \rangle &= 1 \text{ m/s} \\ Re &= 6.0 \cdot 10^4 && \rightarrow 4f = 0.02 \\ L &= 20 \text{ m} \\ \sum Kw &= 0.2 + 4 * 0.5 + 4.1 \text{ (meetflens)} = 6.3 \end{aligned}$$

Uit vergelijking 5.33 volgt dan:  $\Delta p = 5.6 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Aanname dat over de zandfilter geldt:  $\Delta p = 1.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Dit levert totaal  $\Delta p = 2.06 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Uit vergelijking 5.32 volgt dan:  $\Phi = 596 \text{ W}$

Uit vergelijking 5.30 volgt dan:  $P^a = 946 \text{ W}$

De pomp (fys) P10

Deze pomp transporteert de waterstroom uit de stripkolom T7 naar het actief koolfilter M11.

De gegevens voor het berekenen van het pompvermogen zijn:

$$\begin{aligned}
 \rho_l &= 1000 \text{ kg/m}^3 \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 \Delta h &= 3 \text{ m} \\
 \Phi_v &= 10.42 \text{ m}^3/\text{hr} = 2.894 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \\
 d_i &= 6.0 \text{ cm} \\
 \langle \bar{v} \rangle &= 1 \text{ m/s} \\
 Re &= 6.0 \cdot 10^4 \quad \rightarrow 4f = 0.02 \\
 L &= 5 \text{ m} \\
 \Sigma K_w &= 2 * 0.5 = 1.0
 \end{aligned}$$

Uit vergelijking 5.33 volgt dan:  $\Delta p = 3.1 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Aanname dat over de actiefkoolfilter geldt:  $\Delta p = 1.5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Totaal voor fysisch proces geldt  $\Delta p = 1.8 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Uit vergelijking 5.32 volgt dan:  $\Phi = 521 \text{ W}$

Uit vergelijking 5.30 volgt dan:  $P^a = 830 \text{ W}$

De toevoerpomp (bio) P7

Deze pomp transporteert de met water verzadigde kool en het opgeloste kunstmest van het mengvat V6 naar de toevoerleiding van de eerste bioreactor R9.

De gegevens voor het berekenen van het pompvermogen zijn:

$$\begin{aligned}
 \rho_l &= 1001 \text{ kg/m}^3 \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 \Delta h &= 2 \text{ m} \\
 \Phi_v &= 0.42 \text{ m}^3/\text{hr} = 1.167 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \\
 d_i &= 1.2 \text{ cm} \\
 \langle \bar{v} \rangle &= 1 \text{ m/s} \\
 Re &= 9.6 \cdot 10^3 \quad \rightarrow 4f = 0.03 \\
 L &= 4 \text{ m} \\
 \Sigma K_w &= 0.2 + 4 * 0.5 = 2.2
 \end{aligned}$$

Uit vergelijking 5.33 volgt dan:  $\Delta p = 2.6 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Uit vergelijking 5.32 volgt dan:  $\Phi = 3.0 \text{ W}$

Uit vergelijking 5.30 volgt dan:  $P^a = 4.8 \text{ W}$

De slurriepomp (bio) P14

Deze pomp transporteert de onderstroom uit de bezinkbak V13 die 55.4 w% koolpoeder bevat naar de eerste bioreactor R9.

De gegevens voor het berekenen van het pompvermogen luiden:

$$\begin{aligned}
 \rho_{sl} &= 1188 \text{ kg/m}^3 \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2 \\
 \Delta h &= 7 \text{ m} \\
 \Phi_v &= 10.42 \text{ m}^3/\text{hr} = 2.894 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}d_1 &= 6.0 \text{ cm} \\ \langle \dot{v} \rangle &= 1 \text{ m/s} \\ \eta_{sl} &= 5 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s (aanname)} \\ Re &= 1.4 \cdot 10^4 \quad \rightarrow 4f = 0.03 \\ L &= 20 \text{ m} \\ \Sigma K_w &= 0.2 + 5 * 0.5 = 2.7\end{aligned}$$

Uit vergelijking 5.33 volgt dan:  $\Delta p = 8.9 \cdot 10^4 \text{ Pa}$

Uit vergelijking 5.32 volgt dan:  $\Phi^a = 258 \text{ W}$

Uit vergelijking 5.30 volgt dan:  $P^a = 410 \text{ W}$

## 5.5 Compressoren

Het drukverlies in de leiding samen met de aanwezige bochten en afsluiters kan berekend worden met:

$$P_{\text{leid}} = \left(4f \frac{L}{d_i} + \sum K_w\right) * 0.5 \rho_g \langle v \rangle^2 \quad \text{Pa} \quad (5.35)$$

$$\text{met} \quad \langle v \rangle = \frac{\Phi_g}{\pi/4 d_i^2}$$

De frictie factor voor de leiding wordt bepaald met figuur 5.13 [47] waarvoor eerst het Reynolds getal berekend moet worden.

$$Re = \frac{\rho_g \langle v \rangle d_i}{\eta_g} \quad (5.36)$$

De drukval over de vloeistofkolom in de bioreactor of de ~~stripkolom~~ wordt gegeven door:

$$P_{\text{kolom}} = \rho_l g H_{\text{kolom}} \quad (5.37)$$

De compressiedruk  $p_{\text{comp}}$  is de som van  $P_{\text{leid}}$ ,  $P_{\text{kolom}}$  en buitenluchtdruk  $p_o$ .

Met behulp van figuur 5.14 [16] kan voor een bepaald werkgebied (gasdebiet en compressiedruk) de bijbehorende compressor bepaald worden.

Het vermogen van de compressor kan berekend worden met [16]:

$$P = 2.72 \cdot 10^{-5} \Phi \text{ [m}^3\text{/h]} \cdot p_{\text{comp}} \text{ [cmH}_2\text{O]} \quad \text{kW} \quad (5.38)$$

De efficiency van deze fans ligt in het gebied van 40 tot 70 %. Er wordt een efficiency van 55% genomen.

$$P_{\text{werk}} = P_{\text{theor}} / \eta_{\text{eff}} \quad (5.39)$$

De temperatuurstijging van de lucht na compressie kan berekend worden met de volgende relatie:

$$T_{\text{uit}} = T_{\text{in}} \left( \frac{p_{\text{uit}}}{p_{\text{in}}} \right)^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} \quad (5.40)$$

Gegevens die voor beide processen gelden:

$$\begin{aligned} \rho_g &= 1.336 \text{ kg/m}^3 \\ g^g &= 8.1 \text{ m/s}^2 \\ p_o &= 1 \text{ bar} \\ \eta^o &= 1.75 \cdot 10^{-5} \text{ Pa.s} \\ \kappa &= 1.4 \\ T_{\text{in}} &= 11^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Met behulp van de vergelijkingen 5.35 t/m 5.40 en de figuren wo benodigde compressoren berekend.

Compressor (fvs) C8

$$\Phi_3 = 0.0972 \text{ m}^3/\text{hr} \quad d_i = 0.20$$

$$\langle v \rangle = 18.42 \text{ m/s}$$

$$Re = 2.8 \cdot 10^5 \quad \text{----> } 4f = 0.014$$

$$L = 1 \text{ m}$$

$$\Sigma Kw = 0.6$$

$$P_{\text{leid}} = 152 \text{ Pa}$$

Met behulp van bijlage I:

$$P_{\text{kolom}} = 1.891 \text{ kPa}$$

$$\Delta p_{\text{tot}} = 2.043 \text{ kPa}$$

In verband met de drukval over het compostfilter  $2 * \Delta p_{\text{tot}} = 4.086 \text{ kPa}$

$$\text{Dit levert: } p_{\text{comp}} = 1.04 \text{ bar} \quad P_{\text{theor}} = 3.2 \text{ kW} \quad P_{\text{werk}} = 5.8 \text{ kW}$$

$$T_{\text{uit}} = 14.3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Het effect veroorzaakt door de temperatuurstijging van de lucht op het doorstromende water, ligt binnen de temperatuur nauwkeurigheid van het grondwater, en wordt daarom verwaarloosd. Uit figuur 5.14 volgt dat een fan gebruikt kan worden.

Voor de compressoren C10 en C12 (bio) wordt een luchtpijp genomen van  $d_u = 2 \text{ cm}$  en  $d_i = 1.6 \text{ cm}$ .

Compressor (bio)C10

$$\Phi_6 = 0.3096 \text{ m}^3/\text{hr} \quad \langle v \rangle = 0.427 \text{ m/s}$$

$$Re = 522 \quad \text{----> } 4f = 0.122$$

$$\Sigma Kw = 0.6 \quad P_{\text{leid}} = 1 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{sl}} = 1094 \text{ kg/m}^3$$

$$H_{\text{R9}} = 3.758 \text{ m}$$

$$P_{\text{kolom}} = 40.32 \text{ kPa}$$

Dit levert:  $p_{\text{comp}} = 1.4 \text{ bar}$

$$P_{\text{theor}} = 12.03 \text{ W}$$

$$P_{\text{werk}} = 21.9 \text{ W}$$

$$T_{\text{uit}} = 39.6 \text{ }^\circ\text{C}$$

Compressor (bio) C12

$$\Phi_8 = 0.0972 \text{ m}^3/\text{hr} \quad \langle v \rangle = 0.134 \text{ m/s}$$

$$Re = 164 \quad \text{----> } 4f = 0.39$$

$$\Sigma Kw = 0.6 \quad P_{\text{leid}} = 0.3 \text{ Pa}$$

$$P_{\text{sl}} = 1094 \text{ kg/m}^3$$

$$H_{\text{R11}} = 2.98 \text{ m}$$

$$P_{\text{kolom}} = 32.0 \text{ kPa}$$

Dit levert:  $p_{\text{comp}} = 1.3 \text{ bar}$

$$P_{\text{theor}} = 3.7 \text{ W}$$

$$P_{\text{werk}} = 6.7 \text{ W}$$

$$T_{\text{uit}} = 33.0 \text{ }^\circ\text{C}$$

Uit figuur 5.14 volgt dat bijvoorbeeld een rotary sliding vane worden.

*Waarom 1.6 cm?*

*9 x 40 = 360 m<sup>3</sup>*

*100% bewaakt?*

*1.5 x 20 m<sup>3</sup> = 30 m<sup>3</sup>/hr*

## 5.6 Veiligheidsaspecten

De concentratie van de stoffen in de lucht afkomstig van de compostfilter moet onder de geurdrempel blijven (Tabel 5.1) [12]. Hierdoor bevindt de specificatie van de lucht zich tevens ruim onder de MAC-waarde. Bijlage L geeft nog verder informatie over de aspecten van de te verwijderen verbindingen uit het grondwater.

TABEL 5.1 Geurdrempels en MAC-waarden van verbindingen in grondwater.

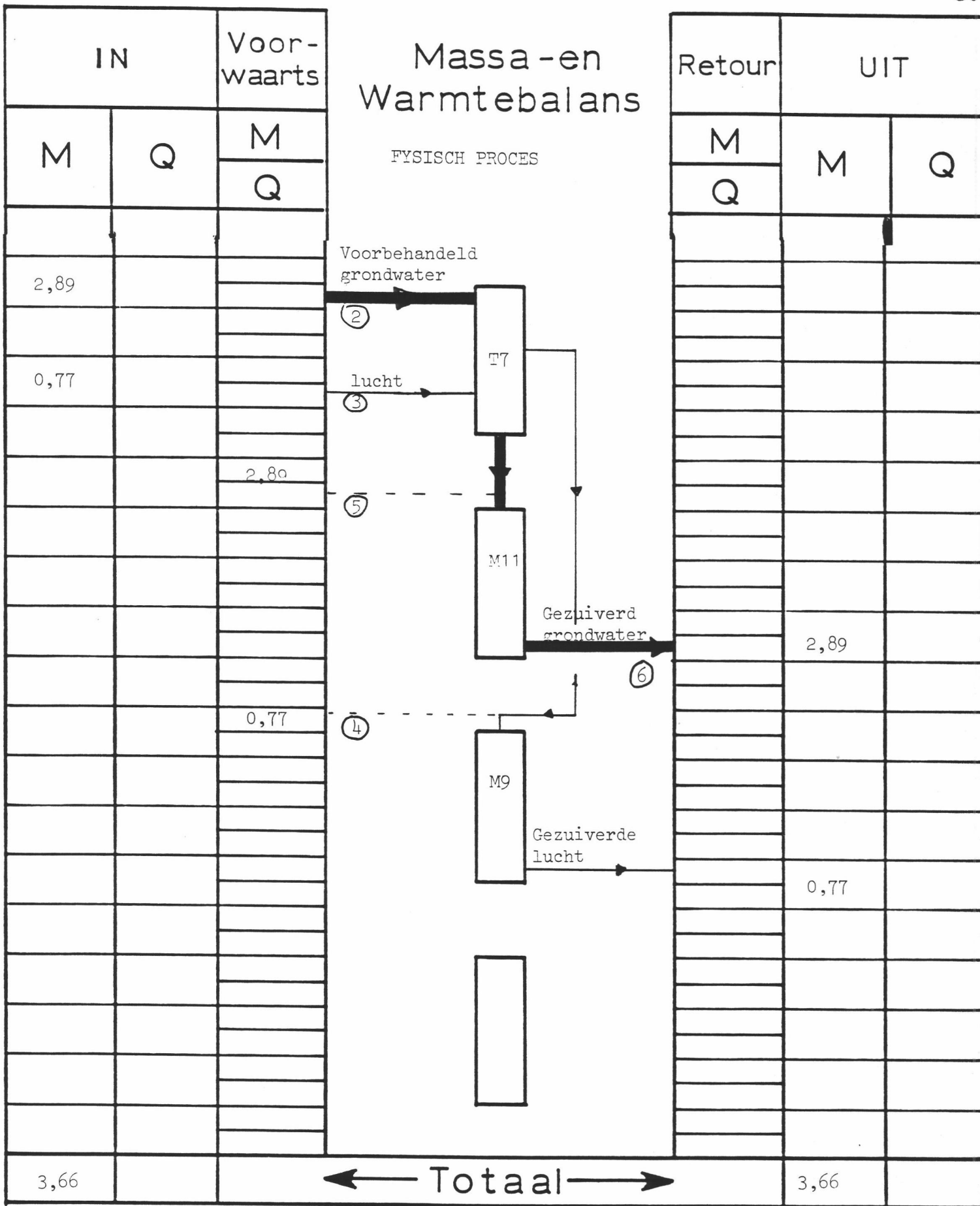
| Verbinding | Geurdrempel<br>mg/m <sup>3</sup> lucht | MAC waarde<br>mg/m <sup>3</sup> lucht |
|------------|--|---------------------------------------|
| benzeen    | 32.5 - 108                             | 30                                    |
| tolueen    | 0.53 - 84                              | 375                                   |
| xyleen     | 0.7 - 86                               | 435                                   |
| pentaan    |  | 1800                                  |
| hexaan     |  | 360                                   |
| heptaan    |  | 1600                                  |
| octaan     |  | 1450                                  |

De biomassa in het gezuiverde en geïnfiltreerde grondwater vormt geen belasting voor het milieu. De microorganismen die samen met het beluchte grondwater de bodem in verdwijnen, zorgen daar voor een extra effect van reiniging. De omzetting van de in bodem en grondwater aanwezige verontreinigingen wordt geactiveerd.



## 6 MASSA- EN WARMTEBALANSEN

De massa- en warmtebalansen (zie bijlage M berekening) over het systeem zijn uitgewerkt voor een invoerstroom van  $\Phi v_3(\text{bio}) = \Phi v_2(\text{fys}) = 10.42 \text{ m}^3/\text{hr}$  en de begin influentconcentratie van totaal  $25 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  aan verontreiniging.



Massa in kg/s  
 Warmte in kW

Fabrieksvoorontwerp  
 No: 2739







Biotechnologisch proces

| Apparaatstroom  | 2       |       | 3                     |         | 4                     |         | 5      |        | 6                     |                      |
|-----------------|---------|-------|-----------------------|---------|-----------------------|---------|--------|--------|-----------------------|----------------------|
| ↓ Componenten   | M       | Q     | M                     | Q       | M                     | Q       | M      | Q      | M                     | Q                    |
| grond water     | 0,11667 | 5,390 | 2,89355               | 133,682 | 2,89355               | 133,682 | 1,5345 | 73,730 |                       |                      |
| actief kool     | 0,00045 | 0,006 |                       |         | 0,00045               | 0,006   | 1,9045 | 26,145 |                       |                      |
| lucht           |         |       |                       |         |                       |         |        |        | $1,149 \cdot 10^{-4}$ | $4,55 \cdot 10^{-3}$ |
| substraat*      |         |       | $7,236 \cdot 10^{-5}$ |         | $7,236 \cdot 10^{-5}$ |         |        |        |                       |                      |
| microorganisme* |         |       |                       |         |                       |         |        |        |                       |                      |
| Totaal:         | 0,11712 | 5,396 | 2,89355               | 133,682 | 2,894                 | 133,688 | 3,439  | 99,875 | $1,149 \cdot 10^{-4}$ | $4,55 \cdot 10^{-3}$ |

| Apparaatstroom  | 7                     |         | 8                  |                       | 9                     |         | 10                    |        | 11                     |         |
|-----------------|-----------------------|---------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------|-----------------------|--------|------------------------|---------|
| ↓ Componenten   | M                     | Q       | M                  | Q                     | M                     | Q       | M                     | Q      | M                      | Q       |
| grond water     | 4,4285                | 211,454 |                    |                       | 4,4285                | 212,752 | 0,00035               | 0,0168 | 2,8932                 | 138,994 |
| actief kool     | 1,9045                | 25,982  |                    |                       | 1,9045                | 26,140  | 0,00045               | 0,0062 |                        |         |
| lucht           |                       |         | $0,360 \cdot 10^4$ | $1,188 \cdot 10^{-3}$ |                       |         |                       |        |                        |         |
| substraat*      | $1,447 \cdot 10^{-5}$ |         |                    |                       | $5,789 \cdot 10^{-9}$ |         | $6,80 \cdot 10^{-13}$ |        | $2,89 \cdot 10^{-9}$   |         |
| microorganisme* | $3,45 \cdot 10^{-2}$  |         |                    |                       | $3,4516 \cdot 10^2$   |         | $6,0 \cdot 10^{-9}$   |        | $2,5994 \cdot 10^{-5}$ |         |
| Totaal:         | 6,333                 | 237,436 | $0,360 \cdot 10^4$ | $1,188 \cdot 10^{-3}$ | 6,333                 | 238,892 | 0,0008                | 0,023  | 2,8932                 | 138,994 |

M in kg/s

Q in kW

\*: niet in totaal verwerkt

Stroom/Componenten staat

## 7 OVERZICHT SPECIFICATIE APPARATUUR

Op de volgende pagina's zijn de apparatenlijsten gegeven, waarop de gegevens van de diverse benodigde apparaten vermeld staan. Er is een aparte lijst voor het fysische en het biotechnologische procesgedeelte.

De apparaten van het voorbehandelingsgedeelte zijn niet verder gespecificeerd en worden hier onder kort vermeld:

|                             | geschat<br>volume<br>m <sup>3</sup> | druk<br>bar | temp<br>°C | Aantal |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------|------------|--------|
| V2 Buffervat/bezinkbak      | 100                                 | 1           | 11         | 1      |
| V3 Geroerde tank            | 10                                  | 1           | 11         | 1      |
| V4 Bezinkbak precipitaat    | 15                                  | 1           | 11         | 1      |
| M6(fys) M8 (bio) Zandfilter | 2                                   | 1           | 11         | 1      |

Een indicatie van het pompvermogen is in H5 wel berekend zodat deze in de lijst voor het voorbehandelingsgedeelte nader gespecificeerd zijn.

Apparatenlijst voor pompen, blowers, compressoren

Voorbehandeling

| Apparaat No:  | P1                                  | P5                   |  |  |  |
|---|-------------------------------------|----------------------|--|--|--|
| Benaming,<br>type                                       | Grondwater-<br>pomp<br>Centrifugaal | pomp<br>Centrifugaal |  |  |  |
| te verpompen<br>medium                                  | grondwater                          | water                |  |  |  |
| Capaciteit in<br>t/d <del>of kg/s*</del>                | 262,5                               | 250                  |  |  |  |
| Dichtheid<br>in kg/m <sup>3</sup>                       | 1050                                | 1000                 |  |  |  |
| Zuig-/persdruk<br>in bar(abs. <del>of<br/>eff.**)</del> | 1 / 2,07                            | 1 / 3,06             |  |  |  |
| temp. in °C<br>in / uit                                 | 11                                  | 11                   |  |  |  |
| Vermogen in kW<br>theor./ prakt.                        | 0,311 / 0,493                       | 0,596 / 0,946        |  |  |  |
| Speciaal te ge-<br>bruiken mat.                         | RVS                                 | RVS                  |  |  |  |
| aantal<br>serie/parallel                                | 1                                   | 1                    |  |  |  |
|   |                                     |                      |  |  |  |

\* aangeven wat bedoeld wordt



Apparatenlijst voor reaktoren, kolommen, vaten

Fysisch proces

| Apparaat No:   | T7                       | M9  | M11   |  |  |
|--|--------------------------|---|---|--|--|
| Benaming,<br>type  | Stripkolom               | Compostfilter   | Actief<br>Kool<br>Filter  |  |  |
| Abs. of <del>xxxx</del><br>druk in bar   | 1                        | 1   | 1   |  |  |
| temp. in °C  | 11                       | 11  | 11  |  |  |
| Inhoud in m <sup>3</sup><br>Diam. in m<br>l of h in m  | 1,99<br>0,68<br>5,51     | 6<br>2,76<br>1  | 1<br>0,65<br>3  |  |  |
| Vulling:*<br>schotels-aant.<br>vaste pakking<br>katalysator-<br>type<br>- ,, - vorm<br>.....<br>.....<br>..... | Pall-ringen<br>38 mm RVS | Compost<br>Mergel<br>Polystyreen<br>Micro-<br>organisme | Actief Kool<br>korrels<br>3 mm<br>CAL-type <sub>2</sub><br>A = 1140 m <sup>2</sup> /g |  |  |
| Speciaal te ge-<br>bruiken mat.  | RVS                      | RVS   | RVS   |  |  |
| aantal<br>serie/parallel   | 1                        | 1   | 1   |  |  |
|  |                          |   |   |  |  |

\* aangeven wat bedoeld wordt

Apparatenlijst voor pompen, blowers, compressoren

Fysisch proces

|   |                   |                      |  |  |  |
|---|-------------------|----------------------|--|--|--|
| Apparaat No:                                | C8                | P10                  |  |  |  |
| Benaming,<br>type                           | Striplucht<br>Fan | Centrifugaal<br>pomp |  |  |  |
| te verpompen<br>medium                      | lucht             | water                |  |  |  |
| Capaciteit in<br>t/d of kg/s*               | 0,77              | 2,89                 |  |  |  |
| Dichtheid<br>in kg/m <sup>3</sup>           | 1,336             | 1000                 |  |  |  |
| Zuig-/persdruk<br>in bar(abs. of<br>eff. *) | 1 / 1,04          | 1 / 2,8              |  |  |  |
| temp. in °C<br>in / uit                     | 11 / 14,3         | 11                   |  |  |  |
| Vermogen in kW<br>theor./ prakt.            | 3,2 / 5,8         | 0,52 / 0,83          |  |  |  |
| Speciaal te ge-<br>bruiken mat.             |                   | RVS                  |  |  |  |
| aantal<br>serie/parallel                    | 1                 | 1                    |  |  |  |
|   |                   |                      |  |  |  |

\* aangeven wat bedoeld wordt

Technische Hogeschool Delft  
Afd. Chemische Technologie

Fabrieksvoorontwerp No: 2739  
Datum : 23-5-1988  
Ontworpen door : P.A. van Reeuwijk

TORENSPECIFIKATIEBLAD

|  |     |  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
|--|-----|--|------|-------|------|--|------|------------------------------|-----|-------------------------|
| Apparaatnummer : T.7.                      |     | Fabrieksnummer : 2739 (fys)  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| ALGEMENE EIGENSCHAPPEN :                   |     |  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| Functie.....                               | :   | <del>destillatie</del> / <del>extractie</del> / absorptie / .....* |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| Type toren.....                            | :   | gepakt / <del>schotel</del> / <del>spreeker</del> / .....*         |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| Type schotel.....                          | :   | klokje / zeefplaat / valve / .....*                                |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| Aantal schotels.....                       | :   | theoretisch : 7.848  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| <del>Aantal schotels.....</del>            | :   | <del>praktisch</del>   |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| <del>Schotelafstand / H<sub>01</sub></del> | :   | 0.702 m  |      |       |      | Materiaal schotel :                    |      |                              |     |                         |
| Diameter toren.....                        | :   | 0.68 m   |      |       |      | Hoogte toren .... : 5.51 m             |      |                              |     |                         |
| Materiaal toren .....                      | :   | RVS  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| Verwarming.....                            | :   | geen / <del>open stoom</del> / <del>reboiler</del> / .....*        |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| BEDRIJFSKONDITIONES :                      |     |  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
|  |     | Voeding  |      | Top   |      | Bodem                                  |      | Reflux/absorp-<br>tie middel |     | Extraktie<br>middel/... |
| Temperatuur..... °C                        |     | 11   |      | 11    |      | 11                                     |      | 11                           |     |                         |
| Druk..... bar                              |     | 1  |      | 1     |      | 1                                      |      | 1.04                         |     |                         |
| Dichtheid..... kg/m <sup>3</sup>           |     | 1000   |      | 1,336 |      | 1000                                   |      | 1,336                        |     |                         |
| Massastroom..... kg/s                      |     | 2,89   |      | 0,77  |      | 2,89                                   |      | 0,77                         |     |                         |
| Samenstelling in<br>mol % resp. gew. %     |     |  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| water                                      |     | 100  | 100  | 0     | 0    | 100                                    | 100  | 0                            | 0   |                         |
| aromaten                                   |     |  | 2e-5 |       | 8e-5 |  | 2e-8 | 0                            | 0   |                         |
| minerale olie                              |     |  | 5e-6 |       | 2e-5 |  | 5e-9 | 0                            | 0   |                         |
| lucht                                      |     | 0  | 0    | 100   | 100  | 0                                      | 0    | 100                          | 100 |                         |
| ONTWERP :                                  |     |  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |
| Aantal klokjes / zeefgaten / .....         | **: |  |      |       |      | Type pakking..... : Pall-ringen        |      |                              |     |                         |
| Aktief schoteloppervlak.....               | :   |  |      |       |      | m <sup>2</sup> Materiaal pakking : RVS |      |                              |     |                         |
| Lengte overlooprand.....                   | :   |  |      |       |      | mm Afmetingen pakking : 38 mm          |      |                              |     |                         |
| Diameter valpijp / gat / .....             | :   |  |      |       |      | mm                                     |      |                              |     |                         |
| Verdere gegevens op schets vermelden       |     |  |      |       |      |  |      |                              |     |                         |

\*doorstrepen wat niet van toepassing is.

\*\*indien een toren schotels van verschillend ontwerp bevat, dit aangeven!

Apparatenlijst voor reaktoren, kolommen, vaten: het biotechnologische proces

| Apparaat No:                    | V6               | R9                             | R11         | V13       |  |
|---------------------------------|------------------|--------------------------------|-------------|-----------|--|
| Benaming,<br>type               | geroerde<br>tank | bioreactor                     | bioreactor  | bezinkbak |  |
| Abs.<br>druk in bar             | 1                | 1                              | 1           | 1         |  |
| temp. in °C                     | 11               | 11                             | 11          | 11        |  |
| Inhoud in m <sup>3</sup>        | 1.0              | 41.68                          | 20.84       | 8.3       |  |
| Diam. in m                      | 1.1              | 3.758                          | 2.983       | 2.3       |  |
| l of h in m                     | 1.05             | 3.758                          | 2.983       | 2.0       |  |
| Vulling:                        |                  |                                |             |           |  |
| katalysator-<br>type            |                  | microorganismen<br>Pseudomonas | id. R9<br>" |           |  |
| hulpdrager...<br>.....<br>..... |                  | actief kool<br>poeder (PAC)    | "           |           |  |
| Speciaal te ge-<br>bruiken mat. | RVS              | RVS                            | RVS         | RVS       |  |
| aantal                          | 1                | 1                              | 1           | 1         |  |
|                                 |                  |                                |             |           |  |

Apparatenlijst voor pompen, blowers, kompressoren : het biotechnologische proces

| Apparaat No:                      | C10                    | C12                   | P7                   | P14                  |  |
|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|--|
| Benaming,<br>type                 | compressor<br>fan      | compressor<br>fan     | pomp<br>centrifugaal | pomp<br>centrifugaal |  |
| te verpompen<br>medium            | lucht                  | lucht                 | grondwater           | slurrie<br>( 55 w%)  |  |
| Capaciteit in<br>t/d              | 9.927 10 <sup>-3</sup> | 3.12 10 <sup>-3</sup> | 10.1                 | 297                  |  |
| Dichtheid<br>in kg/m <sup>3</sup> | 1.336                  | 1.336                 | 1001                 | 1188                 |  |
| Zuig-/persdruk<br>in bar abs      | 1/1.4                  | 1/1.3                 | 1/1.26               | 1/1.89               |  |
| temp. in °C<br>in / uit           | 11/39.6                | 11/33.0               | 11                   | 11                   |  |
| Vermogen in W<br>theor./ prakt.   | 12.0/21.9              | 3.7/6.7               | 3.0/ 4.8             | 258/410              |  |
| Speciaal te ge-<br>bruiken mat.   |                        |                       | RVS                  | RVS                  |  |
| aantal                            | 1                      | 1                     | 1                    | 1                    |  |
|                                   |                        |                       |                      |                      |  |

## 8 KOSTENANALYSE

### 8.1 Inleiding

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de te maken kosten om het project te financieren.

De kosten worden onderscheiden in:

- investeringen
- hulpstoffen
- afvalverwerking
- electriciteit
- arbeid
- onderhoud
- verzekeringen
- overhead/administratie
- rente

Uit de som van deze posten worden de totale kosten van het proces berekend. Met behulp hiervan wordt de zuiveringsprijs per m<sup>3</sup> water en per kilo verontreiniging berekend. Ter berekening van de investeringskosten is gebruik gemaakt van gegevens van fabrikanten, of -indien niet voor handen- is een vergelijking gemaakt met soortgelijke apparatuur, waarvan de kosten bekend zijn. [49][50]

### 8.2 Berekening van de kostenposten

#### 8.2.1 Investeringskosten

De totale investeringskosten bestaan voor 80% uit vastgelegd kapitaal, voor 6% uit werkkapitaal en voor 14% uit investeringen in niet tastbare zaken.

Voorbehandeling

#### Apparaat

|                               |                         |
|-------------------------------|-------------------------|
| Buffervat/bezinkbak V2        | fl. 70.000,- (aannname) |
| Geroerde tank V3              | fl. 9.000,- (aannname)  |
| Bezinkbak Precipitaat V4      | fl. 8.000,- (aannname)  |
| Zandfilter bio M8, fys M6     | fl. 50.000,- (aannname) |
| Pompen (2*)                   | fl. 15.000,-            |
| <b>Totaal Voorbehandeling</b> | <b>fl. 152.000,-</b>    |

## Fysisch proces

## Apparaat

|                              |                      |
|------------------------------|----------------------|
| Voorbehandeling              | fl. 152.000,-        |
| Stripkolom T7                | fl. 60.000,-         |
| Actief koolfilter M11        | fl. 24.500,-         |
| Compostfilter M9 *           | fl. 30.000,-         |
| Pomp P10                     | fl. 5.000,-          |
| Compressor C8                | fl. 20.000,-         |
| <b>Totaal Fysisch proces</b> | <b>fl. 291.500,-</b> |

\* Hierbij wordt ook de compost meegerekend.

## Biotechnologisch proces

## Apparaat

|                                       |                      |
|---------------------------------------|----------------------|
| Voorbehandeling                       | fl. 152.000,-        |
| Geroerde tank V6                      | fl. 6.000,-          |
| Bioreactor R9                         | fl. 80.000,-         |
| Bioreactor R11                        | fl. 50.000,-         |
| Bezinkbak V13                         | fl. 4.000,-          |
| Pompen (2*)                           | fl. 7.500,-          |
| Compressoren                          | fl. 14.000,-         |
| <b>Totaal Biotechnologisch proces</b> | <b>fl. 313.500,-</b> |

De investeringskosten bestaan echter, naast de hierboven gegeven opsomming, ook nog uit kosten voor fundamenteen, pijpleidingen, elektrische installaties e.d. en indirecte kosten (constructie, overhead, engineering, etc.).

De zogenaamde Lang-methode [51] zegt dat, om tot de totale investeringen te komen, de hierboven genoemde investeringen met een bepaalde factor vermenigvuldigd moeten worden. Voor gemengde processen is deze factor 3.63.

De totale investeringen worden hiermee:

|                            |                |
|----------------------------|----------------|
| - Fysisch proces:          | fl.1.058.145,- |
| - Biotechnologisch proces: | fl.1.138.005,- |

Dit is alleen het vastgelegd kapitaal. Om tot de werkelijke kosten te komen wordt het bedrag door 0.8 gedeeld. Hierdoor komen de totale investeringskosten op:

|                            |                 |
|----------------------------|-----------------|
| - Fysisch proces:          | fl.1.322.681,25 |
| - Biotechnologisch proces: | fl.1.422.506,25 |

Gesteld wordt dat de installatie in 10 jaar lineair wordt afgeschreven.

*by month 2 jaar*

8.2.2 Hulpstoffen

## Voorbehandeling

|   | Hoeveelheid | prijs                                      | prijs (gehele reiniging) |
|---|-------------|--|--------------------------|
| Natronloog                                | 4 ton       | fl. 0.18 / kg<br>oplossing (50% oplossing) | fl. 720,-                |
| IJzerchloride                             | 1.5 ton     | fl. 335,-/ton<br>(41% oplossing)           | fl. 503,-                |
| Zand                                      | 2 ton       | fl. 100,-/ton                              | fl. 200,-                |
| <b>Totaal hulpstoffen voorbehandeling</b> |             |  | <b>fl. 1.423,-</b>       |

## Fysisch proces

|  | Hoeveelheid      | prijs                       | prijs (gehele reiniging)  |
|--|------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Pall-ringen                              | 2 m <sup>3</sup> | fl. 13.000,-/m <sup>3</sup> | fl. 26.000,- <i>markt</i> |
| Actief kool                              | 500 kg           | fl. 3.100,-/ton             | fl. 1.550,-               |
| <b>Totaal hulpstoffen fysisch proces</b> |                  |                             | <b>fl. 27.550,-</b>       |

## Biotechnologisch proces

|   | Hoeveelheid | prijs                                    | prijs (gehele reiniging) |
|---|-------------|--|--------------------------|
| Actief koolpoeder                                 | 46.6 ton    | fl. 2000,-/ton                           | fl. 93.200,-             |
| Zoutzuur  | 4.6 ton     | fl. 0.19/kg<br>oplossing (38% oplossing) | fl. 874,-                |
| Kunstmest   | 1.6 ton     | fl. 1.00/kg                              | fl. 1.600,-              |
| Bitterzout  | 390 kg      | fl. 0.60/kg                              | fl. 234,-                |
| <b>Totaal hulpstoffen biotechnologisch proces</b> |             |  | <b>fl. 95.908,-</b>      |

8.2.3 Afvalverwerking

Niet alles wordt binnen het proces zelf verwerkt, dus er ontstaat ook een hoeveelheid afval. Om deze te reinigen is men uitgegaan van de volgende gegevens:

|                                   |                      |
|-----------------------------------|----------------------|
| -Afvalverwerking actief kool:     | 300 gulden/ton [8.2] |
| -Afvalverwerking compost:         | 500 gulden/ton [8.2] |
| -Afvalverwerking slib buffervat:  | 500 gulden/ton [8.2] |
| -Afvalverwerking slib biosysteem: | 500 gulden/ton       |

Op grond van deze gegevens moet er bij de voorbehandeling rekening gehouden worden met:

Afvalverwerking buffertank: 0.05 kg stof/m<sup>3</sup> water, totaal dus 7.5 ton droge stof in twee jaar. Dit levert dus 30 ton slib (ds 25%). De verwerking hiervan kost fl. 15.000,-



Afvalverwerking precipitatie-eenheid: gesteld wordt dat ook hier 30 ton slib verwerkt moet worden. Oftewel, de kosten bedragen ook hier fl.15.000,-  
De voorbehandeling levert dus fl.30.000,- afvalkosten gedurende de hele periode.

Voor het fysisch systeem moet er nog 500 kg actief kool verwerkt worden en 3 ton compost (aannee), hetgeen neerkomt op f.1650,-

Het biotechnologisch systeem produceert 93 ton slib (ds 55%). Dit komt neer op fl.46.500,- voor afvalverwerking.

|                         | hoeveelheid         | kosten afvalverwerking |
|-------------------------|---------------------|------------------------|
| Voorbehandeling         | 2* 30 ton slib      | fl. 30.000,-           |
| Fysisch proces          | 500 kg actief kool  |                        |
|                         | 3 ton compost       | fl. 1.650,-            |
| Biotechnologisch proces | 120 ton koolslurrie | fl. 46.500,-           |

#### 8.2.4 Electriciteit

##### Voorbehandeling

| Apparaat   | kW           |
|--|--------------|
| Pompen   | 1.44         |
| Roerders   | 1.0 (aannee) |
|  | -----        |
| <b>Totaal Electriciteitsverbruik voorbehandeling</b> | <b>2.44</b>  |

##### Fysisch proces

| Apparaat  | kW          |
|---|-------------|
| Voorbehandeling                                     | 2.44        |
| Pomp  | 0.83        |
| Compressor  | 5.8         |
|   | -----       |
| <b>Totaal Electriciteitsverbruik fysisch proces</b> | <b>9.07</b> |

Kosten: totaal \* 24 \* 600 \* fl. 0.12 = fl. 15.673,-

##### Biotechnologisch proces

| Apparaat  | kW          |
|---|-------------|
| Voorbehandeling                                       | 2.44        |
| Pompen  | 0.41        |
| Roerders  | 3.76        |
| Compressoren  | 0.03        |
|   | -----       |
| <b>Totaal Electriciteitsverbruik biotechnologisch</b> | <b>6.64</b> |

Kosten: totaal \* 24 \* 600 \* fl. 0.12 = fl. 11.474,-

### 8.2.5 Arbeid

De arbeidskosten worden gevonden met behulp van de Factoring methode [8.1]:

$$L = L_0 \left( \frac{C}{C_0} \right)^\beta$$

Uit de literatuur [8.2] is voor  $L_0$  de waarde fl.60.000,- per jaar bekend. Aangezien  $C$  ongeveer gelijk is aan  $C_0$ , volgt hieruit dat ook  $L$  ongeveer gelijk zal zijn aan  $L_0$ , dus fl. 60.000,- per jaar. Dit houdt dan in dat voor de hele zuivering de loonkosten fl. 120.000,- bedragen. Aangenomen wordt dat deze kosten voor beide processen gelijk zijn.

### 8.2.6 Onderhoud

De onderhoudskosten worden gesteld op 10% van de totale investeringen voor de hele periode:

fysisch:

$$0.10 * \text{fl.1.322.681,25} = \text{fl.132.268,13}$$

biotechnologisch:

$$0.10 * \text{fl.1.422.506,25} = \text{fl.142.250,63}$$

### 8.2.7 Verzekeringen

De kosten voor verzekeringen worden gesteld op 2% van de totale investeringen voor de hele periode:

fysisch:

$$0.02 * \text{fl.1.322.681,25} = \text{fl. 26.453,63}$$

biotechnologisch:

$$0.02 * \text{fl.1.422.506,25} = \text{fl. 28.450,13}$$

### 8.2.8 Overhead/administratie

De kosten voor overhead en administratie worden gesteld op 2% van de totale investeringen voor de hele periode:

fysisch:

$$0.02 * \text{fl.1.322.681,25} = \text{fl. 26.453,63}$$

biotechnologisch:

$$0.02 * \text{fl.1.422.506,25} = \text{fl. 28.450,13}$$

### 8.2.9 Rente

Er wordt gesteld dat er jaarlijks een bedrag aan rente verloren gaat, dat "verdiend" had kunnen worden als het geld was weggezet in plaats van geïnvesteerd. Het rentepercentage is 5%. De rentederving over de gehele periode bedraagt:

$$(\text{totale investeringen} * ((1.05)^{10} - 1)) / 5 = \text{rentederving}$$

Dit komt neer op fl. 166.365,43 voor het fysisch proces,  
en fl. 178.921,31 voor het biotechnologisch proces.

### 8.3 De Totale Kosten

De totale kosten voor de gehele periode bedragen:

Fysisch proces :

|                        |     |            |
|------------------------|-----|------------|
| Investerings           | fl. | 264.536,25 |
| Hulpstoffen            | fl. | 27.550,-   |
| Afvalverwerking        | fl. | 31.650,-   |
| Electriciteit          | fl. | 15.673,-   |
| Arbeid                 | fl. | 120.000,-  |
| Onderhoud              | fl. | 132.368,13 |
| Verzekeringen          | fl. | 26.453,63  |
| Overhead/administratie | fl. | 26.453,63  |
| Rentederving           | fl. | 166.365,43 |

**Totale kosten fysisch proces** fl. 811.050,07

Biotechnologisch proces :

|                        |     |            |
|------------------------|-----|------------|
| Investerings           | fl. | 284.501,25 |
| Hulpstoffen            | fl. | 97.331,-   |
| Afvalverwerking        | fl. | 76.500,-   |
| Electriciteit          | fl. | 11.474,-   |
| Arbeid                 | fl. | 120.000,-  |
| Onderhoud              | fl. | 142.250,63 |
| Verzekeringen          | fl. | 28.450,13  |
| Overhead/administratie | fl. | 28.450,13  |
| Rentederving           | fl. | 178.921,31 |

**Totale kosten biotechnologisch proces** fl. 967.878,45

De kosten per kubieke meter gezuiverd grondwater bedragen dan:

|                          |     |      |
|--------------------------|-----|------|
| Fysisch proces:          | fl. | 5,41 |
| Biotechnologisch proces: | fl. | 6,45 |

De totale hoeveelheid verwijderde verontreiniging bedraagt 410 kilo na de gehele periode. Dit houdt in dat de reinigingskosten per kilo verwijderde verontreiniging de volgende zijn:

|                          |     |          |
|--------------------------|-----|----------|
| Fysisch proces:          | fl. | 1.978,17 |
| Biotechnologisch proces: | fl. | 2.360,68 |

## 9 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

### 9.1 Conclusies

De volgende conclusies kunnen uit de beide procesontwerpen getrokken worden.

- Het gekozen biotechnologische proces, nl de combinatie van biologische activiteit en adsorptie aan actief koolpoeder lijkt technologisch een goede optie te zijn om grondwater vervuild met organische componenten te zuiveren. Afvoer van organische componenten naar de lucht wordt door minimalisatie van de luchtstroom en het effect van adsorptie aan het actief koolpoeder vermeden.
- Uit de kostenberekening blijkt dat de kosten voor het fysisch proces per m<sup>3</sup> water fl. 5,41 zijn en voor het biotechnologische proces fl. 6,45. Deze kosten zijn aan de hoge kant gezien de praktijk situatie [12]. Bij een soort gelijke zuivering komt men in de praktijk uit op een kostprijs van 2,- á 3,- gulden.
- Het gezuiverde grondwater afkomstig van het fysische proces is schoner dan de in de uitgangspunten gestelde norm (B-norm). Dit is echter het gevolg van de werking van het actief koolfilter dat wordt vervangen zodra het doorslaat. Het biotechnologische proces voldoet aan de gestelde voorwaarden. Tevens is er een extra reinigend effect van de meegespoelde microorganismen met het gezuiverde grondwater in de bodem.
- De installatie heeft een afschrijvingsduur van tien jaar. De looptijd van het zuiveringsproces is echter twee jaar. De consequentie hiervan is dat de installatie verplaatsbaar moet zijn. Het fysische proces is makkelijker verplaatsbaar wegens de eenvoudige en compacte uitvoering.
- Op grond van de kosten is er geen duidelijk onderscheid te maken tussen de processen. Als tevens de verplaatsbaarheid beschouwd wordt lijkt het fysische proces aantrekkelijker.

### 9.2 Aanbevelingen

In het licht van de grondwaterzuiveringsproblematiek menen wij de volgende aanbevelingen te mogen doen:

- In de laatste fase van de reiniging zijn er alleen nog zeer lage concentraties aanwezig. Het verdient de aandacht om na te gaan of het afschakelen van een deel van het proces economisch gunstig is. Voor het fysisch proces zou dat kunnen inhouden dat de stripkolom (incl compostfilter) afgeschakeld wordt. Het koolfilter wordt dan extra belast doordat de concentraties in de vloeistof naar het filter weer toenemen, maar de beladingsgraad van het kool zal hierdoor hoger worden, hetgeen weer een gunstig effect heeft op het koolverbruik.

Bij het biotechnologische proces zou de tweede bioreactor afgekoppeld kunnen worden. De actief koolpoederdosering kan dan ook vermindert worden.

- Bij biotechnologische (ook andere methoden) is het gewenst om praktijk ervaring te hebben, door de afwezigheid hiervan zijn aannames voor het proces gedaan.  
Er zal nog veel onderzoek gedaan moeten worden om dit proces te kunnen beschrijven:  
o.a.
  - Het effect van de omgevingstemperatuur (seizoen afhankelijk) op de biologische activiteit.
  - Bioregeneratie van het actiefkoolpoeder
  - Effect van biomassaleeftijd op de afbraaksnelheid en bioregeneratie
  - Verblijftijd van het substraat in het systeem door adsorptie bij onvoldoende biomassa
- Door overkapping van de bioreactoren zou de lucht die uit de eerste reactor komt kan weer gebruikt kunnen worden om de tweede bioreactor van zuurstof te voorzien. Eventuele gestripte componenten zouden hier weer geadsorbeerd of geabsorbeerd kunnen worden.
- Afhankelijk van de locatie zal minder kunstmest toegevoegd kunnen worden. Dit gezien het feit dat het nitraat gehalte van het grondwater verhoogd kan zijn door de intensieve veehouderij.
- In dit procesvoorontwerp is een vergelijking gemaakt met als uitgangspunt een bepaalde concentratie aan vervuilingen. Het verdient de aandacht om ook andere influentconcentraties te beschouwen om op die manier na te gaan in welke gevallen een bepaald systeem aantrekkelijker is.
- Het beschreven fysisch systeem zou verder geoptimaliseerd kunnen worden door de kosten van de verschillende apparaten te beschouwen en de afmetingen zodanig op elkaar af te stellen dat de investeringen minimaal zijn. (bijvoorbeeld kleinere stripkolom, groter actief koolfilter, enz.)
- De locatie van de grondwaterzuivering kan ook flink uiteenlopen. Hierdoor is het ook mogelijk dat de lozingseisen kunnen variëren. Het kan interessant zijn om na te gaan of er eventueel op het riool geloosd kan worden, zodat de uitgaande concentraties hoger kunnen zijn en de installatie goedkoper. Er dient echter wel rekening gehouden te worden met toenemende reinigingskosten door rioolwaterzuiveringskosten.

## 10 SYMBOLENLIJST

Het fysisch proces:

|                    |   |  |
|--------------------|---|--|
| C <sub>gas</sub>   | concentratie in de gasstroom                        | kg/m <sup>3</sup> lucht                |
| C <sub>in</sub>    | concentratie aan begin kolom                        | kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O     |
| C <sub>in*</sub>   | evenwichtsconcentratie aan begin kolom              | kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O     |
| C <sub>uit</sub>   | concentratie aan eind kolom                         | kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O     |
| ΔC <sub>ln</sub>   | logaritmisch gemiddelde in- en uitgaande conc.      | -                                      |
| d                  | diameter  | m                                      |
| D <sub>g</sub>     | diffusiecoëfficiënt gasfase                         | m <sup>2</sup> /s                      |
| D <sub>kol</sub>   | diameter kolom                                      | m                                      |
| D <sub>l</sub>     | diffusiecoëfficiënt vloeistoffase                   | m <sup>2</sup> /s                      |
| D <sub>r</sub>     | diameter pakking                                    | m                                      |
| f                  | frictiefactor                                       | -                                      |
| F                  | belastingfactor $ugpg^0 \cdot 5$                    | m/s(kg/m <sup>3</sup> ) <sup>0.5</sup> |
| F <sub>p</sub>     | pakkingsfactor                                      | m <sup>-1</sup>                        |
| g                  | valversnelling                                      | m/s <sup>2</sup>                       |
| G                  | gasbelasting  | kmol/s                                 |
| h                  | hoogte  | m                                      |
| h <sub>l</sub>     | holdup vloeistoffase                                | m                                      |
| H <sub>i</sub>     | Henry-coëfficiënt van component i                   | Pa                                     |
| H <sub>ox</sub>    | overall hoogte overdrachtstrap gebaseerd op gasfase | m                                      |
| H <sub>x</sub>     | hoogte vloeistoffase overdrachtstrap                | m                                      |
| H <sub>y</sub>     | hoogte gasfase overdrachtstrap                      | m                                      |
| K <sub>w</sub>     | weerstandsgetal                                     | -                                      |
| L                  | lengte  | m                                      |
| L                  | vloeistofbelasting                                  | kmol/s                                 |
| m                  | helling evenwichtslijn                              | kmol/kmol                              |
| No <sub>x</sub>    | overall aantal overdrachtstrappen vloeistoffase     | -                                      |
| p                  | druk  | Pa                                     |
| perc <sub>fl</sub> | percentage van floodinggrens voor stuwgrens         | %                                      |
| p <sub>i*</sub>    | dampspanning component i                            | Pa                                     |
| S                  | stripping factor                                    | -                                      |
| u                  | lineaire snelheid                                   | m/s                                    |
| v                  | snelheid  | m/s                                    |

## Griekse symbolen:

|                   |                                    |                   |
|-------------------|------------------------------------|-------------------|
| η                 | rendement                          | -                 |
| η                 | viscositeit                        | Pa.s              |
| λ                 | belastingsfactor bij floodinggrens | m/s               |
| λ <sub>stuw</sub> | belastingsfactor bij de stuwgrens  | m/s               |
| ρ                 | dichtheid                          | kg/m <sup>3</sup> |
| φ                 | flowparameter                      | -                 |
| Φ <sub>a</sub>    | netto pompvermogen                 | W                 |
| Φ <sub>v</sub>    | volumestroom                       | m <sup>3</sup> /s |

## indices:

dr zonder vloeistof

|     |               |
|-----|---------------|
| g   | gas           |
| l   | vloeistof     |
| nat | met vloeistof |

Het biotechnologisch proces:

|                 |   |                       |
|-----------------|---|-----------------------|
| cp              | soortelijke warmte  | J/kg°C                |
| C               | concentratie  | kg/m <sup>3</sup>     |
| C               | afstand tussen roeder en reactorbodem   | m                     |
| d               | diameter  | m                     |
| D               | diameter roeder   | m                     |
| f               | frictiefactor   | -                     |
| Fl              | Flowgetal   | -                     |
| g               | valversnelling  | m/s <sup>2</sup>      |
| h               | hoogte  | m                     |
| H               | hoogte reactor  | m                     |
| k <sub>1a</sub> | stofoverdrachtscoëfficiënt  | s <sup>-1</sup>       |
| K <sub>S</sub>  | Monodconstante voor een microorganisme<br>(=de substraatconcentratie als $\mu=1/2\mu_{max}$ ) | kg/m <sup>3</sup>     |
| K <sub>w</sub>  | weerstandsgetal   | -                     |
| L               | lengte  | m                     |
| m               | massa   | kg                    |
| n               | exponent  | -                     |
| N               | toerental   | s <sup>-1</sup>       |
| P               | druk  | N/m <sup>2</sup> (Pa) |
| P               | vermogen  | W                     |
| P <sup>o</sup>  | vermogenskental   | -                     |
| Q <sub>w</sub>  | warmtestroom  | W                     |
| r               | productie of consumptie snelheid  | kg/m <sup>3</sup> /hr |
| S               | afstand tussen roeder en beluchter  | m                     |
| T               | diameter reactor  | m                     |
| T               | temperatuur   | °C                    |
| Y <sub>sx</sub> | stoichiometrische yieldcoëfficiënt  | kgX/kgS               |
| v               | snelheid  | m/s                   |
| V               | volume  | m <sup>3</sup>        |
| w%              | gewichtspercentage  | -                     |

Griekse symbolen:

|           |                          |                      |
|-----------|--------------------------|----------------------|
| $\eta$    | rendement                | -                    |
| $\eta$    | viscositeit              | Pa.s                 |
| $\mu$     | specifieke groeisnelheid | hr <sup>-1</sup>     |
| $\nu$     | kinematische viscositeit | m <sup>2</sup> /s    |
| $\rho$    | dichtheid                | kg/m <sup>3</sup>    |
| $\tau$    | verblijftijd             | hr                   |
| $\varphi$ | volumefractie deeltjes   | -                    |
| $\Phi_a$  | netto pompvermogen       | W                    |
| $\Phi_v$  | volumestroom             | m <sup>3</sup> /hr   |
| $\Phi_m$  | massastroom              | kg/s                 |
| $\psi$    | deeltjesflux             | kg/m <sup>2</sup> .s |

Indices:

|                |   |
|----------------|---|
| 1              | grootheden die betrekking hebben op bioreactor1 |
| 2              | grootheden die betrekking hebben op bioreactor2 |
| *              | verzadigingsconcentratie                        |
| b              | benzeen   |
| g              | gas   |
| gr             | groot   |
| i              | stroom i  |
| js             | just suspended                                  |
| kl             | klein   |
| l              | vloeistof                                       |
| m              | minerale olie                                   |
| meta           | metabolisme                                     |
| mo             | microorganisme                                  |
| min            | minimale  |
| max            | maximaal  |
| O <sub>2</sub> | zuurstof  |
| p              | deeltje   |
| r              | recycle   |
| s              | substraat                                       |
| s              | vaste stof deeltjes                             |
| sl             | slurrie   |
| t              | tolueen   |
| vast           | geadsorbeerde biomassa aan PAC                  |
| x              | xyleen  |
| x              | biomassa  |
| z              | zwerm deeltjes                                  |

## Afkortingen:

|     |                        |
|-----|------------------------|
| GAC | Granular Active Carbon |
| OUR | Oxygen Uptake Rate     |
| OTR | Oxygen Transfer Rate   |
| PAC | Powdered Active Carbon |



## 11 LITERATUUR

- [1] Energie en afvalbeheer, Strippen van verontreinigd grondwater in het Gooi, no. 8 (1987), blz. 28/29.
- [2] ROM, Grondwater en de banden met oppervlaktewater en bodembescherming, no. 9 (1986), blz. 9-18.
- [3] Absalon J.R. and Hockenbury M.R., Treatment Alternatives evaluation for Aquifer Restoration, Proceedings of the Second National Symposium on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, Ohio, may 26-28 (1982), p. 98-103
- [4] Muilerman H., Grondwater - bron van drinkwater - bedreigd, Uitgeverij Milieudefensie (1987), Amsterdam.
- [5] Bodembeschermingreeks no. 64, Grondwater behandeling bij Bodemsanering, Ministerie van Ruimtelijke Ordening en Milieu Beheer (1987), Staatsuitgeverij.
- [6] Bodembeschermingreeks no. 49, Toepassing EG-Grondwaterrichtlijnen, Ministerie van Ruimtelijke Ordening en Milieu Beheer (1985), Staatsuitgeverij.
- [7] Viveen B. Bodemsanering bij tankstation en oliedepots, Preventie no. 2 (1987).
- [8] Chaffee W.T. and Weimar R.A., Remedial Programs for ground-water supplies contaminated by Gasoline, Proceedings of the Third National Symposium on Aquifer Restoration and Ground-Water Monitoring, Ohio, may 25-27 (1983), p. 39-46.
- [9] Heinis F.S., Verwijdering van bodemverontreiniging, PT/Civiele Techniek 39 (1984) no. 1.
- [10] Zeeuw de E., Ervaringen met grondwatersaneringen in situ bodemreiniging, Land + Water - nu/Milieutechniek, no. 11 (1986).
- [11] Frederiks A.N.J., Grondwatersanering bij verontreiniging door vluchtige gehalogeneerde verbindingen, Milieutechniek no. 2 (1985).
- [12] Bodembeschermingreeks no. 53, Reiniging van grondwater van voormalige gasfabriekterreinen, Ministerie van Ruimtelijke Ordening en Milieu Beheer (1986), Staatsuitgeverij.
- [13] PATO, Intersectie Gezondheidstechniek, Chemische en fysische waterzuiveringstechnieken (1985) deel II.
- [14] Stover E.L. and Kincannon D.F., Biological treatability of specific organic compounds found in chemical industry wastewaters, J. Water Pollut. Control. Fed. (1983), vol 55, no. 1, p. 977-103.

- [15] Painter H.A., Biotechnology of wastewater treatment, Proceedings of a meeting on The oil industry and microbial ecosystems (1978), p. 178-197.
- [16] Perry R.H., Perry's Chemical Engineers Handbook, 6th edition.
- [17] Bos P., Huber T.F., Kos C.H. en Doddema H.J., Microbiele voorreiniging van steenkool, Rapport van Technische Universiteit Delft en TNO Zeist (1986).
- [18] Handboek Bodemsaneringstechnieken, afl 1, juli 1983, p.149-162.
- [19] Treybal R.E., Mass Transfer Operations, 3rd, McGraw-Hill, New York (1980), p. 33-35.
- [20] Landolt- Börnstein, deel 4C, 6e ed. Springer-Verlag Berlin (1976).
- [21] Tsonopoulos C. and Wilson C.M., AIChE Journal (1983), vol 29, no 6 p. 990-9.
- [22] Brady C.J. and Wilson C.M., AIChE Journal (1985), vol 31, no 3, p. 376
- [23] Zuiderweg F.J., Fysische Scheidingsmethoden deel 2 Apparaten (1987), Delft, p. 86.
- [24] Energiebeheer & Afvalbeheer (1987), no 10, p. 41-46
- [25] Schenz T.W., Manes M, J. Phys. Chem. (1975), no. 79(6), p. 604-9.
- [26] Sherwood T.K., Pigford R.L., Wilke C.R., Mass Transfer, McGraw-Hill, New York (1974), p.586
- [27] Gibson D.T., Cardini G.E., Maseles F.C. and Kallio R.E., Incorporation of oxygen-18 into benzene by *Pseudomonas putida*, Biochemistry (1970), vol 9, no 7, p. 1631-5.
- [28] Higgins I.J. and Gilbert P.D., The biodegradation of hydrocarbons, Proceedings of a meeting on The oil industry and microbial ecosystems (1978), p. 80-109.
- [29] Rehm H.J. and Reed G., Biotechnology, vol 8 Microbial Degradations (1986), p. 483-489.
- [30] McGuire M.J. and Suffet I.H., Activated Carbon Adsorption of Organics from the Aqueous Phase, Vol 1, p. (a) 424-443, (b) 106-109. (c) 167-189, (e) 43-63, Vol 2, p. (d) 340-345, 280 (1980), Michigan.
- [31] Chudyk W.A. and Snoeyink V.L., The removal of low levels of phenol by activated carbon in the presence of biological activity, Water Res. (1981).
- [32] Li A.Y.L. and DiGiano F.A., Availability of sorbed substrate for microbial degradation on granular activated carbon, J. Water Pollut. Control. Fed. (1983), vol. 55, no. 4, p 392-399.

- [33] Sublette K.L., Snider E.H. and Sylvester N.D., A review of the mechanism of powdered activated carbon enhancement of activated sludge treatment, *Water Research* (1982), vol. 16, p. 1075-82.
- [34] Roels J.A. *Energetics and kinetics in biotechnology* (1983).
- [35] Atkinson B. and Mavituna F., *Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook* (1983), p. 582-593,603.
- [36] Kreuk J.F. and Hansveit A.O., Assessment of biodegradation, *Proceedings of a meeting on The oil industry and microbial ecosystems* (1978), p. 155-162.
- [37] Hawkes H.A., The ecology of activated sludge, *Proceedings of a meeting on The oil industry and microbial ecosystems* (1978), p. 217-231.
- [38] Lafrance P., Mazet M. and Villessot D., Bacterial growth on granular activated carbon, *Water Res.* (1983), vol 17, no 10, p. 1467-70.
- [39] Wilcox D.P., Chang E., Dickson K.L. and Johansson K.R., Microbial growth associated with granular activated carbon in a pilot water treatment facility, *Applied and Environmental Microbiology* (1983), vol 46, no 2, p. 406-416.
- [40] Quon J.E. and Chang K., Communication, *J. Water Pollut. Control. Fed.* (1979), vol 551, no 9, p. 2324-2326.
- [41] Jong de E.J., *Collegedictaat ST42, Apparaten voor de procesindustrie, deel 3, Impulsoverdracht, TUDelft.*
- [42] Frijlink J.J., *Physical Aspects of Gassed Suspension Reactors, Proefschrift Technische Universiteit Delft* (1987).
- [43] Creemers M.R. e.a., *Polytechnisch zakboekje, 42e editie* (1987), PBNA.
- [44] Kleijntjens R.H., *Vergelijking van de drie fasen (S-L-G) pachuca reactor met andere drie fasen systemen aan de hand van fysisch technologische criteria, voortgangsverslag project Bt 3024* (1988).
- [45] *Dictaat ST 26 Deeltjestechnologie I, TUDelft* (19895).
- [46] Baumann E.R., *Overwegingen bij het ontwerp van een indikker, filtratie deel4, PT/ Procestechneik* (1986), no. 41(7), p. 29-32.
- [47] Smith J.M., Stammers E., Janssen L.P.B.M., *Fysische transportverschijnselen I, Dumm* (1981).
- [48] Kossen N.W.F., *dictaat bioprocestechneologie, TUDelft* (1984).
- [49] Guthrie, *Process Plant Estimating Evaluation and Control Craftsman, California* (1974).
- [50] *WEBCI prijzenboekje, Ned. Stichting voor kostentechniek.*

- [51] Montfoort A.G., De Chemische Fabriek College dictaat st 44 (1988), TU Delft.
- [52] Manes M. and Hofer L.J.E., J. Phys. Chem. (1969), no. 73(3), p. 584-90.
- [53] Wohleber D.A. and Manes M., J. Phys. Chem. (1971), no. 75(1), p. 61-64.
- [54] Schenz T.W. and Manes M., J. Phys. Chem. (1975), no. 79(6), p. 604-609.
- [55] Grant R.J. and Manes M., I & EC Fundament. (1966), no 5(4), p. 490-498.
- [56] Grant R.J. and Manes M., Smith S.B., AIChE J. (1962), no 8(3), p. 403-406.

## BIJLAGE A Algemene aspecten van grondwater en sanering

### Grondwater

Tweederde deel van het drinkwater in Nederland is van oorsprong grondwater. Eenderde deel van het drinkwater is afkomstig uit de Maas en de Rijn, en wordt via spaarbekkens of duinfiltratie tot drinkwater bereid. Grondwater is vanwege z'n gunstige kwaliteiten als constante temperatuur, het ontbreken van bacteriën en virussen, goede smaak en geur, en (relatieve) afwezigheid van gevaarlijke stoffen, een begeerd artikel voor de bereiding van drinkwater. Ook de landbouw en de industrie maken er echter graag gebruik van. Het grondwater is gemakkelijk te zuiveren voor gebruik van drinkwater. In natuurlijk grondwater kunnen stoffen voorkomen als ijzer, mangaan, koolzuur, etc. Een relatief eenvoudige zuivering zoals beluchting, ontijzering, filtratie en bijstelling van de zuurgraad is over het algemeen voldoende. [4]

Er moet onderscheid gemaakt worden tussen grondwater in de verzadigde zone, waar alle poriën tussen bodemdeeltjes gevuld zijn met water, en water in de onverzadigde zone. In de onverzadigde zone spelen zich de bodemprocessen af (figuur A.1). Juist boven de grondwaterspiegel, die de grens van de verzadigde en onverzadigde zone vormt, komt capillair water voor. Water dat nog dicht bij het oppervlak voorkomt wordt hangwater genoemd.

Afhankelijk van de geologische opbouw van de bodem kunnen er in Nederland een of meer watervoerende lagen voorkomen. Watervoerende lagen zijn de grofkorrelige zand- of grindafzettingen. Voor het zoete grondwater is alleen de eerste 200 meter van de ondergrond van belang. Watervoerende lagen worden van elkaar gescheiden door slecht doorlatende lagen in de vorm van klei, veen of leem. Als men het over grondwater heeft, wordt vaak gesproken van ondiep, middeldiep of diep grondwater wat betrekking heeft op de winningsdiepte.

Grondwater stroomt van plaatsen met een hoog grondwaterniveau naar plaatsen met een laag grondwaterniveau, als gevolg van de zwaartekracht. De grondwaterstroming wordt bepaald door slecht doorlatende lagen die de stroming belemmeren, door rivieren die of voedend, of ontwaterend kunnen werken, en zeker ook door menselijke ingrepen zoals het onttrekken van grondwater. Grondwater stroomt voornamelijk horizontaal. [4]

### De bodem:

De Nederlandse bodem kan ingedeeld worden in vijf verschillende bodemtypes. Deze bodemtypes worden normbodems genoemd. De indeling is gebaseerd op textuur en het gehalte aan organische stof in de bodem (zie tabel A.1)

TABEL A.1 Karakteristieken van de 5 bodemtypes.

| BODEMTYPES             | TEXTUUR <sup>1</sup> |                   | ORGANISCH <sup>2</sup><br>STOFGEHALTE |
|------------------------|----------------------|-------------------|---------------------------------------|
|                        | klei<br>< 2 µm       | silt<br>2 - 50 µm |                                       |
| I Humus arme zandgrond | < 8                  | < 25              | < 2                                   |
| II Humeuse zandgrond   | < 8                  | < 25              | 2 - 15                                |
| III Zavelgrond         | 8 - 17.5             | > 25              | < 15                                  |
| IV Kleigrond           | > 17.5               | -                 | < 15                                  |
| V Veengrond            | -                    | -                 | > 15                                  |

1) gehalte uitgedrukt in gewichtsprocenten op de minerale delen ( d.w.z. drooggewicht na verwijdering van kalk en organische stof)

2) gehalte uitgedrukt in gewichtsprocenten "op de grond" (d.w.z. totaal drooggewicht, inclusief kalk en organische stof).

De geologische opbouw van de eerste vier types is te zien in figuur A.2. De zandgrond heeft het grootste watervoerendpakket. [6]

Globaal kan de ondergrond van Nederland in grote lijnen worden geschematiseerd tot een goed doorlatend zandpakket. De dikte van het zandpakket varieert tussen enkele meters in Oost-Nederland tot enkele honderden meters in West- en Noord-Nederland. Het zandpakket is dikwijls in etages verdeeld door matig doorlatende klei- of veenlagen. [5]

#### De rol van de overheid in het grondwaterbeheer:

Er zitten twee belangrijke aspecten aan het grondwater die regelingen van de overheid nodig hebben gemaakt:

1. Het kwantitatieve aspect: de verdeling van het grondwater over de verschillende gebruikers.

Pas in 1984 is de Grondwaterwet van kracht geworden, die een algemene regeling inhoudt voor de verdeling van het grondwater. De vergunningverlening voor alle onttrekkingen kwam in handen van Gedeputeerde Staten. Winningen onder een bepaalde grens (aantal m<sup>3</sup> per uur) zijn vrijgesteld van een vergunning en kennen hooguit een meldingsplicht.

Het beheer van de hoeveelheid water in Nederland is vrijwel geheel afgestemd op de landbouw. Er wordt een volledig kunstmatige situatie in stand gehouden, waarbij het milieu wordt aangepast aan de landbouwgewassen. Er zijn en worden nog steeds grootscheeps ontwateringswerken uitgevoerd, waarbij grondwaterpeilen sterk worden verlaagd om de productie op te voeren.

2. Het kwalitatieve aspect: de bescherming van het grondwater.

De meeste wetten die met het milieu te maken hebben bestrijken een bepaald deel van het milieu (water, bodem, lucht) of richten zich op bepaalde stoffen (bestrijdingsmiddelen, afvalstoffen). Gezien de verwevenheid van grondwater met ander milieucomponenten, geldt dat een goed functioneren van alle bestaande milieuwetten voor de grondwaterkwaliteit van groot belang is.

Naast de bestaande wetten is voor grondwater een wet die een directe en integrale bescherming biedt aan bodem (en grondwater) van groot belang. Al in 1971 is een voorontwerp in de Tweede Kamer besproken, maar invoering van de Wet Bodembescherming vond pas plaats in 1987. Deze wet die nu van kracht is zal de integrale bescherming van bodem en grondwater vorm moeten geven. Naast een algemeen beschermingsniveau van de bodem, vastgesteld op Rijksniveau, moeten bijzondere beschermingsniveaus worden vastgesteld voor afzonderlijke gebieden. Dit laatste wordt de provincie geacht te doen. Als speciale bodembeschermingsgebieden zullen worden aangemerkt gebieden die geologisch of ecologisch waardevol zijn, en grondwaterbeschermingsgebieden rondom waterwinputten. In figuur A.3 zijn de voor het grondwater relevante regelingen samengevat.

De beschikbaarheid van voldoende en goed grondwater is voor de verschillende functies van groot belang. Dat de belangen van natuur, landbouw, en waterwinning niet altijd parallel lopen is duidelijk.[4]

### Bronnen van vervuiling

Er zijn twee soorten bronnen die de kwaliteit van het grondwater bedreigen:

#### A. Diffuse verontreinigingsbronnen

Deze vervuilingen zijn als een deken van vervuiling over een groot gebied uitgespreid:

(1) De landbouw; De grootste bron van vervuiling voor het grondwater is zonder twijfel de landbouw. Met name in gebieden met veel bio-industrie produceren de miljoenen kalveren, varkens en kippen zeer veel mest. Hiernaast is het de intensieve akkerbouw (bieten, aardappelen, bloembollen) die voor problemen zorgt, in het bijzonder door het intensieve gebruik van bestrijdingsmiddelen.

(2) De zure regen; Een tweede belangrijke bron van vervuiling die het grondwater treft is de zure regen, een resultaat van de luchtverontreiniging. Landbouw, verkeer, en industrie zijn hiervan de grootste veroorzakers.

#### B. Puntbronnen

Puntbronnen zijn alle duidelijk gelocaliseerde bronnen van bodem, en dus meestal van grondwaterverontreiniging. Bij puntbronnen is het grondwater plaatselijk sterk verontreinigd. Dit kunnen zijn industriële lozingen en dumpingen, vuilnisbelten, lekkende olietanks, etc. [4] Tabel A.2 geeft een globaal overzicht van de hoofdgroepen zoals die in de bodem van verontreinigde locaties kunnen worden aangetroffen en een voorbeeld van een bedrijfstak die deze stofgroep zou hebben kunnen lozen.[11]

Tabel 2 Indeling hoofdgroepen verontreinigingen en voorbeelden van potentieel vervuilende bedrijfstakken

|   |  |   |
|---|--|---|
| 1. Zware metalen  | kwik, cadmium, lood                    | galvanische industrie<br>metallurgische industrie                                   |
| 2. Cyaniden   | complexe cyaniden en<br>vrije cyaniden | voormalige gasfabrieks-<br>terreinen<br>galvanische industrie                       |
| 3. Alifatische kool-<br>waterstoffen                    | olie, benzine                          | garagebedrijven,<br>benzinstations  |
| 4. Aromatische kool-<br>waterstoffen                    | benzeen, toluen, xyleen                | grafische industrie,<br>galvanische industrie,<br>voormalige fabrieks-<br>terreinen |
| 5. Polycyclische aromatische<br>koolwaterstoffen        | naftaleen, benzo(a)pyreen              | teerprodukten,<br>voormalige gasfabrieks-<br>terreinen                              |
| 6. Vluchtige gehalogeneerde<br>koolwaterstoffen         | trichlooretheen<br>chloroform          | galvanische industrie<br>chemische wasserijen                                       |
| 7. Niet-vluchtige<br>gehalogeneerde<br>koolwaterstoffen | polychloorbifenylen<br>dioxinen        | chemische industrie   |

De mate en soort van verontreiniging is per geval zeer verschillend. Met betrekking tot het procesontwerp voor grondwaterzuivering zal de olieverontreiniging nu verder worden toegelicht. Olieverontreiniging is een van de meest voorkomende vormen van verontreinigingen in Nederland (zie artikel NRC-Handelsblad bijlage C). Op plaatsen waar olieproducten worden opgeslagen of verhandeld is er een grote kans op verontreiniging van de bodem. Dit kan worden veroorzaakt door lekkende tanks of lekkende leidingen, maar ook door morsverliezen bij onzorgvuldig vullen.[7]

Het hele land is bezaaid met deels lekkende olietanks. Vaak worden deze tanks na een verhuizing of een faillissement 'vergeten', terwijl er nog olie in zit. Na een aantal jaren roesten de tanks door en gaan lekken, met verontreiniging als gevolg. Olieverontreinigingen zijn heel vervelend omdat olie gemakkelijk de grond in dringt en zich dan als een drijfslag op het grondwater in de omgeving verspreidt.[4]

De vorm waarin de verontreinigde stof zich uiteindelijk in de bodem manifesteert wordt in belangrijke mate bepaald door de fysisch en chemische eigenschappen van de desbetreffende stof, de ontvangende grond en het ontvangende grondwater. De uiteindelijke verschijningsvormen kunnen worden onderverdeeld in de volgende 4 hoofdgroepen:

- de verontreiniging bevindt zich in vaste (granulaire) vorm in de bodem;
- de verontreiniging bevindt zich onopgelost en ongemengd in het grondwater;
- de verontreiniging is opgelost in het grondwater;
- de verontreiniging is aan bodemdeeltjes geadsorbeerd.[11]

#### Hoe wordt de verontreiniging verspreid

Bodemverontreiniging vindt meestal plaats in de eerste meters onder het maaiveld. Bodemverontreiniging heeft veelal waterverontreiniging tot gevolg. De meeste verontreinigingen, die op of in de bodem worden gebracht,



worden door de bodemdeeltjes opgenomen. Dit opnamevermogen is echter niet eindeloos. Na verloop van tijd wordt de met het regenwater percolerende verontreiniging al dieper in de bodem aangetroffen alvorens het door bodemdeeltjes wordt vastgehouden. De verontreinigingen verplaatsen zich als een front door de bodem heen. Als het front de grondwaterspiegel bereikt, vindt er op grote schaal verontreiniging van het grondwater plaats. [2]

In het grondwater aangekomen bestaan er grote verschillen in verspreidingspatroon tussen zandgebieden en gebieden met een slecht doorlatende deklaag. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen verplaatsing in een deklaag en verplaatsing in een watervoerend zandpakket.

(a) Zandpakket zonder slecht doorlatende deklaag

In het hoge zandgebied ligt het zandpakket (watervoerendpakket) direct aan de oppervlakte. Hier is sprake van een overwegend horizontale grondwaterstroming (figuur A.4) met een verplaatsing van enkele tientallen meters per jaar.

(b) Poldergebied met slecht doorlatende deklaag

De verplaatsing in de deklaag is afhankelijk van de afwisseling van goed en minder doorlatende lagen op lokale schaal. Wanneer de doorlaatfactor op geringe diepte verhoudingsgewijs nog vrij groot is dan zal er sprake zijn van een overwegend horizontale verplaatsing naar de ontwateringsmiddelen (sloten, drains). Wanneer de verontreinigingen de slecht doorlatende deklaag zijn gepasseerd komen ze in het zandpakket (figuur A.5) [5]

Door natuurlijke fluctuatie van de grondwaterspiegel kan de dikte van b.v. een olielens verminderen. Figuur A.6 toont de relatie tussen grondwaterfluctuaties en de verspreiding van de olie tussen grond en grondwater. [8]

**De schadelijke effecten van het vervuilde grondwater:**

Risico's voor de volksgezondheid treden op bij contactmogelijkheden door binnendringen in waterleidingen, opname in (volks)tuin gewassen en verdamping, bijvoorbeeld in kelderruimten. Met de hier van toepassing zijnde stoffen betekent dit zowel een smaak- en stankprobleem als een gezondheidsgevaar (benzeen).

Het risico voor het milieu kan zich uiten in het afsterven van groen ter plaatse, maar ook door verspreiding naar andere objecten b.v. drinkwaterputten. [7]

**Grondwatersaneringsystemen**

Een grondwatersaneringsysteem bestaat uit twee geïntegreerde subsystemen (figuur A.7):

1. het onttrekkingsysteem;
2. het zuiveringsysteem.

Hieronder wordt ingegaan op de verschillende onderdelen van het systeem. [16]

### 1. Het Onttrekkingssysteem

De belangrijkste factoren die de keuze van het onttrekkinssysteem bepalen zijn de doorlatendheid van de bodem en de omvang en diepte van een te saneren verontreiniging. Deze factoren worden beïnvloed door de bodem opbouw.

Wanneer een verontreiniging zich over grote afstand heeft verplaatst in een zandpakket, moet veel water worden onttrokken om de verontreiniging te saneren. Daarbij wordt in het algemeen een keuze gemaakt tussen de volgende systemen [5]:

#### a. verticale vacuumbemaling (onttrekkingsfilters, bronnering)

Figuur A.8 geeft schematisch de constructie van een vacuümfilter weer. Een aantal filters aangesloten op een gemeenschappelijke zuigleiding is een filterstreng. De onderlinge afstand tussen de filters kan varieëren van 2 tot 5 a 10 meter. De zuigleiding is aangesloten op een zelfaanzuigende (plunjer) pomp. De filters worden in het algemeen tot een diepte van 5 á 8 m-maaiveld aangebracht. Dit systeem wordt veel toegepast voor verontreiniging in het ondiepe grondwater in deklagen en watervoerende pakketten. Bij slecht doorlatende deklagen (klei of sterk slibhoudend zand) is het systeem minder goed bruikbaar vanwege de geringe toestroming van grondwater.

#### b. horizontale vacuumbemaling

#### c. horizontale drainage

Figuur A.9 geeft een principeschema van een horizontale drain. Dit systeem wordt veelal toegepast bij ondiepe grondwaterverontreinigingen die in deklagen of watervoerend pakketten voorkomen.

#### d. verticale puttenbemaling (diepwells)

Figuur A.10 geeft de principeschets van een deepwell. De deepwells worden toegepast bij verontreiniging van het diepere grondwater in deklagen en met name in watervoerende pakketten. Bij een diepe grondwaterverontreiniging kan de filterdiepte aangepast worden aan de diepte waar de verontreiniging in het grondwater voorkomt.

#### e. open bemaling (sloten, vijvers)

Wanneer verontreinigde grond wordt ontgraven tot onder de grondwaterspiegel wordt het water dat in de ontgravingen stroomt door middel van klokpompen rechtstreeks verwijderd. Toestroming vanuit de omgeving is zeer gering zodat de omvang van de grondwatersanering gering is. [5]

Onttrekkingssystemen worden veelal uitgevoerd in kunststof. Vanwege het doorgaans tijdelijke karakter van een grondwatersanering wordt meestal gebruik gemaakt van PVC. Bij langdurige toepassingen (bv. een beheersingssysteem bij een verontreinigde lokatie) is het in verband met chemische aantasting noodzakelijk meer aandacht te besteden aan een optimale materiaalkeuze. Zo wordt in voorkomende gevallen gebruik gemaakt van HPDE, roestvrijstaal, hout e.d..

De perforatiegrootte van de onttrekkingsfilters hangt af van de korrelgrootte van de grond en de gradatie van het grind van de filteromstorting. Bij langdurige toepassingen is het met het oog op verstopping van het filter door fijne deeltjes (silt, lutum) of neerslag van ijzer, mangaan e.d. aan te bevelen het filter op te bouwen uit verschillende gradaties.

Het verontreinigde grondwater wordt met behulp van een pomp of combinatie van pompen onttrokken. De toepassing van een pomp hangt af van de aard en concentratie van de verontreiniging, de opvoerhoogte, het af te pompen debiet, het type onttrekkingssysteem en het feit of een pomp al dan niet mag lensdraaien (droogpompen). De moeilijkheid ligt vaak in een zeer heterogene samenstelling van het op te pompen water en de snel wisselende pompondities: water, zwevende vaste deeltjes en verontreinigingen. In het algemeen wordt gebruik gemaakt van elektrisch aangedreven plunjer- of membraanpompen. In tabel A.3 is een overzicht gegeven van de belangrijkste parameters van onttrekkingssystemen. [11]

Tabel 3 Grondwateronttrekkingsmethoden

| Methode  | Principe  | Grondsoort  | Toepassingsgebied<br>Grondwaterstand   |
|--|---|---|--|
| Vertikale vacuumbemaling                           | Filters met een diam. van 50 tot 100 mm worden gepulst op gespoten, aangesloten op een verzamelleiding. M.b.v. een pomp wordt een vacuüm gecreeërd, waardoor het water wordt opgezogen.           | goed en redelijk doorlatende grond                                  | tot maximaal ca. 7 m beneden maaiveld  |
| Horizontale vacuumbemaling                         | Met een drainmachine worden horizontale drains met een diam. van 80 tot 120 mm gelegd. M.b.v. een pomp wordt een vacuüm gecreeërd, waardoor het water wordt opgezogen.                            | goed tot redelijk doorlatende grond                                 | vanwege maximale legdiepte max. ca. 4 m beneden maaiveld   |
| Horizontale drainage                               | Via drains of grindsleuven wordt een lokatie gedraineerd. De sloten worden bemalen. Drains of grindsleuven komen uit in een sloot of centrale put, die afgepompt wordt.                           | niet in zware klei of leem  | maximaal ca. 3 m beneden maaiveld  |
| Vertikale puttenbemaling                           | Filters met een diam. van 100 tot 1000 mm worden gepulst. M.b.v. een haalleiding of onderwaterpomp wordt het water opgepompt. Drijfslagen worden doorgaans met een twee-pompensysteem verwijderd. | goed doorlatende grond (drijfslagen) tot redelijk doorlatende grond | geen begrenzing bij onderwaterpomp of in de schacht gehangen pomp  |
| Open bemaling (sloten, vijvers)                    | In het verontreinigd gebied worden sloten of vijvers gegraven die direct worden afgepompt.  | alle grondsoorten   | geen begrenzing, maar praktisch ca. 5 m beneden maaiveld   |
| Verontreiniging                                    | Pomptype  | Maximale diepte   | Opmerkingen  |
| Alle   | Een pomp die lens mag draaien, zoals een plunjerpomp of membraanpomp  | ca. 10 m  | Het grote probleem met vacuumbemalen, is dat als in één filter lucht wordt aangezogen door een losse verbinding of filterperforatie boven de grondwaterstand, er ook in andere filters nauwelijks water wordt opgepompt. |
| Alle   | Plunjerpomp, membraanpomp   | ca. 5 m beneden maaiveld  | Dit type onttrekkingssysteem is slechts geschikt voor ondiepe verontreinigingen en is dan vaak het goedkoopst in aanleg en exploitatie. Vanwege de aanlegmethode niet geschikt op lokaties met kabel en leidingen.       |
| Alle   | Alle  | ca. 5 m beneden maaiveld  |  |
| Alle, maar met name drijfslagen olie, benzine etc. | Onderwaterpomp<br>Verdringerpomp  | In principe onbeperkt   | Met twee-pompensysteem zeer geschikt voor drijfslagverwijdering. Bovendien toepasbaar bij alle grondwaterstanden.  |
| Alle, behalve vluchtige verbindingen               | Alle  | Tot enkele meters beneden grondwaterstand                           |  |

## Infiltratie

Voor de plantengroei zijn de hoogte van de grondwaterstand en de schommelingen daarin van het grootste belang. Door een te grote winning van grondwater en de daaropvolgende grondwaterstands daling kunnen natuurterreinen verdrogen, omdat de beschikbare vochtinhoude van de wortelzone vermindert. [4]

Bij onttrekking wordt door een kunstmatig gevormde verhanglijn bereikt dat de verontreiniging naar het onttrekkingspunt toestroomt. Bij toepassing van onttrekking kan door de verlaging van de grondwaterspiegel veel schade ontstaan, onder meer door zettingen en vermindering van gewasopbrengsten. Om deze schade te beperken kan de onttrekking gecombineerd worden met infiltratie van het gereinigde water. Het principe hiervan is gegeven in figuur A.11. De omvang van het beïnvloede gebied wordt hiermee teruggebracht. [9]

Als infiltratiesystemen kunnen worden toegepast:

- a. horizontale drains;
- b. verticale putten;
- c. open systemen (sloten, grindsleuven, vijvers)

### Voordelen van het toepassen van infiltratie:

1. het plaatselijk verhogen van het grondwaterpeil zodat ook een deel van de onverzadigde zone kan worden schoongespoeld;
2. het creëren van een steilere hydraulische gradiënt geeft een kortere verblijftijd van het water in de grond, zodat er een intensievere doorspoeling van de bodem in de verzadigde zone mogelijk is of de tijdsduur van een grondwatersanering te verkorten is;
3. een afname van de lozingskosten. [10]

Bij het ontwerp van een onttrekkings- en infiltratiesysteem dient verdere verspreiding van de verontreiniging via het grondwater te allen tijde voorkomen te worden. Dit houdt in dat in sommige gevallen alleen infiltratie mogelijk is in de kern van de verontreiniging. Het verontreinigde grondwater wordt dan aan de rand van de verontreiniging opgepompt. Het grondwater stroomt in de richting van verontreinigde grond naar schonere grond volgens het zogenaamde tegenstroomprincipe. [10]

## 2. Het zuiveringssysteem

De zuiveringstechnieken zijn in 3 hoofdgroepen in te delen:

- a. Fysische zuivering:
  - absorptie/adsorptie
  - filtratie
  - membraan filtratie (hyperfiltratie en ultrafiltratie)
  - diffusieprocessen (beluchting/stripping)
  - dichtheidsscheiding (sedimentatie, flocculatie)
- b. Fysische/chemische zuivering:
  - coagulatie/flocculatie
  - REDOX-processen
  - ionenwisseling
- c. Biologische zuivering:
  - trickling filters

- activated sludge

Door te kiezen voor een modulaire opbouw, kan een zeer flexibel zuiveringssysteem worden verkregen, dat in de loop van het proces op basis van veranderende debiet- en concentratie omstandigheden kan worden gewijzigd. [11]

Als het zuiveringssysteem als een black-box (figuur A.12) wordt bekeken, dan kunnen potentieel de volgende in- en uitgaande stofstromen worden onderscheiden.

a. Ingaande stofstroom:

- verontreinigd influent
- voor zuiveringsproces benodigde stoffen (bv. zuurstof)

b. Uitgaande stofstroom:

- gereinigd effluent
- slibstroom
- luchtmissies

Het water dient te worden gereinigd tot een gestelde lozingsnorm is bereikt.

In principe kan het gereinigde water op drie manieren worden geloosd, te weten:

- op de vuilwaterriolering;
- op het oppervlaktewater;
- infiltratie in de bodem.

Veelal wordt het gereinigde water geloosd op de riolering. Hierbij moet rekening gehouden worden met de grootte en het type rioolwaterzuiveringsinrichting. Indien geen riolering in de nabijheid is, kan op het oppervlaktewater worden geloosd. De normen van lozing zijn hier echter veel zwaarder dan die van de riolering. Voorts is het mogelijk het gereinigde water via infiltratie/injectie weer in de bodem terug te brengen. De bodem moet hiertoe (goed) doorlatend zijn, zodat alleen zandgrond in aanmerking komt. Het water moet vooraf ontdaan zijn van zwevende vaste deeltjes en ijzer en mangaan met het oog op verstopping. [11]

Het meest complexe aspect van de grondwaterverontreinigingsproblemen is de verwijdering van opgeloste organische stoffen. Drie basis mogelijkheden zijn adsorptie, strippen of biologische afbraak. De verwijdering van een bepaalde organische stof uit water is afhankelijk van zijn fysische, chemische en biologische eigenschappen. Sommige stoffen zijn biologisch afbreekbaar maar zijn niet adsorbeerbaar, terwijl andere stripbaar maar niet biologische afbreekbaar zijn. [3]

**BIJLAGE B Grondwaterreinigingstechnieken**

Behandelingsystemen voor verontreinigd grondwater zijn afgeleid van systemen voor behandeling van industrieel water of bereiding van drinkwater. Hier volgt een overdruk van de verschillende toegepaste technieken met praktijkervaring zoals die in lit [12] behandeld zijn. Er wordt alleen naar de technologische en bedrijfstechnische aspecten gekeken.

De volgende technieken worden behandeld:

- |  |  |
|--|--|
| 1. Bezinktank met olieafscheider       | 11. Actieve kooladsorptie                            |
| 2. Dissolved Air Flotation             | 12. Oxydatie   |
| 3. Induced Air Flotation               | 13. Ionen-wisseling                                  |
| 4. Precipitatie                        | 14. Omgekeerde Osmose of<br>Hyperfiltratie           |
| 5. Coagulatie en flocculatie           | 15. Lucht-strippen                                   |
| 6. Coalescentie filter                 | 16. Grensfilmverdamer                                |
| 7. Zand-multi mediafilter              | 17. Stoom-stripper                                   |
| 8. Diatomeeënaarde filter              | 18. Vloeistof-vloeistof extractie                    |
| 9. Ultrafiltratie en<br>microfiltratie | 19. Biologische behandeling<br>met aërobe organismen |
| 10. Harsadsorptie                      |  |

1. Bezinktank met olieafscheider

Een bezinktank met olieafscheider bestaat uit een bassin waarin via zwaartekrachtscheiding verwijdering van bezinkbare en oopbare stoffen plaatsvindt. Geemulgeerde stoffen en colloïden worden niet verwijderd. Tevens kan dit bassin als buffer of egalisatietank dienen, een combinatie, die in de praktijk vaak voorkomt.

De zwaartekrachtscheiding verloopt traag zodat een vrij omvangrijk bassin nodig is. Door toepassing van lamellenafscheiders wordt een versnelde afscheiding bewerkstelligd zodat het bassin een factor 3-6 compacter geconstrueerd kan worden, echter de egalisatiefunctie wordt dan sterk verminderd.

Het uit de drainage afkomstige grondwater wordt in de bezinktank opgevangen en hierbij is vooral de egalisatiefunctie van belang.

- Kenmerken :
- aanzienlijk reinigend effect (geen influent-eisen, effluent = 10-50 mg ss/l en 20-200 mg olie/l (ss = suspended solids = zwevende stof))
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - zeer bedrijfszeker
  - compactheid afhankelijk van het ontwerp
  - geen verbruik hulpstoffen, laag energieverbruik
  - slibverwerking nodig
  - veel praktijkervaring in het algemeen en ook bij gasfabriekgrondwaterreiniging

Conclusie: geschikt voor verwijdering van de maximale in grondwater voorkomende concentraties minerale olie, zand en overige bezinkbare en zwevende stof.

2. Dissolved Air Flotation (DAF)

Bij DAF wordt lucht onder een druk van 3-5 bar in het grondwater opgelost en in een flotatietank gebracht, die werkt bij omgevingsdruk, zodat zeer kleine luchtbelletjes (50-100 µm) ontstaan. Deze hechten zich aan het (hydrofobe) zwevende stof zodat dit opstijgt, een drijfvlagen vormt en met een drijfvlagenafscheider verwijderd kan worden. Het rendement is in het algemeen wat beter, dan bij zwaartekrachtscheiding.

In verband met de mogelijke aanwezigheid van bezinkbaar materiaal is een bodemruimer met slibafvoer noodzakelijk. DAF wordt meestal toegepast na, of gecombineerd met coagulatie/flocculatie, waardoor geemulgeerde of colloïdale verontreinigingen ook kunnen worden verwijderd.

- Kenmerken:
- aanzienlijk reinigend effect (geen influent-eisen, zonder coagulatie/flocculatie effluent = 10-100 mg olie/l en 5-50 mg ss/l, met coagulatie/flocculatie effluent = 5-20 mg olie/l en 5-20 mg ss/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - zeer bedrijfszeker
  - compact
  - zonder coagulatie/flocculatie geen verbruik hulpstoffen, laag energieverbruik (0.2-0.4 kWh/m<sup>3</sup>)
  - afhankelijk van lokatie en grondwatersamenstelling stripluchtreiniging noodzakelijk
  - slibverwerking nodig
  - veel praktijkervaring in het algemeen en ook bij gasfabriekgrondwaterreiniging

Conclusie: geschikt voor "snelle" verwijdering van de maximale in grondwater voorkomende concentraties zwevende stof en minerale olie, met coagulatie/flocculatie is minerale olie verwijdering tot aan de R-waarde mogelijk.

3. Induced Air Flotation (IAF)

Bij IAF worden de luchtbelletjes mechanisch of met diffusor-beluchters in het grondwater gebracht. De luchtbelletjes zijn groter dan bij DAF namelijk 500-1000 µm en er ontstaat een 5-10 maal dikkere schuimlaag.

In het algemeen geldt, dat er alleen hechting optreedt als het luchtbelletje even groot of kleiner is dan het deeltje. Omdat de in grondwater voorkomende deeltjes klein zijn wordt verwacht dat het reinigend effect van IAF veel kleiner is dan van DAF. De hoeveelheid geproduceerde striplucht is vanwege een ongunstiger lucht-water verhouding veel groter dan bij DAF. Een voordeel van IAF is dat het een compacter apparaat is. Nadelig is het grotere energieverbruik.

- Kenmerken:
- kleiner reinigend effect dan DAF
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - zeer bedrijfszeker
  - compacter dan DAF
  - geen verbruik hulpstoffen, hoger energieverbruik dan DAF
  - grotere hoeveelheid striplucht dan bij DAF, slibverwerking nodig
  - veel praktijkervaring in het algemeen, niet bij gasfabriekgrondwaterreiniging

Conclusie: minder geschikt voor de gasfabriekgrondwaterreiniging dan DAF en wordt daarom niet in de verdere studie betrokken.

4. Precipitatie

Bij precipitatie wordt door toevoeging van chemicaliën aan het grondwater een precipitaat (neerslag) gevormd dat afscheidbaar is. Het proces is vooral geschikt voor de verwijdering van metalen en andere onoplosbaar te maken verbindingen (cyaniden) en kan gerealiseerd worden in een geroerde tank. De verblijftijd is afhankelijk van de te precipiteren verbindingen. Het afscheiden gebeurt in een bezink- of flotatieunit. Door doseren van Fe- of Al-zouten kunnen bij hogere pH Fe-respectievelijk Al-hydroxyde vlokken worden gevormd. Deze vlokken zijn in staat om een deel van de verontreinigingen in te vangen, waardoor afscheiding mogelijk is. Dit proces wordt coprecipitatie genoemd.

- Kenmerken:**
- aanzienlijk reinigend effect (geen influenteisen, effluent CN <1 mg/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - bedrijfszeker
  - compact
  - chemicaliënverbruik, laag energieverbruik
  - vergroot aandeel residuslib
  - praktijkervaring bij de defosfatering en verwijdering van zware metalen en cyaniden
- Conclusie:** geschikt voor verwijdering Fe- en Al-hydroxyden ter bescherming koolfilter, geschikt voor de cyanidenverwijdering (met FeSO<sub>4</sub>) van de maximale in grondwater voorkomende concentraties tot aan de R-waarde

5. Coagulatie en flocculatie

Coagulatie is het destabiliseren van emulsies en colloïdale-deeltjes met chemicaliën (FeCl<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, polyelectroliet) onder intensief mengen (verblijftijd 0,5-2 min.), zodat agglomeratie optreedt. Flocculatie is het bevorderen van de vlokvorming en vlogroei eventueel met polyelectrolieten onder langzaam eventueel trapsgewijs roeren (verblijftijd 20-30 min). De flocculatietanks zijn compact en worden voor een bezinktank of flotatieunit geschakeld.

- Kenmerken :**
- aanzienlijk reinigend effect (influent = 100-1000 mg ss en olie/l, effluent = 5-25 mg ss en olie/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - bedrijfszeker
  - compacte tanks
  - chemicaliënverbruik, laag energieverbruik
  - vergroot aandeel residuslib
  - veel praktijkervaring in het algemeen en bij de gasfabriekgrondwaterreiniging

**Conclusie :** geschikt voor het verwijderen van de maximale in grondwater voorkomende concentraties geëmulgeerde olie, colloïden en overig zwevende stof, er kan door coprecipitatie enige verwijdering plaatsvinden van opgeloste minerale olie, PCK, naftaleen, fenolen en BTEX; minerale olie kan verwijderd worden tot aan de R-waarde.

6. Coalescentie filter

Filter waarin colloïdale en emulsiedeeltjes naar elkaar toegedreven worden en coalesceren (= samenvloeien) waardoor grotere en gemakkelijker afscheidbare deeltjes ontstaan. Bij emulsies die oppervlakte actieve stoffen bevatten treedt vrijwel geen coalescentie op. Coalescentie en afscheiding geschieden in de meeste gevallen in één apparaat. De coalescentie kan bewerkstelligd worden door het grondwater door kleine gaatjes te persen of bloot te stellen aan een krachtig pulserend elektrisch veld. Het filter kan verstopt raken met zwevende stof of teer. Ingeval van teer kan door verwarming van het filter verstopping worden voorkomen.

- Kenmerken :**
- groot reinigend effect (geen influenteisen, effluent 2-15 mg olie/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen
  - verstopping mogelijk met zwevende stof en teer
  - redelijk bedrijfszeker
  - compact
  - geen verbruik chemicaliën, laag energieverbruik
  - slibverwerking nodig
  - praktijkervaring bij scheepvaart en metaalverwerkende industrie

**Conclusie :** geschikt voor verwijdering van de maximale in grondwater voorkomende concentraties teer, minerale olie, colloïden en emulsies, olie verwijdering mogelijk tot aan de R-waarde.



7. Zand-multimediafilter

Het zand-multimediafilter bestaat uit een neerwaarts doorstroomde kolom gevuld met bovenin grofkorrelig medium (anthraciet, zand, enz.) en onderin fijnkorrelig medium. Om doorslaan en verstopping te voorkomen wordt het filter periodiek teruggespoeld en wordt in het algemeen een bezinktank met olieafscheider voorgeschakeld. Het teruggespoelde water wordt doorgaans tijdelijk opgeslagen en teruggevoerd naar de bezinktank. Het filter is zeer geschikt voor de restverwijdering van zwevende stof, metaalhydroxyde vlokken en minerale olie.

- Kenmerken :**
- aanzienlijk reinigend effect (influent maximaal 100-200 mg ss en olie/l, effluent 2-5 mg ss/l en 15-20 mg olie/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen
  - verstopping mogelijk bij te hoge concentraties nevenverontreinigingen
  - redelijk bedrijfszeker
  - compact
  - geen verbruik chemicaliën, laag energieverbruik
  - slibverwerking nodig
  - veel praktijkervaring in het algemeen en ook bij de gasfabriekgrondwaterreiniging
- Conclusie :** zeer geschikt voor de restverwijdering van zwevende stof, metaalhydroxyde-vlokken en minerale olie uit ernstig en minder ernstig verontreinigd grondwater ter bescherming van hars en actieve koolfilters.

8. Diatomeeënaarde filter

Een diatomeeënaarde filter is in dit verband een zogenaamd precoatfilter. Bij dit discontinu werkende filter wordt eerst op het filterdoek een poreuze filterkoek van diatomeeënaarde opgebouwd.

Dit gebeurt door drukverlaging aan de ene zijde van het filterdoek en dosering van diatomeeënaarde aan de andere zijde zodat door aanstroming van de diatomeeënaarde de filterkoek gevormd wordt. Vervolgens heeft de filtratie van het grondwater plaats, waarbij om verstopping te voorkomen diatomeeënaarde aan het grondwater gedoseerd wordt.

Als laatste stap in de cyclus wordt bij het ontstaan van een te grote drukval over het filter, de filtratie onderbroken en de filterkoek met daarin het residu verwijderd. Alvorens nu weer met de filtratie gestart kan worden, dient eerst een "verse" filterkoek gevormd te worden.

In het algemeen wordt om het diatomeeënaardefilter te ontlasten een bezinktank met olieafscheider voorgeschakeld. Diatomeeënaarde bestaat hoofdzakelijk uit de kiezelhoudende pantsers van kiezelalgen en heeft een uitstekende filterende werking. Door ook actieve koolpoeder aan het grondwater te doseren kunnen naast zwevende stof, colloïden en minerale olie ook PCK, naftaleen, fenolen en BTEX verwijderd worden.

- Kenmerken :**
- aanzienlijk reinigend effect (influent 100-400 mg ss en olie/l, effluent 10-15 mg olie/l en 1-3 mg ss/l), verwijdering van de overige verontreinigingen afhankelijk van actieve kooldosering.
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - redelijk bedrijfszeker
  - compact
  - verbruik diatomeeënaarde en eventueel actieve kool, laag energieverbruik
  - vergroot aandeel residu, residuverwerking nodig.
  - praktijkervaring bij de drinkwaterbereiding uit o.a. oppervlaktewater en bij de olie-verwijdering uit afvalwater

**Conclusie :** geschikt voor verwijdering van zwevende stof, colloïden, emulsies en minerale olie uit ernstig en minder ernstig verontreinigd grondwater tot beneden de R-waarde, in combinatie met actieve kool ook verwijdering van PCK, naftaleen, fenolen en BTEX tot de B- of A-sigitaalwaarde.

9. Ultrafiltratie en Microfiltratie

Bij ultrafiltratie en microfiltratie wordt verontreinigd water onder overdruk (1-10 bar) langs een semipermeabel membraan geleid. Daarbij gaat een groot deel van het water door het membraan heen, terwijl het merendeel van de verontreinigingen wordt tegengehouden. Er ontstaat een relatief schone permeaatstroom en een concentraatstroom waarin zwevende stof, colloïden en minerale olie geconcentreerd zijn. PCK, BTEX, naftaleen, fenolen en cyaniden worden in verminderde mate tegengehouden.

Het membraan dient regelmatig gereinigd te worden. Indien mechanische reiniging toegepast wordt, is een buisvormige configuratie geschikt. Chemische reiniging kan zowel bij buisvormige als bij rietjesconfiguratie toegepast worden.

- Kenmerken :**
- groot reinigend effect (geen influenteisen, effluent lager dan oplosbaarheids grens)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en weinig gevoelig voor nevenverontreinigingen
  - redelijk bedrijfszeker
  - compact
  - geen verbruik chemicaliën, hoog energieverbruik (2-10 kWh/m<sup>3</sup>)
  - concentraatverwerking nodig
  - praktijkervaring in de industrie en vele andere bedrijfstakken
- Conclusie** geschikt voor grondwaterstroom waarin de maximale concentraties verontreinigingen voorkomen, minerale olie en PCK verwijdering tot aan de R-waarde.

#### 10. Harsadsorptie

Harsadsorptie geschiedt in een filter van harskorrels. Door toepassing van zwakke base harsen kan fenol en met niet-ionische harsen kunnen geëmulgeerde en vrije olieachtige verbindingen, PCK en naftaleen verwijderd worden. Bij afnemende concentraties in het grondwater treedt geen of nagenoeg geen desorptie van de hars op. In verband met vervuiling van het filter mag het grondwater niet te hoge concentraties zwevende stof en minerale olie bevatten.

- Kenmerken :
- groot reinigend effect (influent 30-100 mg olie/l, effluent 1-5 mg olie/l)
  - gevoelig voor nevenverontreinigingen
  - bij afnemende concentraties kan enige desorptie optreden
  - redelijk bedrijfszeker
  - compact
  - harsverbruik, laag energieverbruik
  - harsresidu (geschikt voor verbranding)
  - veel praktijkervaring in olieverwerkende industrie

Conclusie : geschikt voor toepassing na zand-multimedia filter en voor ontlasting van actieve koolfilter, verwijdering van minerale olie en de maximale in grondwater voorkomende concentraties PCK en naftaleen tot beneden de R-waarde.

#### 11. Actieve kooladsorptie

Actieve kooladsorptie geschiedt in een filter met korrelkool (1-3 mm) of in geval van diatomeeënaardefiltratie met poederkool (50-70 µm) en is uitsluitend geschikt voor de verwijdering van opgeloste stoffen (minerale olie, PCK, naftaleen, BTEX en fenolen).

De adsorptie aan actieve kool is onderworpen aan adsorptie-isothermen van de specifiek te adsorberen verontreinigingen. Dit betekent, dat de ene stof beter geadsorbeerd wordt dan de andere, zodat bij adsorptie van de ene stof de andere stof geadsorbeerd kan worden. Ook betekent dit, dat in een evenwichtssituatie bij hoge concentraties in de waterfase de bezetting van het actieve kool hoog is. Bij lage concentraties in de waterfase is de actieve koolbezetting laag zodat in verband met de kosten een meertrapsfilter noodzakelijk kan zijn.

Na verloop van tijd raakt het koolfilter verzadigd met als gevolg dat sommige stoffen doorslaan. In de praktijk bij de gasfabriekgrondwaterreiniging is gebleken dat meestal de doorslagvolgorde is:

1. benzeen
2. fenol
3. toluen
4. xyleen
5. ethylbenzeen
6. naftaleen
7. olie.

Deze volgorde is niet alleen afhankelijk van de specifieke adsorptiecapaciteit per verbinding maar ook van de concentratieverhoudingen tussen deze verbindingen.

Bij laboratoriumexperimenten zijn met standaardoplossingen van 1 mg/l de volgende adsorptiecapaciteiten (mg/g actieve kool) gemeten:

|                    |    |                      |     |
|--------------------|----|----------------------|-----|
| benzeen            | 1  | benzo(b)fluorantheen | 60  |
| benzo(ghi)perileen | 11 | xyleenol             | 80  |
| fenol              | 21 | p-xyleen             | 85  |
| tolueen            | 26 | naftaleen            | 132 |
| benzo(a)pyreen     | 34 | benzo(k)fluorantheen | 181 |
| ethylbenzeen       | 53 | fluorantheen         | 664 |

Geconcludeerd kan worden dat er een redelijke overeenkomst is ten aanzien van de verdringing tussen de praktijk- en laboratorium resultaten.

Een actieve koolfilter is zeer gevoelig voor vervuiling zodat een goede zwevende stof, minerale olie en Fe-hydroxyde vlok voorverwijdering noodzakelijk is. (bijvoorbeeld met zand- en/of harsfilter).

De verschillende soorten kool worden hieronder, in volgorde van toenemend prijsniveau, genoemd:

- niet regenerereerbare en niet reactiveerbare kool
- wel regenerereerbare maar niet reactiveerbare kool
- reactiveerbare kool

De adsorptiecapaciteiten van deze koolsoorten zijn verschillend.

- Kenmerken:
- zeer groot reinigend effect (influent 20-10.000 µg ss en olie, effluent tot niet aantoonbaar)
  - zeer gevoelig voor nevenverontreinigingen
  - bij afnemende concentraties kan desorptie optreden
  - redelijk bedrijfszeker
  - compact
  - koolverbruik, laag energieverbruik
  - goed brandbaar koolresidu bij de niet regenerereerbare en niet reactiveerbare kool; regeneraatsresidu bij de regenerereerbare kool
  - veel praktijkervaring in het algemeen en ook bij de gasfabriekgrondwaterreiniging

Conclusie: met de nodige voorzorgsmaatregelen zeer geschikt voor vergaande verwijdering (tot aan de B- of A-signaalwaarde) van minerale olie, en de maximale in grondwater voorkomende concentraties PCK, naftaleen, BTEX en fenolen.

12. Oxydatie

Algemeen

Door oxydatie worden toxische stoffen omgezet in beter biologisch afbreekbare stoffen. Bovendien heeft verwijdering van restverontreinigingen van organische aard plaats. De in principe bruikbare chemicaliën zijn chloor, chloordioxyde, zuurstof, waterstofperoxyde en ozon.

Deze chemicaliën kunnen eventueel in combinatie met UV straling toegepast worden.

Gezien de vorming van mogelijke bijprodukten bij gasfabriekgrondwater (organochloorverbindingen) wordt van chloor en chloordioxide afgezien.

Zuurstof is alleen bij hoge temperatuur (200-300°C) toepasbaar (natte luchtoxydatie). Vanwege de relatief lage concentraties verontreinigingen in gasfabriekgrondwater is naast de zeer hoge investeringen het energieverbruik van natte luchtoxydatie zeer hoog en daardoor dit proces veel te kostbaar.

Electrochemische en electrolytische oxydatie zijn niet geschikt vanwege de te lage geleidbaarheid van grondwater en de mogelijke vorming van organochloorverbindingen.

Ozon oxydatie

Ozon (O<sub>3</sub>) is in staat om complexe cyaniden en alle overige organische restverontreinigingen snel om te zetten. In combinatie met UV straling (oxyfotolyse) wordt de omzetting versneld. Ozon kan met behulp van een ozonisator uit geconditioneerde lucht of zuivere zuurstof opgewekt worden.

Vanwege de korte halfwaardetijd van ozon in waterige oplossingen, de lage oplosbaarheid van ozon en de lage concentraties verontreinigingen is een zeer goede stofoverdracht noodzakelijk. Naarmate de concentraties verontreinigingen hoger zijn is meer ozon nodig zodat het toch al hoge energieverbruik zeer sterk toeneemt.

Bij de ozonoxydatie kunnen toxische afbraakprodukten gevormd worden, met name nitrosamines en peroxyden.

In het algemeen zijn deze afbraakprodukten echter veel beter biologisch afbreekbaar dan de uitgangprodukten. Omdat ozon zelf toxisch is, dient aandacht besteed te worden aan het arbeidsklimaat.

- Kenmerken:
- groot reinigend effect (influent: verwijdering van zeer hoge concentraties verontreinigingen is mogelijk maar zeer kostbaar, effluent tot niet aantoonbaar).
  - gevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - zeer bedrijfszeker
  - zeer compact
  - verbruik van geconditioneerde lucht of zuivere zuurstof, hoog energieverbruik (15-25 kWh/kg ozon)
  - omzetting milieubelastende stoffen
  - veel praktijkervaring bij de desinfectie
- Conclusie :
- geschikt voor toepassing na actief koolfilter, verwijdering van organische restverontreinigingen en de maximale in grondwater voorkomende concentraties cyaniden tot de B-of A-signaalwaarde.

Waterstofperoxyde oxydatie

Waterstofperoxyde is in staat om fenolen en potentieel beschikbare cyaniden om te zetten. In combinatie met UV straling worden beide omzettingen versneld en ook complexe cyaniden omgezet. Daar in gasfabriekgrondwater vrijwel altijd complexe cyaniden voorkomen dient waterstofperoxyde in combinatie met UV toegepast te worden. De overige in gasfabriekgrondwater voorkomende verontreinigingen worden niet of nauwelijks verwijderd. Waterstofperoxyde is in oplossingen van 35% verkrijgbaar. Dosering heeft plaats in verhoudingen van 2-7 mol per mol te verwijderen verontreiniging. Ook bij waterstofperoxyde bestaat kans op vorming van geoxydeerde organische verbindingen.

- Kenmerken:
- groot reinigend effect (influent: verwijdering van zeer hoge concentraties fenolen en complexe cyaniden is mogelijk, effluent tot niet aantoonbaar)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - zeer bedrijfszeker
  - compact
  - verbruik van waterstofperoxyde oplossing, matig energieverbruik (1 kWh/m<sup>3</sup>)
  - omzetting milieubelastende stoffen
  - praktijkervaring bij de afvalwaterreiniging
- Conclusie:
- geschikt voor toepassing na actieve koolfilter, verwijdering van de maximale in grondwater voorkomende concentraties fenolen en cyaniden tot de B- of A-signaalwaarde mits met UV-straling gecombineerd

13. Ionenwisseling

Bij ionenwisseling treedt een reversibele uitwisseling van ionen op tussen het grondwater en een vaste stof (hars) zonder verandering van de fysische structuur van de vaste stof. Het wordt toegepast bij de verwijdering van zware metalen, cyaniden en fenolen, waarvoor specifieke harsen ontwikkeld zijn. Hoe lager het gehalte aan overige zouten hoe beter de ionenwisseling.

Het hars kan geregeneerd worden met een geconcentreerde NaCl oplossing, een sterk zuur of andere waterige oplossingen afhankelijk van de harssoort. Hierbij is een regeneraatoewerkingsinstallatie vereist.

- Kenmerken :
- beperkt reinigend effect (lage ionenwisselingsselectiviteit bij hogere zoutgehalten van het grondwater)
  - gevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - beperkte bedrijfszekerheid
  - compact
  - regeneraatoewerkingsinstallatie vereist, matig energieverbruik
  - praktijkervaring in de waterontharding, proceswaterbereiding, denitrificatie en bij de behandeling van fenolhoudend afvalwater en afvalwater van galvanische bedrijven

Conclusie : misschien geschikt voor verwijdering van cyaniden of fenolen in grondwater met hoog cyanide- of fenolgehalte en laag zoutgehalte.

14. Omgekeerde osmose of Hyperfiltratie

Osmose is het verschijnsel dat een spontane stroming van een verdunde oplossing door een membraan naar een geconcentreerde oplossing doet optreden.

Bij omgekeerde osmose wordt een overdruk (7-25 bar) op de geconcentreerde oplossing uitgeoefend om de osmotische druk teniet te doen en een netto stroom van zuivere vloeistof door het membraan naar de verdunde oplossing te forceren.

Met deze techniek kunnen cyaniden, zware metalen, minerale olie, PCK, naftaleen en in mindere mate fenolen en BTEX afgescheiden worden.

Omgekeerde osmose is zeer gevoelig voor vervuiling vanwege de zeer kleine poriën in het membraan, zodat een zeer goede voorverwijdering van zwevende stof, ijzer en minerale olie noodzakelijk is.

- Kenmerken :
- groot reinigend effect (geen influenteisen, effluent tot niet aantoonbaar)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen, van de in dit verband van belang zijnde stoffen, zeer gevoelig voor vervuiling
  - redelijk bedrijfszeker
  - beperkt verbruik hulpstoffen, zeer hoog energieverbruik (7.5-15 kWh/m<sup>3</sup>)
  - verwerking concentraatstroom nodig
  - praktijkervaring bij de brakwater- en zee-waterontzouting en de afvalwaterbehandeling

Conclusie : in principe geschikte techniek voor de verwijdering van in hoge concentraties voorkomende cyaniden, minerale olie, PCK en naftaleen tot de B- of A-signaalwaarde, te kostbaar en te gevoelig voor vervuiling.

15. Lucht-strippen

Bij strippen wordt lucht in intensief contact met het grondwater gebracht waardoor vluchtige verbindingen overgaan naar de luchtfase. Op deze manier kunnen BTEX en een deel van het naftaleen uit het grondwater verwijderd worden. Omdat deze stoffen een gevaar voor de volksgezondheid kunnen opleveren is luchtreiniging (bijvoorbeeld met behulp van een compostfilter) noodzakelijk.

- Kenmerken:
- aanzienlijk reinigend effect (geen influenteisen, effluent 20-100 µg/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - bedrijfszeker
  - compact
  - grote hoeveelheden lucht nodig, laag energieverbruik
  - stripluchtbehandeling nodig met compostfilter
  - veel praktijkervaring in het algemeen bij het verwijderen van oplosmiddelen uit afvalwater

Conclusie : geschikt voor de verwijdering van BTEX en in mindere mate naftaleen van de maximale in grondwater voorkomende concentraties tot aan de B-signaalwaarde.

16. Grensfilmverdamer

De grensfilmverdamer wordt toegepast bij de verwijdering van vluchtige stoffen uit grond- en afvalwater. Het verontreinigde water wordt vanuit een verzamelbassin naar een zelfaanzuigende lucht/watermenger gepompt en in verticale richting in een vat gesproeid. Hierbij gaan de vluchtige stoffen over naar de luchtfase. Bovenin het vat wordt de lucht afgezogen en via een cycloon en actief-koolfilter naar de zelfaanzuigende menger teruggevoerd. Door toepassing van grensfilmverdamping op gasfabriekgrondwater kunnen BTEX en in mindere mate naftaleen verwijderd worden.

- Kenmerken:
- groot reinigend effect op BTEX (geen influenteisen, effluent 1-100 µg/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen
  - bedrijfszeker
  - compact

- geringe hoeveelheid lucht nodig, matig energieverbruik (2-3 kWh/m<sup>3</sup>)
- luchtbehandeling nodig met actief koolfilter
- vooral in Duitsland veel praktijkervaring bij de verwijdering van oplosmiddelen uit afvalwater en grondwater

Conclusie: geschikt voor de verwijdering van BTEX en in mindere mate naftaleen van de maximale in grondwater voorkomende concentraties tot aan de B- of A-sig-naalwaarde.

17. Stoomstrippen

Bij stoomstrippen wordt een hoeveelheid stoom in een kolom in intensief contact gebracht met (tot ca. 100°C) opgewarmd grondwater. Hierbij gaan BTEX, naftaleen, fenolen en een deel van de minerale olie en PCK over naar de stoomfase. De niet gecondenseerde stoom wordt afgezogen en vervolgens gecondenseerd waarbij de verontreinigingen in geconcentreerde vorm in het condensaat aanwezig zijn. Met behulp van een warmtewisselaar wordt het ingaande grondwater opgewarmd en het uitgaande grondwater afgekoeld.

- Kenmerken:
- groot reinigend effect (geen influenteisen, verwijdering BTEX en naftaleen tot 1-5 µg/l)
  - ongevoelig voor concentratieveranderingen en nevenverontreinigingen; wel kans op scaling
  - zeer bedrijfszeker
  - niet compact (kolommen tot mogelijk ± 10 m hoogte noodzakelijk)
  - verbruik stoom, hoog energieverbruik
  - condensaatverwerking nodig, kleine opwarming grondwater
  - veel praktijkervaring in de chemische industrie

Conclusie: misschien geschikt voor de verwijdering van de maximale in grondwater voorkomende concentraties BTEX, naftaleen en fenolen tot de B-sig-naal waarde.

18. Vloeistof-vloeistof extractie

Extractie van minerale olie, PCK, naftaleen en BTEX uit het grondwater met behulp van een organisch oplosmiddel is mogelijk. Hiervoor is een extractiekolom en regeneratie-unit voor het oplosmiddel nodig. Als regeneratietechniek wordt vaak destillatie toegepast.

- Kenmerken :
- aanzienlijk reinigend effect (geen influenteisen, effluent 10-20 mg olie en ss/l)
  - gevoelig voor concentratieveranderingen, ongevoelig voor nevenverontreinigingen, gevoelig voor gevormde emulsies tijdens extractiefase
  - zeer bedrijfszeker
  - niet compact
  - verbruik hulpstoffen, matig hoog energieverbruik (regeneratieunit)
  - oplossen van extractiemiddel in grondwater, regeneratieunit voor extractiemiddel nodig
  - veel praktijkervaring in de chemische industrie, niet bij de grondwaterreiniging.

Conclusie : misschien geschikt voor verwijdering van de maximale in grondwater voorkomende concentraties minerale olie, PCK, naftaleen en BTEX tot aan de R-waarde.

19. Biologische behandeling met aërobe organismen

Bij biologische behandeling met actief slib heeft afbraak van organische verbindingen door microorganismen plaats. De in gasfabriekgrondwater voorkomende verontreinigingen worden in aëroob-werkende installaties na een adaptatietijd van 1-3 maanden (afhankelijk van de soort verontreiniging) afgebroken. PCK worden primair door adsorptie verwijderd met relatief hoog rendement maar slechts zeer langzaam afgebroken. Zolang het slib niet geadapteerd is, adsorbeert een deel van de verontreinigingen aan het slib. Het resterende deel verlaat de reinigingsinstallatie ongezuiverd. Vluchtige verbindingen (BTEX) kunnen deels worden gestript door beluchting. De concentraties van de verontreinigingen mogen bij ongeadaptieerd slib niet te hoog zijn omdat dan slibvergiftiging en slibsterfte optreedt.

Geadapteerd slib is gevoelig voor concentratieverhogingen van vooral cyaniden. Ideaal gemengde systemen (bijvoorbeeld actief slib proces) kunnen concentratiewisselingen beter opvangen dan systemen die met het propstroom-principe werken (bijvoorbeeld oxydatiebed, biorotor). Het reinigend effect van een laagbelaste installatie is in het algemeen groter dan van een hoog belaste installatie. PCK, naftaleen, vrije en geëmulgeerde olie worden bij een biologisch proces verwijderd tot de R-waarde. Voor het bereiken van de B- of A-sig-naalwaarde is organische restverwijdering met actieve koolfiltratie nodig.

Door toepassing van het PACT proces (actieve kool in actief slibunit) wordt ook een goede organische restverwijdering bereikt.

- Kenmerken :
- aanzienlijk reinigend effect (verwijdering 80-95%)
  - gevoelig voor concentratieveranderingen (vooral verhoging van de cyanideconcentratie)
  - ongevoelig voor nevenverontreinigingen
  - lange adaptatietijd nodig, matig bedrijfszeker
  - niet compact

- geen verbruik hulpstoffen, laag energieverbruik
  - beperkte hoeveelheid milieuvriendelijk residu
  - veel praktijkervaring bij de reiniging van huishoudelijke en industrieel afvalwater
- Conclusie : laag belast biologisch behandelingsysteem geschikt voor langdurige of semi-permanente reiniging van ernstig en minder ernstig verontreinigd grondwater tot beneden de R-waarde, actief slib proces geschikter dan oxydatiebed of biorotor, PACT proces mogelijk geschikter dan "gewoon" actief slibproces.

Bacteriën eten vette bellen onder benzinstations op, Hendriks P., NRC-Handelsblad, 12 januari 1988, bijlage Wetenschap & Samenleving.



Foto Ger Dijkstra

## Bacteriën eten vette bellen onder benzinstations op

Piet Hendriksma

Onder vrijwel elk benzinepompstation bevindt zich een vette bel, een mengsel van water, benzine en oliëresten. Deze bellen doden het bodemleven en vormen een bedreiging voor de plantengroei erboven. Op termijn moeten we zelfs rekening houden met verontreinigd diep grondwater, een belangrijke bron van ons drinkwater. Als er maar een milliliter olie in 1000 liter zit kan een mens de vieze smaak al proeven.

Die bellen moeten dus weg. Maar het weghalen van één zo'n bel kan al gauw meer dan een miljoen gulden kosten. Alle verontreinigde grond moet namelijk afgegraven worden en elders worden verwerkt. De kosten bestaan dan niet alleen uit het opruimen zelf, maar ook uit de afbraak en herbouw van het beheerdersgebouw en de loonderving tijdens deze werkzaamheden.

H.T.T.S., High Tech Trouble Shooters b.v., is de ambitieuze naam van een gloednieuwe twee-mans bedrijf. Het pretendeert een milieuvriendelijke techniek in huis te hebben voor het opruimen van de lekverliezen van benzinstations. Kernpunt van deze techniek is het gebruik van oliebacteriën. Gaat dit bedrijf echt een gouden toekomst tegemoet of moeten we de kooporder voor aandelen H.T.T.S. nog even uitstellen?

In 1966 beschreef een Amerikaan voor het eerst *Pseudomonas oleovorans*, een olieëterende bacterie. Met behulp van zuurstof kan deze nauweuivete zeer kleine oliedruppeltjes

tot kooldioxide en water verbranden. In 1984 construeerde een technicus in Duitsland een installatie met ideale groeiomstandigheden voor deze bacteriën. Doel is het opruimen van afvalolie. Zijn activiteiten vonden weinig weerklank in zijn land. Maar in Groningen pikten enkele pas afgestudeerde biologen het idee op en probeerden de resultaten van het laboratorium naar de praktijk over te brengen. Met dit idee zetten ze een bedrijfje op en als proefproject konden ze een benzinetankstation bij Winschoten onder handen nemen.

Er steeg daar een indringende benzinetank uit de grond op en omwonenden maakten zich zorgen over hun tuinen. De benzinemaatschappij stelde als voorwaarde voor het opruimen dat de benzineverkoop onderhouden zou kunnen gaan. Grond afgraven was onmogelijk. De bacteriën moesten dus op enkele meters diepte hun honger stillen. Hoe ging deze overgang van laboratorium naar veld in zijn werk?

De heer Fieten, zichtbaar (zwarte handen) de man-in-het-veld van H.T.T.S., "Laboratoria zijn prachtig om deze bacteriën te isoleren, te kweken en de ideale voedingsstoffenconcentraties te bepalen, maar de praktijk is anders." De gebruikte receptuur voor de veld-opstelling is niet zo ingewikkeld. Pompen trekken het grondwater omhoog, dwars door de benzinebel heen. Dit water, waarin dan een klein deel van de verontreiniging is opgelost, loopt door een filterkolom. Daar worden zuivere zuurstof en de voedingsstoffen nitraat en fosfaat toegevoegd. De oliebacteriën worden geënt door met olie voorbehandeld slijb uit waterzuiveringsinstallaties toe te voegen. In dit slijb komt deze bacterie namelijk altijd in kleine hoeveelheden

voor. Door het inweken in de olie-oplossing worden de andere bacteriesoorten gedood en de hoeveelheid van het gewenste type verhoogd.

Door het steeds laten circuleren van dit bacteriehoudende water zal de verontreiniging veel sneller afbreken dan in een natuurlijke situatie. Tegelijkertijd worden de benzinedampen verwijderd. Lucht verdrijft de dampen, vooral benzeen, toluen en xyleen uit het benzine-water. Deze zwaar giftige stoffen worden in een bacteriehoudend compostfilter afgebroken tot onschadelijke stoffen.

### Resultaten

En hoe zijn nu, een jaar na de in gebruik neming van de Winschoter opstelling, de resultaten? Fieten: "De concentraties van de vluchtige verbindingen liggen nu duizenden malen later dan toen we begonnen en dicht bij de zeer strenge landelijke milieunormen."

Maar het opruimen van de minerale oliën gaat moeizamer. Er zijn allerlei omstandigheden die de bacteriegroei belemmeren. De temperatuur is diep in de bodem veel lager (8° Celsius) dan die waar bacteriën echt van houden (28°).

Fieten: "Vergeet ook niet de *dope* in de benzine, de toegevoegde producten. Stoffen om corrosie tegen te gaan, stoffen om vuildeeltjes zwendend te houden, anti-bederf-stoffen, lood. Wat het allemaal precies is, ik weet het niet, dat is het geheim van elke benzinemaatschappij. Maar ik weet wel dat het de bacteriegroei remt."

Een ander groot probleem was het toevoegen van het zuurstofrijke water in de ondergrond. In de natuur komt zuurstof eigenlijk alleen in de bovenste paar meter van de grond

Het aanleggen van de leidingen, waar het oliebehoudende water door gaat stromen Foto Berk

voor, daaronder is alleen maar zuurstofloos grondwater. Door de toevoer van zuurstofrijk water ontstaan in de diepte allerlei geoxideerde magnesium-, ijzer- en carbonaatverbindingen, die neerslaan en samen een afsluitende laag vormen. Fieten: "We dachten dat alles goed ging, tot in een weekend afgelopen winter opeens een vijf meter hoge waterfontein de grond uitspoot. De bodem was dichtgeoxideerd."

Immiddels is er een oplossing voor dit probleem gevonden door een veel groter deel van het proces zich bovengronds te laten afspeelen. De benodigde zuurstof wordt niet meer opgelost in water, maar als gas en onder hoge druk de grond ingebracht. Door die druk breken de dunne afsluitende laagjes.

Op dit moment wordt door de overheid een landelijk programma van preventie- en saneringseisen voor bodems rond benzinstations voorbereid. Volgens de heer Moons van het ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu begint hierover binnenkort overleg met gemeenten en brancheorganisaties. Een mogelijke uitkomst zal zijn dat elke benzinstation-bodem bemonsterd gaat worden, eventueel gevolgd door een sanering van die bodem. Als er een systematische aanpak voor dit probleem beschikbaar is — op zijn vroegst in 1989 — is het nog niet zeker of de beschreven opruimingstechniek dan vervolmaakt is.

De automobilist mag er op hopen, want anders merkt hij misschien op een dag tot zijn schrik dat zijn vaste benzinetankstation is afgebroken.

De grote oliemaatschappijen hebben het nu nog makkelijk. Zij kunnen nu nog volstaan met af en toe een opdrachtje te laten uitgaan naar een bedrijfje als H.T.T.S. Of zoals Fieten het zegt: "Wij doen heel veel moeite de achterdeur schoon te houden, terwijl de zaal vol rommel ligt. Eigenlijk hadden we gewoon twintig jaar eerder moeten beginnen."

Toetsingstabel voor de beoordeling van de concentratieniveaus van diverse verontreinigingen in de bodem\*

N.B.: Tabel niet los van tekst\*\* te gebruiken.

Indicatieve richtwaarden: A: referentiewaarde  
B: toetsingswaarde t.b.v. (nader) onderzoek  
C: toetsingswaarde t.b.v. saneringsonderzoek

| Voorkomen in :                 | grond en slib<br>(mg/kg (droge stof)) |     |      | grondwater en oppervlakte water (µg/l) |      |      |
|--------------------------------|---------------------------------------|-----|------|--|------|------|
|                                | A                                     | B   | C    | A                                      | B    | C    |
| <b>I METALEN</b>               |                                       |     |      |  |      |      |
| Cr                             | 100                                   | 250 | 800  | 20                                     | 50   | 200  |
| Co                             | 20                                    | 50  | 300  | 20                                     | 50   | 200  |
| Ni                             | 50                                    | 100 | 500  | 20                                     | 50   | 200  |
| Cu                             | 50                                    | 100 | 500  | 50                                     | 50   | 200  |
| Zn                             | 200                                   | 500 | 3000 | 50                                     | 200  | 800  |
| As                             | 20                                    | 30  | 50   | 10                                     | 30   | 100  |
| Mo                             | 10                                    | 40  | 200  | 5                                      | 20   | 100  |
| Cd                             | 1                                     | 5   | 20   | 1                                      | 2,5  | 10   |
| Sn                             | 20                                    | 50  | 300  | 10                                     | 30   | 150  |
| Ba                             | 200                                   | 400 | 2000 | 50                                     | 100  | 500  |
| Hg                             | 0,5                                   | 2   | 10   | 0,2                                    | 0,5  | 2    |
| Pb                             | 50                                    | 150 | 600  | 20                                     | 50   | 200  |
| <b>II ANORGANISCHE VERONT.</b> |                                       |     |      |  |      |      |
| NH <sub>4</sub> (als N)        | -                                     | -   | -    | 200                                    | 1000 | 3000 |
| F (totaal)                     | 200                                   | 400 | 2000 | 300                                    | 1200 | 4000 |
| CN (als vrij ion)              | 1                                     | 10  | 100  | 5                                      | 30   | 100  |
| CN (totaal-complex)            | 5                                     | 50  | 500  | 10                                     | 50   | 200  |
| S (totaal)                     | 2                                     | 20  | 200  | 10                                     | 100  | 300  |
| Br (totaal)                    | 20                                    | 50  | 300  | 100                                    | 500  | 2000 |
| PO <sub>4</sub> (als P)        | -                                     | -   | -    | 50                                     | 200  | 700  |
| <b>III AROMATISCHE VERB.</b>   |                                       |     |      |  |      |      |
| benzeen                        | 0,01                                  | 0,5 | 5    | 0,2                                    | 1    | 5    |
| ethylbenzeen                   | 0,05                                  | 5   | 50   | 0,5                                    | 20   | 60   |
| tolueen                        | 0,05                                  | 3   | 30   | 0,5                                    | 15   | 50   |
| xylenen                        | 0,05                                  | 5   | 50   | 0,5                                    | 20   | 60   |
| fenolen                        | 0,02                                  | 1   | 10   | 0,5                                    | 15   | 50   |
| aromaten (totaal)              | 0,1                                   | 7   | 70   | 1                                      | 30   | 100  |

| Voorkomen in :                           | grond en slib<br>(mg/kg (droge stof)) |      |      | grondwater en oppervlakte water (µg/l) |     |     |
|--|---------------------------------------|------|------|--|-----|-----|
|  | A                                     | B    | C    | A                                      | B   | C   |
| <b>IV POLYCYCLISCHE KOOLWATERSTOFFEN</b> |                                       |      |      |  |     |     |
| naftaleen                                | 0,1                                   | 5    | 50   | 0,2                                    | 7   | 30  |
| anthraceen                               | 0,1                                   | 10   | 100  | 0,1                                    | 2   | 10  |
| fenanthreen                              | 0,1                                   | 10   | 100  | 0,1                                    | 2   | 10  |
| fluorantheen                             | 0,1                                   | 10   | 100  | 0,02                                   | 1   | 5   |
| pyreen                                   | 0,1                                   | 10   | 100  | 0,02                                   | 1   | 5   |
| benzo(a)pyreen                           | 0,05                                  | 1    | 10   | 0,01                                   | 0,2 | 1   |
| pck's (totaal)                           | 1                                     | 20   | 200  | 0,2                                    | 10  | 40  |
| <b>V GECHLOREERDE KOOLWATERSTOFFEN</b>   |                                       |      |      |  |     |     |
| alifatische chloor-kwst. (indiv.)        | 0,1                                   | 5    | 50   | 1                                      | 10  | 50  |
| alifatische chloor-kwst (totaal)         | 0,1                                   | 7    | 70   | 1                                      | 15  | 70  |
| chloorbenzenen (indiv.)                  | 0,05                                  | 1    | 10   | 0,02                                   | 0,5 | 2   |
| chloorbenzenen (totaal)                  | 0,05                                  | 2    | 20   | 0,02                                   | 1   | 5   |
| chloorfenolen (indiv.)                   | 0,01                                  | 0,5  | 5    | 0,01                                   | 0,3 | 1,5 |
| chloorfenolen (totaal)                   | 0,01                                  | 1    | 10   | 0,01                                   | 0,5 | 2   |
| chloorpck's (totaal)                     | 0,05                                  | 1    | 10   | 0,01                                   | 0,2 | 1   |
| PCB's (totaal)                           | 0,05                                  | 1    | 10   | 0,01                                   | 0,2 | 1   |
| EOCl (totaal)                            | 0,1                                   | 8    | 80   | 1                                      | 15  | 70  |
| <b>VI BESTRIJDINGSMIDDELEN</b>           |                                       |      |      |  |     |     |
| org. chloor (indiv.)                     | 0,1                                   | 0,5  | 5    | 0,05                                   | 0,2 | 1   |
| org. chloor (totaal)                     | 0,1                                   | 1    | 10   | 0,1                                    | 0,5 | 2   |
| pesticiden (totaal)                      | 0,1                                   | 2    | 20   | 0,1                                    | 1   | 5   |
| <b>VII OVERIGE VERONTREINIGINGEN</b>     |                                       |      |      |  |     |     |
| tetrahydrofuran                          | 0,1                                   | 4    | 40   | 0,5                                    | 20  | 60  |
| pyridine                                 | 0,1                                   | 2    | 20   | 0,5                                    | 10  | 30  |
| tetrahydrothiofeen                       | 0,1                                   | 5    | 50   | 0,5                                    | 20  | 60  |
| cyclohexanon                             | 0,1                                   | 6    | 60   | 0,5                                    | 15  | 50  |
| styreen                                  | 0,1                                   | 5    | 50   | 0,5                                    | 20  | 60  |
| benzine                                  | 20                                    | 100  | 800  | 10                                     | 40  | 150 |
| minerale olie                            | 100                                   | 1000 | 5000 | 20                                     | 200 | 600 |

\*) De concentraties dienen beschouwd te worden in samenhang met de functie van de bodem en de lokale verontreinigingssituatie.

\*\*) Voor volledige tekst zie leidraad bodemsanering afl. 1, Juli 1983. waarin richtlijnen van het Ministerie van VROM inzake bodem verontreinigingsproblematiek zijn vastgelegd.

BIJLAGE E. POLANYI ADSORPTIE POTENTIALAAL THEORIE

De evenwichtsgegevens voor de actief koolfilters zijn bewerkt met behulp van de Polanyi adsorptie potentiaal theorie, zoals beschreven door Manes e.a. [30, 52, 53, 54].

Deze theorie gaat uit van een vast volume ("adsorptie zone"), dicht bij het oppervlak van de adsorberende stof, waar de adsorptie kan plaatsvinden. Voor actieve kool kan dit het best voorgesteld worden als bestaand uit micro-poriën van verschillende grootte en ongedefinieerde vorm. Een voorstelling van dit model is te zien in figuur E.1, een enkele porie met een variërende diameter.

Polanyi definieert de adsorptie potentiaal,  $\epsilon$ , van ieder molecuul binnen het aantrekkende veld van het oppervlak (dat is de som van de aantrekkende krachten van alle bijdragende atomen van de vaste stof) als de arbeid die nodig is om het molecuul oneindig ver te verwijderen van zijn plaats in de adsorptie zone. (de adsorptie potentiaal is zo gerelateerd aan het verschil tussen de adsorptie energie en de condensatie energie.) Voor een bepaald adsorbent hangt de grootte van  $\epsilon$  af van de aard van de geadsorbeerde stof en van de afstand tot het oppervlak;  $\epsilon$  is het grootst in de kleinste poriën omdat er op korte afstand meer kool aanwezig is. Polanyi stelde dat  $\epsilon$  onafhankelijk zou zijn van de temperatuur, een aanname die goed bleek op te gaan voor London attractie. We nemen nu aan dat voor iedere bepaalde combinatie van vaste stof en geadsorbeerde stof (het maakt niet uit of het een gas of een vloeistof is), de waarde van  $\epsilon$  continu varieert in de adsorptie zone, van een bepaald maximum tot nul. De theorie probeert niet om deze functie te beschrijven, waarbij opgemerkt wordt dat de structuur van de adsorbent bepalend zal zijn. Men kan zich voorstellen dat er, in elk gebied van de adsorptie zone, equipotentiaal vlakken van afnemende waarden van  $\epsilon$  zijn. We kunnen het cumulatieve volume waarbinnen een bepaalde waarde van  $\epsilon$  geldt of wordt overschreden uitzetten tegen  $\epsilon$ . Dit levert een karakteristieke curve op, zoals Polanyi hem noemt.

We nemen nu twee adsorptie processen. Ten eerste een gas-fase adsorptie. In dit model concentreert de adsorptie potentiaal het gas of de damp boven zijn bulk evenwichtsdruk. Dit wordt weergegeven door de Boltzmann vergelijking

$$RT \ln \frac{c^*}{c} = RT \ln \frac{p^*}{p} = \epsilon \quad (1)$$

hierin zijn  $c^*$  en  $c$  respectievelijk de concentraties op een bepaald punt in de adsorptie zone en in de bulk,  $p^*$  en  $p$  de overeenkomstige drukken, en de variatie van  $c^*$  of  $p^*$  wordt bepaald, onder bepaalde evenwichtscondities, door de variatie van  $\epsilon$ . Op analoge manier zal de concentratie van een opgeloste stof in een waterige oplossing variëren in de adsorptie zone. Voor gassen en dampen zal er condensatie optreden naar een vloeistof als de adsorptie potentiaal groot genoeg is om het te concentreren tot een verzadigde concentratie bij de temperatuur



van het experiment. Het criterium voor condensatie van een gas bij Polanyi is dan

$$\epsilon \geq RT \ln \frac{p_{\infty}}{p} \quad (2)$$

waarin  $p_{\infty}$  de verzadigingsdruk van de vloeistof is bij evenwichts-temperatuur  $T$ .

Als de dampfase adsorptie isotherm gegevens opnieuw uitgezet worden als volume vloeistof geadsorbeerd per gram kool tegen  $RT \ln(p_{\infty}/p)$  dan zal dit een karakteristieke curve opleveren voor die bepaalde combinatie van kool en geadsorbeerde stof.

De theorie stelt dat er een enkele karakteristieke curve is voor een bepaald systeem bij iedere temperatuur. Dus, uit gegevens bij een temperatuur kan de isotherm bij andere temperaturen berekend worden.

Een andere eigenschap van de karakteristieke curven, die zowel voor gas als vloeistof fase adsorptie gelden, is dat ze gelijk zijn voor alle geadsorbeerde stoffen op een bepaalde kool, op een factor voor  $\epsilon$  na, die, eenmaal bepaald, gelijk verondersteld mag worden voor alle koolsoorten.

Het is gebleken dat voor veel gassen en dampen de adsorptie potentiaal per mol ongeveer evenredig is met het molair volume, dus als het geadsorbeerd volume wordt uitgezet tegen de adsorptie potentiaal per volume eenheid, vallen vele karakteristieke curves samen. In dit geval is aangenomen dat de alkanen allemaal dezelfde karakteristieke curve hebben en ditzelfde geldt voor de aromatische verbindingen.

Het is gebruikelijk om het geadsorbeerd volume uit te zetten tegen  $T/V \log(p_{\infty}/p)$ . Dit levert dan een grafiek op die "correlatie curve" genoemd wordt.

#### Adsorptie van opgeloste stoffen

In het geval van adsorptie van een vaste stof of een gedeeltelijk oplosbare stof uit een waterige oplossing is het model in principe gelijk. Maar in dit geval wordt de drijvende kracht voor de adsorptie gereduceerd door die van een gelijk volume van het oplosmiddel, aangezien de condenserende stof nu een gelijk volume oplosmiddel uit de adsorptie zone moet verplaatsen. De conditie voor condensatie is nu

$$\epsilon_{\infty 1} = \epsilon_{\infty} - \epsilon_1 \frac{V_{\infty}}{V_1} = RT \ln \frac{c_{\infty}}{c} \quad (3)$$

waarin  $\epsilon_{\infty 1}$  de netto drijvende kracht is, en  $\epsilon_{\infty}$  en  $\epsilon_1$  de adsorptie potentialen zijn van de opgeloste stof en het oplosmiddel als

individuele componenten. Anders geschreven levert dit

$$\frac{\epsilon_{m1}}{V_m} = \frac{\epsilon_m}{V_m} - \frac{\epsilon_1}{V_1} \quad (4)$$

In deze vorm is te zien dat een grafiek van het geadsorbeerd volume tegen  $RT/V \ln(c_m/c)$  een correlatiecurve zal opleveren die gelijk is aan die van de zuivere component op dezelfde kool bij gasfase adsorptie, met dat verschil dat het afgesneden stuk gelijk zal zijn aan dat van de opgeloste stof min dat van het oplosmiddel. (figuur E.2)

Dit laatste verband (4) wordt ook wel geschreven als

$$\alpha_{m1} = \alpha_m - \alpha_1 \quad (5)$$

waarin  $\alpha$  de schaalfactor wordt genoemd. Omdat niet altijd gasfase adsorptie gegevens voorhanden zijn, zal  $\alpha$  op een andere manier bepaald moeten worden. Men kan  $\alpha_{m1}$  voor een aantal opgeloste stoffen bepalen in verschillende oplosmiddelen. In plaats van het relateren van  $\alpha$  aan een bepaald adsorptie volume, kunnen we verhoudingen bekijken tussen verschillende  $\alpha$ 's en  $\alpha_n$  (= de schaalfactor voor een referentiestof, in dit geval een alkaan). Vergelijking (5) wordt dan

$$\frac{\alpha_{m1}}{\alpha_n} = \frac{\alpha_m - \alpha_1}{\alpha_n} \quad (6)$$

of

$$\gamma_{m1} = \gamma_m - \gamma_1 \quad (7)$$

Als de referentie stof het oplosmiddel is, dan geldt  $\gamma_m = \gamma_{m1} + 1$ . Voor water geldt dat  $\gamma = 0.28$  [52]. Met dit gegeven kan het adsorptie-gedrag van de alkanen en de aromaten afgeleid worden uit de karakteristieke curven voor gasfase adsorptie [30, 53, 55, 56].

In dit geval levert dat dan:

$$\gamma_{\text{benz, H}_2\text{O}} = \gamma_{\text{benz}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}$$

en

$$\gamma_{\text{alkaan, H}_2\text{O}} = \gamma_{\text{alkaan}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}}$$

oftewel

$$\alpha_{\text{benz, H}_2\text{O}} = \alpha_{\text{benz}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}} * \alpha_{\text{alkaan}}$$

en

$$\alpha_{\text{alkaan, H}_2\text{O}} = \alpha_{\text{alkaan}} - \gamma_{\text{H}_2\text{O}} * \alpha_{\text{alkaan}}$$

met  $\gamma_{\text{H}_2\text{O}} = 0.28$  krijgen we:

$$\alpha_{\text{benz, H}_2\text{O}} = \alpha_{\text{benz}} - 0.28 * \alpha_{\text{alkaan}}$$

en

$$\alpha_{\text{alkaan, H}_2\text{O}} = 0.72 * \alpha_{\text{alkaan}}$$

Het resultaat is te vinden in figuur E.3.

## BIJLAGE F Microbiële degradatie van koolwaterstoffen en aanhechting aan actief kool.

### Degradatie van n-alkanen:

Er zijn vele microorganismen beschreven die n-alkanen gebruiken als groeisubstraat en microorganismen die een breed scala aan n-alkanen co-oxideren bij groei op andere koolwaterstoffen.

De algemene afbraakroute loopt via terminale methyloxidatie (figuur F.1). De initiële activering vindt plaats door hydroxylering van de  $\omega$ -methylgroep. De terminale zuurstofgroep kan verder geoxideerd worden tot de overeenkomstige vetzuur welke dan de klassieke  $\beta$ -oxidatie ondergaat. [29]

### Degradatie van aromaten:

Er zijn vele verslagen over microorganismen die in staat zijn op aromaten, de simpelste vorm benzeen als ook de alkylbenzenen en de polycyclische aromaten, te groeien.

De eerste oxidatie stap van de afbraak van benzeen loopt via cis-benzeenglycol naar catechol (fig. F.2). De simpelste derivaat van benzeen, toluen, biedt het microorganisme twee plaatsen voor de initiële stap nl. de aromatische ring of the methylgroep. Beide mechanismen zijn waargenomen, maar oxygenering van de ring lijkt het meest gebruikelijk (fig. F.3). De eerste oxidatie stap van m- en p-xyleen verloopt via oxydatie van een van de methylgroepen tot 3- en 4-methylcatechol (fig. F.3). [19]

De producten van de initiële oxidatie, catechol en gesubstitueerde catecholen, kunnen afhankelijk van het organisme en het substraat op twee manieren verder afgebroken worden:

- de ortho route; de ring wordt tussen de twee hydroxylgroepen open geknipt,
- de meta route: de ring wordt tussen een C-atoom die een hydroxylgroep draagt en een aanliggend C-atoom zonder hydroxylgroep open geknipt (fig F.4). [19]

### Aanhechting van Pseudomonas aan actief kool:

De bacteriën die aangetroffen zijn op de GAC filters van afvalwaterzuiveringinstallaties staan in Tabel F.1. De bacterie soort Pseudomonas komt in grote verscheidenheid voor en blijkt in staat te zijn zich aan actief kool te hechten.

TABEL F.1 Bacterie soorten gevonden in effluent van GAC adsorbers.

|                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| <i>Pseudomonas alcaligenes</i> | <i>Chromobacterium violaceum</i>    |
| <i>Pseudomonas cepacia</i>     | <i>Neisseria sicca</i>              |
| <i>Pseudomonas facilis</i>     | <i>Acinetobacter calcoaceticum</i>  |
| <i>Pseudomonas fluorescens</i> | <i>Micrococcus luteus</i>           |
| <i>Pseudomonas lemoignei</i>   | <i>Staphylococcus saprophyticus</i> |
| <i>Pseudomonas mendocina</i>   | <i>Bacillus cereus</i>              |
| <i>Pseudomonas rihlandii</i>   | <i>Bacillus circulans</i>           |
| <i>Pseudomonas stutzeri</i>    | <i>Bacillus licheniformis</i>       |
| <i>Pseudomonas sp.</i>         | <i>Bacillus megaterium</i>          |
| <i>Gluconobacter oxidans</i>   | <i>Bacillus pumilus</i>             |
| <i>Azomonas agilis</i>         | <i>Bacillus thuringensis</i>        |
| <i>Azomonas insignis</i>       | <i>Corynebacterium sp.</i>          |
| <i>Azomonas macrocytogenes</i> | <i>Micromonospora sp.</i>           |

De bacteriën bezetten eerst de shear-vrije holtes en richels aan het buiten oppervlakte van het deeltje. Vervolgens wordt door verdere groei het deeltje bedekt met bacteriën.

Het is gebleken dat het aantal microorganismen op geactiveerd kool twee tot driemaal zoveel is als op inerte media gevonden worden. Hierdoor is een hoge biomassaconcentratie mogelijk. [30]

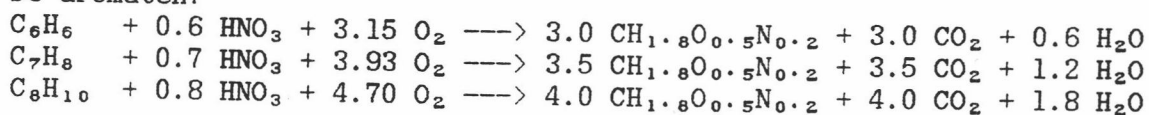
Lafrance et al. [38] hebben de biologische ontwikkeling in GAC-filters onderzocht. Zij observeerde dat microbiële colonisatie optreedt in scheuren en gaten in het kooloppervlak waar substraat concentrering optreedt en waar de microorganismen beschermd. De bacteriën hechten aan het kooloppervlak door het afscheiden van een netwerkachtige polysaccharide matrix. Wilcox et al. [39] stelde zelfs vast dat *Pseudomonas* de overheersende bacterie soort was op GAC-filters voor drinkwaterbereiding.

## BIJLAGE G Kinetiek

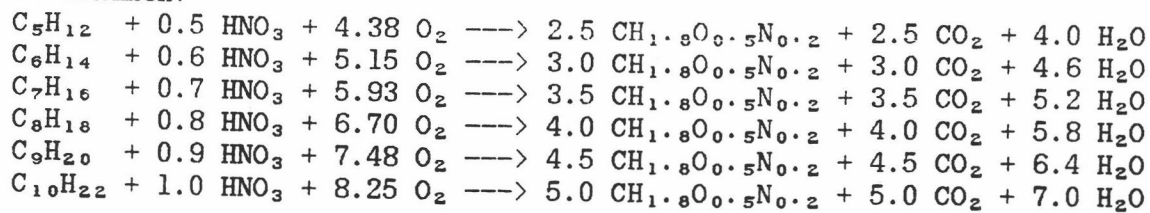
Berekening van de gemiddelde molecuulmassa van de organische componenten:

De stoechiometrische reactie vergelijking [34] voor de omzetting van elke component afzonderlijk in aanwezigheid van zuurstof en nitraat tot biomassa, H<sub>2</sub>O en CO<sub>2</sub> en het gegeven dat Y<sub>sx</sub> = 0.5 C-molX/C-mols :

De aromaten:



De alkanen:

\* Aromaten:

Er is in het begin per liter aanwezig: 10 mg benzeen C<sub>6</sub>H<sub>6</sub> = 0.128 mmol  
5 mg toluen C<sub>7</sub>H<sub>8</sub> = 0.054 mmol  
5 mg xyleen C<sub>8</sub>H<sub>10</sub> = 0.047 mmol

Om 20 mg aromaten volledig om te zetten is nodig:

$$0.128 \cdot 3.15 + 0.054 \cdot 3.93 + 0.047 \cdot 4.7 = 0.836 \text{ mmol O}_2 = 26.75 \text{ mgram}$$

$$0.152 \text{ mmol HNO}_3 = 9.58 \text{ mgram}$$

en wordt gevormd (X = biomassa):

$$\begin{aligned} 0.761 \text{ mmol X} &= 18.72 \text{ mgram} \\ 0.761 \text{ mmol CO}_2 &= 33.48 \text{ mgram} \\ 0.226 \text{ mmol H}_2\text{O} &= 4.07 \text{ mgram} \end{aligned}$$

\* Alkanen:

De 5 mg minerale olie is in mmol als volgt over de componenten verdeeld:

|         |           |        |           |
|---------|-----------|--------|-----------|
| pentaan | : 0.01774 | octaan | : 0.00613 |
| hexaan  | : 0.01485 | nonaan | : 0.00351 |
| heptaan | : 0.01277 | decaan | : 0.00007 |

Om 5 mg n-alkanen volledig om te zetten is nodig:

$$\begin{aligned} 0.298 \text{ mmol O}_2 &= 9.54 \text{ mgram} \\ 0.035 \text{ mmol HNO}_3 &= 2.21 \text{ mgram} \end{aligned}$$

en wordt gevormd:

$$\begin{aligned} 0.174 \text{ mmol X} &= 4.28 \text{ mgram} \\ 0.174 \text{ mmol CO}_2 &= 7.66 \text{ mgram} \\ 0.264 \text{ mmol H}_2\text{O} &= 4.75 \text{ mgram} \end{aligned}$$



in reactie  
 $C_x \approx 10, \text{ om}$   
 $C_s \approx 0,08$   
 wkt

In de tweede bioreactor wordt de substraatconcentratie van 0.5 mg/l naar  $10^{-3}$  verlaagd. De specifieke groeisnelheid verminderd met een fitfactor  $\alpha$ . In een verblijftijd van 1 hr wordt per liter 0.499 mgS omgezet in 0.4591 mgX ( $Y_{sx} = 0.92 \text{ gX/gS}$ ).

$C_{x7} = 552 \text{ mgX/l}$        $\alpha = 12$   
 $C_{x9} = 552.4591 \text{ mgX/l}$        $\mu_{\max} = 0.01$

$\mu = \frac{0.25}{10^{-3}} \approx 370$

$r_x = \frac{\mu_{\max}}{\alpha} \cdot C_{x9} = 0.46 \text{ mgX/l/hr}$

Er moet  $\approx 0.5 \text{ mgS/omgezet in 1 hr} \Rightarrow \mu \approx 0.5$   
 Er zit meer om  $\frac{0.01 \cdot 550}{370} \approx 0,015$  *telopt met*

*dit hangt hangt  
 v. knoop af?*

Deze berekening geldt voor het aanvangstijdstip van de behandeling van het grondwater. Daar de substraatconcentratie afneemt in de tijd, nemen ook de biomassaproductiesnelheid af en de biomassaconcentraties af. Uitgaande van het feit dat  $C_{s9}$  gelijk moet zijn aan de B-waarde ( $10^{-3} \text{ mg/l}$ ) is de benodigde hoeveelheid biomassa ent en de ingaande substraatconcentratie van de tweede bioreactor berekend. In Tabel G.2 worden de uitkomsten vermeld samen met de substraatconcentratie in de voeding en na verdunning (zie ook figuur G.1 en 2).

TABEL G.2 Biomassa en substraatprofielen in de tijd.

| t   | $r_{x9}$                          | $r_{x11}$ | $C_{x7}$                 | $C_{x9}$ | $C_{x5}$ | $C_{xvast5}$ |
|-----|-----------------------------------|-----------|--------------------------|----------|----------|--------------|
| d   | $10^{-6} \text{ kg/m}^3\text{hr}$ |           | $10^{-3} \text{ kg/m}^3$ |          |          |              |
| 0   | 5520.00                           | 460.00    | 552.0                    | 552.459  | 1082.0   | 10820.0      |
| 100 | 1191.63                           | 100.28    | 119.16                   | 119.263  | 233.56   | 2335.6       |
| 200 | 255.99                            | 21.16     | 25.69                    | 25.620   | 50.18    | 501.8        |
| 300 | 54.97                             | 4.60      | 5.50                     | 5.502    | 10.78    | 107.8        |
| 400 | 11.66                             | 0.966     | 1.166                    | 1.167    | 2.286    | 22.86        |
| 500 | 2.34                              | 0.195     | 0.2341                   | 0.2342   | 0.4588   | 4.58         |
| 600 | 0.33                              | 0.027     | 0.03312                  | 0.03315  | 0.06492  | 0.65         |

| t   | $C_{s4}$                 | $C_{s0}$ | $C_{s7}$ |
|-----|--------------------------|----------|----------|
| d   | $10^{-3} \text{ kg/m}^3$ |          |          |
| 0   | 25.0                     | 12.5     | 0.5      |
| 100 | 5.4                      | 2.7005*  | 0.11     |
| 200 | 1.16                     | 0.5805   | 0.024    |
| 300 | 0.25                     | 0.1255   | 0.006    |
| 400 | 0.0539                   | 0.0274   | 0.00205  |
| 500 | 0.0117                   | 0.0063   | 0.01212  |
| 600 | 0.0025                   | 0.00175  | 0.00103  |

\* Hier is al de verdunde  $0.001 \text{ } 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  uit de recirculatiestroom bij opgeteld.

### Berekening van de bezettingsgraad van PAC door microorganismen:

Om te weten of het actiefkoolpoeder niet volledig bezet wordt door microorganismen zodat geen plaatst meer is voor adsorptie van de verontreiniging wordt de bezettingsgraad berekend.

We bekijken de recyclestroom waarin 55.4 w% PAC zit met een biomassaconcentratie van 10820 mgX/l.

Een microorganisme kan gezien worden als een langwerpig blok met een  $h * b * d$  van  $10^{-6} * 10^{-6} * 2 \cdot 10^{-6}$  [m].

$$\begin{aligned} \text{"Oppervlak"} &= 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \\ \text{Volume} &= 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^3 \\ \rho_{\text{mo}} &= 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \text{---> Gewicht mo} = 2 \cdot 10^{-15} \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{In een liter zitten dan } \frac{10.82 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1 \cdot 10^{-15}} = 5.41 \cdot 10^{12} \text{ microorganismen,}$$

die per liter een oppervlak bezetten van 11 m<sup>2</sup>

Uitgaande van een actiefkoolconcentratie van 658 mg PAC/l (= 55.4 w%):

$$\begin{aligned} dp &= 115 \cdot 10^{-6} \text{ m} \\ \text{Oppervlak} &= 4.15 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \\ \text{Volume} &= 7.96 \cdot 10^{-13} \text{ m}^3 \\ \rho_{\text{PAC}} &= 1400 \text{ kg/m}^3 \quad \text{-----> Massa} = 1.1144 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{In een liter zitten dan } \frac{658 \cdot 10^{-3} \text{ kg/l}}{1.1144 \cdot 10^{-9} \text{ kg}} = 5.9 \cdot 10^8 \text{ kooldeeltjes,}$$

die een oppervlakte hebben van 24.5 m<sup>2</sup>

$$\text{Bezettingsgraad: } \frac{11}{24.5} \cdot 100 \% = 45 \%$$

Gezien het aflopende profiel van de vastgehechte biomassa zal ook de bezettingsgraad van het kool door microorganismen afnemen, wat in Tabel G.4 vermeld staat.

Tabel G.3 Het verloop van de bezettingsgraad in de tijd.

| t   | C <sub>xvast<sub>s</sub></sub> * | bezettings<br>graad |
|-----|----------------------------------|---------------------|
| d   | mg/l                             | %                   |
| 0   | 10820.00                         | 45                  |
| 100 | 2335.58                          | 9.5                 |
| 200 | 501.74                           | 2.0                 |
| 300 | 107.74                           | 0.44                |
| 400 | 22.85                            | 0.093               |
| 500 | 4.587                            | 0.0187              |
| 600 | 0.649                            | 0.0026              |

\* C<sub>xvastr</sub> heeft hier betrekking op de recirculatiestroom



Berekening van de hoeveelheid benodigde nutriënten:

Eerst wordt berekend hoeveel substraat er totaal in de looptijd van 600 dagen verwijderd zal worden.

Het influentconcentratie profiel van benzeen zoals in de uitgangspunten vermeld staat is:  $C_b = C_{b0} * \exp [-0.01535 * t]$

met  $t$  = het aantal dagen van de looptijd [d]

Na 600 dagen is de eindwaarde namelijk de normwaarde B bereikt:

$$C_b(600) = 0.001 \text{ mg/l.}$$

De andere stoffen hebben dezelfde tijdsconstante (de stoffen worden simultaan afgebroken) dus:

$$C_x = C_{x0} * \exp [-0.01535 * t] \quad C_x(600) = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mg/l}$$

$$C_t = C_{t0} * \exp [-0.01535 * t] \quad C_t(600) = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mg/l}$$

$$C_m = C_{m0} * \exp [-0.01535 * t] \quad C_m(600) = 5 \cdot 10^{-4} \text{ mg/l}$$

$$C_{tot} = C_{toto} * \exp [-0.01535 * t] \quad C_m(600) = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ mg/l}$$

De integraal voor de totale hoeveelheid over 600 dagen vermenigvuldigd met de voedingsstroom  $\Phi_{v_4}$  van  $250 \text{ m}^3/\text{dag}$  levert een totaal te verwijderen hoeveelheid substraat van  $407.11 \text{ kg}$ . Welke nog onderverdeeld kan worden in  $162.85 \text{ kg}$  benzeen

81.42 kg toluen

81.42 kg xyleen

81.42 kg minerale olie

Uit de reactievergelijking volgt dat voor de omzetting van  $1 \text{ kg}$  substraat  $0.4716 \text{ kg HNO}_3$  nodig is. Voor de omzetting van onze hoeveelheid is dus  $192.0 \text{ kg}$  nitraat nodig. Hieruit volgt dat er  $1600 \text{ kg}$  NPK kunstmest en  $390 \text{ kg}$  bitterzout toegevoegd moet worden. Toevoer van de extra nutriënten moet uiteraard ook exponentieel verlopen.

## BIJLAGE H Bepaling van de adsorptie isotherm van PAC

### Inleiding

Geactiveerd kool is wegens zijn eigenschappen wijd toepasbaar voor het behandelen van drinkwater. Twee mogelijke manieren om geactiveerd kool in drinkwater zuiverings systemen toe te passen zijn:

1. percolatie door een GAC bed,

Met een diep genoeg GAC-bed en gematigde influent stroomsnelheid kan bijna totale verwijdering van adsorbeerbare organische stoffen verkregen worden.

2. dispersie in water van PAC gevolgd door sedimentatie.

PAC biedt een veel groter oppervlak voor een gegeven hoeveelheid kool, en de mogelijkheid om de hoeveelheid in het systeem te variëren waardoor het proces flexibeler wordt. Daar adsorptie door een verdelingscoëfficiënt bepaald wordt kan de stof nooit helemaal verwijderd worden in tegenstelling tot een GAC-bed. [30.a]

### Structuur

De karakteristieken van de grafiet structuur (figuur H.1) zijn verantwoordelijk voor de unieke eigenschappen van het geactiveerde kool. De structuur van de  $\pi$  - electronen komt overeen met die van aromaten (bv. benzeen). In figuur H.2 staat het verband tussen de soort binding en de lengte van de binding. Hieruit blijkt de overeenkomst tussen de bindingen van de grafietlagen en die van de benzeenring.

### Activering

De aktivering van kool door thermische behandeling kan leiden tot oxidatie producten aan het oppervlak en verstoorde plekken in het grafiet rooster. De snelheid van aktiveren en de temperatuur beïnvloeden de vorming van porieën in het materiaal. De oxides geven aan het kool hydrofiele eigenschappen. Geactiveerd kool kan dus hydrofiele en hydrofobe eigenschappen vertonen waardoor een wijd spectrum van stoffen geadsorbeerd kan worden.

De chemisch eigenschappen van de organische producten aan het kool dragen zorg voor de selectiviteit van de adsorptie. De eigenschappen die overheersen op het oppervlak van het geactiveerd kool geven een voorkeur adsorptie van hydrofobe stoffen.

### Interactie adsorbent geadsorbeerde stof

Bij het gebruik van geactiveerd kool in waterzuiveringssystemen zal voornamelijk sprake zijn van fysische adsorptie die plaats vindt in zeer verdunde oplossingen (ng/l to mg/l). Vele modellen zijn verschenen over de isothermen voor adsorptie aan geactiveerd kool. De benadering van Polanyi wordt het meest toegepast voor adsorptie uit verdunde waterige oplossingen. [30.a]

### Bepaling adsorptie isotherm van PAC

Hetzelfde artikel geeft vervolgens aan dat het adsorptieproces onder evenwichts condities uit verdunde oplossingen door poedervormige geactiveerd kool (PAC) ook beschreven kan worden met Freundlich's isotherm.

Het schijnt dat voor nieuw adsorptie oppervlak de adsorptie condities gunstig zijn voor lage concentraties aan te adsorberen stof.[30.a]

P.C. Singer en C. Yen hebben de adsorptie van alkylfenolen en fenol aan geactiveerd kool onderzocht:

- adsorptie neemt toe met het aantal substituenten;
- adsorptie neemt toe de lengte van de alkylketen;
- de positie van de alkylgroep heeft geen effect op de geadsorbeerde hoeveelheid.

Hun experimenten zijn uitgevoerd met PAC (specifiek oppervlak: 2800-3500 m<sup>2</sup>/g; Amoco Research Corporation, Illinois). De adsorptie isothermen van de alkyl fenolen en fenol zijn gegeven in figuur H.3. De alkyl-gesubstitueerde fenolen adsorberen beter dan fenol. Over een groot gebied van concentraties bleken de gegevens het best met de Freundlich adsorptie isotherm overeen te komen:

$$q_e = K_f C^{1/n}$$

K<sub>f</sub> en n zijn fitconstanten. Deze constanten zijn voor fenol, 2-methylfenol en 2,6 dimethyl fenol in Tabel H.1 weergegeven.[30.c]

Tabel H.1 Freundlich constanten voor de adsorptie of fenol, 2-methylfenol en 2,6-dimethylfenol aan PAC

| component         | K <sub>f</sub> | n    |
|-------------------|----------------|------|
| fenol             | 0.0478         | 2.44 |
| 2-methylfenol     | 0.0200         | 4.25 |
| 2,6-dimethylfenol | 0.0241         | 4.63 |

Figuur H.4 geeft de isothermen van verschillende soorten organische stoffen voor een groot gebied van evenwichtsconcentraties. De brede gespikkelde lijn is een poging van de auteurs om een algemene isotherm te beschrijven. Ondanks dat de isothermen voor de afzonderlijke componenten bepaald zijn door verschillende onderzoekers met verschillende technieken en verschillende soorten kool is er toch sprake van een goede overeenkomst tussen deze isothermen voor dezelfde componenten.[30.b]

Voor deze algemene adsorptie isotherm zijn ook de constanten die in de Freundlich adsorptie isotherm voorkomen uitgerekend:

$$K_f = 0.0525$$

$$n = 2.289$$

deze liggen nog redelijk in de buurt van fenol. Directe bruikbare gegevens zijn in de literatuur niet aanwezig. Een rekenkundige benadering met behulp van de theorie van Polanyi is een mogelijkheid maar nu is gekozen om van vergelijkbaar systeem de meest waarschijnlijke isotherm te gebruiken. De algemene adsorptie isotherm zou in principe gebruikt kunnen worden maar zal voor onze stoffen die allemaal zeer hydrofoob zijn niet echt reeel zijn. Fenol is vergelijkbaar met benzeen maar bevat zuurstof dat het adsorptie gedrag negatief zal beïnvloeden. Daarom is gekozen voor de adsorptiecurve van dimethylfenol, wat behalve de zuurstof op xyleen lijkt.

BIJLAGE I. PROGRAMMA VOOR DE BEREKENINGEN

In deze bijlage zijn zowel het stroomschema, de gebruikte variabelen en procedures, als het programma te vinden dat gebruikt is voor de berekening van het fysisch systeem. Omdat er geen gegevens bekend zijn over het compostfilter, is op dit punt alleen het verloop van de concentraties is de luchtstroom als functie van de tijd bepaald. Om een idee te krijgen van invloed van een aantal variabelen, is een aantal combinaties meegeleverd ter vergelijking. De variabelen die veranderd zijn, zijn:

- uitgangskonzentratie benzeen
- volume verhouding gas/vloeistof.

Indien het koolfilter in de loop van de tijd vervangen zou moeten worden, is dit tijdstip aangegeven in de uitvoer.

De geleverde combinaties zijn:

|    | Concentratie benzeen uit | Volume verhouding gas/vloeistof |
|----|--------------------------|---------------------------------|
| 1. | 5E-6                     | 200                             |
| 2. | 5E-6                     | 500                             |
| 3. | 5E-6                     | 80                              |
| 4. | 5E-4                     | 200                             |
| 5. | 5E-5                     | 200                             |
| 6. | 5E-7                     | 200                             |

HOOFDPROGRAMMA:

Dimensionering arrays

STROOMSCHEMA  
bij bijlage I

Herhaal

@Stripper

Stripper

@Filter

Filter

@Stripper:

@Defaultwaarde Vastleggen van de defaultwaarden en constanten

@In Invoeren van te veranderen constanten

@Stripper Berekening van de helling van de werklijn (benz)

Herhaal voor iedere component

Berekening van helling evenwichtslijn  
en stripfactor

@Tabellen Invoer floodinggroep en percentage voor stuwgrens

Berekening van floodinggrens, stuwgrens,  $U_g$ ,  
kolomdiameter, drukval per meter@Hoogteev Berekening van de hoogte van een evenwichtstrap  
(voor benzeen)@Evenwtrap Berekening en uitvoer van het aantal evenwichts-  
trappen (voor benzeen), lengte van  
de kolom, totale drukval

@Restcomp Herhaal voor iedere component

Berekening evenwichtsconcentratie

Berekening hoogte evenwichtstrap

Bepaling aantal evenwichtstrappen in  
gegeven kolomBepaling van de uitgangskoncentratie op  $t=0$   
met behulp van Newton-Raphson@Stripper Vastleggen uitgaande concentratie op  $t=0$ @Header Afdrukken Header voor uitvoer van stroomsamen-  
stelling als functie van de tijd@Stripper Herhaal van  $t=0$  tot  $t=600$  dagen

Berekening van tijdsinvloed op concentratie

Herhaal voor iedere component

Berekening van uitgangskoncentratie  
als functie van de tijd  
( $C_{uit} = C_{t=0} * factor$ )

@Tijduit Uitvoer samenstelling stromen

@Filter:

Initialiseren van aantal koolfilters en volume

@Koolin

Herhaal voor iedere component  
Berekening oplosbaarheid uit dampdruk en Hi

@Filter

Uitvoer header actief kool gedeelte  
Herhaal van t=0 tot t=600

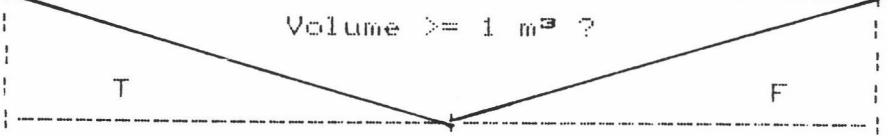
Bepaling tijdsafhankelijkheid

@Koolrestcompl  
@Evenwkoolwat

Herhaal voor iedere component  
Berekening geadsorbeerd volume met de Polanyi-theorie

Bepaling volume koolfilter

@Test



Uitvoer tijdstip  
Vkool  
beladingsgraad  
N filters  
Vkool totaal

@Filter

Uitvoer restant kool en totaal volume kool

Lijst van variabelen bij bijlage 1.

## Arrays:

|        |   |  |
|--------|---|--|
| Adpot  | : | Adsorptiepotentiaal bij koolfilter           |
| C      | : | Ingaande beginconcentratie koolfilter water  |
| Cdef   | : | Defaultwaarde ingaande concentratie          |
| Cin    | : | Ingaande concentratie 1/stripkolom, 2/filter |
| Cuit   | : | Uitgaande concentratie van stripkolom        |
| CO     | : | Ingaande concentratie stripkolom             |
| Dg     | : | Diffusiecoefficient in gasfase               |
| Dl     | : | Diffusiecoefficient in vloeistoffase         |
| Henry  | : | Henry-coefficient                            |
| M      | : | Molekuul-massa                               |
| Massal | : | Massa geadsorbeerd uit vloeistof in interval |
| Massag | : | Massa geadsorbeerd uit gas in interval       |
| Mastot | : | Totale geadsorbeerde massa in 1 filter       |
| Molfr  | : | Molfractie in vloeistofstroom                |
| Fpart  | : | Partiaalspanning                             |
| Rho    | : | Dichtheid                                    |
| S      | : | Stripfactor                                  |
| Solv   | : | Oplosbaarheid                                |
| Vads   | : | Geadsorbeerd volume                          |
| Vmol   | : | Molair volume                                |
| Vp     | : | Dampdruk                                     |

## Variabelen:

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| A\$       | : | In gebruik bij de invoer van getallen        |
| Ca        | : | Ingaande concentratie benzeen in stripkolom  |
| Cartot    | : | Concentratie aromaten totaal in gasstroom    |
| Caster    | : | Evenwichtsconcentratie benzeen in stripkolom |
| Cbdef     | : | Defaultwaarde uitgaande benzeenconcentratie  |
| Cgem      | : | Logaritmisch gemiddelde concentratie         |
| Cminoin   | : | Ingaande concentratie minerale olie          |
| Cminuit   | : | Uitgaande concentratie minerale olie         |
| Cn        | : | Startwaarde Newton-Raphson procedure         |
| Co        | : | Hulpvariabele Newton-Raphson                 |
| C1        | : | Idem   |
| C2        | : | Idem   |
| C3        | : | Idem   |
| Deltapdr  | : | Droge drukval stripkolom                     |
| Deltapnat | : | Natte drukval stripkolom                     |
| Dkol      | : | Diameter kolom                               |
| Dr        | : | Diameter Pall-ringen                         |
| Etag      | : | Viscositeit gas                              |
| Etal      | : | Viscositeit vloeistof                        |
| Fact      | : | Factor die de tijdsafhankelijkheid weergeeft |
| Flowpar   | : | Flowparameter                                |
| Floodgrp  | : | Flooding-groep                               |
| Fp        | : | Pakkingsfactor                               |
| G         | : | Zwaartekrachtversnelling                     |
| Hellv     | : | Helling evenwichtslijn                       |
| Hellwerk  | : | Helling werklijn                             |
| Hl        | : | Holdup                                       |
| Hox       | : | Overall hoogte overdrachtstrap op L-basis    |
| Hx        | : | Hoogte overdrachtstrap L-fase                |
| Hy        | : | Hoogte overdrachtstrap G-fase                |

|                |   |  |
|----------------|---|--|
| I              | : | Hulpvariabele                                |
| Invoer         | : | Hulpvariabele bij procedure Invoer           |
| Invoerdef      | : | Hulpvariabele bij procedure Invoer           |
| Invoer\$       | : | Hulpvariabele bij procedure Invoer           |
| J              | : | Hulpvariabele                                |
| K              | : | Hulpvariabele                                |
| L              | : | Hoogte stripkolom                            |
| Lambda         | : | Belastingsfactor                             |
| Lambdafld      | : | Belastingsfactor na flooding correctie       |
| Molstrg        | : | Molenstroom gas                              |
| Molstrl        | : | Molenstroom vloeistof                        |
| Mtot           | : | Totale massa koolstof                        |
| N              | : | Aantal overdrachtstrappen                    |
| Nbed           | : | Aantal actief koolbedden                     |
| Noem           | : | Hulpvariabele                                |
| Nox            | : | Aantal overdrachtstrappen op L-basis         |
| Opp            | : | Dwarsdoorsnede stripkolom                    |
| Percfld        | : | Percentage van de floodinggrens              |
| Pi             | : | 3.1415926.....                               |
| Rhog           | : | Dichtheid gasfase                            |
| Rhol           | : | Dichtheid vloeistoffase                      |
| Stap           | : | Tijdsinterval stripkolom berekening          |
| Stapdef        | : | Defaultwaarde tijdsinterval stripkolom       |
| Stap2          | : | Tijdsinterval koolfilter berekening          |
| Stap2def       | : | Defaultwaarde tijdsinterval koolfilter       |
| Tel            | : | Hulpvariabele                                |
| Tijd           | : | Tijdstip voor berekening                     |
| Tijdsconstante | : | Factor die concentratieverloop bepaald       |
| Ug             | : | Lineaire gassnelheid                         |
| Ul             | : | Lineaire vloeistofsnelheid                   |
| Vbedtot        | : | Totaal volume koolfilter gebruikt            |
| Verhvolly      | : | Volume verhouding vloeistof- en gasstroom    |
| Vkoolbed       | : | Volume koolfilter                            |
| Volstrg        | : | Volumestroom gas                             |
| Volstrl        | : | Volumestroom vloeistof                       |
| Procedures:    |   |  |
| Defaultwaarde  | : | Defaultwaarden                               |
| Evenwtrap      | : | Berekening Nox, uitvoer Nox, Hox, L, enz.    |
| Evenwkoolwater | : | Berekening adsorptie-evenwicht water         |
| Evenwkoolgas   | : | Berekening adsorptie-evenwicht lucht         |
| Filter         | : | Berekening koolfilters, uitvoer verbruik     |
| Header         | : | Uitvoer header voor concentratieverloop      |
| Hoogteev       | : | Berekening Hox                               |
| In             | : | Invoer gegevens                              |
| Invoer         | : | Handhaven van defaultwaarde bij invoeren     |
| Koolin         | : | Begincondities koolfilt, berekening oplosb.  |
| Koolrestcomp   | : | Berekening actief koolfilter gasstroom       |
| Koolrestcompl  | : | Berekening actief koolfilter vloeistofstroom |
| Nera           | : | Newton-Raphson nulpuntsbepaling              |
| Reken          | : | Hulpprocedure Newton Raphson                 |
| Restcomp       | : | Berekening uitgaande concentr andere comp    |
| Schuif         | : | Hulpprocedure Newton Raphson                 |
| Stripper       | : | Gehele berekening stripkolom                 |
| Tabellen       | : | Berekening flowpar, Ul, Deltapnat            |
| Test           | : | Filter vervangen ? (Y/N)                     |
| Tijduit        | : | Uitvoer concentratieverloop                  |



## LISTING PROGRAMMA bij bijlage I

```

Dim Henry(10),S(10),Dl(10),Dg(10),Cdef(10),Cin(10),Cuit(10),C(10)
Dim Rho(10),Vads(10),Adpot(10),Vmol(10),Ppart(10),CO(10),Massal(10),Massag(10)
Dim Solv(10),Vp(10),Molfr(10),M(10),Mastot(10)
Do
  @Stripper
  @Filter
Loop
Procedure Stripper
  @Defaultwaarde
  @In
  Volstrg=Volstrl*Verhvollv
  Lprint "volumestroom gas = ";Volstrg;
  Lprint " m3/s"
  Molstrg=Volstrg/Molvolg11
  Molstrl=Volstrl*Rhol/M(1)
  Hellwerk=Molstrl/Molstrg
  For I=2 To 10
    Hellev=Henry(I)/0.101325
    S(I)=Hellev/Hellwerk
  Next I
  @Tabellen
  I=2
  @Hoogteev
  @Evenwtrap
  Fact=1
  @Restcomp
  For K=2 To 10
    C(K)=Cuit(K)
  Next K
  @Header
  For Tijd=0 To 600 Step Stap
    Fact=Exp(Tijdsconstante*Tijd)
    For K=2 To 10
      Cuit(K)=C(K)*Fact
      Cin(K)=Cdef(K)*Fact
    Next K
  @Tijduit
  Next Tijd
Return
Procedure Defaultwaarde
  Tijdsconstante=-0.01535
  Rem per dag
  M(1)=18.02
  M(2)=78.11
  M(3)=92.13
  M(4)=106.16
  M(5)=72.15
  M(6)=86.17
  M(7)=100.2
  M(8)=114.22
  M(9)=128.25
  M(10)=142.28
  Rem kg/kmol
  Molvolg11=21.71

```

Volstr1=(250/24/60/60)

Rem m3/s

G=9.81

Rem kg m/s<sup>2</sup>

Cbdef=5.0E-06

Rem kg/m<sup>3</sup>

Etal=0.001271

Etag=0.0000175

Rem Pa.s

Rho1=1000

Rhog=1.336

Rem kg/m<sup>3</sup>

Dr=0.038

Rem m

Verhvollvdef=80

Rem m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>

Henry(2)=16.87

Henry(3)=16.87

Henry(4)=16.87

Henry(5)=3662

Henry(6)=3856

Henry(7)=402

Henry(8)=8441

Henry(9)=3638

Henry(10)=57025

Rem MPa

D1(2)=6.827E-10

D1(3)=6.0264E-10

D1(4)=5.4351E-10

D1(5)=6.0203E-10

D1(6)=5.4305E-10

D1(7)=4.9732E-10

D1(8)=4.6061E-10

D1(9)=4.3033E-10

D1(10)=4.0483E-10

Dg(2)=8.681E-06

Dg(3)=7.757E-06

Dg(4)=7.124E-06

Dg(5)=8.276E-06

Dg(6)=7.414E-06

Dg(7)=6.723E-06

Dg(8)=6.283E-06

Dg(9)=5.727E-06

Dg(10)=5.262E-06

Rem m<sup>2</sup>/s

Cdef(2)=0.01

Cdef(3)=0.005

Cdef(4)=0.005

Cdef(5)=0.00128

Cdef(6)=0.00128

Cdef(7)=0.00128

Cdef(8)=0.0007

Cdef(9)=0.00045

Cdef(10)=9.0E-06

```

Rem kg/m3
Rho(2)=876.5
Rho(3)=866.9
Rho(4)=868.5
Rho(5)=626.2
Rho(6)=660.3
Rho(7)=683.7
Rho(8)=702.5
Rho(9)=718
Rho(10)=730

```

```

Rem kg/m3
Vp(2)=6390
Vp(3)=1760
Vp(4)=440
Vp(5)=39400
Vp(6)=9600
Vp(7)=29000
Vp(8)=800
Vp(9)=230
Vp(10)=65

```

```

Rem Pa
Vmol(2)=0.0891
Vmol(3)=0.1063
Vmol(4)=0.1222
Vmol(5)=0.1152
Vmol(6)=0.1305
Vmol(7)=0.1466
Vmol(8)=0.1626
Vmol(9)=0.1786
Vmol(10)=0.1949
Stap2def=1
Stapdef=60

```

Return

Procedure In

Ca=Cdef(2)

Cin(2)=Ca

@Invoer("Cb(kg/m3 H2O)",Cbdef)

Cb=Invoer

Cuit(2)=Cb

Print "Concentratie Benzeen aan uitgang op t=0 ";

Print "N.B. Dit is een ontwerp-parameter !!"

Lprint "[Benzeen] =";

Lprint Using "###^",Cuit(2);

Lprint " kg/m3 H2O"

@Invoer("V/L verhouding",Verhvollydef)

Verhvolly=Invoer

Lprint "verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L=";

Lprint Using "###",Verhvolly;

Lprint " m3/m3"

@Invoer("tijdsinterval",Stapdef)

Stap=Invoer

@Invoer("tijdsinterval",Stap2def)

Stap2=Invoer

Return

## Procedure Evenvtrap

```

Caster=Ca/S(I)
Cgem=((Ca-Caster)-Cb)/Log((Ca-Caster)/Cb)
Nox=(Ca-Cb)/Cgem
Lprint "nox = ";
Lprint Using "##.###",Nox
L=Hox*Nox
Lprint "Hox = ";
Lprint Using "##.###",Hox
Lprint "lengte kolom = ";
Lprint Using "##.##",L;
Lprint " m"
Lprint "diameter kolom = ";
Lprint Using "##.##",Dkol;
Lprint " m"
Lprint "doorsnee kolom = ";
Lprint Using "##.##",Opp;
Lprint " m2"
Lprint "volume kolom = ";
Lprint Using "##.##", (L*Opp);
Lprint " m3"
Lprint
Lprint "drukval droog = ";
Lprint Using "#.###^",Deltapdr;
Lprint " Pa/m"
Lprint "drukval nat = ";
Lprint Using "#.###^",Deltapnat;
Lprint " Pa/m"
Lprint "drukval nat tot= ";
Lprint Using "#.###^", (Deltapnat*L);
Lprint " Pa"
Lprint .

```

## Return

## Procedure Invoer(Invoer\$,Invoerdef)

```

Print "defaultwaarde "+Invoer$+" = ";Invoerdef;
Print " "+Invoer$+" nieuw= ";
Input A$
If Val?(A$)>=1
    Invoer=Val(A$)
Else
    Invoer=Invoerdef
Endif
Return

```

## Procedure Tabellen

```

Fp=140
Rem Scheiding 2 blz86
Flowpar=(Rhol/Rhog)^0.5/Verhvollv
Print "flowpar= ";Flowpar
Input "floodgrp uit fig blz89= ";Floodgrp
Lambdafld=Floodgrp*(G/Fp)^0.5*(Etag/Etal)^0.05
Input "fractie van floodinggrens= ";Percfld
Lambda=Lambdafld*Percfld
Ug=Lambda*(Rhol/Rhog)^0.5
Ul=Ug/Verhvollv
Opp=Volstrg/Ug
Dkol=(4*Opp/Pi)^0.5
Deltapdr=0.4*Fp*Ug^2*Rhog
Hl=1.22*(Ul^2/Dr/6)^(1/3)
Deltapnat=(1-2.6*Hl)^(-3)*Deltapdr

```

Return

## Procedure Restcomp

```

For I=2 To 10
  Cin(I)=Cdef(I)*Fact
  Caster=Cin(I)/S(I)
  Ca=Cin(I)
  @Hoogteev
  N=L/Hox
  @Nera
  Cuit(I)=Cn
Next I

```

Return

## Procedure Nera

```

Cn=1.0E-20
C3=C2=C1=0
For J=1 To 3
  Co=Cn
  @Reken
  @Schuif
Next J
Repeat
  Co=Cn
  @Reken
  @Schuif
Until Abs((C3-C2)/C1)<=1.0E-06

```

Return

## Procedure Reken

```

Tel=N*(Co-((Ca*S(I)-Ca)/S(I)))+(Ca-Co)*Log((Ca*S(I)-Ca)/(Co*S(I)))
Noem=N*Log((Ca*S(I)-Ca)/S(I))-Ca/Co+Log(Co)
Cn=Co-Tel/Noem

```

Return

## Procedure Schuif

```

C1=C2
C2=C3
C3=Cn

```

Return

## Procedure Hoogteev

$$Hx=0.00029*U1^{0.27}*Dr^{(1/3)}/Dl(I)^{0.5/6^{(1/6)}}$$

$$Hy=0.00044*(Ug*Dr*Rhog/Etag)^{0.4}*(Etag/Dg(I)/Rhog)^{(2/3)}*1/U1^{0.56}$$

$$Hox=Hx+Hy/S(I)$$

Return

## Procedure Header

```
Lprint "Tijd ; vloeistofstroom (kg/m3 H2O) ; gasstroom (kg/m3 lucht) "
```

```
Lprint "-----"
```

```
Lprint "Dagen ; Aromaten ; Minerale Olie ; Aromaten ; Minerale Olie"
```

```
Lprint "-----"
```

Return

## Procedure Tijduit

```
Lprint Using "###",Tijd;
```

```
Lprint " ; ";
```

```
Lprint Using "#.###^",Cuit(2)+Cuit(3)+Cuit(4);
```

```
Lprint " ; ";
```

```
Lprint Using "#.###^",Cuit(5)+Cuit(6)+Cuit(7)+Cuit(8)+Cuit(9)+Cuit(10);
```

```
Lprint " ; ";
```

$$Cartot=(Cin(2)+Cin(3)+Cin(4))-(Cuit(2)+Cuit(3)+Cuit(4))$$

```
Lprint Using "#.###^",Cartot/Verhvollv;
```

```
Lprint " ; ";
```

$$Cminoin=Cin(5)+Cin(6)+Cin(7)+Cin(8)+Cin(9)+Cin(10)$$

$$Cminouit=Cuit(5)+Cuit(6)+Cuit(7)+Cuit(8)+Cuit(9)+Cuit(10)$$

$$Cminotot=Cminoin-Cminouit$$

```
Lprint Using "#.###^",Cminotot/Verhvollv;
```

```
Lprint
```

Return

## Procedure Filter

```
Nbed=0
```

```
Vbedtot=0
```

```
@Koolin
```

```
Lprint
```

```
Lprint "actief kool in waterstroom"
```

```
For Tijd=0 To 600 Step Stap2
```

```
Fact=Exp(Tijdsconstante*Tijd)
```

```
@Koolrestcompl
```

```
Next Tijd
```

$$Vbedtot=Vbedtot+Vkoolbed$$

```
Lprint "vkool rest= ";
```

```
Lprint Using "##.###",Vkoolbed;
```

```
Lprint " m3"
```

```
Lprint
```

```
Lprint "V kool totaal= ";
```

```
Lprint Using "##.###",Vbedtot;
```

```
Lprint " m3"
```

Return

## Procedure Koolin

```
For K=2 To 10
```

$$CO(K)=Cdef(K)$$

$$Cin(K)=C(K)$$

$$Solv(K)=Vp(K)/Henry(K)*1.0E-06$$

```
Next K
```

Return

## Procedure Test

```

If Vkoolbed=>1 Then
  Lprint Using "###",Tijd;
  Lprint " ";
  Lprint Using "###.##",Vkoolbed;
  Nbed=Nbed+1
  Lprint " ";
  Tot=0
  For K=2 To 10
    Tot=Tot+Mastot(K)
  Next K
  Lprint Using "#.###^^^",Tot/Mtot;
  Lprint Using "###",Nbed;
  For K=2 To 10
    Mastot(K)=0
  Next K
  Vbedtot=Vbedtot+Vkoolbed
  Lprint Using "###.###",Vbedtot
Endif

```

Return

## Procedure Koolrestcompl

@Evenkoolwater

@Test

Return

## Procedure Evenkoolwater

Mtot=0

For J=2 To 10

Massal(J)=250\*Cin(J)/Tijdsconstante

Massal(J)=Massal(J)\*(Fact-Exp(Tijdsconstante\*(Tijd-Stap2)))

Mastot(J)=Mastot(J)+Massal(J)

Molfr(J)=Cin(J)\*Fact\*M(1)/(M(J)\*Rhol)

Adpot(J)=284.15/(Vmol(J)\*1000)\*Log10(Solv(J)/Molfr(J))

Next J

Vads(2)=10^(2.2051-1.51/12.8\*Adpot(2))

Vads(3)=10^(1.9862-1.05/10.7\*Adpot(3))

Vads(4)=10^(1.9197-0.87/9.3\*Adpot(4))

Vads(5)=10^(2.0769-1.48/9.9\*Adpot(5))

Vads(6)=10^(1.9208-1.06/8.7\*Adpot(6))

Vads(7)=10^(2.1079-1.1/7.8\*Adpot(7))

Vads(8)=10^(1.7989-0.63/6.97\*Adpot(8))

Vads(9)=10^(1.7998-0.57/6.39\*Adpot(9))

Vads(10)=10^(1.81-0.52/5.8\*Adpot(10))

For J=2 To 10

Mtot=Mtot+Mastot(J)/(Vads(J)\*Rho(J)\*0.00001)

Next J

Vkoolbed=Mtot/0.9/500

Return

[Benzeen] = 5.000E-06 kg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O  
 verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L=200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 volumestroom gas = 0.5787037037 m<sup>3</sup>/s  
 nox = 7.848  
 Hox = 0.702  
 lengte kolom = 5.51 m  
 diameter kolom = 0.68 m  
 doorsnee kolom = 0.36 m<sup>2</sup>  
 volume kolom = 1.99 m<sup>3</sup>

drukval droog = 1.918E+02 Pa/m  
 drukval nat = 3.432E+02 Pa/m  
 drukval nat tot= 1.891E+03 Pa

| Tijd  | vloeistofstroom (kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O) |               | gasstroom (kg/m <sup>3</sup> lucht) |               |
|-------|--|---------------|-------------------------------------|---------------|
| Dagen | Aromaten   | Minerale Olie | Aromaten                            | Minerale Olie |
| 0     | 1.461E-05  | 5.117E-06     | 9.993E-05                           | 2.497E-05     |
| 60    | 5.817E-06  | 2.037E-06     | 3.978E-05                           | 9.941E-06     |
| 120   | 2.316E-06  | 8.111E-07     | 1.584E-05                           | 3.958E-06     |
| 180   | 9.221E-07  | 3.229E-07     | 6.306E-06                           | 1.576E-06     |
| 240   | 3.671E-07  | 1.286E-07     | 2.510E-06                           | 6.273E-07     |
| 300   | 1.461E-07  | 5.118E-08     | 9.994E-07                           | 2.497E-07     |
| 360   | 5.818E-08  | 2.038E-08     | 3.979E-07                           | 9.943E-08     |
| 420   | 2.316E-08  | 8.113E-09     | 1.584E-07                           | 3.958E-08     |
| 480   | 9.222E-09  | 3.230E-09     | 6.307E-08                           | 1.576E-08     |
| 540   | 3.672E-09  | 1.286E-09     | 2.511E-08                           | 6.274E-09     |
| 600   | 1.462E-09  | 5.119E-10     | 9.996E-09                           | 2.498E-09     |

actief kool in waterstroom  
 vkool rest= 0.656 m<sup>3</sup>

V kool totaal= 0.66 m<sup>3</sup>



[Benzeen] = 5.000E-06 kg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O  
 verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L=500 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 volumestroom gas = 1.4467592593 m<sup>3</sup>/s  
 nox = 7.698  
 Hox = 0.572  
 lengte kolom = 4.40 m  
 diameter kolom = 0.99 m  
 doorsnee kolom = 0.76 m<sup>2</sup>  
 volume kolom = 3.36 m<sup>3</sup>

drukval droog = 2.682E+02 Pa/m  
 drukval nat = 3.767E+02 Pa/m  
 drukval nat tot = 1.658E+03 Pa

| Tijd  | vloeistofstroom (kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O) |               | gasstroom (kg/m <sup>3</sup> lucht) |               |
|-------|--|---------------|-------------------------------------|---------------|
| Dagen | Aromaten   | Minerale Olie | Aromaten                            | Minerale Olie |
| 0     | 1.463E-05  | 5.924E-06     | 3.997E-05                           | 9.986E-06     |
| 60    | 5.824E-06  | 2.358E-06     | 1.591E-05                           | 3.976E-06     |
| 120   | 2.319E-06  | 9.389E-07     | 6.335E-06                           | 1.583E-06     |
| 180   | 9.230E-07  | 3.738E-07     | 2.522E-06                           | 6.301E-07     |
| 240   | 3.675E-07  | 1.488E-07     | 1.004E-06                           | 2.509E-07     |
| 300   | 1.463E-07  | 5.925E-08     | 3.998E-07                           | 9.988E-08     |
| 360   | 5.825E-08  | 2.359E-08     | 1.592E-07                           | 3.976E-08     |
| 420   | 2.319E-08  | 9.390E-09     | 6.336E-08                           | 1.583E-08     |
| 480   | 9.232E-09  | 3.739E-09     | 2.523E-08                           | 6.303E-09     |
| 540   | 3.675E-09  | 1.488E-09     | 1.004E-08                           | 2.509E-09     |
| 600   | 1.463E-09  | 5.926E-10     | 3.998E-09                           | 9.990E-10     |

actief kool in waterstroom  
 vkool rest = 0.667 m<sup>3</sup>

V kool totaal = 0.67 m<sup>3</sup>

[Benzeen] = 5.000E-06 kg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O  
 verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L= 80 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 volumestroom gas = 0.23148148148 m<sup>3</sup>/s  
 nox = 8.253  
 Hox = 0.854  
 lengte kolom = 7.05 m  
 diameter kolom = 0.47 m  
 doorsnee kolom = 0.18 m<sup>2</sup>  
 volume kolom = 1.25 m<sup>3</sup>

drukval droog = 1.278E+02 Pa/m  
 drukval nat = 3.479E+02 Pa/m  
 drukval nat tot= 2.452E+03 Pa

| Tijd  | vloeistofstroom (kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O) |               | gasstroom (kg/m <sup>3</sup> lucht) |               |
|-------|--|---------------|-------------------------------------|---------------|
| Dagen | Aromaten   | Minerale Olie | Aromaten                            | Minerale Olie |
| 0     | 1.457E-05  | 3.529E-06     | 2.498E-04                           | 6.244E-05     |
| 60    | 5.800E-06  | 1.405E-06     | 9.946E-05                           | 2.486E-05     |
| 120   | 2.309E-06  | 5.593E-07     | 3.960E-05                           | 9.897E-06     |
| 180   | 9.193E-07  | 2.227E-07     | 1.576E-05                           | 3.940E-06     |
| 240   | 3.660E-07  | 8.866E-08     | 6.276E-06                           | 1.569E-06     |
| 300   | 1.457E-07  | 3.530E-08     | 2.499E-06                           | 6.245E-07     |
| 360   | 5.801E-08  | 1.405E-08     | 9.947E-07                           | 2.486E-07     |
| 420   | 2.310E-08  | 5.594E-09     | 3.960E-07                           | 9.899E-08     |
| 480   | 9.195E-09  | 2.227E-09     | 1.577E-07                           | 3.941E-08     |
| 540   | 3.661E-09  | 8.867E-10     | 6.277E-08                           | 1.569E-08     |
| 600   | 1.457E-09  | 3.530E-10     | 2.499E-08                           | 6.246E-09     |

actief kool in waterstroom  
 552 1.00 1.387E-03 1 1.002  
 vkool rest= 0.000 m<sup>3</sup>

V kool totaal= 1.00 m<sup>3</sup>

[Benzeen] = 5.000E-04 kg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O  
 verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L=200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 volumestroom gas = 0.5787037037 m<sup>3</sup>/s  
 nox = 3.076  
 Hox = 0.702  
 lengte kolom = 2.16 m  
 diameter kolom = 0.68 m  
 doorsnee kolom = 0.36 m<sup>2</sup>  
 volume kolom = 0.78 m<sup>3</sup>

drukval droog = 1.918E+02 Pa/m  
 drukval nat = 3.432E+02 Pa/m  
 drukval nat tot = 7.410E+02 Pa

| Tijd  | vloeistofstroom (kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O) |               | gasstroom (kg/m <sup>3</sup> lucht) |               |
|-------|--|---------------|-------------------------------------|---------------|
| Dagen | Aromaten   | Minerale Olie | Aromaten                            | Minerale Olie |
| 0     | 1.144E-03  | 3.308E-04     | 9.428E-05                           | 2.334E-05     |
| 60    | 4.556E-04  | 1.317E-04     | 3.753E-05                           | 9.292E-06     |
| 120   | 1.814E-04  | 5.244E-05     | 1.494E-05                           | 3.700E-06     |
| 180   | 7.221E-05  | 2.088E-05     | 5.949E-06                           | 1.473E-06     |
| 240   | 2.875E-05  | 8.311E-06     | 2.368E-06                           | 5.864E-07     |
| 300   | 1.144E-05  | 3.309E-06     | 9.429E-07                           | 2.334E-07     |
| 360   | 4.556E-06  | 1.317E-06     | 3.754E-07                           | 9.294E-08     |
| 420   | 1.814E-06  | 5.245E-07     | 1.495E-07                           | 3.700E-08     |
| 480   | 7.222E-07  | 2.088E-07     | 5.950E-08                           | 1.473E-08     |
| 540   | 2.875E-07  | 8.313E-08     | 2.369E-08                           | 5.865E-09     |
| 600   | 1.145E-07  | 3.309E-08     | 9.431E-09                           | 2.335E-09     |

actief kool in waterstroom

146 1.00 4.846E-02 1 1.002  
 556 1.00 5.657E-03 2 2.003  
 vkool rest = 0.001 m<sup>3</sup>

V kool totaal = 2.00 m<sup>3</sup>

[Benzeen] = 5.000E-05 kg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O  
 verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L=200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 volumestroom gas = 0.5787037037 m<sup>3</sup>/s  
 nox = 5.460  
 Hox = 0.702  
 lengte kolom = 3.83 m  
 diameter kolom = 0.68 m  
 doorsnee kolom = 0.36 m<sup>2</sup>  
 volume kolom = 1.39 m<sup>3</sup>

drukval droog = 1.918E+02 Pa/m  
 drukval nat = 3.432E+02 Pa/m  
 drukval nat tot = 1.315E+03 Pa

| Tijd  | vloeistofstroom (kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O) |               | gasstroom (kg/m <sup>3</sup> lucht) |               |
|-------|--|---------------|-------------------------------------|---------------|
| Dagen | Aromaten   | Minerale Olie | Aromaten                            | Minerale Olie |
| 0     | 1.286E-04  | 4.095E-05     | 9.936E-05                           | 2.479E-05     |
| 60    | 5.118E-05  | 1.630E-05     | 3.956E-05                           | 9.870E-06     |
| 120   | 2.038E-05  | 6.491E-06     | 1.575E-05                           | 3.929E-06     |
| 180   | 8.112E-06  | 2.584E-06     | 6.270E-06                           | 1.564E-06     |
| 240   | 3.230E-06  | 1.029E-06     | 2.496E-06                           | 6.228E-07     |
| 300   | 1.286E-06  | 4.096E-07     | 9.937E-07                           | 2.479E-07     |
| 360   | 5.119E-07  | 1.631E-07     | 3.956E-07                           | 9.871E-08     |
| 420   | 2.038E-07  | 6.492E-08     | 1.575E-07                           | 3.930E-08     |
| 480   | 8.113E-08  | 2.585E-08     | 6.271E-08                           | 1.565E-08     |
| 540   | 3.230E-08  | 1.029E-08     | 2.497E-08                           | 6.229E-09     |
| 600   | 1.286E-08  | 4.097E-09     | 9.939E-09                           | 2.480E-09     |

actief kool in waterstroom  
 390 1.00 6.935E-03 1 1.005  
 vkool rest = 0.007 m<sup>3</sup>  
 V kool totaal = 1.01 m<sup>3</sup>

[Benzeen] = 5.000E-07 kg/m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O  
 verhouding Gas-, Vloeistofstroom, V/L=200 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>  
 volumestroom gas = 0.5787037037 m<sup>3</sup>/s  
 nox = 10.237  
 Hox = 0.653  
 lengte kolom = 6.68 m  
 diameter kolom = 0.78 m  
 doorsnee kolom = 0.48 m<sup>2</sup>  
 volume kolom = 3.18 m<sup>3</sup>

drukval droog = 1.105E+02 Pa/m  
 drukval nat = 1.779E+02 Pa/m  
 drukval nat tot = 1.188E+03 Pa

| Tijd  | vloeistofstroom (kg/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> O) |               | gasstroom (kg/m <sup>3</sup> lucht) |               |
|-------|--|---------------|-------------------------------------|---------------|
| Dagen | Aromaten   | Minerale Olie | Aromaten                            | Minerale Olie |
| 0     | 1.680E-06  | 6.379E-07     | 9.999E-05                           | 2.499E-05     |
| 60    | 6.690E-07  | 2.540E-07     | 3.981E-05                           | 9.950E-06     |
| 120   | 2.663E-07  | 1.011E-07     | 1.585E-05                           | 3.961E-06     |
| 180   | 1.060E-07  | 4.025E-08     | 6.310E-06                           | 1.577E-06     |
| 240   | 4.221E-08  | 1.603E-08     | 2.512E-06                           | 6.279E-07     |
| 300   | 1.681E-08  | 6.380E-09     | 1.000E-06                           | 2.500E-07     |
| 360   | 6.691E-09  | 2.540E-09     | 3.982E-07                           | 9.951E-08     |
| 420   | 2.664E-09  | 1.011E-09     | 1.585E-07                           | 3.962E-08     |
| 480   | 1.060E-09  | 4.026E-10     | 6.311E-08                           | 1.577E-08     |
| 540   | 4.222E-10  | 1.603E-10     | 2.512E-08                           | 6.280E-09     |
| 600   | 1.681E-10  | 6.381E-11     | 1.000E-08                           | 2.500E-09     |

actief kool in waterstroom  
 vkool rest = 0.166 m<sup>3</sup>

V kool totaal = 0.17 m<sup>3</sup>

## BIJLAGE J Het PACT systeem

Tot 1972 moest de industrie in de Verenigde Staten de Best Practicable Control Technology Currently Available toepassen bij de behandeling van hun effluent. Om deze effluent kwaliteitstandaard te bereiken werd na primaire fysische en chemische behandeling (filtratie, flocculatie, chemische precipitatie, adsorptie) vrijwel altijd secundaire biologische behandeling (actief slib) uitgevoerd.

In 1977 werd door de Water Pollution Act en de Clean Water Act vastgesteld dat in juli 1984 de Best Available Technology Economically Achievable ingezet moesten zijn voor afvalwaterbehandeling. Dit betekende dat na de secundaire biologische behandeling een tertiair granulair actief kool (GAC) adsorptie moest volgen als de polishing stap. Het toevoegen van GAC adsorptiekolommen aan bestaande biologische behandelings faciliteiten vergt grote kapitaal uitgaven en toenemende operationele kosten.

Een technische en economisch goed alternatief is de directe toevoeging van actief koolpoeder (PAC) aan een biologisch systeem (vrijwel altijd een actief slib systeem).

Het conventionele actief slib systeem bestaat uit:

- een voorbehandelingseenheid; egaliseren, bezinkers etc.
- een aerobe biologische reactor; waar bacterieën de organische stoffen omzetten naar biomassa, CO<sub>2</sub> en H<sub>2</sub>O.
- een bezinker waar het biologisch materiaal onder invloed van de zwaartekracht bezinkt.

Een gedeelte van het biologische materiaal wordt gerecirculeerd naar de reactor. De PAC kan direct aan de bioreactor toegevoegd worden of eerst gemengd met het effluent van de voorbehandelings eenheden.

Het proces waarbij PAC aan een actief slib systeem wordt toegevoegd is gepatenteerd door du Pont (VS) als het Powdered Activated Carbon Treatment Proces (PACT). De volgende voordelen van dit PACT proces werden vermeld:

- betere verwijdering van organische stoffen
- grotere stabiliteit voor shock ladingen
- betere bezinksnelheid van het slib en ontwatering
- minder schuimvorming in de reactor
- goedkoper dan een GAC kolom:
  - 1/3 van de kapitaalkosten
  - 1/8 van operationele kosten. [33]

### BIJLAGE K Berekening van de roersnelheid en het gasdebiet

Voor verwerking van de gevonden gegevens moet aan de volgende eisen worden voldaan:

- \* zodanige roersnelheid dat er sprake is van suspendering
- \* zodanige gassnelheid dat aan de OUR voldaan wordt en het stripeffect verwaarloosbaar is. (  $k_1 a_{RG} = 3.5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$   
 $k_1 a_{R11} = 5.4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  )

Op een schaal van 70 liter geldt voor suspendering van zand bij een minimaal flowgetal een roersnelheid (figuur 5.7) van:

$$N_{js} = 3.3 \text{ s}^{-1}$$

Uit figuur 5.10 volgt na lineaire regressie dat bij deze roersnelheid een  $k_1 a$  behoort van:

$$\begin{aligned} k_1 a &= 13.3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} & Fl &= 0.02 \\ k_1 a &= 18.0 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1} & Fl &= 0.04 \end{aligned}$$

Om de  $k_1 a$  te verlagen naar  $k_1 a_{RG}$  kan nu het Flowgetal c.q. het gasdebiet verlaagd worden:  $Fl = 0.0001$

Onder de meetcondities van  $D = 0.4 \text{ T}$  ( $T = 29 \text{ cm}$ ) en de gestelde roersnelheid is hieruit het gasdebiet te berekenen

$$\Phi_g = 5.15 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$$

Tevens geldt  $\Phi_g = A * v_g$  met  $A = 6.6 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$  zodat  $v_g = 7.8 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$

Uit figuur 5.7 volgt verder voor een 70 liter tank ( $H=T= 44 \text{ cm}$ )

$$\begin{aligned} P^* &= 5.5 \\ (P/V)^0 &= 500 \text{ W/m}^3 \end{aligned}$$

Met behulp van de schaalvergrotings regels (vergelijking 5.23)

$$\begin{aligned} (P/V)_{gr} &= (P/V)_{kl} * \left( \frac{v_{gr}}{v_{kl}} \right)^{-0.14} \\ &= 500 * (41.68/6.69 \cdot 10^{-2})^{-0.14} = 203 \text{ W/m}^3 \end{aligned}$$

Gevolgd door de correctie voor het feit dat we niet met zand maar met kool te doen hebben

$$(P/V)_{kool} = 0.286 (P/V)_{zand} = 58 \text{ W/m}^3$$

Het totale vermogen toegevoerd volgt na vermenigvuldiging met het volume

$$P = (P/V)_{kool} * V_1 = 2421.1 \text{ W}$$

Verder kan met de vergelijking 5.21 voor een geroerd drie fase systeem en met  $D = 0.4 * 3.758 = 1.50 \text{ m}$  de benodigde roersnelheid berekend worden

$$N_1 = 0.387 \text{ s}^{-1}$$

Deze berekening kan ook uitgevoerd worden voor de tweede bioreactor.

Samengevat volgt voor beide bioreactoren:

|                                | Bioreactor 1        | Bioreactor 2        |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|
| $v_g$ (m/s)                    | $7.8 \cdot 10^{-6}$ | $3.9 \cdot 10^{-6}$ |
| $\Phi_g^g$ (m <sup>3</sup> /s) | $8.6 \cdot 10^{-5}$ | $2.7 \cdot 10^{-5}$ |
| $P_g/V$ (W/m <sup>3</sup> )    | 58.0                | 64.0                |
| P (W)                          | 2421.2              | 1334.0              |
| N (s <sup>-1</sup> )           | 0.387               | 0.464               |
| D (m)                          | 1.504               | 1.193               |

### Berekening volume toename door gasholdup

Met een luchtbelstijgsnelheid van ca. 0.25 m/s [48] en een reactor hoogte van  $H_1 = 3.758$  en  $H_2 = 2.983$  m verkrijgen we een minimale lucht verblijftijd van:

$$\tau_{lu1} = 15.03 \text{ s} \quad \text{en} \quad \tau_{lu2} = 11.03 \text{ s}$$

Voor de luchtstroom door de reactor geldt:  $\Phi_g = A * v_g$

Nu geldt voor het luchtvolume:  $V_g = \Phi_g * \tau_{lu}$

|                               |   |   |
|-------------------------------|---|---|
| met $A_1 = 11.09 \text{ m}^2$ | $\Phi_g = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$   | $V_{g1} = 1.29 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$   |
| $A_2 = 6.99 \text{ m}^2$      | $\Phi_g^g = 2.7 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ | $V_{g2}^g = 0.32 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ |

Nu zal door roeren de verblijftijd van de bellen groter zijn maar ook dan is de volume toename verwaarloosbaar.

### Gegevens van de berekening van de batchfluxcurve voor bezinkbak V13.

| $C_{pac}$<br>koolpoeder<br>concentratie | $\varphi$<br>volumefractie<br>deeltjes | $v_z$<br>bezinksnelheid<br>zwerm | $\psi$<br>koolpoeder<br>flux          |
|---|--|----------------------------------|---------------------------------------|
| kg/m <sup>3</sup>                       | -                                      | 10 <sup>-3</sup> m/s             | 10 <sup>-3</sup> kg/m <sup>2</sup> .s |
| 0                                       | 0                                      | 1.487                            | 0                                     |
| 50                                      | 0.036                                  | 1.363                            | 68.2                                  |
| 100                                     | 0.071                                  | 1.245                            | 124.5                                 |
| 200                                     | 0.143                                  | 1.028                            | 205.6                                 |
| 213                                     | 0.152                                  | 1.001                            | 213.2                                 |
| 300                                     | 0.214                                  | 0.834                            | 250.2                                 |
| 329                                     | 0.235                                  | 0.782                            | 257.3                                 |
| 350                                     | 0.250                                  | 0.746                            | 261.0                                 |
| 375                                     | 0.268                                  | 0.703                            | 263.8                                 |
| 400                                     | 0.286                                  | 0.663                            | 265.6                                 |
| 425                                     | 0.304                                  | 0.623                            | 264.9                                 |
| 452                                     | 0.325                                  | 0.579                            | 261.7                                 |
| 600                                     | 0.429                                  | 0.387                            | 232.6                                 |
| 725                                     | 0.518                                  | 0.258                            | 187.3                                 |
| 900                                     | 0.643                                  | 0.126                            | 113.1                                 |
| 1000                                    | 0.714                                  | 0.074                            | 73.7                                  |
| 1100                                    | 0.786                                  | 0.037                            | 40.1                                  |
| 1200                                    | 0.857                                  | 0.013                            | 16.7                                  |



**BENZEEN\***



**TOLUEEN**



CAS-nr: [71-43-2]  
benzol

C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>

CAS-nr: [108-88-3]  
methylbenzeen\*; toluol

C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>CH<sub>3</sub>

| FYSISCHE GROOTHEDEN   |   | BELANGRIJKE GEGEVENS  |  |
|---|---|---|--|
| Kookpunt °C   | 80  | <b>KLEURLOZE VLOEISTOF, AAN DE GEUR TE HERKENNEN</b><br>De damp is zwaarder dan lucht en verzinkt zich over de grond met kans op ontzetting op afstand. Ten gevolge van het geringe geleidingsvermogen van de vloeistof kunnen electrostatische ladingen worden opgewekt bij stroming, beweging enz. Bij vullen, aftappen of verwijderen geen prutsaak toestaan. Reageert heftig met sterke oxidatiemiddelen onder warmteontwikkeling.<br>MAC-waarde in ppm: 10 H<br>MAC-waarde in mg/m <sup>3</sup> : 30 H |  |
| Smeltpunt °C  | 5,5   |   |  |
| Vlampunt °C   | -11   |   |  |
| Zelfontbrandingspunt °C   | 550   |   |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1)   | 0,7   |   |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1) bij 20 °C van verzadigd damp/luchtmengsel   | 0,9   |   |  |
| Dampspanning in mbar bij 20 °C  | 1,16  |   |  |
| Oplosbaarheid in water  | 100   |   |  |
| Oplosbaarheid in water bij 20 °C  | 0,1   |   |  |
| Explosiegrenzen, volume % in lucht  | 1,2 - 8   |   |  |
| Minimum Ontstekingsterkte, mJ   | 0,2   |   |  |
| Soortelijke Geleiding, pSm  | 3,8   |   |  |
| Relatieve Molecuulmassa   | 78,1  |   |  |
| <b>DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN</b>  |   | <b>PREVENTIE</b>  | <b>BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP</b>               |
| Brand: zeer brandgevaarlijk.  | geen open vuur, geen vorken en niet roken.  | poeder, A.F.F.F., schuim, heksen, bootzuur.   |  |
| Explosie: damp met lucht explosief.   | geïsoleerd apparaat, ventilatie, explosieveilige elektrische apparatuur en verlichting, aarden, vorm- en persdichtheid. | bij brand: tank/vaten koel houden door spuiten met water.   |  |
| <b>STRENGE HYGIENE</b>  |   |   |  |
| Inadem: hoofdpijn, duizeligheid, oeverding, misselijkheid, sufheid, bewusteloosheid.  | ventilatie, plastische afsluiting of adembescherming.   | frisse lucht, rust, zo nodig bedrusting, en arts waarschuwen, of naar ziekenhuis vervoeren.   |  |
| Huid: ernstig opgezwollen.  | handschoenen, beschermende bedijking.   | verontreinigde bedijking uitschakelen, huid spoelen met veel water of afwassen, en naar arts vervoeren.   |  |
| Ogen: roodheid, pijn.   | plastic bescherming of oogbescherming in combinatie met adembescherming.  | eerst spoelen met veel water, dan naar arts vervoeren.  |  |
| Inhalatie: keelpijn, hoofdpijn, duizeligheid, misselijkheid, sufheid, bewusteloosheid.  |   | mond laten spoelen, en onmiddellijk naar ziekenhuis vervoeren.  |  |
| <b>OPRUIMING</b>  |   | <b>OPSLAG</b>   | <b>GEBRUIKSETIKETTERING (bags, ags, agp)</b> |
| verontreinigd oppervlakken in afvalwater vaten, morsvloeistof opvangen in zand of inert absorptiemiddel en naar veilige plaats afvoeren, (extra persoonlijke bescherming, persuchtmaster).  | brandveilig, gescheiden van oxidatiemiddelen.   | R: 11-2326-38<br>S: 9-16-29   | <br>Licht ontvlambaar Vergiftig              |
| <b>OPMERKINGEN</b><br>De reagentie ligt boven de MAC-waarde. Gebruik van alcoholische dranken versterkt de schadelijke werking. Afhankelijk van de mate van blootstelling is periodiek gezondheidscontrole gewenst. Het gebruik van benzine is volgens Richtlijn 66/152 art. 10(1) verboden. Het gebruik van reagentie en gesloten apparaat is onder bepaalde omstandigheden toegestaan. Pas een stevige gebruiksaanwijzing toe, plaats beschermende gebruiksaanwijzing en een stevige label. |   |   |  |

| FYSISCHE GROOTHEDEN  |   | BELANGRIJKE GEGEVENS  |  |
|--|---|---|--|
| Kookpunt °C  | 111   | <b>KLEURLOZE VLOEISTOF, AAN DE GEUR TE HERKENNEN</b><br>De damp mengt zich goed met lucht. Infolge van het geringe geleidingsvermogen van de vloeistof kunnen electrostatische ladingen worden opgewekt bij stroming, beweging enz. Bij vullen, aftappen of verwijderen geen prutsaak toestaan. Reageert met zure stoffen (zie aldaar) onder warmteontwikkeling.<br>MAC-waarde in ppm: 100 H<br>MAC-waarde in mg/m <sup>3</sup> : 375 H |  |
| Smeltpunt °C   | -95   |   |  |
| Vlampunt °C  | 4   |   |  |
| Zelfontbrandingspunt °C  | 510   |   |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1)  | 0,8   |   |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1) bij 20 °C van verzadigd damp/luchtmengsel  | 3,2   |   |  |
| Dampspanning in mbar bij 20 °C   | 1,06  |   |  |
| Oplosbaarheid in water   | 29  |   |  |
| Oplosbaarheid in water bij 20 °C   | 0,1   |   |  |
| Explosiegrenzen, volume % in lucht   | 1,2 - 7   |   |  |
| Minimum Ontstekingsterkte, mJ  | 92,1  |   |  |
| Relatieve Molecuulmassa  | 92,1  |   |  |
| <b>DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN</b>   |   | <b>PREVENTIE</b>  | <b>BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP</b>               |
| Brand: zeer brandgevaarlijk.   | geen open vuur, geen vorken en niet roken.  | poeder, A.F.F.F., schuim, heksen, bootzuur.   |  |
| Explosie: damp met lucht explosief.  | geïsoleerd apparaat, ventilatie, explosieveilige elektrische apparatuur en verlichting, aarden. | bij brand: tank/vaten koel houden door spuiten met water.   |  |
| Inadem: hoofdpijn, duizeligheid, misselijkheid, sufheid.   | ventilatie, plastische afsluiting of adembescherming.   | frisse lucht, rust, en arts waarschuwen.  |  |
| Huid: ernstig opgezwollen, roodheid.   | handschoenen.   | verontreinigde bedijking uitschakelen, huid spoelen met veel water of afwassen.   |  |
| Ogen: roodheid, pijn.  | veiligheidsbril.  | eerst spoelen met veel water, dan zo nodig naar arts vervoeren.   |  |
| Inhalatie: keelpijn, hoofdpijn, duizeligheid, sufheid.   |   | mond laten spoelen, veel water laten drinken, GEEN braken opwekken, en onmiddellijk naar ziekenhuis vervoeren.  |  |
| <b>OPRUIMING</b>   |   | <b>OPSLAG</b>   | <b>GEBRUIKSETIKETTERING (bags, ags, agp)</b> |
| verontreinigd oppervlakken in afvalwater vaten, morsvloeistof opvangen in zand of inert absorptiemiddel en naar veilige plaats afvoeren, (extra persoonlijke bescherming, persuchtmaster). | brandveilig, gescheiden van zwavelzuur.   | R: 11-29<br>S: 16-29-33   | <br>Licht ontvlambaar Schadelijk             |
| <b>OPMERKINGEN</b><br>Gebruik van alcoholische dranken versterkt de schadelijke werking.   |   |   |  |

**BENZINE, AUTO**



**meta-XYLEEN**



CAS-nr: [8006-61-9]  
benzine; super benzine

C<sub>8</sub>H<sub>10</sub>; koolwaterstoffen

CAS-nr: [108-38-3]  
1,3-dimethylbenzeen\*; xylol; m-xyleen

C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>

| FYSISCHE GROOTHEDEN   |   | BELANGRIJKE GEGEVENS   |  |
|---|---|--|--|
| Kookpunt °C   | ca. 45-205  | <b>KLEURLOZE VLOEISTOF, AAN DE GEUR TE HERKENNEN</b><br>Bij vullen, aftappen of verwijderen geen prutsaak toestaan. Superbenzine is rood gekleurd. Door toevoeging van dyes is de kans op electrostatische ladingen gering. Mengsel van, hoofdzakelijk, koolwaterstoffen, de technische gegevens zijn afhankelijk van de samenstelling.<br>MAC-waarde in ppm: 7<br>Wijze van opname: De stof kan worden opgenomen in het lichaam door inademing en inslikken.<br>Directe gevolgen: De vloeistof ontvecht de huid. De stof werkt op het zenuwstelsel. Na inslikken van de vloeistof kunnen druppels in de longen terecht komen (aspiratie), waardoor een longontsteking kan optreden. |  |
| Smeltpunt °C  | < -20   |  |  |
| Vlampunt °C   | < -20   |  |  |
| Zelfontbrandingspunt °C   | > 220   |  |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1)   | 0,7 - 0,8   |  |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1) bij 20 °C van verzadigd damp/luchtmengsel   | ca. 4,0   |  |  |
| Dampspanning in mbar bij 20 °C  | n.b.  |  |  |
| Oplosbaarheid in water  | met   |  |  |
| Oplosbaarheid in water bij 20 °C  | 0,6 - 8   |  |  |
| Explosiegrenzen, volume % in lucht  | 10 - 11 (aspir.)  |  |  |
| Soortelijke Geleiding, pSm  | ca. 115   |  |  |
| Relatieve Molecuulmassa   | ca. 115   |  |  |
| <b>DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN</b>  |   | <b>PREVENTIE</b>   | <b>BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP</b>               |
| Brand: zeer brandgevaarlijk.  | geen open vuur, geen vorken en niet roken.  | poeder, A.F.F.F., schuim, heksen, bootzuur.  |  |
| Explosie: damp met lucht explosief.   | geïsoleerd apparaat, ventilatie, explosieveilige elektrische apparatuur en verlichting, aarden. | bij brand: tank/vaten koel houden door spuiten met water.  |  |
| Inadem: duizeligheid, hoofdpijn, bewusteloosheid.   | ventilatie, plastische afsluiting of adembescherming.   | frisse lucht, rust, zo nodig bedrusting, en arts waarschuwen.  |  |
| Huid: roodheid.   | handschoenen.   | verontreinigde bedijking uitschakelen, huid spoelen met veel water of afwassen.  |  |
| Ogen: roodheid, pijn.   | veiligheidsbril.  | eerst spoelen met veel water, dan naar arts vervoeren.   |  |
| Inhalatie: misselijkheid, braken.   |   | mond laten spoelen, GEEN braken opwekken, en arts waarschuwen of naar ziekenhuis vervoeren.  |  |
| <b>OPRUIMING</b>  |   | <b>OPSLAG</b>  | <b>GEBRUIKSETIKETTERING (bags, ags, agp)</b> |
| verontreinigd oppervlakken, morsvloeistof opvangen in afvalwater vaten, morsvloeistof opvangen in zand of inert absorptiemiddel en naar veilige plaats afvoeren, (extra persoonlijke bescherming, persuchtmaster).  | brandveilig.  | R: 11<br>S: 9-16-29-33   | <br>Licht ontvlambaar                        |
| <b>OPMERKINGEN</b><br>Superbenzine kan tot 5% benzine (zie aldaar) bevatten en tot 0,4 ppm <sup>3</sup> lead. De samenstelling van benzine varieert van partij tot partij onder MAC-waarde kan worden overschreden. Voorkom dat de vloeistof terecht komt in riool, bodem of bodemwater. Het gebruik van reagentie en gesloten apparaat is onder bepaalde omstandigheden toegestaan. Pas een stevige gebruiksaanwijzing toe, plaats beschermende gebruiksaanwijzing en een stevige label. |   |  |  |

| FYSISCHE GROOTHEDEN  |  | BELANGRIJKE GEGEVENS  |  |
|--|--|---|--|
| Kookpunt °C  | 139  | <b>KLEURLOZE VLOEISTOF, AAN DE GEUR TE HERKENNEN</b><br>De damp mengt zich goed met lucht. Ten gevolge van het geringe geleidingsvermogen van de vloeistof kunnen electrostatische ladingen worden opgewekt bij stroming, beweging enz. Reageert met zure stoffen, salpeterminaam en sterke oxidatiemiddelen onder warmteontwikkeling.<br>MAC-waarde in ppm: 100 H<br>MAC-waarde in mg/m <sup>3</sup> : 435 H<br>Wijze van opname: De stof kan worden opgenomen in het lichaam door inademing, inslikken en via de huid.<br>Directe gevolgen: De stof werkt irriterend op de ogen, de huid en de ademhalingsorganen. De vloeistof ontvecht de huid. De stof werkt op het zenuwstelsel. In ernstige gevallen kans op bewusteloosheid. Na inslikken van de vloeistof kunnen druppels in de longen terecht komen (aspiratie), waardoor een longontsteking kan optreden. De kans op vergiftiging door opname via de huid is praktisch nihil.<br>Gevolgen bij langdurige, herhaaldelijke blootstelling: Bij intensief huidcontact kans op huidandoeningen. |  |
| Smeltpunt °C   | -48  |   |  |
| Vlampunt °C  | 25   |   |  |
| Zelfontbrandingspunt °C  | 525  |   |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1)  | 0,8  |   |  |
| Relatieve Dampdichtheid (lucht=1) bij 20 °C van verzadigd damp/luchtmengsel  | 3,7  |   |  |
| Dampspanning in mbar bij 20 °C   | 1,02   |   |  |
| Oplosbaarheid in water   | 8,25   |   |  |
| Oplosbaarheid in water bij 20 °C   | 0,1  |   |  |
| Explosiegrenzen, volume % in lucht   | 1,1 - 7  |   |  |
| Minimum Ontstekingsterkte, mJ  | 106,2  |   |  |
| Relatieve Molecuulmassa  | 106,2  |   |  |
| <b>DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN</b>   |  | <b>PREVENTIE</b>  | <b>BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP</b>               |
| Brand: brandgevaarlijk.  | geen open vuur, geen vorken en niet roken.                                       | poeder, A.F.F.F., schuim, heksen, bootzuur.   |  |
| Explosie: boven 25 °C: damp met lucht explosief.   | geïsoleerd apparaat, ventilatie, explosieveilige elektrische apparatuur, aarden. | bij brand: tank/vaten koel houden door spuiten met water.   |  |
| Inadem: hoesten, hoofdpijn, duizeligheid, misselijkheid, bewusteloosheid.  | ventilatie, plastische afsluiting of adembescherming.                            | frisse lucht, rust, en arts waarschuwen.  |  |
| Huid: roodheid, pijn.  | handschoenen.  | verontreinigde bedijking uitschakelen, huid spoelen met veel water of afwassen.   |  |
| Ogen: sticht zien, roodheid, pijn.   | veiligheidsbril.   | eerst spoelen met veel water, dan zo nodig naar arts vervoeren.   |  |
| Inhalatie: hoesten, hoofdpijn, duizeligheid, misselijkheid, braken, bewusteloosheid.   |  | mond laten spoelen, veel water laten drinken, GEEN braken opwekken, en onmiddellijk naar ziekenhuis vervoeren.  |  |
| <b>OPRUIMING</b>   |  | <b>OPSLAG</b>   | <b>GEBRUIKSETIKETTERING (bags, ags, agp)</b> |
| verontreinigd oppervlakken in afvalwater vaten, morsvloeistof opvangen in zand of inert absorptiemiddel en naar veilige plaats afvoeren.   | brandveilig.   | R: 10-20<br>S: 24-25  | <br>Schadelijk                               |
| <b>OPMERKINGEN</b><br>Gebruik van alcoholische dranken versterkt de schadelijke werking. De reagentie op deze kaart geldt ook voor ortho-xyleen en para-xyleen. Kookpunt ortho-xyleen: 144. Smeltpunt o-xyleen: -25. Explosiegrenzen o-xyleen: 1,0-6. Vlampunt o-xyleen: 30 °C. Het handelsproduct bevat voornamelijk meta-xyleen. Zelfontbrandingspunt ortho-xyleen: 465 °C. p-xyleen: 525. |  |   |  |

n-PENTAAN\*



CAS-nr: [109-66-0]

n-HEXAAN\*



CAS-nr: [110-54-3]  
hexaan

Table with 3 columns: FYSISCHE GROOTHEDEN, BELANGRIJKE GEGEVENS, and sub-columns for DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN, PREVENTIE, and BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP. Includes data for boiling point, density, and safety instructions.

Table with 3 columns: FYSISCHE GROOTHEDEN, BELANGRIJKE GEGEVENS, and sub-columns for DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN, PREVENTIE, and BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP. Includes data for boiling point, density, and safety instructions.

HEPTAAN\*



CAS-nr: [142-82-5]  
n-heptaan

OCTAAN



CAS-nr: [111-65-9]  
n-octaan\*

Table with 3 columns: FYSISCHE GROOTHEDEN, BELANGRIJKE GEGEVENS, and sub-columns for DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN, PREVENTIE, and BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP. Includes data for boiling point, density, and safety instructions.

Table with 3 columns: FYSISCHE GROOTHEDEN, BELANGRIJKE GEGEVENS, and sub-columns for DIRECTE GEVAREN/ VERSCHIJNSELEN, PREVENTIE, and BLUSSTOFFEN/EERSTE HULP. Includes data for boiling point, density, and safety instructions.

## BIJLAGE M. MASSA- EN WARMTEBALANSEN.

## M.1 Het fysisch proces

M.1.1 Massabalansen:De massabalansen over de stripkolom:De gehele kolom:

Massastroom [kg/hr]

$$\Phi_{m_2} = \Phi_{m_4} + \Phi_{m_5}$$

Dit kan ook geschreven worden als:

$$\Phi_{v_2} * C_{x_2} = \Phi_{v_4} * C_{x_4} + \Phi_{v_5} * C_{x_5}$$

$$\text{met } \Phi_{v_5} = \Phi_{v_2}$$

Dit geldt eigenlijk voor iedere component, zodat de massabalans verandert in:

$$\Phi_{v_2} * C_{i_2} = \Phi_{v_4} * C_{i_4} + \Phi_{v_5} * C_{i_5}$$

Omdat  $\Phi_{v_2}$  vastligt, is het mogelijk om  $\Phi_{v_4}$  uit te drukken als functie van  $\Phi_{v_2}$ :

$$\Phi_{v_4} = \left(\frac{G}{L}\right) * \Phi_{v_2} \quad \text{met } \left(\frac{G}{L}\right) = \frac{\Phi_{v_4}}{\Phi_{v_2}}$$

Als we deze gegevens combineren, wordt de balans als volgt:

$$C_{i_2} * \Phi_{v_2} = C_{i_5} * \Phi_{v_2} + C_{i_4} * \left(\frac{G}{L}\right) * \Phi_{v_2}$$

Aangezien de beschouwde concentraties erg klein zijn, kan  $\Phi_{v_2}$  constant verondersteld en geëlimineerd worden. Na elimineren van  $\Phi_{v_2}$  blijft er dan nog over:

$$C_{i_2} = C_{i_5} + C_{i_4} * \left(\frac{G}{L}\right)$$

Hierbij dient nog opgemerkt te worden dat er blijft gelden:

$$C_i = C_i(t)$$

De massabalansen over het actief koelfilter:Het gehele filter:

Massastroom [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]:

$$\Phi_{m_5} = \Phi_{m_6} + \text{ophoping}$$

Analoog aan de balansen van de stripkolom gaat dit over in:

$$\Phi_{v_5} * C_{i_5} = \Phi_{v_6} * C_{i_6} + \text{ophoping}$$

Ook hier geldt weer:

$$\Phi_{v_6} = \Phi_{v_5} = \Phi_{v_2} = \text{constant}$$

Tot aan de doorbraak van het koelfilter geldt er:

$$\text{ophoping} = \Phi_{v_5} * C_{i_5} - \Phi_{v_6} * C_{i_6}$$

Daarna is de massabalans alleen nog op te stellen met kennis van de vorm van de doorbraakkromme. Aangezien deze ontbreekt, kan dit deel van de massabalans niet opgesteld worden. Daarom is bij de berekening van de benodigde hoeveelheid kool aangenomen dat alle verontreinigingen worden geadsorbeerd.

De massabalansen over het compostfilter:Het gehele filter:

Massastroom [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]:

$$\Phi_{m_4} = \Phi_m \text{ gezuiverd} + \text{omzetting}$$

Omdat het compostfilter niet duidelijk te definiëren is, wordt ook de massabalans niet verder uitgewerkt.

M.1.2 Warmtebalansen:

In het geval van het fysisch proces is er geen warmtebalans opgesteld, omdat de hoeveelheid energie die aan het proces wordt toegevoerd in de vorm van opgewarmde lucht, dusdanig klein is, dat dit effect te verwaarlozen is in ten opzichte van de aanname dat de grondwater-temperatuur constant  $11^\circ\text{C}$  blijft.

## M.2 Het biotechnologisch systeem

### M.2.1 Massabalansen:

Gegevens:

$$\Phi_m = 1.618 \text{ kg/hr}$$

$$\Phi_{v\text{door}} = 10.0 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{\text{vaftap}} = 0.42 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_2} = 10.42 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_3} = 10.42 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_4} = 10.42 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_5} = 20.84 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_7} = 20.84 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_9} = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\Phi_{v_{10}}$$

$$C_{\text{PAC}_2} = 3.852 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{PAC}_4} = 0.1533 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{PAC}_5} = 658.0 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{PAC}_7} = 329.0 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{PAC}_9} = 329.0 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{PAC}_{10}}$$

$$\rho_{s_{l_2}} = 1001 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s_{l_5}} = 1188 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s_{l_7}} = 1094 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s_{l_9}} = 1094 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{s_{l_{10}}}$$

$$c_{\text{pPAC}} = 1.2 \cdot 10^3 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \text{ (aannname)}$$

### De massabalansen voor actiefkoolpoederdosering:

#### Het aftappunt:

Volumestroom [ $\text{m}^3/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{v_3} = \Phi_{\text{vaftap}} + \Phi_{v\text{door}}$$

#### Geroerde tank V6:

Volumestroom [ $\text{m}^3/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{\text{vaftap}} = \Phi_{v_2}$$

Actief koolpoederdosering [ $\text{kg PAC/hr}$ ]:

$$\Phi_m = \Phi_{v_2} * C_{\text{PAC}_2}$$

#### Het mengpunt:

Volumestroom [ $\text{m}^3/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{v\text{door}} + \Phi_{v_2} = \Phi_{v_4}$$

Actief koolpoederstroom:

$$\Phi_{v_2} * C_{\text{PAC}_2} = \Phi_{v_4} * C_{\text{PAC}_4}$$

Aanname: de substraatconcentratie verandert niet door deze procedure.

De massabalansen over bioreactor R9:Volumestromen [ $\text{m}^3/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_4} + \Phi_{V_5} = \Phi_{V_7} \quad \text{met} \quad \Phi_{V_4} = \Phi_{V_5}$$

Actief koolpoederstromen [ $\text{kgPAC}/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_4} * C_{\text{PAC}_4} + \Phi_{V_5} * C_{\text{PAC}_5} = \Phi_{V_7} * C_{\text{PAC}_7}$$

Substraatstromen [ $\text{kgS}/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_4} * C_{S_4} = \Phi_{V_7} * C_{S_7} + \text{omz}$$

$$\text{met omz} = r_{S_9} * V_9$$

Biomassastromen [ $\text{kgX}/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_5} * C_{X_5} + \text{prod} = \Phi_{V_7} * C_{X_7}$$

$$\Phi_{V_5} * C_{X_{\text{vast}_5}} = \Phi_{V_7} * C_{X_{\text{vast}_7}}$$

$$\text{met prod} = r_{X_9} * V_9$$

De massabalansen over bioreactor R11:Volumestromen [ $\text{m}^3/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_7} = \Phi_{V_9}$$

Actief koolpoeder [ $\text{kgPAC}/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_7} * C_{\text{PAC}_7} = \Phi_{V_9} * C_{\text{PAC}_9}$$

Substraatstromen [ $\text{kgS}/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_7} * C_{S_7} = \Phi_{V_9} * C_{S_9} + \text{omz}$$

$$\text{met omz} = r_{S_{11}} * V_{11}$$

Biomassastromen [ $\text{kgX}/\text{hr}$ ]:

$$\Phi_{V_7} * C_{X_7} + \text{prod} = \Phi_{V_9} * C_{X_9}$$

$$\Phi_{V_7} * C_{X_{\text{vast}_7}} = \Phi_{V_9} * C_{X_{\text{vast}_9}}$$

$$\text{met prod} = r_{X_{11}} * V_{11}$$

Aanname:  $C_{X_{\text{vast}_7}} = C_{X_{\text{vast}_9}} = C_{X_{\text{vast}_5}}$ 

Herverdeling vindt plaats in de bezinkbak.

De massabalansen over Bezinkbak V13:Volumestromen [m<sup>3</sup>/hr]:

$$\Phi_{V_9} = \Phi_{V_5} + \Phi_{V_{11}} + \Phi_{V_{10}}$$

Actief koolpoederstromen [kgPAC/hr]:

$$\Phi_{V_9} * C_{PAC_9} = \Phi_{V_5} * C_{PAC_5} + \Phi_{V_{10}} * C_{PAC_{10}} \quad \text{met } C_{PAC_5} = C_{PAC_{10}}$$

Substraatstromen [kgS/hr]:

$$\Phi_{V_9} * C_{S_9} = \Phi_{V_{11}} * C_{S_{11}} + \Phi_{V_5} * C_{S_5} + \Phi_{V_{10}} * C_{S_{10}}$$

met  $C_{S_5} = C_{S_9} = C_{S_{10}} = C_{S_{11}}$

Biomassastromen [kgX/hr]:

$$\Phi_{V_9} * C_{X_9} = \Phi_{V_5} * C_{X_5} + \Phi_{V_{10}} * C_{X_{10}} + \Phi_{V_{11}} * C_{X_{11}}$$

$$\Phi_{V_9} * C_{X_{vast_9}} = \Phi_{V_5} * C_{X_{vast_5}} + \Phi_{V_{10}} * C_{X_{vast_{10}}}$$

met  $C_{X_{vast_5}} = C_{X_{vast_{10}}}$

Aanname: Er vindt geen afbraak plaatst in de bezinkbak. Er vindt herverdeling van de biomassa plaatst tot verhouding 1:10 voor  $C_{X_5} : C_{X_{vast_5}}$ .

Waardoor de biomassa concentratie in stroom  $\Phi_{V_{11}}$  als volgt berekend moet worden:

$$C_{X_{11}} = (\gamma C_{X_{vast_9}} + \beta C_{X_9}) * \Phi_{V_9} / \Phi_{V_{11}}$$

$$C_{X_5} = (1-\beta) C_{X_9}$$

$$C_{X_{vast_5}} = (1-\gamma) C_{X_{vast_9}}$$

met  $\gamma = 6.659 \cdot 10^{-3}$   
 $\beta = 2.147 \cdot 10^{-2}$

De massabalansen over het gehele biotechnologische gedeelte van het zuiveringsproces (vanaf stroom nummer 3 in de hoofdstroom):Volumestromen [m<sup>3</sup>/hr]:

$$\Phi_{V_3} = \Phi_{V_{11}} + \Phi_{V_{10}}$$

Actief koolpoederstromen [kgPAC/hr]:

$$\Phi_{V_2} * C_{PAC_2} = \Phi_{V_{10}} * C_{PAC_{10}}$$

Substraatstromen [kgS/hr]:

$$\Phi_{V_3} * C_{S_3} = \Phi_{V_{10}} * C_{S_{10}} + \Phi_{V_{11}} * C_{S_{11}} + \text{omzetting}$$

$$\text{met omz} = -\frac{r_{X_9}}{Y_{SX}} * V_9 + \frac{r_{X_{11}}}{Y_{SX}} * V_{11}$$

Biomassastromen [kgX/hr]:

$$\Phi_{V_{11}} * C_{X_{11}} + \Phi_{V_{10}} * C_{X_{10}} = \text{productie} + \text{uitspoeling}$$

$$\text{met prod} = r_{X_9} * V_9 + r_{X_{11}} * V_{11}$$

### M.2.2 Warmtebalans:

De warmteinhoud van de stromen is als volgt te berekenen:

Voor de vloeistof- en koolstromen:

$$Q_{wi} = (w\%/100 \Phi_{mi} c_{pPAC} T + (1-w\%/100) \Phi_{mi} c_{pwater} T) \quad W$$

$$\text{met } \Phi_{mi} = \Phi_{vi} \rho_i / 3600 \quad [\text{kg/s}]$$

Voor de luchtstromen geldt:

$$Q_{wi} = \Phi_{mi} c_{pg} T$$

De totale warmtetoevoer naar de bioreactor wordt gegeven door [48]:

$$Q_{wtot} = Q_{wmeta} + Q_{wl} + Q_{wr} \quad W$$

Met:

-  $Q_{wmeta}$  warmtetoevoer door activiteit van de microorganismen

Voor aerobe groei wordt de warmteproductie door microorganismen door Roels [34] afgeleid:

$$Q_{wm} = 4.6 \cdot 10^5 * r_{O_2} [\text{mol } O_2/\text{m}^3\text{s}] * V_{\text{reactor}} [\text{m}^3] \quad W$$

De zuurstofconsumptiesnelheid volgt uit H4.2.4 R9 :  $r_{O_2} = 7.56 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^3\text{s}$   
 R11:  $r_{O_2} = 1.26 \cdot 10^{-5} \text{ mol/m}^3\text{s}$

-  $Q_{wl}$  warmtetoevoer door ingeblazen lucht



Het comprimeren van de lucht resulteert in een temperatuurstijging van de lucht. De ingeblazen lucht heeft een temperatuur van 39.6 en 33.0 °C en de uitgaande lucht 11 °C. Zodoende draagt deze luchtstroom warmte over aan de reactor wat leidt tot:

$$Q_{wl} = c_{pg} \Phi_{mi} \rho_g (T_{gi} - T_{reactor})$$

$$\Phi_{mi} = \text{massastroom} \quad [\text{kg/s}]$$

-  $Q_{wr}$  warmtetoevoer door roeren.

Verwaarloosd wordt de warmteafvoer door verdamping, warmteafvoer door expansie van de luchtbelllen en warmtetoevoer of -afvoer van of naar de omgeving.

Resultaat:

$$Q_{wmetaR9} = 1.450 \text{ kW} \quad Q_{wLR9} = 3.286 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \quad Q_{wrR9} = 2.421 \text{ kW}$$

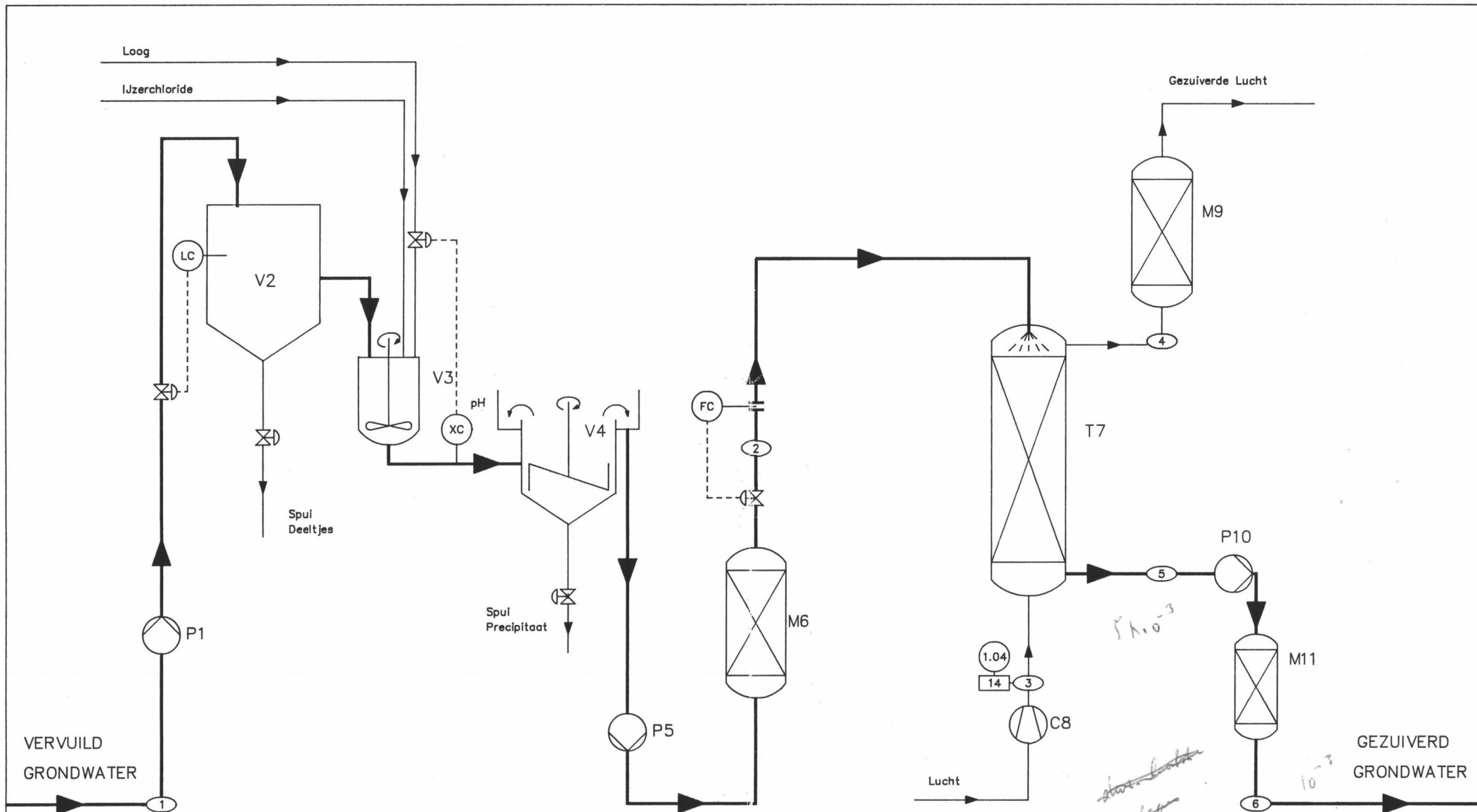
$$Q_{wmetaR11} = 0.121 \text{ kW} \quad Q_{wLR11} = 0.792 \cdot 10^{-3} \text{ kW} \quad Q_{wrR11} = 1.334 \text{ kW}$$

$$Q_{wtotR9} = 3.874 \quad \text{kW}$$

$$Q_{wtotR11} = 1.456 \quad \text{kW}$$

Het resultaat van deze berekeningen is terug te vinden in de massa- en warmte balansen. (H6)

De warmtetoevoer verhoogd de warmte inhoud van de massastroom. Het resultaat is een temperatuur stijging van 11°C naar 11.44°C.



|     |                       |
|-----|-----------------------|
| P 1 | GRONDWATER POMP       |
| V 2 | BUFFERVAT/BEZINKBAK   |
| V 3 | GEROERDE TANK         |
| V 4 | BEZINKBAK PRECIPITAAT |
| P 5 | POMP                  |
| M 6 | ZANDFILTER            |

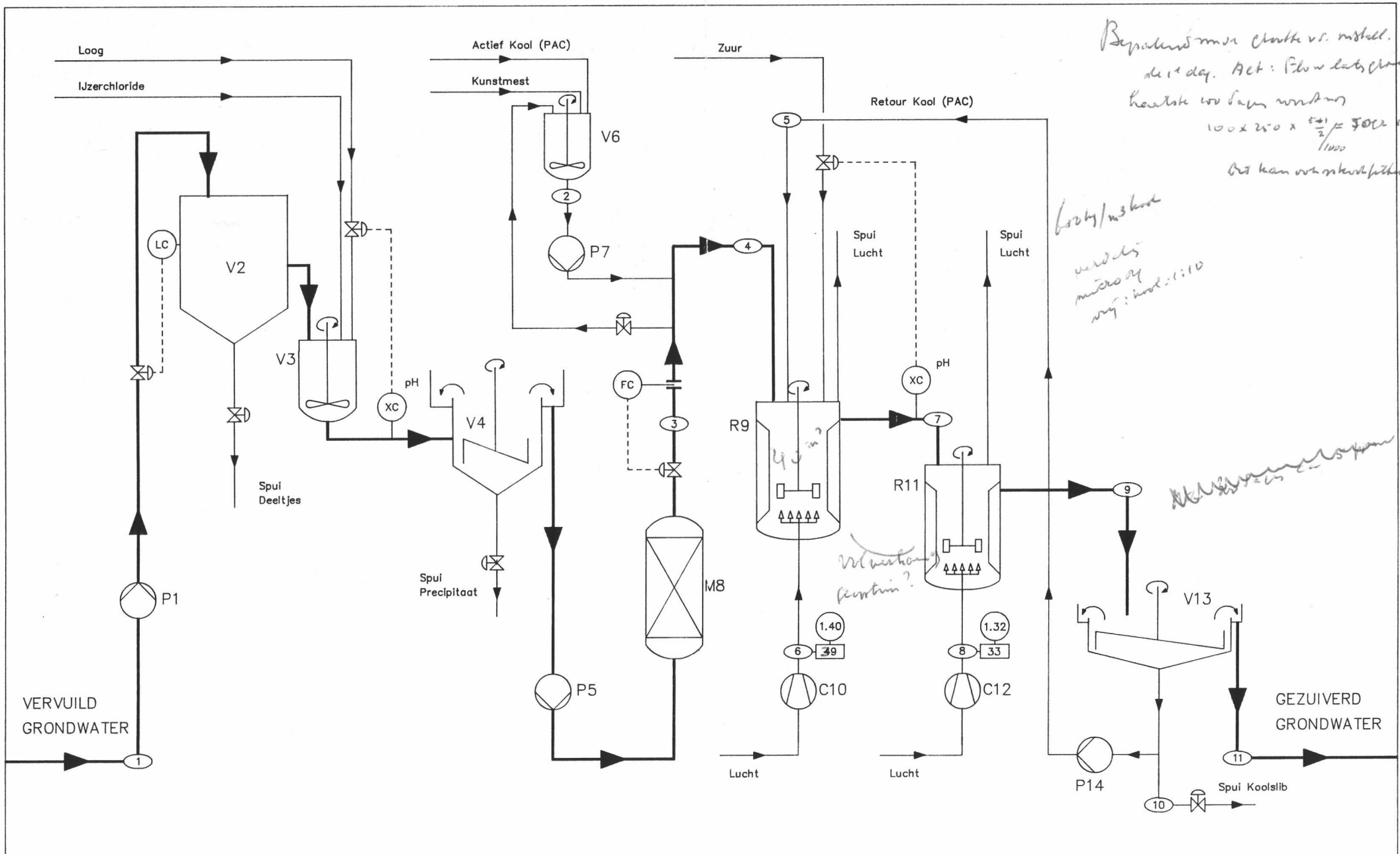
|      |                       |
|------|-----------------------|
| T 7  | STRIPKOLON            |
| C 8  | COMPRESSOR STRIPLUCHT |
| M 9  | COMPOSTFILTER         |
| P 10 | POMP                  |
| M 11 | ACTIEF KOOLFILTER     |

**PROCESSEMA van GRONDWATERZUIVERING**  
( FYSISCH SYSTEEM )

A.A. van de Graaf  
P.A. van Reeuwijk

Fabrieksvoorontwerp No.: 2739  
Mei 1988

○ Stroomnummer   
  Temp. in °C   
 ○ Absolute druk in bar   
 Systeem: T = 11 °C  
p = 1 bar



*Bepalen van chloride vs. nitraat. is de 1e dag. Act: Filterlab, chemis. keurde 100 gram waterstof 100 x 200 x  $\frac{5+1}{2}$  = 5000 mm<sup>2</sup> / 1000. Dit kan overmatige zijn.*

*body/water  
verdukt  
microog  
vrij: kool: 1:10*

*Microog = 10<sup>-6</sup> m*

|     |                       |
|-----|-----------------------|
| P 1 | GRONDWATER POMP       |
| V 2 | BUFFERVAT/BEZINKBAK   |
| V 3 | GEROERDE TANK         |
| V 4 | BEZINKBAK PRECIPITAAT |
| P 5 | POMP                  |
| V 6 | GEROERDE TANK         |

|      |            |
|------|------------|
| P 7  | POMP       |
| M 8  | ZANDFILTER |
| R 9  | BIOREACTOR |
| C 10 | COMPRESSOR |
| R 11 | BIOREACTOR |
| C 12 | COMPRESSOR |

|      |             |
|------|-------------|
| V 13 | BEZINKBAK   |
| P 14 | SLURRIEPOMP |

**PROCESSHEMA van GRONDWATERZUIVERING (BIOTECHNOLOGISCH SYSTEEM)**

A.A. van de Graaf  
P.A. van Reeuijk

Fabrieksvoorontwerp No.: 2739  
Mei 1988

Stroomnummer   
  Temp. in °C   
  Absolute druk in bar

Systeem: T = 11 °C  
p = 1 bar

