

MEDEDELING NR. 87

DE INVLOED VAN BODEMVERONTREINIGINGEN EN LEIDINGMA-
TERIAAL OP DE DRINKWATERKWALITEIT

"EEN SAMENVATTING"

drs. G. Veenendaal
ir. L.A.H.M. Verheijen
dr. M.W. Vonk
KIWA N.V.
Nieuwegein, mei 1985

Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA N.V.

Correspondentieadres

Sir Winston Churchill-laan 273

Postbus 70

2280 AB RIJSWIJK

Telefoon (070) 90 27 20

Telex 32480

Postrekening 52 92 95

Speurwerklaboratorium

Groningenhaven 7

Postbus 1072

3430 BB NIEUWEGEIN

Telefoon (03402) 6 08 60

TEN GELEIDE

Het onderzoeksproject "De invloed van bodemverontreinigingen en leidingmateriaal op de drinkwaterkwaliteit", waarvan de resultaten zijn samengevat in voorliggend rapport, is in 1981 gestart op initiatief van het voormalige Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, thans Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM), de Fabrikanten van Drinkwaterleidingbuizen van Kunststof, Asbest- cement en Beton, en de VEWIN, die vervolgens gezamenlijk het onderzoek hebben gefinancierd.

Het project omvatte twee deelonderzoeken, namelijk het transport van organische verbindingen door de bodem en de permeatie van organische verbindingen door buismaterialen.

Teneinde het project in een acceptabel tijdsbestek te kunnen uitvoeren is bij de start een aantal randvoorwaarden aangegeven:

- Het onderzoek diende met name gericht te worden op de organische verbindingen die relatief frequent voorkomen in bodemverontreinigingen.
- Het onderdeel transport van organische verbindingen is beperkt tot een verkennende literatuurstudie.
- Het permeatie-onderzoek was gericht op buismaterialen, waaraan bij de start van het onderzoek, een KIWA-Keurmerk was verleend.

Het onderzoek is eind 1984 afgerond, met uitzondering van één onderdeel, namelijk de permeatie van organische verbindingen door rubberringen, die worden toegepast in koppelingen voor drinkwaterleidingen. Dit onderzoek is in 1985 in KIWA-verband voortgezet.

In de KIWA-Mededelingen nrs. 85, 86 en 87 is de stand van zaken met betrekking tot het onderzoek vastgesteld.

Deze informatie kan voor de Overheid en de Waterleidingbedrijven de basis vormen voor het formuleren van beleid ten aanzien van bodemverontreinigingen in de nabijheid van drinkwaterleidingen, alsmede bij de Industrie een nieuw facet inbrengen bij de ontwikkeling van leidingmaterialen.

Het ligt in de bedoeling om in het najaar een studiedag te organiseren, waarin het onderzoek wordt toegelicht en waar de verschillende participanten hun visie zullen geven op de consequenties van het onderzoek voor het beleid. Op deze dag zal voldoende ruimte worden gereserveerd voor een discussie over dit onderwerp. Tevens zal worden nagegaan of, en op welk terrein, vervolgonderzoek gewenst is.

De Stuurgroep Permeatie

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	Blz.
1 INLEIDING	3
2 ACHTERGRONDEN EN PRINCIPES VAN DE PERMEATIE	6
3 POLYETHEEN	10
3.1 Algemeen	10
3.2 Permeatie vanuit grondwater	11
3.3 Permeatie vanuit bodemlucht	15
4 PVC	18
5 RUBBERRINGEN	20
5.1 Inleiding	20
5.2 Permeatie door rubberringen	20
6 KEUZE VAN METHODEN VOOR PERMEATIE-ONDER- ZOEK AAN KUNSTSTOFLEIDINGMATERIALEN	21
7 BETON	23
7.1 Experimenteel onderzoek	23
7.2 Permeatie door beton	23
8 ASBESTCEMENT	25
8.1 Experimenteel onderzoek	25
8.2 Permeatie door asbestcement	25
9 CONCLUSIES VAN HET ONDERZOEK	26
9.1 Polyetheen	26
9.2 PVC	26
9.3 Rubberringen	27
9.4 Beton en asbestcement	27

	Blz.
10 TRANSPORT VAN ORGANISCHE VERBINDINGEN	
DOOR DE BODEM	28
10.1 Inleiding	28
10.2 Beoordeling praktijksituaties	28
10.3 Een mini-draaiboek voor verdachte situaties	39
 11 VERANTWOORDING	 44
 BIJLAGE I FYSISCH CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN	 46
VAN EEN AANTAL ORGANISCHE	
VERBINDINGEN	

INLEIDING

Eind 1980 werd de openbare drinkwatervoorziening in Nederland geconfronteerd met methylobromide in drinkwater in de nabijheid van kassen. Methylobromide werd gebruikt voor de ontsmetting van de bodem en werd daartoe als gas in de grond gebracht. In deze grond lagen PE-leidingen op geringe diepte, die door de eigenaren van de kassen waren aangelegd. Naar aanleiding hiervan is door het KIWA een onderzoek verricht naar de permeatie van methylobromide door PVC en PE.

Het verschijnsel permeatie, waaronder wordt verstaan het doordringen van verbindingen door de buiswand, zonder dat deze buis lek raakt, is echter al meer dan 25 jaar geleden geconstateerd. Mededeling nr. 2 van het KIWA uit 1959, die is opgesteld door de Commissie Waterleidingbuizen van Plastiek, maakt melding van enkele incidenten waarbij het drinkwater, dat werd aangevoerd via een PE-dienstleiding, naar aardgas respectievelijk benzine smaakte. Deze leidingen lagen in de directe nabijheid van een defecte gas- of benzineleiding.

Sindsdien worden op plaatsen waarvan bekend is, dat sterke verontreinigingen met organische verbindingen kunnen optreden, bijvoorbeeld bij benzineservicestations, geen kunststof waterleidingbuizen toegepast.

Sedert het eind van de zeventiger jaren zijn in Nederland echter een groot aantal plaatsen ontdekt waar de bodem sterk verontreinigd is met organische verbindingen als gevolg van ongelukken, dumpingen of bewust gebruik van chemicaliën (bijvoorbeeld pesticiden). Deze verontreinigingen betreffen vooral aromatische koolwaterstoffen (benzeen, toluen en dergelijke), gechloreerde alkenen (trichloor-

etheen en dergelijke) en alkanen (minerale olie).

Bovenstaande en het feit dat in Nederland relatief veel kunststof drinkwaterleidingen worden toegepast (in 1981 bestond 32 % van het hoofd- en distributieleidingnet (vanaf 50 mm diameter) uit PVC, dat wil zeggen $\pm$ 27.000 km) bracht het toenmalige Ministerie van Volksgezondheid en Milieuhygiëne, de Fabrikanten van Waterleidingbuizen van Kunststof, Asbestcement en Beton en de VEWIN tot het opzetten van een breed onderzoek bij het KIWA naar de invloed van bodemverontreinigingen en leidingmateriaal op de drinkwaterkwaliteit. Doel van dit onderzoek was het verkrijgen van inzicht in de mobiliteit van organische verbindingen in de bodem en de permeatie door leidingmaterialen van stoffen, die de drinkwaterkwaliteit kunnen beïnvloeden. Het onderzoek bestond uit derhalve twee hoofdonderdelen: het transport van stoffen door de bodem en de permeatie van organische stoffen door leidingmaterialen.

Een kwalitatieve beschrijving van het transport van stoffen in de bodem en de invloed van verschillende factoren daarop is weergegeven in hoofdstuk 10.

De permeatie van organische stoffen door buiswanden is gericht op buismaterialen waaraan een KIWA-keurmerk is verleend en waarbij permeatie op voorhand niet is uit te sluiten. Dit betreft de kunststoffen PVC, LDPE en HDPE, rubberringen die worden toegepast in koppelingen en de materialen die enigszins poreus zijn namelijk asbestcement en beton.

In hoofdstuk 2 van dit rapport wordt een algemene inleiding gegeven op de theorie van de permeatie.

Vervolgens worden de materiaaltypen afzonderlijk behandeld.

Het eerste gedeelte handelt over kunststoffen: polyetheen (hoofdstuk 3), PVC (hoofdstuk 4) en rubberringen (hoofdstuk 5). De technieken die zijn toegepast bij het onderzoek naar de permeatie door kunststoffen zijn beschreven in hoofdstuk 6.

Asbestcement en beton worden beschreven in hoofdstuk 7 respectievelijk 8.

De laatste hoofdstukken van dit rapport bevatten de conclusies uit het onderzoek.

Dit rapport is een samenvatting van Mededeling nr. 85 waarin de theorie van de permeatie, de opzet van het onderzoek en de resultaten uitvoerig worden beschreven en Mededeling nr. 86 waarin nader wordt ingegaan op het transport van organische verbindingen door de bodem. In beide Mededelingen zijn relevante literatuurreferenties opgenomen.

ACHTERGRONDEN EN PRINCIPES VAN DE PERMEATIE

Onder permeatie wordt verstaan het transport van stoffen door een wand (membraan, buiswand) onder invloed van een verschil in concentratie van de stof aan de ene en aan de andere zijde van de wand. Bij polymeren (kunststoffen) verloopt het permeatieproces in drie fasen:

1. de organische stof lost op in het polymeer aan de buitenzijde;
2. de organische stof diffundeert door het polymeer;
3. de organische stof treedt uit het polymeer aan de binnenzijde.

Uit bovenstaande blijkt, dat permeatie door kunststoffen niet alleen bepaald wordt door de diffusiesnelheid maar eveneens door de mate waarin de stof kan oplossen in het polymeer, namelijk:

$$P = D.K. \quad (2.1)$$

waarin P = permeabiliteitscoëfficiënt (m^2/dag).

D = diffusiecoëfficiënt (m^2/dag).

K = verdelingscoëfficiënt, dat wil zeggen de concentratie in het polymeer gedeeld door de concentratie buiten het polymeer.

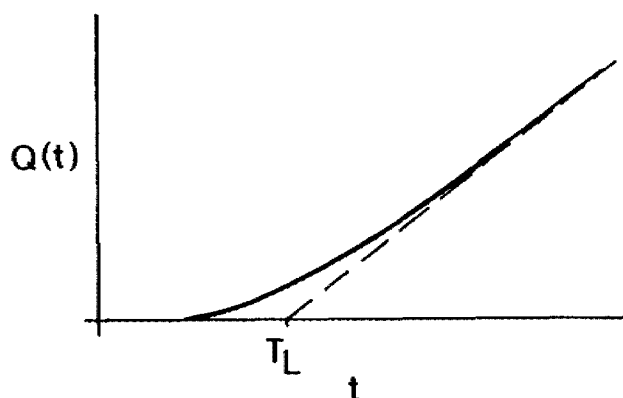
De diffusiecoëfficiënt D van een organische stof door een polymeer wordt hoofdzakelijk bepaald door de starheid van de polymeerketens en de afmetingen van het molecuul (organische stof). Voor stoffen die het polymeer niet aantasten (doen zwellen of verweken) kan de diffusie beschreven worden met de 1e en 2e diffusiewet van Fick.

De verdelingscoëfficiënt K wordt bepaald door de mate waarin de organische stof en het polymeer bij elkaar passen. De affiniteit van een organische stof voor een polymeer is over het algemeen groter naarmate de polariteiten van de organische stoffen en het polymeer dichter bij elkaar liggen.

Zowel de diffusiecoëfficiënt D als de verdelingscoëfficiënt K zijn afhankelijk van de temperatuur. Algemeen geldt dat bij verhoging van de temperatuur de permeatiesnelheid toeneemt.

Wanneer de diffusie beschreven kan worden met de wetten van Fick, zal permeatie door een buis plaatsvinden op de volgende wijze.

Wanneer een drinkwaterleiding in contact komt met een bodemverontreiniging, zal deze verontreiniging oplossen in de buiswand en naar het drinkwater diffunderen. Het duurt echter enige tijd alvorens de verontreiniging het drinkwater bereikt. De hoeveelheid stof die hierna per tijdseenheid het drinkwater bereikt neemt toe, tot de stationaire toestand is bereikt. Dit is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 2-1

Permeatie van een organische verbinding door een drinkwaterleiding. Wanneer een kunststofdrinkwaterleiding, in contact komt met een verontreiniging, zal de totale hoeveelheid organische verbinding die door 1 m^2 buiswand is gepermeëerd (Q_t) toenemen in de tijd volgens bovenstaande curve.

In de stationaire toestand permeëert per tijdseenheid een constante hoeveelheid organische stof in het drinkwater. De asymptoot snijdt de tijdas op het punt T_L , het zogenaamde time-lag intercept van Barrer. Dit time-lag intercept is afhankelijk van de diffusiecoëfficiënt:

$$T_L = \frac{d^2}{6D} \quad (2.2)$$

waarin T_L = time-lag intercept (dag).

d = wanddikte van de buis (m).

D = diffusiecoëfficiënt (m^2/dag).

De hiervoor beschreven theorie geldt voor PE, PVC en rubberringen, mits er geen sprake is van interactie tussen de organische stof en de kunststof.

Asbestcement en beton zijn enigszins poreuze materialen, waardoor het drinkwater onder invloed van de druk door de poriën naar buiten treedt.

De organische stof moet tegen deze waterstroom in diffunderen van buiten naar binnen. Aangezien een theoretische beschrijving van dit proces ten gevolge van de materiaaleigenschappen van beton en asbestcement zeer complex is, is het onderzoek naar de permeatie door asbestcement en beton derhalve geheel empirisch opgezet.

3 POLYETHEEN

3.1 Algemeen

De permeatie van organische verbindingen door polyetheenbuizen kan worden beschreven met behulp van de twee wetten van Fick. Dit betekent dat, wanneer een buis aan de buitenzijde in aanraking komt met een verontreiniging door een organische verbinding, na een bepaalde tijd een constante hoeveelheid organische stof per tijdseenheid de buis zal binnendringen (stationaire toestand).

De tijd t_s (dag) die verloopt tussen het eerste contact met de verontreiniging en het bereiken van (96 % van) de stationaire toestand wordt bepaald door de diffusiecoëfficiënt $\bar{D}$ ($\text{m}^2 \cdot \text{dag}^{-1}$) van de organische verbinding en de wanddikte d (m) van de buis. De tijd t_s wordt gegeven door:

$$t_s = \frac{d^2}{2\bar{D}} \quad (3.1)$$

Deze tijd ligt bij een LDPE-buis met een wanddikte van 3,5 mm voor alle in het kader van dit onderzoek onderzochte organische verbindingen tussen ongeveer 60 (chloorbenzeen) en 400 dagen (bifenyl).

De hoeveelheid stof die in de stationaire toestand per tijdseenheid door een buiswand permeëert wordt bepaald door de permeabiliteitscoëfficiënt $\bar{P}$, de buitenconcentratie C_o en de dimensies van de buis. Wanneer het water in een buis gedurende t dagen wordt stilgezet bedraagt de concentratie $C(t)$ in het drinkwater:

$$C(t) = \frac{2.C_o \cdot t \cdot \bar{P}}{r.d} \quad (3.2)$$

met $C(t)$: concentratie van de organische verbinding in het drinkwater in de buis na t dagen stilstand (g.liter^{-1});

C_o : concentratie van de organische verbinding buiten de buis (g.liter^{-1});

t : tijd gedurende welke het water in de buis heeft stilgestaan (dag);

$\bar{P}$: permeabiliteitscoëfficiënt ($\text{m}^2.\text{dag}^{-1}$);

r : inwendige straal van de buis (m);

d : wanddikte van de buis (m).

De vergelijking (3.2) is echter alleen toepasbaar zolang geldt:

$$C(t) \ll C_o$$

Omdat de permeabiliteitscoëfficiënt van een organische verbinding niet gelijk is voor permeatie vanuit de damp- en waterfase, zal bij de berekening van de hoeveelheid gepermeëerde stof onderscheid moeten worden gemaakt tussen beide situaties (dat wil zeggen, water dan wel damp). Bovendien is de permeabiliteitscoëfficiënt vaak afhankelijk van de concentratie. Voor in water opgelost toluen neemt de permeabiliteitscoëfficiënt $\bar{P}$ van toluen bijvoorbeeld met een factor 3 tot 5 toe in het concentratie-interval van 100 tot 300 mg/liter.

3.2 Permeatie vanuit grondwater

Wanneer de drinkwaterleidingen beneden de grondwaterspiegel liggen zal de permeatie plaatsvinden vanuit de waterfase. De concentratie in het water is met de huidige technieken redelijk nauwkeurig vast te stellen. Wanneer de permeabiliteitscoëfficiënt bekend is, kan een schatting worden gemaakt

van de hoeveelheid stof die door een LDPE- of HDPE-leiding dringt in een gegeven tijd, gebruik makend van vergelijking (3.2).

Voor een aantal verbindingen, die zijn onderzocht met de flesmethode (tabel 3.1) zijn de permeabiliteitscoëfficiënten vrij nauwkeurig bekend.

Voor de stoffen die vergelijkbaar zijn met de verbindingen uit tabel 3.1 kunnen als eerste schatting dezelfde permeabiliteitscoëfficiënten worden aangehouden. Uit deze tabel blijkt dat de onderzochte aromaten permeabiliteitscoëfficiënten bezitten van $5 \cdot 10^{-7}$ (bifenylether) tot $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{dag}^{-1}$ (tolueen). De conclusie lijkt derhalve gerechtvaardigd dat een aromaat met één of meerdere alkylgroepen, die qua grootte ligt tussen tolueen en bifenyl, eveneens een permeabiliteitscoëfficiënt zal bezitten in de orde van grootte van $5 \cdot 10^{-7}$ tot $5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{dag}^{-1}$. De vluchtige gechlloreerde alifaten zullen op basis van een analoge redenering als die voor de aromaten, waarschijnlijk permeabiliteitscoëfficiënten bezitten in de orde van grootte van $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{dag}^{-1}$.

Voor bepaalde groepen van stoffen zijn geen permeabiliteitscoëfficiënten bekend en kunnen ook geen schattingen worden gemaakt op grond van overeenkomsten met de stoffen die zijn vermeld in tabel 3.1 en/of tabel 3.2. Voor deze stoffen is het slechts mogelijk een zeer globale schatting te maken op basis van liquid-immersion-experimenten. Hierbij wordt de maximale waarde van de partitievoëfficiënt K berekend uit de oplosbaarheid S (die is bepaald uit een liquid-immersion-experiment) en vermenigvuldigd met een globale schatting van de diffusiecoëfficiënt D .

In bijlage I zijn de waarden voor de oplosbaarheid S van een groot aantal organische verbindingen in

LDPE en HDPE gepresenteerd. Hieruit kan de maximale waarde voor de partitiecöefficient $\bar{K}_w$ worden berekend met behulp van vergelijking (3.3).

$$\bar{K}_w = \frac{S \cdot \rho}{C_{w\max}} \quad (3.3)$$

met: S : oplosbaarheid van de organische verbinding in polyetheen;
 ρ : dichtheid van polyetheen (g.liter⁻¹);
 $C_{w\max}$: maximale oplosbaarheid van de organische verbinding in water (g.liter⁻¹).

In bijlage I zijn tevens voor een aantal organische verbindingen de literatuurwaarden voor de maximale oplosbaarheid $C_{w\max}$ in water bij 20 °C vermeld. De grootte van de diffusiecoëfficiënt is voor kleine verbindingen circa 10⁻⁷ m².dag⁻¹ en neemt af met de grootte van het molecuul (bijvoorbeeld 2.10⁻⁸ m².dag⁻¹ voor bifenyl). Met $\bar{P}_w = \bar{K}_w \cdot \bar{D}$ wordt op deze wijze een zeer globale schatting verkregen van de permeabiliteitscoëfficiënt. Uit een vergelijking van de resultaten van deze schattingsmethode met die van de flesmethode is gebleken dat de schatting hoger uitvalt naarmate de stoffen lipofieler zijn. In het algemeen zal deze schatting dan ook een te hoge waarde opleveren.

In de tabellen 3.1.a en 3.1.b zijn bij gegeven concentraties in het grondwater de berekende concentraties aan gepermeëerde stof in het drinkwater weergegeven na 8 uur, respectievelijk 2 dagen stilstand van het drinkwater in een LDPE- en HDPE-buis. Uit deze tabellen blijkt dat het verschil in de hoeveelheid gepermeëerde stof tussen een LDPE- en HDPE-buis voor de onderzochte verbindingen slechts

LDPE

Organische verbinding	$\bar{P} \cdot 10^7$ ($m^2 \cdot dag^{-1}$)	$C_o = 10 \text{ mg/liter}$		$C_o = 0,1 \text{ mg/liter}$	
		t = 2 (dag)	t = 0,333 (dag)	t = 2 (dag)	t = 0,333 (dag)
tolueen	12	1,10 mg/l	0,18 mg/l	11,0 $\mu g/l$	1,8 $\mu g/l$
biphenyl	4,8	0,44 mg/l	0,07 mg/l	4,4 $\mu g/l$	0,7 $\mu g/l$
biphenylether	5,0	0,46 mg/l	0,07 mg/l	4,6 $\mu g/l$	0,7 $\mu g/l$
trichlooretheen	16	1,46 mg/l	0,24 mg/l	14,6 $\mu g/l$	2,4 $\mu g/l$
tetrachlooretheen	7,7	0,71 mg/l	0,12 mg/l	7,1 $\mu g/l$	1,2 $\mu g/l$
chloorbenzeen	35	3,20 mg/l	0,53 mg/l	32,0 $\mu g/l$	5,3 $\mu g/l$
1,3-dichloorbenzeen	19	1,74 mg/l	0,29 mg/l	17,4 $\mu g/l$	2,9 $\mu g/l$
methylethylketon	0,058	0,005 mg/l	$8 \cdot 10^{-4}$ mg/l	< 0,1 $\mu g/l$	< 0,1 $\mu g/l$
fenol	< 0,0084	< $8 \cdot 10^{-4}$ mg/l	< $1 \cdot 10^{-4}$ mg/l	< 0,1 $\mu g/l$	< 0,1 $\mu g/l$

Tabel 3.1.a - Berekende concentraties aan gepermeerde organische stof in het drinkwater na 8 uur, respectievelijk 2 dagen stilstand van het drinkwater in een LDPE-buis ($\phi = 32 \text{ mm}$, wanddikte 3,5 mm). De concentraties in het grondwater (C_o) bedragen 10, respectievelijk 0,1 mg liter^{-1} .

HDPE

Organische verbinding	$\bar{P} \cdot 10^7$ ($m^2 \cdot dag^{-1}$)	$C_o = 10 \text{ mg/liter}$		$C_o = 0,1 \text{ mg/liter}$	
		t = 2 (dag)	t = 0,333 (dag)	t = 2 (dag)	t = 0,333 (dag)
trichlooretheen	7,2	1,03 mg/l	0,17 mg/l	10,3 $\mu g/l$	1,7 $\mu g/l$
tetrachlooretheen	3,8	0,54 mg/l	0,09 mg/l	5,4 $\mu g/l$	0,9 $\mu g/l$
chloorbenzeen	19	2,71 mg/l	0,45 mg/l	27,1 $\mu g/l$	4,5 $\mu g/l$
1,3-dichloorbenzeen	11	1,57 mg/l	0,26 mg/l	15,7 $\mu g/l$	2,6 $\mu g/l$
methylethylketon	0,029	0,004 mg/l	$7 \cdot 10^{-4}$ mg/l	< 0,1 $\mu g/l$	< 0,1 $\mu g/l$

Tabel 3.1.b - Berekende concentraties aan gepermeerde organische stof in het drinkwater na 8 uur, respectievelijk 2 dagen stilstand van het drinkwater in een HDPE-buis ($\phi = 32 \text{ mm}$, wanddikte 2 mm). De concentraties in het grondwater (C_o) bedragen 10, respectievelijk 0,1 mg liter^{-1} .

* De permeabiliteitscoëfficiënten $\bar{P}$ zijn experimenteel bepaald.

gering is.

3.3 Permeatie vanuit bodemlucht

Wanneer de drinkwaterleiding is gelegen in droge grond, zal permeatie alleen plaatsvinden vanuit de dampfase. Voor de berekening van de hoeveelheid organische stof die door een PE-buis zal permeëren, is het noodzakelijk dat de concentratie van deze verbinding in de bodemlucht bekend is.

Er zijn echter geen algemene technieken bekend, waarmee deze concentratie kan worden vastgesteld. Veelal wordt alleen de totaal in de bodem aanwezige hoeveelheid van een organische stof bepaald (uitgedrukt in gram per kilogram vaste stof). In Mededeling nr. 86: "Transport van organische verbindingen door de bodem" wordt hier nader op ingegaan.

Eerst wanneer de concentratie in de dampfase bekend is, kan de hoeveelheid gepermeëerde stof worden berekend uit vergelijking (3.2).

De permeabiliteitscoëfficiënten voor permeatie vanuit de dampfase, $\bar{P}_{dw}$, zijn voor een aantal verbindingen bepaald met de flesmethode (tabel 3.2).

Zoals opgemerkt in paragraaf 3.1 kunnen voor aanverwante verbindingen als schatting dezelfde permeabiliteitscoëfficiënten worden genomen.

De permeabiliteitscoëfficiënt $\bar{P}_{dw}$ is in theorie gelijk aan de permeabiliteitscoëfficiënt $\bar{P}_d$, die geldt voor permeatie vanuit damp door een buis waarin zich lucht bevindt in plaats van drinkwater.

Dit betekent dat $\bar{P}_{dw}$ kan worden berekend uit $\bar{P}_w$ volgens:

$$\bar{P}_{dw} = \frac{\bar{P}_w \cdot C_w^{\max}}{C_d^{\max}}$$

met $\bar{P}_{dw}$: permeabiliteitscoëfficiënt "damp-PE-water" ($m^2 \cdot dag^{-1}$);

$\bar{P}_w$: permeabiliteitscoëfficiënt "water-PE-water" ($m^2 \cdot dag^{-1}$);

$C_w^{\max}$: maximale oplosbaarheid in water ($g \cdot liter^{-1}$);

$C_d^{\max}$: maximale concentratie in de dampfase ($g \cdot liter^{-1}$).

In Bijlage I zijn de waarden van $C_w^{\max}$ en $C_d^{\max}$ gegeven voor een groot aantal verbindingen.

In tabel 3.2.a en 3.2.b zijn de berekende concentraties aan gepermeëerde organische stof in het drinkwater weergegeven na 8 uur respectievelijk 2 dagen stilstand, bij gegeven concentratie van de verbinding in bodemlucht.

LDPE

Organische verbinding	$\bar{P} \cdot 10^6$ ($m^2 \cdot dag^{-1}$)	$C_o = 10 \text{ mg/liter}$		$C_o = 0,1 \text{ mg/liter}$	
		$t = 2$	$t = 0,333$	$t = 2$	$t = 0,333$
		(dag)	(dag)	(dag)	(dag)
tolueen	7,6	6,9 mg/l	1,1 mg/l	69 $\mu g/l$	11 $\mu g/l$
m-xyleen	9,1	8,3 mg/l	1,3 mg/l	83 $\mu g/l$	13 $\mu g/l$
ethylbenzeen	8,3	7,5 mg/l	1,2 mg/l	75 $\mu g/l$	12 $\mu g/l$
trichlooretheen	8,2	7,4 mg/l	1,2 mg/l	74 $\mu g/l$	12 $\mu g/l$
tetrachlooretheen	3,5	3,2 mg/l	0,5 mg/l	32 $\mu g/l$	5,3 $\mu g/l$
chloorbenzeen	14,0	12,8 mg/l	2,1 mg/l	128 $\mu g/l$	21 $\mu g/l$
hexaan	0,07	0,06 mg/l	0,01 mg/l	0,6 $\mu g/l$	<0,1 $\mu g/l$
nonaan	0,06	0,06 mg/l	0,01 mg/l	0,6 $\mu g/l$	<0,1 $\mu g/l$

Tabel 3.2.a - Berekende concentraties aan gepermeerde organische stof in het drinkwater na 8 uur, respectievelijk 2 dagen stilstand van het drinkwater in een LDPE-buis ($\phi = 32 \text{ mm}$, wanddikte 3,5 mm). De concentraties in "bodemlucht" (C_o) bedragen 10, respectievelijk 0,1 mg liter⁻¹.

HDPE

Organische verbinding	$\bar{P} \cdot 10^6$ ($m^2 \cdot dag^{-1}$)	$C_o = 10 \text{ mg/liter}$		$C_o = 0,1 \text{ mg/liter}$	
		$t = 2$	$t = 0,333$	$t = 2$	$t = 0,333$
		(dag)	(dag)	(dag)	(dag)
tolueen	2,2	3,1 mg/l	0,5 mg/l	31 $\mu g/l$	5,2 $\mu g/l$
trichlooretheen	4,6	6,5 mg/l	1,1 mg/l	65 $\mu g/l$	11 $\mu g/l$
tetrachlooretheen	2,2	3,1 mg/l	0,5 mg/l	31 $\mu g/l$	5,2 $\mu g/l$
chloorbenzeen	5,7	8,1 mg/l	1,3 mg/l	81 $\mu g/l$	13 $\mu g/l$
hexaan	0,04	0,06 mg/l	0,009 mg/l	0,6 $\mu g/l$	<0,1 $\mu g/l$
nonaan	0,04	0,06 mg/l	0,009 mg/l	0,6 $\mu g/l$	<0,1 $\mu g/l$

Tabel 3.2.b - Berekende concentraties aan gepermeerde organische stof in het drinkwater na 8 uur, respectievelijk 2 dagen stilstand van het drinkwater in een HDPE-buis ($\phi = 32 \text{ mm}$, wanddikte 2 mm). De concentraties in "bodemlucht" (C_o) bedragen 10, respectievelijk 0,1 mg liter⁻¹.

* De permeabiliteitscoëfficiënten $\bar{P}$ zijn experimenteel bepaald.

PVC

De permeatie van organische verbindingen door PVC kan, wanneer de concentratie van een verbinding buiten de buis lager is dan 0,1 maal de maximale concentratie in water of in dampfase, voor alle verbindingen beschreven worden met de twee diffusiewetten van Fick (zie hoofdstuk 3: Polyetheen).

De diffusiecoëfficiënt is echter zo klein, dat de tijd die verloopt tussen het eerste contact van de PVC-buis met een verontreiniging en het bereiken van de stationaire toestand (dat wil zeggen de situatie waarin de stofstroom van buiten naar binnen constant is) duizenden jaren zal bedragen. In de praktijk speelt dit derhalve geen rol.

Bepaalde organische verbindingen kunnen, wanneer deze in concentraties aanwezig zijn die direct onder de verzadigingsconcentratie liggen ($> 0,8$ maal de maximale concentratie), het PVC verweken. Hierdoor treedt een ander mechanisme op voor de permeatie, het zogenaamde "moving-front". In die situatie kan significante permeatie al binnen enkele weken tot maanden optreden.

In het tussengebied (tussen 0,1 en 0,8 maal de maximale concentratie) is het permeatiemechanisme niet éénduidig te beschrijven. In dit gebied kan de mogelijkheid dat permeatie optreedt echter niet uitgesloten worden.

De voorgaande beschrijving geldt voor organische verbindingen die het PVC sterk kunnen verweken, zoals gechlloreerde koolwaterstoffen, aniline, ketonen en nitrobenzenen.

Voor organische verbindingen die het PVC in mindere mate doen verweken, zoals gealkyleerde aromaten, treedt geen afwijking van het Fickse diffusiegedrag en daarmee geen significante permeatie op tot con-

centraties gelijk aan circa 0,25 maal de maximale concentratie.

Voor verbindingen die PVC in het geheel niet verweken, zal geen significante permeatie optreden. Dit geldt voor verbindingen zoals alcoholen, alifatische koolwaterstoffen en organische zuren.

Samengevat betekent dit, dat er geen significante permeatie optreedt voor:

- alcoholen, alifatische koolwaterstoffen en organische zuren;
- gealkyleerde aromaten indien de concentratie lager is dan circa 0,25 maal de maximale concentratie;
- gechloreerde koolwaterstoffen, anilines, ketonen en nitrobenzenen wanneer de concentratie lager is dan circa 0,1 maal de maximale concentratie.

De maximale concentraties in water en in de dampfase zijn voor diverse organische verbindingen weergegeven in bijlage I.

5 RUBBERRINGEN

5.1 Inleiding

Rubberringen hebben een relatief gering contactoppervlak met het drinkwater. Deze ringen zitten ingesloten in een koppeling, die buisstukken met elkaar verbindt van 2 tot 20 meter lengte. Dit betekent, dat de permeatie door een rubberring relatief groot moet zijn, wil dit een meetbaar effect hebben op de waterkwaliteit.

5.2 Permeatie door rubberringen

Uit de resultaten van een modelberekening die is gebaseerd op realistische aannames blijkt, dat de permeatie door rubberringen op voorhand niet te allen tijde is te verwaarlozen.

Bij hoge concentraties aan organische verontreinigingen in een bodem, waarin buizen met koppelingen worden toegepast waarin zich rubberringen bevinden, is voorzichtigheid geboden.

Nauwkeurige voorspellingen van de permeatie door rubberringen zijn vooralsnog niet te maken. Hiertoe zal nader onderzoek worden uitgevoerd met verschillende typen rubber in combinatie met verschillende organische verbindingen.

KEUZE VAN METHODEN VOOR PERMEATIE-ONDERZOEK AAN
KUNSTSTOF LEIDINGMATERIALEN

Tijdens het onderzoek naar de permeatie door kunststofbuizen is gebruik gemaakt van diverse experimentele methoden zoals:

- de flesmethode, waarin kunststof buizen gevuld met drinkwater worden blootgesteld aan een oplossing van de te onderzoeken organische verbinding in water of in de dampfase;
- de balansmethode; hierbij wordt met behulp van een zeer gevoelige balans het tijdsafhankelijk absorptiegedrag bepaald van organische verbindingen in zeer dunne filmpjes, die uit een buis gesneden zijn, of in zeer kleine bolletjes van de kunststof. Uit de snelheid van de gewichtstoename en de uiteindelijke relatieve gewichtstoename kan de permeabiliteitscoëfficiënt worden berekend;
- liquid-immersion; hierbij worden stukjes buis blootgesteld aan de pure organische verbinding en wordt de maximale gewichtstoename bepaald na evenwichtsinstelling.

Uit het onderzoek zijn volgens de huidige inzichten de volgende conclusies te trekken ten aanzien van de methoden.

De flesmethode komt qua opzet het meest overeen met de praktijksituatie.

Voor het onderzoek naar de permeatie van organische verbindingen door polyetheen (of andere rubberpolymeren) verdient de balansmethode de voorkeur. Deze methode levert voor onderzochte verbindingen resultaten op die goed overeenkomen met de resultaten van de flesmethode. De tijd die nodig is voor één

experiment met de balans, is echter duizenden tot miljoenen malen kleiner dan de tijd die nodig is voor één experiment met de flesmethode.

De balansmethode is echter alleen toepasbaar voor organische verbindingen met een dampspanning groter dan ongeveer 1 mbar. Voor verbindingen met een lagere dampspanning dan 1 mbar verdient de flesmethode de voorkeur.

De toepasbaarheid van liquid-immersion is beperkt tot het maken van een eerste globale schatting van de permeatie.

Voor het onderzoek naar de permeatie door PVC is de flesmethode niet algemeen toepasbaar, omdat de tijd die verloopt tussen het eerste contact van de buis met een organische verbinding en het optreden van permeatie kan variëren van enkele weken tot duizenden jaren.

Met de balansmethode kan zeer snel (in enkele dagen) inzicht worden verkregen in het permeatiegedrag van vluchtige organische verbindingen (dampspanning groter dan 1 mbar).

Voor niet-vluchtige, vloeibare organische verbindingen kan via liquid-immersion in beperkte tijd (1 tot 10 maanden) inzicht worden verkregen in het permeatiegedrag.

7 BETON

7.1 Experimenteel onderzoek

Zoals beschreven in hoofdstuk 2 is het onderzoek naar de doorlatendheid van beton geheel empirisch geweest. Hierbij zijn buisstukken van 500 mm diameter en 1 m lengte onder zeer extreme omstandigheden onderzocht. De buisstukken zijn afgesloten en gevuld met water waarin een mengsel van verschillende organische stoffen in hoge concentraties is opgelost. Op deze buizen (binnenzijde) is een druk van 5 bar gezet. Vervolgens is aan de buitenzijde gemeten hoeveel organische verontreiniging door de buiswand komt. Deze situatie is zeer extreem. Door de poriën in de buiswand vindt een (zeer geringe) waterstroming plaats. De organische verontreinigingen worden gedeeltelijk met de waterstroming mee naar buiten getransporteerd.

In praktijkomstandigheden (druk aan de binnenzijde, verontreinigingen aan de buitenzijde) moeten de verontreinigingen echter tegen de waterstroming in diffunderen.

Bovendien wordt de betonwand onder invloed van water steeds dichter in de tijd.

7.2 Permeatie door beton

Bij de bovenbeschreven experimenten is gebleken dat zelfs onder deze zeer extreme omstandigheden vrijwel geen permeatie door beton optreedt. (Maximaal enkele microgrammen per liter water bij een gemiddelde stilstandtijd van 40 dagen).

Betonnen leidingen zijn alleen verkrijgbaar in grote diameters (vanaf 500 mm). Deze buizen zullen daardoor in de praktijk vrijwel altijd doorstromen.

Voorgaande betekent, dat permeatie door beton in de praktijk niet tot relevante beïnvloeding van de drinkwaterkwaliteit zal leiden.

8 ASBESTCEMENT

8.1 Experimenteel onderzoek

Het onderzoek naar doorlatendheid van asbestcement-buizen is uitgevoerd met leidingen van 100 mm diameter. Deze leidingen zijn geplaatst in een opstelling waarin het mogelijk is druk aan te leggen, zowel binnen als buiten de leidingen. Een mengsel van organische verontreinigingen in water is aangebracht aan de buitenzijde van de buis.

Aan de binnenzijde bevindt zich drinkwater.

Er zijn drie situaties onderzocht:

1. druk aan de buitenzijde (5,5 bar), drukloos aan de binnenzijde;
2. drukloos aan beide zijden;
3. druk aan de binnenzijde (3,5 bar), drukloos aan de buitenzijde.

8.2 Permeatie door asbestcement

Bij de experimenten is gebleken, dat enkele weken na de start van de experimenten, de hoeveelheid gepermeëerde stof in alle gevallen gering is (maximaal enkele microgrammen per liter na gemiddeld 20 dagen stilstand bij buitenconcentraties van enkele tientallen milligrammen per liter).

Evenals beton krijgt asbestcement een dichtere structuur in de loop van de tijd.

Op grond van de experimentele resultaten en gegeven de eigenschappen van het materiaal kan geconcludeerd worden, dat permeatie door asbestcement in de praktijk niet tot relevante beïnvloeding van de drinkwaterkwaliteit zal leiden.

9 CONCLUSIES VAN HET ONDERZOEK

De resultaten van het laboratoriumonderzoek naar de permeatie van organische verbindingen door diverse typen drinkwaterleidingmaterialen kunnen als volgt worden samengevat.

9.1 Polyetheen

De permeatie door PE-drinkwaterleidingbuizen is

- vrijwel gelijk voor LDPE- en HDPE-buizen van dezelfde drukklasse;
- vrij groot voor lipofiele organische verbindingen zoals gealkyleerde aromaten en gechloreerde koolwaterstoffen. Voor een PE-dienstleiding met een buitendiameter van 32 mm bedraagt de concentratie aan gepermeëerde stof in het drinkwater na een stilstandstijd van 8 uur doorgaans meer dan één procent van de concentratie in de water- of dampfase buiten de buis;
- gering voor polaire organische verbindingen zoals ketonen en fenolen. Wanneer een PE-dienstleiding met een buitendiameter van 32 mm, bijvoorbeeld in met fenol verontreinigd grondwater is gelegen zal de concentratie in het drinkwater na 8 uur stilstand minder dan 0,01 procent van de buitenconcentratie bedragen.

9.2 PVC

Bij PVC-drinkwaterleidingbuizen wordt geen permeatie gevonden voor

- alcoholen, alifatische koolwaterstoffen en organische zuren;
- een individuele verbinding uit de groep der gealkyleerde aromaten indien de concentratie in grondwater kleiner is dan circa 0,25 maal de

- maximale oplosbaarheid in water of wanneer de concentratie in bodemlucht kleiner is dan circa 0,25 maal de maximale dampconcentratie;
- een individuele verbinding uit de groepen der anilines, gechloreerde koolwaterstoffen, ketonen en nitrobenzenen indien de concentratie in grondwater kleiner is dan circa 0,1 maal de maximale oplosbaarheid in water of wanneer de concentratie in bodemlucht kleiner is dan circa 0,1 maal de maximale dampconcentratie.

9.3 Rubberringen

Significante permeatie door rubberringen valt voorts nog niet geheel uit te sluiten voor hoge concentraties van organische verbindingen in combinatie met (zeer) lange stagnatietijden van het drinkwater. Het onderzoek naar de mate van permeatie door rubberringen wordt door het KIWA voortgezet.

9.4 Beton en asbestcement

Permeatie door beton en asbestcement zal onder praktijkomstandigheden niet leiden tot relevante beïnvloeding van de drinkwaterkwaliteit.

10 TRANSPORT VAN ORGANISCHE VERBINDINGEN DOOR DE BODEM

10.1 Inleiding

In de volgende paragraaf (10.2) wordt weergegeven hoe een eerste beoordeling gemaakt kan worden van een praktijksituatie.

Daarnaast wordt in 10.3 een mini-draaiboek weergegeven. Hierbij wordt naar voren gebracht op welke factoren men moet letten om een schatting van het gevaar te kunnen maken.

Opgemerkt wordt, dat hier alleen de technische kant bekeken is. De juridische en financiële kant zijn buiten beschouwing gelaten.

10.2 Beoordeling praktijksituaties

In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe een eerste beoordeling gemaakt kan worden van een praktijksituatie.

Beschouw voor een eerste beoordeling van de situatie achtereenvolgens vier aspecten ten aanzien van de verontreinigde stof:

1. de oplosbaarheid;
2. de mobiliteit van de stof;
3. de biodegradatie;
4. de vervluchtiging.

1. De oplosbaarheid van de organische verbindingen kan sterk verschillen, wat zowel voor de alifatische als voor de aromatische verbindingen geldt (zie tabel 10-1).

Tabel 10-1 Oplosbaarheden (mg/l) in water van een aantal organische verontreinigingen

<u>Alifaten</u>		<u>Aromaten</u>	
dichloormethaan	20.000	fenol	82.000
1,2-dichloormethaan	8.690	benzeen	1.780
1,1-dichlooretheen	400	chloorbenzeen	500
octaan	0.66	1,4-dichloorbenzeen	49
		bifenyyl	7.5

2. De mobiliteit van een stof wordt bepaald door de adsorptie van de stof. De adsorptie van organische verbindingen vindt voornamelijk plaats aan de organische stof in de bodem. De verdeling van een organische verbinding over de vloeibare fase van de bodem en de organische stof in de bodem kan beschreven worden met de octanol-waterverdelings-coëfficiënt, de K_{ow} .

Karickhoff (1981) leidde voor een praktijk situatie de volgende vergelijking af die de sorptie, uitgedrukt in de K_p -waarde, beschrijft:

$$\log K_p = 0.989 \log K_{ow} + \log f_{oc} - 0.21$$

met K_p = verdelingscoëfficiënt van de stof over vaste en vloeibare fase (cm^3/g).

K_{ow} = verdelingscoëfficiënt van de stof over octanol en water.

f_{oc} = fractie organische stof in de bodem.

Is de absorptie bekend, uitgedrukt in K_p , dan is de mobiliteit van de stof ten opzichte van water

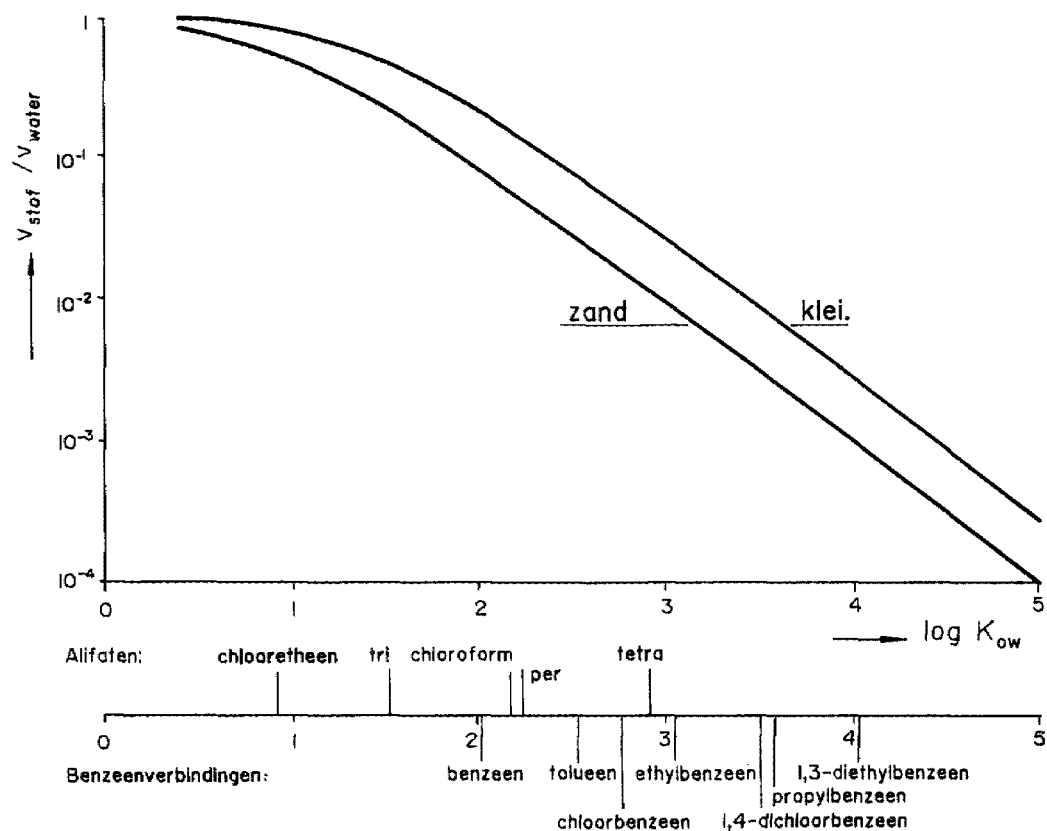
te berekenen met de volgende vergelijking:

$$\frac{V_{\text{stof}}}{V_{\text{water}}} = (1 + \frac{D(1-E)}{E} * K_p)^{-1} = \frac{1}{1 + R_D}$$

met D = dichtheid van de vaste fase
E = porositeit
V_{stof} = snelheid van de stof in de bodem
V_{water} = snelheid van het water in de bodem
R_D = retardatiefactor

In figuur 10-1 staat de relatieve snelheid van een stof in de bodem weergegeven als functie van de K_{ow}.

De snelheid waarmee een stof zich in de bodem verplaatst.
t.o.v. de snelheid waarmee water zich in de bodem verplaatst.*



Figuur 10-1 De relatieve snelheid waarmee een stof zich door de bodem verplaatst als functie van de K_{ow} ($f_{oc} = 3 \%$)

Zand: $D = 2600 \text{ kg/m}^3$, $E = 0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$

Klei: $D = 2600 \text{ kg/m}^3$, $E = 0.5 \text{ m}^3/\text{m}^3$

* Dit geldt uitsluitend voor stoffen die in water zijn opgelost beneden de verzadigingsconcentratie. Vloeistoffen met een dichtheid groter dan 1 kunnen zich zeer snel door de bodem verplaatsen.

3. Ten aanzien van de biodegradatie is bekend, dat de redoxpotentiaal (een maat voor de aerobie) en de concentratie van de bekeken stof van groot belang zijn voor het omzettingspercentage. Het redoxmilieu in de onverzadigde zône (het gebied waarin de bodem niet verzadigd is met water) is meestal aeroob; de verzadigde zône kan anaeroob worden. Zodra de omstandigheden anaeroob worden, treedt denitrificatie op. Wordt het milieu sterker anaeroob dan ontstaat eerst een sulfaat reducerend milieu en vervolgens een methaanvormend milieu (zie figuur 10-2).

Verder zijn in mindere mate ook de temperatuur en de pH belangrijk voor de biodegradatie.

In tabel 10-2 staan voor zover mogelijk de geschatte halfwaarde-tijden voor de biodegradatie weergegeven; deze waarden zijn uit de literatuurstudie afgeleid.

Uit deze tabel blijkt, dat lage concentraties van gechloreerde alkanen, c.q. alkenen, zoals bijvoorbeeld trichloormethaan (chloroform), tetrachlooretheen (per) en trichlooretheen (tri), nauwelijks afgebroken worden. Onder methaanvormende omstandigheden vindt, bij hogere temperatuur, wel langzame afbraak plaats van deze verbindingen. De benzeenverbindingen worden in het algemeen onder aerobe omstandigheden afgebroken. Sommigen worden snel afgebroken, bijvoorbeeld chloorbenzeen en m-xyleen; andere langzaam, bijvoorbeeld ethylbenzeen. Er is ook een aantal benzeenverbindingen bekend die onder anaerobe omstandigheden afbreken, zoals fenol, benzoëzuur en ftaalzuur.

Van veel verbindingen ontbreekt echter nog informatie omtrent de biodegradatie.

4. De vervluchtiging tenslotte is nog niet of nauwelijks te schatten.

Tabel 10-2: Geschatte halfwaarde-tijden voor de biodegradatie; afgeleid uit resultaat van de literatuurstudie.

Naam stof	Concentratie	Redoxpotentiaal		
		aeroob	NO ₃ ⁻ -red.	CH ₄ -vormend
tetrachloormethaan	± 100 µg/l		- 21 ₂₅ *	- 120 ₂₂ *
	± 10 mg/l	- 7 ₂₅		
trichloormethaan	± 100 µ/l	+ 175 ₂₀	+ 56 ₂₅ *	- 112 ₃₅ *
	± 10 mg/l	- 21 ₂₅		
dichloormethaan	± 100 µg/l			
	± 10 mg/l	- 4 ₂₀		
chloormethaan				
tetrachloormetheen	± 100 µg/l	+ 175 ₂₅		- 56 ₃₅ *
	± 10 mg/l	- 21 ₂₅		
trichlooretheen	± 100 µg/l	+ 175 ₂₀		120 ₃₅ *
	± 10 mg/l	- 14 ₂₅		
1-1 dichlooretheen				
	± 10 mg/l	- 14 ₂₅		
chlooretheen				
1,1,1-trichloorethaan	± 100 µg/l		+ 56 ₂₅ *	- 54 ₃₅ *
	± 10 mg/l	- 28 ₂₅		
1,2-dichloorethaan	± 100 µg/l			175 ₃₅ *
	± 10 mg/l	28 ₂₅		
2-butanon	± 100 µg/l			
	± 10 mg/l	+ 5 ₂₀		
pentaan				
octaan				
benzeen				
	± 10 mg/l	7 ₂₅		
fenol	± 100 µg/l		+ 40 ₂₃ (?)	
	± 10 mg/l	- 5 ₂₀	- 56	
nitrobenzeen	± 100 µg/l	45 ₂₀		
	± 10 mg/l	45 ₂₀		

Naam stof	concentratie	Redoxpotentiaal		
		aeroob	NO ₃ ⁻ -red.	CH ₄ -vormend
chloorbenzeen	± 100 µg/l	+ 45 ₂₀		+ 56 ₃₅ *
	± 10 mg/l	- 7 ₂₅		
1,4-dichloorbenzeen	± 100 µ/l	45 ₂₀		
	± 10 mg/l			
tolueen	± 100 µg/l			
	± 10 mg/l	5 ₂₀		
ethylbenzeen	± 100 µg/l	- 150*		
propylbenzeen				
m-xyleen	± 10 mg/l	- 3 ₂₀		
m-di-ethylbenzeen				
p-chloortolueen				
2-4 dichloortolueen				
bifenyyl	± 10 µg/l			
bifenyylether				
naftaleen				

* = substraat toegevoegd

Opmerkingen: - 21₂₅*: wil zeggen dat binnen 21 dagen meer dan de helft van de oorspronkelijke hoeveelheid omgezet is bij 25 °C.

+ 175₃₅: wil zeggen dat na 175 dagen nog niet de helft van de oorspronkelijke hoeveelheid stof is omgezet bij 35 °C.

De pH wordt bij de meeste proeven neutraal gehouden.

Enkele voorbeelden ter toelichting

In tabel 10-3a staan voor enkele alifatische en aromatische verbindingen een aantal eigenschappen weergegeven; in tabel 10-3b staat de bewegingssnelheid van deze stoffen ten opzichte van de snelheid van water weergegeven. Enkele verbindingen worden nader bekeken.

Tabel 10-3a Enkele eigenschappen van een aantal alifatische en aromatische verbindingen die van belang zijn voor het gedrag in de bodem.

	$C_w^{\max}$	$C_d^{\max}$	K_{gl}	$\log K_{ow}$	$f_{oc} = 0,2 \%$	$K_p = 1 \%$	5%
Alifaten:							
dichloormethaan	20.000	1599	0,079	1,47	0,04	0,18	0,88
trichlooretheen	1100	410	0,37	1,53	0,04	0,20	1,00
tetrachlooretheen	150	124	0,83	2,28	0,22	1,11	5,54
octaan	0,66	62	94	4,52	36,42	182,09	910,44
Aromaten:							
fenol	82.000	1,03	$1,25 \cdot 10^{-5}$	1,53	0,04	0,20	1,00
benzeen	1700	326	0,19	2,02	0,12	0,61	3,07
chloorbenzeen	500	55,7	0,11	2,76	0,66	3,31	16,54
1,4-dichloorbenzeen	49	4,8	0,098	3,51	3,65	18,26	91,28
bifenyl	7,5	-	-	3,99	10,89	54,46	272,32

$C_w^{\max}$ = verzadigingsconcentratie in water (mg/l)

$C_d^{\max}$ = verzadigingsconcentratie in lucht (mg/l)

K_{gl} = verdelingscoëfficiënt over gas en water

K_{ow} = verdelingscoëfficiënt over octanol en water

K_p = verdelingscoëfficiënt over vaste en vloeibare fase in de grond

f_{oc} = percentage organische stof van de bodem

Tabel 10-3b Snelheid waarmee een stof zich in de bodem beweegt ten opzichte van de snelheid waarmee water zich beweegt voor situaties met verschillende organische stofgehalten en verschillende porositeiten.

		$\frac{V_{\text{stof}}}{V_{\text{water}}}$					
		0,2		1		5	
foc(%)	E(%)	30	60	30	60	30	60
Alifaten:							
dichloormethaan		0,80	0,94	0,48	0,76	0,16	0,40
trichlooretheen		0,80	0,94	0,45	0,74	0,14	0,37
tetrachlooretheen		0,43	0,72	0,13	0,34	0,03	0,09
octaan		$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,02	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-4}$
Aromaten:							
fenol		0,80	0,94	0,45	0,74	0,14	0,37
benzeen		0,58	0,83	0,21	0,49	0,05	0,16
chloorbenzeen		0,20	0,47	0,05	0,15	$2,8 \cdot 10^{-3}$	$9,9 \cdot 10^{-3}$
1,4-dichloorbenzeen		0,04	0,14	$6,5 \cdot 10^{-3}$	0,02	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$
bifenyl		0,02	0,05	$3,0 \cdot 10^{-3}$	0,01	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$

$\frac{V_{\text{stof}}}{V_{\text{water}}}$ = relatieve snelheid van een stof ten opzichte van water

f_{oc} = fractie organische stof in de bodem

E = porositeit van de bodem.

Bekijken we trichlooretheen:

In tabel 10-4a staat voor een aantal verschillende gronden weergegeven hoe de verdeling is van trichlooretheen over de vaste, vloeibare en gasvormige fase. Deze verdeling gaat op zolang

de verzadigingsconcentraties van trichlooretheen in water en in lucht nog niet bereikt zijn.

Uit tabel 10-3a blijkt onder andere dat de verzadigingsconcentraties van tri hoog zijn. Uit de verdeling over de fasen (tabel 10-4a) blijkt, dat er verhoudingsgewijs veel tri in de bodemoplossing voorkomt. Hierdoor is tri mobiel.

Tabel 10-4a Verdeling van trichlooretheen over de vaste, vloeibare en gasvormige fase bij verschillende gas- en water-gevulde poriënvolumina E_g respectievelijke E_w en bij verschillende organisch stof gehalten (oc)

E_g %	E_w %	oc %	conc. vaste fase mg/kg	conc. waterfase mg/l _w	conc. lucht mg/l _l
20	20	1	1	5,00	1,85
5	35	1	1	5,00	1,85
35	5	1	1	5,00	1,85
20	20	0,2	1	25,00	9,25
20	20	5	1	1,00	0,37

Ook blijkt tri in niet te verwaarlozen concentraties in de bodemlucht voor te kunnen komen. Dit is van belang aangezien permeatie eveneens vanuit de gasfase plaats kan vinden. Daarnaast brengt een hoge concentratie in de bodemlucht ook de mogelijkheid met zich mee dat de verdamping grote vormen aanneemt.

Ten aanzien van de biodegradatie blijkt, uit de literatuur (zie tabel 10-2), dat trichlooretheen in lage concentraties ($\pm 100 \mu\text{g/l}$) onder aerobe omstandigheden niet afgebroken wordt maar wel

onder sterk reducerende (methaanvormende) omstandigheden. Hogere concentraties trichlooretheen (± 10 mg/l) worden onder aerobe omstandigheden wel omgezet tot lagere concentraties.

Bekijken we octaan:

In tabel 10-4b staat weergegeven hoe de verdeling van octaan voor de 3 bodemfasen is. Bij een lage organische stof concentratie komt een niet te verwaarlozen deel van het octaan in de bodemlucht voor. Octaan heeft echter een lage luchtverzadigingsconcentratie wat tot gevolg heeft dat octaan zich voornamelijk verdeelt over de vaste- en vloeibare fase. Gelet op de verdeling over vaste- en vloeibare fase kan geconcludeerd worden, dat octaan voornamelijk in de vaste fase voorkomt.

Octaan zal daarom heel weinig mobiel zijn in de bodem.

E_g %	E_w %	oc %	conc. vf (mg/kg)	conc. water (mg/l _w)	conc. lucht (mg/l _l)
20	20	1	1	5,5 10^{-3}	0,061
5	35	1	1	5,5 10^{-3}	0,061
35	5	1	1	5,5 10^{-3}	0,061
20	20	0,2	1	27,5 10^{-3}	0,305
20	20	5	1	11 10^{-3}	0,012

Tabel 10-4c Verdeling van benzeen over de 3 bodemfasen

E_g %	E_w %	oc %	conc. vf (mg/kg)	conc. water (mg/l _w)	conc. lucht (mg/l _l)
20	20	1	1	1,64	0,23
5	35	1	1	1,64	0,23
35	5	1	1	1,64	0,23
20	20	0,2	1	8,33	1,17
20	20	5	1	0,33	0,05

Benzeen:

Benzeen heeft een hoge lucht- en waterverzadigingsconcentratie. Volgens voorgaande tabel (10-4c) komt een groot deel van de benzeen in de bodemoplossing terecht. Benzeen is dus mobiel in de waterfase.

Verder komt een niet te verwaarlozen deel van de benzeen in de bodemlucht waardoor leidingen via de bodemlucht in contact kunnen komen met benzeen.

Doordat de benzeenconcentratie in de bodemlucht hoog kan zijn, is het mogelijk dat door verdamping veel benzeen uit de bodem verdwijnt.

Bekijken we fenol:

Tabel 10-4d Verdeling van fenol over de 3 bodemfasen

E_g %	E_w %	oc %	conc. vf (mg/kg)	conc. water (mg/l _w)	conc. lucht (mg/l _l)
20	20	1	1	5,00	6,25 10^{-5}
5	35	1	1	5,00	6,25 10^{-5}
35	5	1	1	5,00	6,25 10^{-5}
20	20	0,2	1	25,00	31,25 10^{-5}
20	20	5	1	1,00	1,25 10^{-5}

In tabel 10-4d staat weergegeven hoe de verdeling van fenol voor de 3 bodemfasen is. Fenol heeft een zeer hoge oplosbaarheid en een tamelijk lage luchtverzadigingsconcentratie. De meeste fenol zal derhalve in de bodemoplossing voorkomen. Dit houdt in, dat fenol mobiel is. Ten aanzien van de biodegradatie blijkt, dat hoge concentraties fenol zowel aeroob als anaeroob afgebroken kunnen worden tot lage concentraties fenol. Onduidelijk is nog of lage concentraties fenol afgebroken kunnen worden.

10.3 Een mini-draaiboek voor verdachte situaties

In deze paragraaf wordt door middel van een mini-draaiboek geprobeerd weer te geven hoe te handelen bij verdachte situaties.

Indien men te maken krijgt met een "verdachte situatie" kan men de te volgen handelingen onderscheiden in verschillende fasen.

1e fase: alarmering

Fase waarin duidelijk wordt dat er een (permeatie-) probleem aanwezig is of aanwezig kan zijn. Hierbij moet nagegaan worden wat de aanleiding is tot de alarmering. Is dat een constatering, een meting, een aantasting of een gebeurtenis (ongeluk). Wat is bekend, wat is gemeten en wat wordt vermoed.

Indien de situatie er aanleiding toe geeft moeten acuut maatregelen genomen worden. Het verrichten van nader onderzoek ten einde een goed beeld van de situatie te kunnen krijgen, kost veel tijd. Indien de concentraties in stilstaand leidingwater gemeten worden, heeft men al een goede indicatie of de situatie acute maatregelen vereist of niet. Met het nemen van acute maatregelen kan gedacht worden aan het direct zoveel mogelijk verwijderen van de bron (lekkende vaten, kleine hoeveelheden sterk verontreinigende grond etc.) of het afpompen van verontreinigd grondwater.

Indien bekend is om welke stoffen het gaat kan snel een eerste beoordeling gemaakt worden van het gedrag van de betreffende stoffen in de grond (zie 10.2).

2e fase: onderzoek

Indien bodemverontreiniging optreedt in relatie tot drinkwater, zal een bodemonderzoek antwoord moeten geven op de volgende vragen:

1. Met welke stof(fen) heeft men te maken?

Wat zijn de eigenschappen van de stof(fen) gelet op:

- oplosbaarheid;
- sorptie, afhankelijk van de K_{ow} en het organische stofgehalte;
- vluchtigheid;

- biodegradatie;
- 2. Hoe is de geohydrologische situatie op de plaats van de verontreiniging?
 - op de bodem (bijvoorbeeld vuilstort);
 - in de bodem;
 - drijvend op het grondwater;
 - opgelost in het grondwater;
 - bij het oppervlaktewater;
 - bij waterwingebied;
 - stedelijk of landelijk gebied;
 - diepte grondwaterspiegel;
 - type grond - klei
 - veen
 - zand
 - ondoorlatende kleilaag aanwezig; op welke diepte;
 - hoe liggen de leidingen, sleufopvulling.
- 3. Hoe is de relatie met de waterleidingbuis
 - hoofd- of distributieleiding:
 - AC
 - beton
 - kunststof
 - gietijzer of staal
 - dienstleiding:
 - PVC
 - PE
 - staal of koper

Na de onderzoeksfasen moet men een voldoende beeld hebben van de situatie om te kunnen beoordelen of de situatie gevaarlijk is of niet; indien de situatie gevaarlijk is, moet men in staat zijn om het (reducerend) effect van te nemen maatregelen op het gevaar te kunnen beoordelen.

Indien sprake is van een ernstig geval van bodemverontreiniging valt aanpak in het kader van de Interimwet Bodemsanering te overwegen (contact opnemen met Provincie en/of Regionale Inspectie Milieuhygiëne).

In tabel 10-5 wordt weergegeven vanaf welke concentratieniveau's een situatie onder deze wet kan vallen en wanneer nader- of saneringsonderzoek uitgevoerd dient te worden. Deze tabel vormt slechts een onderdeel van het toetsingskader (zie Leidraad Bodemsanering).

Is deze evaluatie uitgevoerd, dan kunnen, in afwachting van een eventuele sanering, tijdelijke maatregelen genomen worden.

3e fase: sanering

Fase waarin maatregelen worden genomen. Deze fase wordt niet bereikt als uit de onderzoeksfase blijkt, dat de situatie ongevaarlijk is.

Mogelijke saneringsmaatregelen kunnen zijn: het vervangen van drinkwaterleidingen, het slaan van schermputten, het aanbrengen van folies en dergelijke bij de bodemverontreinigingsbron, gecombineerd met afpompen om verspreiding van verontreinigd grondwater tegen te gaan, of het verwijderen van de bodemverontreinigingsbron.

Tabel 10-5

Toetsingstabel, die gehanteerd wordt in de Interimwet Bodemsanering, voor de beoordeling van de concentratieniveau's van diverse verontreinigingen in de bodem*

Voorkomen in: Component/niveau	Grond (mg/kg droge stof)			Grondwater		
	A**	B	C	A**	B	C
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
naftaleen	0,1	5	50	0,2	7	30
alifatische chloor- (individueel)	0,1	5	50	1	10	50
alifatische chloor- (totaal)	0,1	7	70	1	15	70
chloorbenzenen (individueel)	0,05	1	10	0,02	0,5	2
chloorbenzenen (totaal)	0,05	2	20	0,02	1	5
EOCl (totaal)	0,1	8	80	1	15	70
benzine	20	100	800	10	40	150
minerale olie	100	1000	5000	20	200	600

* De concentraties dienen te worden beschouwd in samenhang met het gebruik van de bodem en de lokale verontreinigingssituatie

** A: referentie-waarde

B: nivo B is toetsingswaarde waarboven nader onderzoek gewenst is

C: nivo C is toetsingswaarde waarboven sanerings-onderzoek noodzakelijk is

Uit: leidraad bodemsanering, VROM 1983

VERANTWOORDING

Het onderzoeksproject "Invloed van bodemverontreinigingen en leidingmaterialen op de drinkwaterkwaliteit" werd evenredig gefinancierd door de VEWIN, het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM) en de Fabrikanten van Drinkwaterleidingbuizen van Kunststof, Asbest-cement en Beton.

Het onderzoek werd begeleid door de Technische Begeleidingsgroep Permeatie en de Stuurgroep Permeatie. De Technische Begeleidingsgroep heeft zich gericht op de directe begeleiding van het onderzoek; de Stuurgroep op de beleidsmatige aspecten en algehele voortgangscontrole.

De samenstelling van deze groepen is als volgt.

Technische Begeleidingsgroep Permeatie

- ir. J. Schilperoord (KIWA N.V.), voorzitter;
- ir. J. de Feijter (KIWA N.V.), secretaris;
- ir. J.W. Aeyelts Averink (Shell Internationale Research Mij);
- ir. C.G.E.M. van Beek (KIWA N.V.);
- dr. P. Benjamin (Draka-Polva B.V.);
- ir. W.F. Geene (Bonna-Vianen);
- ir. H.J. van 't Haaff (Eternit B.V.);
- drs. B.G. van der Heijden (Drinkwaterleiding Rotterdam);
- drs. W. van de Meent (KIWA N.V.);
- ir. J.B.H.J. Linders (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne);
- prof.dr. A.J. Staverman (Rijksuniversiteit Leiden);
- dr. T. Trouwborst (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer);

- drs. G. Veenendaal (KIWA N.V.);
- prof.dr.ir. A.K. van der Vegt (Technische Hogeschool Delft);
- dr. M.W. Vonk (KIWA N.V.).

Stuurgroep Permeatie

- Ir. P.J. Verkerk (Directie Drink- en Industriewatervoorziening van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer), voorzitter (tot 1 januari 1985);
- drs. W.E.M.C. Krul (Directie Drink- en Industriewatervoorziening van het Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer), voorzitter (vanaf 1 januari 1985);
- drs. G. Veenendaal (KIWA N.V.), secretaris;
- dr. P. Benjamin (DRAKA-POLVA B.V.) namens de industriële groepering;
- ir. J. Schilperoord (KIWA N.V.), voorzitter Technische Begeleidingsgroep Permeatie;
- ir. A.M. Stofberg (Waterleiding Maatschappij Gelderland) namens de VEWIN;
- ir. W.C. Wijntjes (Gemeentelijk Waterbedrijf Groningen) namens de VEWIN.

BIJLAGE I: FYSISCH CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN EEN
AANTAL ORGANISCHE VERBINDINGEN

I FYSISCH CHEMISCHE EIGENSCHAPPEN VAN EEN AANTAL ORGANISCHE VERBINDINGEN

I.1 Inleiding

In deze bijlage worden van een aantal organische verbindingen de maximale oplosbaarheid (S) in LDPE en HDPE (in gram organische verbinding per gram polymeer), de maximale oplosbaarheid in water ($C_w^{\max}$) en de maximale concentratie in de dampfase bij 20 °C ($C_d^{\max}$), deze laatste beide in milligram per liter.

De organische verbindingen zijn ingedeeld in groepen, namelijk aromaten (I-1), alkanen (I-2), alkenen (I-3), gechlloreerde aromaten (I-4), gechlloreerde alkanen en alkenen (I-5), ethers, ketonen en alcoholen (I-6), nitrobenzenen, anilines en chloorfenolen (I-7).

I.2 De oplosbaarheid in LDPE en HDPE

De oplosbaarheden S, van organische verbindingen in LDPE en HDPE zijn in het kader van het permeatie-onderzoek bepaald door middel van liquid-immersion experimenten. Hierbij wordt een stukje buis ondergedompeld in de zuivere organische vloeistof of in een afgesloten potje gebracht tesamen met de vaste organische verbinding.

Door regelmatig de massatoename van het stukje buis te bepalen wordt informatie verkregen over de hoeveelheid organische stof die oplost in het polymeer. Zodra de massa van het stukje buis niet meer toeneemt in de tijd, dat wil zeggen de evenwichtssituatie is bereikt, kan uit de massatoename de maximale oplosbaarheid bepaald worden.

I.3 De oplosbaarheid in water

De vermelde waarden van de oplosbaarheid in water zijn verzameld uit de literatuur. De oplosbaarheid is echter onder andere afhankelijk van:

- de temperatuur;
- het type water (met of zonder zout en dergelijke).

Dit betekent, dat de hier vermelde waarden als richtwaarden moeten worden beschouwd.

I.4 De maximale concentratie in de dampfase

De maximale dampspanning P_o is berekend met behulp van:

$$^{10} \log P_o = (- 0,2185 \frac{A}{T}) + B$$

waarin A = molaire verdampingswarmte;

B = stofconstante;

P_o = maximale dampspanning (in mm Hg);

T = temperatuur (K).

De waarden voor A en B zijn verkregen uit de literatuur.

De maximale concentratie in de dampfase is berekend uit de maximale dampspanning met behulp van:

$$C_d^{\max} = \frac{0,012 P_o \cdot M_w}{T}$$

waarin: $C_d^{\max}$ = maximale dampconcentratie (g.liter⁻¹)

P_o = maximale dampspanning (m bar)

M_w = molaire massa

T = temperatuur (k).

Tabel I-1 - Aromaten

Verbinding	Bruto formule	S _{LDPE} (g/g)	S _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
benzeen	C ₆ H ₆	0,105	0,070	1780	326
tolueen	C ₇ H ₈	0,116	0,076	515	111
styreen	C ₈ H ₈	-	-	300	29
o-xyleen	C ₈ H ₁₀	0,121	0,080	175	29
m-xyleen	C ₈ H ₁₀	0,118	0,079	190	35
p-xyleen	C ₈ H ₁₀	0,124	0,081	198	38
ethylbenzeen	C ₈ H ₁₀	0,101	0,068	152	41
1,2,3-trimethylbenzeen	C ₉ H ₁₂	-	-	-	8
1,2,4-trimethylbenzen	C ₉ H ₁₂	-	-	-	11
1,3,5-trimethylbenzeen	C ₉ H ₁₂	0,115	0,079	20	14
propylbenzeen	C ₉ H ₁₂	0,096	0,066	60	17
isopropylbenzeen	C ₉ H ₁₂	-	-	50	23
o-ethyltolueen	C ₉ H ₁₂	-	-	-	14
m-ethyltolueen	C ₉ H ₁₂	-	-	-	16
p-ethyltolueen	C ₉ H ₁₂	-	-	-	16
naphthaleen	C ₁₀ H ₈	-	-	30	0,4
isobutylbenzeen	C ₁₀ H ₁₄	-	-	17	8,9
p-isopropyltolueen	C ₁₀ H ₁₄	-	-	34	-
biphenyl	C ₁₂ H ₁₀	-	-	7,5	0,3
biphenylether	C ₁₂ H ₁₀ O	-	-	21,0	0,5
1,3,5-triethylbenzeen	C ₁₂ H ₁₈	-	-	7,0	-
antraceen	C ₁₄ H ₁₀	-	-	1,3	0,8
fenantreen	C ₁₄ H ₁₀	-	-	1,6	0,4
C ₉ H ₁₂ -isomeren : P _O varieert van ongeveer 1,7 tot 3,5 mbar					
C ₁₀ H ₁₄ -isomeren: P _O varieert van ongeveer 1,5 tot 2,4 mbar					

-: data niet bekend.

Tabel I-2 - Alkanen

Verbinding	Bruto form	S _{LDPE} (g/g)	S _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
methaan	CH ₄	-	-	24,4	*
ethaan	C ₂ H ₆	-	-	60,4	*
propaan	C ₃ H ₈	-	-	62,4	*
butaan	C ₄ H ₁₀	-	-	61,4	*
2-methylpropaan	C ₄ H ₁₀	-	-	49	*
cyclopentaaan	C ₅ H ₁₀	-	-	156,0	995
pentaaan	C ₅ H ₁₂	0,080	0,051	38,5	1700
iso-pentaaan	C ₅ H ₁₂	-	-	47,8	2065
2,2-dimethylpropaan	C ₅ H ₁₂	-	-	33,2	*
cyclohexaaan	C ₆ H ₁₂	0,132	0,079	55,0	356
hexaaan	C ₆ H ₁₄	0,082	0,053	9,5	566
2-methylpentaaan	C ₆ H ₁₄	-	-	13,8	785
3-methylpentaaan	C ₆ H ₁₄	-	-	12,8	703
2,2-dimethylbutaan	C ₆ H ₁₄	-	-	18,4	1240
cycloheptaaan	C ₇ H ₁₄	-	-	30,0	-
heptaaan	C ₇ H ₁₆	-	-	3,0	1920
2,4-dimethylpentaaan	C ₇ H ₁₆	-	-	4,1	407
cyclo-octaaan	C ₈ H ₁₆	-	-	7,9	-
octaaan	C ₈ H ₁₈	0,079	0,053	0,7	69
2,2,4-trimethylpentaaan	C ₈ H ₁₈	0,065	0,045	2,4	-
2,3-dimethylhexaaan	C ₈ H ₁₈	-	-	0,13	-
nonaan	C ₉ H ₂₀	-	-	0,45	24
C ₆ H ₁₄ -isomeren: P _O varieert van ongeveer 10 tot 350 mbar C ₇ H ₁₆ -isomeren: P _O varieert van ongeveer 43 tot 106 mbar C ₈ H ₁₈ -isomeren: P _O varieert van ongeveer 18 tot 33 mbar					

*: bij 20 °C een gas

-: data niet bekend

Tabel I-3 - Alkenen

Verbinding	Bruto formule	S _{LDPE} (g/g)	S _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
ethyn	C ₂ H ₂	-	-	-	*
etheen	C ₂ H ₄	-	-	131	*
propeen	C ₃ H ₆	-	-	200	*
1,2-butadieen	C ₄ H ₆	-	-	-	*
1,3-butadieen	C ₄ H ₆	-	-	-	*
buteen-1	C ₄ H ₈	-	-	222	-
2-methylproppeen	C ₄ H ₈	-	-	263	*
isopreen	C ₅ H ₈	-	-	-	1870
1,3-pentadieen	C ₅ H ₈	-	-	-	1260
1,4-pentadieen	C ₅ H ₈	-	-	-	2400
cyclopenteen	C ₅ H ₈	-	-	535	-
penteen-1	C ₅ H ₁₀	-	-	148	-
penteen-2	C ₅ H ₁₀	-	-	203	-
3-methyl-1-buteen	C ₅ H ₁₀	-	-	130	-
cyclohexeen	C ₆ H ₁₀	-	-	213	-
1-hexeen	C ₆ H ₁₂	-	-	50	613
2-methyl-1-penteen	C ₆ H ₁₂	-	-	78	-
4-methyl-1-penteen	C ₆ H ₁₂	-	-	48	-
cyclohepteen	C ₇ H ₁₂	-	-	66	-
2-hepteen (cis)	C ₇ H ₁₄	-	-	15	190
1-octeen	C ₈ H ₁₆	-	-	2,7	-
C ₇ H ₁₄ -ismeren: P _O varieert van ongeveer 39 tot 47 mbar					
C ₈ H ₁₆ -ismeren: P _O varieert van ongeveer 12 tot 22 mbar					

* Bij 20 °C een gas.

- data niet bekend

Tabel I-4 - Gechloreerde aromaten

Verbinding	Bruto formule	S _{LDPE} (g/g)	D _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
chloorbenzeen	C ₆ H ₅ Cl	0,136	0,092	500	58
1,2-dichloorbenzeen	C ₆ H ₄ Cl ₂	0,137	0,100	100	7,5
1,3-dichloorbenzeen	C ₆ H ₄ Cl ₂	0,167	0,115	123	14
1,4-dichloorbenzeen	C ₆ H ₄ Cl ₂	0,044	0,035	49	4,8
1,2,3-trichloorbenzeen	C ₆ H ₃ Cl ₃	0,042	0,034	12	-
1,2,4-trichloorbenzeen	C ₆ H ₃ Cl ₃	0,159	0,117	19	-
1,3,5-trichloorbenzeen	C ₆ H ₃ Cl ₃	0,044	0,036	5,8	-
1,2,3,4-tetrachloorbenzeen	C ₆ H ₂ Cl ₄	-	-	3,5	-
1,2,3,5-tetrachloorbenzeen	C ₆ H ₂ Cl ₄	-	-	2,4	-
1,2,4,5-tetrachloorbenzeen	C ₆ H ₂ Cl ₄	-	-	0,3	-
pentachloorbenzeen	C ₆ HCl ₅	0,007	0,005	0,24	0,08
hexachloorbenzeen	C ₆ Cl ₆	-	-	0,005	1,2.10 ⁻⁴
o-chloortolueen	C ₇ H ₇ Cl	0,144	0,097	-	19
m-chloortolueen	C ₇ H ₇ Cl	0,127	0,089	-	19
p-chloortolueen	C ₇ H ₇ Cl	0,128	0,089	-	18
α-chloortolueen	C ₇ H ₇ Cl	-	-	n.v.t.	12
α,α-dichloortolueen	C ₇ H ₆ Cl ₂	-	-	-	3,3
α,α,α-trichloortolueen	C ₇ H ₅ Cl ₃	0,104	0,091	-	-
1-chloor, 2-ethylbenzeen	C ₈ H ₉ Cl	-	-	-	10
1-chloor, 3-ethylbenzeen	C ₈ H ₉ Cl	-	-	-	9
1-chloor, 4-ethylbenzeen	C ₈ H ₉ Cl	-	-	-	8
2-chloorbiphenyl	C ₁₂ H ₉ Cl	-	-	5,8	-
3-chloorbiphenyl	C ₁₂ H ₉ Cl	-	-	3,3	-
4-chloorbiphenyl	C ₁₂ H ₉ Cl	-	-	0,8	-
4,4-dichloorbiphenyl	C ₁₂ H ₈ Cl ₂	-	-	0,062	-
D.D.E.	C ₁₄ H ₈ Cl ₄	-	-	0,040	-
D.D.T.	C ₁₄ H ₈ Cl ₅	-	-	0,031	3,5.10 ⁻⁶

-: data niet bekend

Tabel I-5 - Gechloreerde alkanen en alkenen

Verbinding	Bruto formule	S _{LDPE} (g/g)	S _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
dichloormethaan	CH ₂ Cl ₂	0,105	0,078	20000	1625
trichloormethaan	CHCl ₃	-	-	8000	1050
tetrachloormethaan	CCl ₄	0,281	0,174	800	760
1,2-dichlooretheen	C ₂ H ₂ Cl ₂	0,195	0,126	800	1035
trichlooretheen	C ₂ HCl ₃	-	-	1100	411
tetrachlooretheen	C ₂ Cl ₄	0,295	0,185	150	125
chloorethaan	C ₂ H ₅ Cl	-	-	5700	-
1,2-dichloorethaan	C ₂ H ₄ Cl ₂	0,058	0,046	8700	334
1,1,1-trichloorethaan	C ₂ H ₃ Cl ₃	0,158	0,108	4400	700
1,1,2-trichloorethaan	C ₂ H ₃ Cl ₃	-	-	4500	139
1,1,2,2,-tetrachloorethaan	C ₂ H ₂ Cl ₄	0,105	0,084	2900	46
pentachloorethaan	C ₂ HCl ₅	-	-	-	37
hexachloorethaan	C ₂ Cl ₆	-	-	-	17
n-chloorpropaan	C ₃ H ₇ Cl	-	-	2300 ¹⁾	1190
2-chloorpropaan	C ₃ H ₇ Cl	-	-	3400 ¹⁾	1425
1,2-dichloorpropaan	C ₃ H ₆ Cl ₂	0,075	0,056	2700	246
1,3-dichloorpropaan	C ₃ H ₆ Cl ₂	-	-	2870 ²⁾	-
1,2,3-trichloorpropaan	C ₃ H ₅ Cl ₃	-	-	-	17
n-chloorbutaan	C ₄ H ₉ Cl	-	-	660 ¹⁾	410
1,2-dichloorbutaan	C ₄ H ₈ Cl ₂	-	-	-	107
1,2,3-trichloorbutaan	C ₄ H ₇ Cl ₃	-	-	-	30
lindaan (γ)	C ₆ H ₆ Cl ₆	-	-	10	-
Aldrin	C ₁₂ H ₈ Cl ₆	-	-	0,01	4,5.10 ⁻⁴
Dieldrin	C ₁₂ H ₈ Cl ₆ O	-	-	0,1	3,6.10 ⁻⁶

—: data moet bekend

¹⁾: geldt bij 12 °C

²⁾: geldt bij 30 °C

Tabel I-6 - Ethers, ketonen en alcoholen

Verbinding	Bruto formule	S _{LDPE} (g/g)	S _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
di-ethylether	C ₄ H ₁₀ O	-	-	69000	1800
di-propylether	C ₆ H ₁₄ O	-	-	-	300
di-isopropylether	C ₆ H ₁₄ O	0,055	0,039	9000	712
di-(chloorisopropyl)ether	C ₆ H ₁₂ OC1	-	-	1700	-
di-butylether	C ₈ H ₁₈ O	-	-	300	35
aceton	C ₃ H ₆ O	-	-	∞	520
methylethylketon	C ₄ H ₈ O	0,019	0,018	267000	302
2-pentanon	C ₅ H ₁₀ O	-	-	60000	56
ethylisobutylketon	C ₆ H ₁₂ O	-	-	17000	33
2-heptanon	C ₇ H ₁₄ O	-	-	4300	17
methoxybenzeen	C ₇ H ₈ O	-	-	-	18
ethanol	C ₂ H ₅ OH	0,001	0,002	∞	111
1-propanol	C ₃ H ₇ OH	-	-	-	47
1-butanol	C ₄ H ₉ OH	-	-	77000	18
isobutanol	C ₄ H ₉ OH	-	-	95000	41
1-pentanol	C ₅ H ₁₁ OH	-	-	26000	14
3-methyl-1-butanol	C ₅ H ₁₁ OH	-	-	27500	-
1-hexanol	C ₆ H ₁₃ OH	0,004	0,004	5900	5,5
cyclohexanol	C ₆ H ₁₁ OH	-	-	36000	5,3
2-ethyl-1-hexanol	C ₈ H ₁₇ OH	-	-	1000	0,4

—: data niet bekend

Tabel I-7 - Nitrobenzenen, anilines en chloorfenolen

Verbinding	Bruto formule	S _{LDPE} (g/g)	S _{HDPE} (g/g)	C _w ^{max} (mg.liter ⁻¹)	C _d ^{max} (mg.liter ⁻¹)
nitrobenzeen	C ₆ H ₅ NO ₂	0,018	0,017	1900	1,5
o-dinitrobenzeen	C ₆ H ₄ N ₂ O ₄	-	-	100	-
m-dinitrobenzeen	C ₆ H ₄ N ₂ O ₄	-	-	469	-
p-dinitrobenzeen	C ₆ H ₄ N ₂ O ₄	-	-	-	-
2-chlooraniline	C ₆ H ₆ NC1	0,023	0,022	-	< 0,5
3-chlooraniline	C ₆ H ₆ NC1	0,011	0,011	-	105
4-chlooraniline	C ₆ H ₆ NC1	0,004	0,003	-	0,11
o-nitroaniline	C ₆ H ₆ N ₂ O ₂	-	-	1260	< 0,6
m-nitroaniline	C ₆ H ₆ N ₂ O ₂	0,001	0,002	890	-
p-nitroaniline	C ₆ H ₆ N ₂ O ₂	-	-	800	0,011
aniline	C ₆ H ₇ N	0,006	0,005	34000	5,0
o-nitrotolueen	C ₇ H ₇ NO ₂	-	-	652	0,73
m-nitrotolueen	C ₇ H ₇ NO ₂	-	-	498	0,73
p-nitrotolueen	C ₇ H ₇ NO ₂	-	-	442	0,73
n-methylacetanilide	C ₉ H ₁₁ NO	-	-	-	0,25
ethylcarbanilaat	C ₉ H ₁₁ NO ₂	-	-	-	3,8.10 ⁻³
fenol	C ₆ H ₅ OH	0,002	0,001	82000	0,98
p-chloorfenol	C ₆ H ₄ OHC1	0,004	0,004	27000	0,69
2,4-dichloorfenol	C ₆ H ₃ OHC1 ₂	-	-	4500	-
2,3,5-trichloorfenol	C ₆ H ₂ OHC1 ₃	0,007	0,006	-	-
2,4,6-trichloorfenol	C ₆ H ₂ OHC1 ₃	0,014	0,012	800	-
2,4,5-trichloorfenol	C ₆ H ₂ OHC1 ₃	-	-	1190	-
2,3,5,6-tetrachloorfenol	C ₆ HOHC1 ₄	0,003	0,002	-	-
2,3,4,6-tetrachloorfenol	C ₆ HOHC1 ₄	-	-	-	-
pentachloorfenol	C ₆ OHC1 ₅	0,001	0,001	14	1,1.10 ⁻³

-: data niet bekend