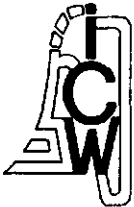


NN31545.1654

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

ICW nota 1654

november 1985



nota

— instituut voor cultuurtechniek en waterhuishouding, wageningen —

TRANSPORT VAN VLUCHTIGE AROMATEN IN DE BODEM ONDER
KRUIPRUIMTEN

dr. J. Hoeks

Dit rapport is samengesteld in opdracht van Heidemij
Adviesbureau B.V. te Arnhem en heeft betrekking op
het bodemsaneringsproject 'Old Ruitenborgh' in
Hengelo (O)

CENTRALE LANDBOUWCATALOGUS



0000 0130 0462

Nota's van het Instituut zijn in principe interne communicatie-
middelen, dus geen officiële publikaties.

Hun inhoud varieert sterk en kan zowel betrekking hebben op een
eenvoudige weergave van cijferreeksen, als op een concluderende
discussie van onderzoeksresultaten. In de meeste gevallen zullen
de conclusies echter van voorlopige aard zijn omdat het onderzoek
nog niet is afgesloten.

Bepaalde nota's komen niet voor verspreiding buiten het Instituut
in aanmerking

17 FEB. 1986

J.M. 1985 *

I N H O U D

	Blz.
1. INLEIDING	1
2. MODELLEN VOOR GASTRANSPORT IN DE BODEM	1
2.1. Algemene transportvergelijkingen	1
2.2. Constante afbraaksnelheid	2
2.3. Eerste-orde afbraak	4
2.4. Geen afbraak	5
3. SCHATTING VAN DE DIFFUSIECOËFFICIËNTEN	6
4. AFBRAAK VAN AROMATEN	8
5. BEREKENING VAN AROMAATCONCENTRATIES IN DE BODEM EN DE KRUIPRUIMTE	10
6. CONCLUSIES	14
LITERATUUR	15
BIJLAGE	

1. INLEIDING

In opdracht van Heidemij Adviesbureau BV is onderzoek verricht naar het transport van vluchtige aromaten in de bodem onder kruipruimten. Dit onderzoek is uitgevoerd in het kader van een saneringsonderzoek met betrekking tot de woonwijk 'Old Ruitenborgh', Hengelo (O), die gebouwd is op een voormalige stortplaats.

De probleemstelling voor dit onderzoek komt voort uit de vraag in hoeverre het vrijkomen van aromatische gasvormige stoffen vanuit de bodem naar de (open) kruipruimte teruggedrongen of zelfs teniet gedaan kan worden door middel van een verlaging van de grondwaterstand tot respectievelijk 0,50 meter en 1,00 meter beneden de kruipruimtebodem.

Bij de berekeningen is gebruik gemaakt van eerder ontwikkelde rekenmodellen (zie HOEKS, 1984). Invoergegevens met betrekking tot de bodemopbouw en gemiddeld voorkomende vochtcondities, welke bepalend zijn voor de schatting van diffusiecoëfficiënten in de bodem, werden aangeleverd door Heidemij Adviesbureau B.V. Hetzelfde geldt ook voor de uitgangskoncentraties op grondwaterniveau.

2. MODELLEN VOOR GASTRANSPORT IN DE BODEM

2.1. Algemene transportvergelijkingen

De diffusie van vluchtige aromaten via de gasfase in een niet-verzadigde bodem kan worden beschreven met de wet van Fick (één-dimensionaal; convectie-transport is verwaarloosbaar):

$$F = - D_s \frac{\delta C}{\delta x} \quad (1)$$

waarin: F = diffusieflux $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$
 D_s = diffusiecoëfficiënt voor het desbetreffende gas in de bodem $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$
 C = concentratie in de gasfase $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$
 x = transportafstand (cm)

Per volume-eenheid grond kan nu de volgende stofbalans worden opgezet (zie ook HOEKS, 1981):

$$\epsilon_g \frac{\delta C}{\delta t} + \frac{\delta q_s}{\delta t} + \frac{\delta q_w}{\delta t} = D_s \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - \alpha \quad (2)$$

waarin: ϵ_g = gasgevuld poriënvolume $(\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$
 q_s = hoeveelheid gas geadsorbeerd aan de vaste fase $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$
 q_w = hoeveelheid gas opgelost in de waterfase $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3})$
 α = snelheid waarmee het gas wordt afgebroken door micro-organismen $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$
 t = tijd (s)

Bij transport van gassen in de bodem wordt relatief snel (meestal binnen enkele dagen tot weken) een stationaire situatie bereikt. Ook voor het hiervoor beschreven probleem (transport van vluchtige aromaten) kan worden volstaan met een beschrijving van de stationaire toestand.

In dat geval is $\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta q_s}{\delta t} = \frac{\delta q_w}{\delta t} = 0$, waarmee vergelijking (2) wordt vereenvoudigd tot:

$$D_s \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = \alpha \quad (3)$$

Adsorptie aan de vaste fase (q_s) en het oplossen in het bodemvocht (q_w) hebben dus geen effect op de stationaire toestand die uiteindelijk wordt bereikt. Wel hebben deze processen tot gevolg dat het langer zal duren voor de stationaire toestand wordt bereikt.

2.2. Constante afbraaksnelheid

Indien de diffusiecoëfficiënt (D_s) en de afbraaksnelheid (α) constant worden verondersteld met de diepte in het profiel, dan ontstaat een eenvoudige oplossing voor de randvoorwaarden:

$$x = 0, C = 0 \quad C = \frac{\alpha}{2D_s} x^2 + \frac{x}{L} (C_0 - \frac{\alpha}{2D_s} L^2) \quad (4)$$

$$x = L, C = C_0$$

waarin: L = dikte van de beschouwde laag (cm)

C_0 = concentratie op diepte $x = L$ (mg.cm^{-3})

Is echter de afbraaksnelheid (α) zo groot dat reeds dieper in het profiel de concentratie $C = 0$ wordt bereikt, dan gelden de bovengenoemde randvoorwaarden niet. In dat geval wordt de oplossing van de differentiaalvergelijking (vgl. (3)) met bijbehorende randvoorwaarden:

$$x = a, C = 0$$

$$x = a, \frac{\delta C}{\delta x} = 0 \quad C = \frac{\alpha}{2D_s} (x^2 - L^2) - \frac{\alpha a}{D_s} (x-L) + C_0 \quad (5)$$

met:

$$a = L - \sqrt{\frac{2D_s C_0}{\alpha}} \quad (6)$$

Met vergelijking (6) kan dus worden berekend hoe dik de 'benzeenvrije' zone in de bovengrond is als functie van de dikte van de beschouwde laag (L), de diffusiecoëfficiënt (D_s), de concentratie op diepte L cm (C_0) en de afbraaksnelheid (α).

De hiervoor afgeleide vergelijkingen hebben betrekking op één homogene laag. Uiteraard varieert onder praktijkomstandigheden het vochtgehalte met de diepte. In feite kan dan niet met een constante diffusiecoëfficiënt worden gerekend. Berekeningen voor een heterogeen bodemprofiel vereisen het gebruik van numerieke computermodellen. De noodzakelijke invoergegevens met betrekking tot de vocht- en luchthuishouding als functie van de diepte moeten dan uiteraard nauwkeurig bekend zijn.

De differentiaalvergelijking (vgl. 3) is overigens ook nog analytisch oplosbaar voor een twee-lagen systeem, als wordt aangenomen dat de diffusiecoëfficiënt (D_s) en de afbraaksnelheid (α) per laag constant zijn. Dit leidt tot de volgende oplossingen:

- randvoorwaarden: $x = 0$, $C = 0$

$$x = x_1, D_1 \left(\frac{\delta C}{\delta x} \right)_1 = D_2 \left(\frac{\delta C}{\delta x} \right)_2$$

$$x = x_1, C_1 = C_2$$

$$x = L, C = C_0$$

- bovenlaag (= laag 1):

$$C = \frac{\alpha_1}{2D_1} x^2 + \frac{D_2 x}{D_1 L + (D_2 - D_1)x_1} \left[C_0 - \frac{\alpha_2}{2D_2} L^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1}{D_1} - \frac{\alpha_2}{D_2} \right) x_1^2 - \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{D_1} \right) x_1^2 \right] + \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{D_1} \right) x_1 \cdot x \quad (7)$$

- onderlaag (= laag 2):

$$C = \frac{\alpha_2}{2D_2} x^2 + \frac{D_1(x-x_1) + D_2 x_1}{D_1 L + (D_2 - D_1)x_1} \left[C_0 - \frac{\alpha_2}{2D_2} L^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1}{D_1} - \frac{\alpha_2}{D_2} \right) x_1^2 - \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{D_1} \right) x_1^2 \right] + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_1}{D_1} - \frac{\alpha_2}{D_2} \right) x_1^2 + \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{D_1} \right) x_1^2 \quad (8)$$

waarin: x_1 = diepte van de grens tussen laag 1 en laag 2 (cm)

D_1, D_2 = diffusiecoëfficiënten in laag 1 respectievelijk laag 2 $(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$

α_1, α_2 = afbraaksnelheden in laag 1 respectievelijk laag 2 $(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1})$

Door de beschouwde laag L op te delen in twee homogene lagen kan enigszins tegemoet worden gekomen aan het feit dat dieper in het profiel het vochtgehalte kan toenemen waardoor de diffusiecoëfficiënt afneemt.

2.3. Eerste-orde afbraak

In het voorgaande is de afbraaksnelheid (α) constant verondersteld. Naar alle waarschijnlijkheid is dit wel aannemelijk voor afbraak in de onverzadigde zone waarbij voortdurend het substraat via de gasfase wordt toegevoerd.

Vooraf in situaties waar een eindige hoeveelheid substraat voorhanden is en geen toevoer van elders plaats vindt, wordt veelal gebruik

gemaakt van een eerste-orde-afbraak reactie. In dat geval is de afbraak-snelheid $\alpha = kC$ en gaat vergelijking (3) over in:

$$D_s \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} = kC \quad (9)$$

Integratie levert nu de volgende oplossing met bijbehorende randvoorwaarden:

$$x = 0, C = 0$$

$$x = L, C = C_0 \quad C = C_0 \left[\frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{e^{\lambda L} - e^{-\lambda L}} \right] \quad (10)$$

met

$$\lambda = \sqrt{\frac{k}{D_s}} \quad \text{en} \quad k = \frac{\ln 2}{t_{\frac{1}{2}}}$$

waarin: k = afbraaksnelheidscoëfficiënt (s^{-1})

$t_{\frac{1}{2}}$ = halfwaarde tijd (s)

Voor het systeem met twee lagen wordt verwezen naar de oplossing zoals gegeven door HOEKS (1984).

2.4. Geen afbraak

Onder ongunstige omstandigheden is het denkbaar dat de afbraak te verwaarlozen is. In principe zou dit kunnen optreden bij ongunstige voedingscondities in de bodem (lage pH, lage stikstof- en fosfaat-beschikbaarheid). Ook onder ongunstige zuurstofcondities zou de afbraak kunnen stagneren. Het is bekend dat onder aërobe omstandigheden aromaten goed worden afgebroken. Niettemin kan tijdelijk, zolang de bacteriepopulatie nog niet is geïmigreerd aan het substraat, de afbraaksnelheid zeer gering zijn.

Voor het geval, dat geen afbraak optreedt ($\alpha = 0$) gaan de vergelijkingen (4), (7) en (8) over in:

$$\text{- systeem met één laag : } C = \frac{x}{L} C_0 \quad (11)$$

- systeem met twee lagen:

$$\text{a. bovenlaag (laag 1) : } C = \frac{D_2 x}{D_1 L + (D_2 - D_1) x_1} C_0 \quad (12)$$

$$\text{b. onderlaag (laag 2) : } C = \frac{D_1 (x - x_1) + D_2 x_1}{D_1 L + (D_2 - D_1) x_1} C_0 \quad (13)$$

Met deze drie vergelijkingen kan dus de meest ongunstige situatie, waarbij in het geheel geen afbraak optreedt, worden berekend. Bij deze situatie is tevens de flux naar het bodemoppervlak maximaal. Zodra afbraak optreedt in de bodem zal deze flux afnemen.

3. SCHATTING VAN DE DIFFUSIECOËFFICIENTEN

De diffusiecoëfficiënten van een gas in de bodem kunnen volgens BAKKER (1978), geciteerd door HOEKS en RIJTEMA (1982), worden berekend als:

$$D_s = a D_o \varepsilon_g^b \quad (14)$$

waarin: D_o = diffusiecoëfficiënt van het desbetreffende gas in lucht
($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)

a, b = constanten (afhankelijk van de structuur van de grond)

Voor de situatie met betrekking tot 'Old Ruitenborgh' in Hengelo (0) heeft het Heidemij Adviesbureau de voorkomende bodemprofielen geschematiseerd tot een 9-tal profielen, waarbij het hoofdbestanddeel in de meeste gevallen zand is met bijmengingen van leem, puin of afval. Daarbij is een schatting gemaakt van de gemiddeld voorkomende luchtgehalten als functie van de in te stellen grondwaterstand (zie bijlage 1). De aangenomen grondwaterstanden van respectievelijk 1,00 en 2,00 meter beneden de kruipruimtebodem bleken naderhand niet realiseerbaar, vandaar dat bij de berekeningen is uitgegaan van grondwaterstanden van 0,50 en 1,00 meter beneden de kruipruimtebodem.

De in bijlage 1 genoemde luchtgehalten variëren van 4-11 vol. % (gem. 6 vol. %) voor een grondwaterstand van 1,00 meter minus kruipruimtebodem. Bij een grondwaterstand van 2,00 meter diepte varieert dit van 8-25 vol. % (gem. 15 vol. %) voor de bovenlaag en van 4-17 vol. % (gem. 10 vol. %) voor de onderlaag. De luchtgehalten bij een grondwaterstand

van 0,50 meter diepte zijn niet gegeven. De volgende schattingen zijn aangehouden. Bij een ondiepe ontwatering tot 50 cm beneden de kruipruimtebodan varieert het luchtgehalte van 2 tot 10 vol. % met een gemiddelde van 6 vol. %. Bij een diepere ontwatering tot 100 cm beneden de kruipruimtebodan varieert het luchtgehalte in de bovenste laag (0-50 cm) tussen 5 en 15 vol. % met een gemiddelde van 10 vol. % en in de onderste laag (50-100 cm) tussen 2-8 vol. % met een gemiddelde van 5 vol. %.

In overleg met Bakker (Pers. Med., 1985) is aangenomen, dat voor alle bodemprofielen, zoals gegeven in bijlage 1, dezelfde constanten a en b gebruikt kunnen worden. Daarvoor zijn de waarden gekozen, zoals deze zijn vastgesteld voor zandgronden met enkelvoudige korrelstructuren. Invulling in vergelijking (14) geeft:

$$D_s = 1,5 D_o \varepsilon_g^{3,0} \quad (15)$$

De diffusiecoëfficiënt (D_o) voor benzeen in lucht bedraagt ongeveer $0,100 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ bij 38°C (REID et al., 1977). Het effect van de temperatuur op de diffusiecoëfficiënt kan worden beschreven met de vergelijking:

$$D_T = D_{T_o} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1,75} \quad (16)$$

waarin: T, T_o = temperatuur respectievelijk referentietemperatuur ($^\circ\text{K}$)

Bij een temperatuur van 20°C bedraagt de diffusiecoëfficiënt voor benzeen in lucht dan $0,090 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en bij 10°C is dit $0,085 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Voor toluen en xylenen zijn geen gegevens met betrekking tot de diffusiecoëfficiënt beschikbaar. Bij de berekeningen is de diffusiecoëfficiënt voor deze stoffen gelijk gesteld aan die voor benzeen (zie tabel 1).

Uit deze gegevens blijkt wel dat de diffusiecoëfficiënt snel toeneemt bij hogere luchtgehalten. Zo bedraagt de diffusiecoëfficiënt voor 15 vol. % lucht al $42,9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ en voor 20 vol. % $102 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Een 'worst case' benadering is daarom eveneens doorgerekend voor een uniform luchtgehalte van 20 vol. %.

Tabel 1. Schatting van de diffusiecoëfficiënten voor benzeen in de bodem bij 10°C

Omschrijving	Laagdikte (cm)	Luchtgehalte (ϵ_g) (vol. %)	Diffusiecoëfficiënt (D_s) ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Ondiepe ontwatering (h = 50 cm-m.v.)	0- 50	6	$2,8 \times 10^{-5}$
Diepe ontwatering (h = 100 cm-m.v.)	0- 50 50-100	10 5	$12,7 \times 10^{-5}$ $1,6 \times 10^{-5}$

4. AFBRAAK VAN AROMATEN

Zoals eerder beschreven (HOEKS, 1984) kan voor de situatie in de onverzadigde zone, waar het substraat wordt aangevoerd via de gasfase, het afbraakproces waarschijnlijk het best beschreven worden door een constante afbraaksnelheid aan te nemen zolang de substraatconcentratie in de gasfase niet limiterend is ($C > 0$). Op grond van laboratorium-experimenten kan worden geschat, dat in niet-bemeste zandgronden de afbraak van aromaten in de orde van $5 \times 10^{-5} \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ (20°C) ligt. Bij bemesting ligt deze waarde minimaal een factor 10 hoger.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor bodems onder kruipruimten. Bij goed geventileerde kruipruimten zal de aeratie van de bodem ruim voldoende zijn voor een goede aërobe afbraak van de aromaten. Dit blijkt uit de volgende beschouwing. De diffusiecoëfficiënt in lucht is voor zuurstof ruim twee keer zo groot als voor benzeen. Voorts is de concentratiegradiënt voor zuurstof veel groter dan voor benzeen, namelijk in de orde van $2,8 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-4}$ tegen $0,00003 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-4}$ voor benzeen (d.w.z. ca. 10^5 keer groter). Dit wordt vooral veroorzaakt door de lage benzeenconcentratie op grondwaterniveau. Heidemij Adviesbureau B.V. heeft uit de beschikbare gegevens een benzeenconcentratie in de gasfase berekend van $3 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ($3 \mu\text{g} \cdot \ell^{-1}$).

De zuurstofflux in de bodem is dus ruim 10^5 keer groter dan de benzeenflux. Dit betekent dat zelfs bij niet-geventileerde kruipruimten, waarbij de zuurstof in de bodem moet worden aangevoerd vanuit de open grond naast de huizen, de zuurstofflux nog groot genoeg blijft om anaërobie als gevolg van de afbraak van aromaten te voorkomen.

De overige omstandigheden, welke voor microbiële afbraakprocessen belangrijk zijn, betreffen de zuurgraad, de beschikbaarheid van nutriënten, de vochthuishouding en de temperatuur. De zuurgraad van de bodemonsters is gunstig voor bacterie-activiteit. Het merendeel van de onderzochte bodemonsters heeft een pH-KCl van 6,75-7,50. Over de beschikbaarheid van nutriënten zijn geen gegevens voorhanden. Op basis van lutumgehalte (3-6%) en organische stofgehalte (1-4%) is de adsorptiecapaciteit (CEC) berekend op 2-7 meq per 100 g grond. Aangezien geen toevoer van nutriënten door bemesting of atmosferische depositie plaats vindt in kruipruimten, moet worden aangenomen dat de nutriëntenvoorziening gering is en afhankelijk is van de verwerking van mineralen en de mineralisatie van organische stof in de bodem. Overigens mag in gronden met 1-4% organische stof in het algemeen toch wel een redelijke bacterie-activiteit worden verwacht. De beschikbaarheid van vocht zal geen limiterende factor zijn voor de bacterie-activiteit bij grondwaterstanden van 50-100 cm diepte.

Op grond van het bovenstaande is een schatting van de afbraaksnelheden gemaakt (zie tabel 2), waarbij de onderlinge verhoudingen in de afbraaksnelheden tussen benzeen, toluen en xyleen zijn gebaseerd op de onderlinge verhoudingen in oplosbaarheid.

Tabel 2. Schatting van de afbraaksnelheid van aromaten in de bodem onder kruipruimten in 'Old Ruitenborgh' bij 10°C

Component	Geschatte afbraaksnelheid ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	'beste schatting'	'pessimistische schatting'	'worst case'
benzeen	50×10^{-7}	5×10^{-7}	0
tolueen	15×10^{-7}	$1,5 \times 10^{-7}$	0
xyleen	10×10^{-7}	1×10^{-7}	0

5. BEREKENING VAN AROMAATCONCENTRATIES IN DE BODEM EN DE KRUIPRUIMTE

Met behulp van vergelijking (6) kan in eerste instantie een schatting worden gemaakt van de 'benzeenvrije' zone in de bodem. In de meest ongunstige situatie, dat wil zeggen bij een ontwatering van slechts 50 cm diepte, een hoge diffusiecoëfficiënt van $102 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ($\epsilon_g = 0,20$) en een zeer lage afbraaksnelheid van $1 \times 10^{-7} \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ bedraagt de 'benzeenvrije' zone ruim 42 cm. Dit betekent dat zelfs onder deze ongunstige omstandigheden de naar boven diffunderende benzeen geheel wordt afgebroken in een bodemlaag van slechts 8 cm. De reden hiervoor is dat, ondanks de hoge diffusiecoëfficiënt, de benzeenflux zeer klein blijft als gevolg van de lage concentratie op grondwaterniveau ($C_0 = 3 \times 10^{-3} \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$). Pas bij een 100 x lagere afbraaksnelheid zou een situatie ontstaan, waarbij de omhoog diffunderende benzeen niet meer geheel kan worden afgebroken in een laag ter dikte van 50 cm.

De dikte van de 'benzeenvrije' zone in de bodem is berekend als functie van de diffusiecoëfficiënt en de afbraaksnelheid. Enkele resultaten zijn weergegeven in tabel 3.

Tabel 3. Berekening van de 'benzeenvrije' zone in de bodem

Situatie	D_s $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	α $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$	Dikte 'benzeenvrije' zone cm
Ondiepe ontwatering (h = 50 cm-m.v.)	$2,8 \times 10^{-5}$	50×10^{-7}	49,8
		5×10^{-7}	49,4
		1×10^{-7}	48,7
		0	0
		102×10^{-5}	50×10^{-7}
	5×10^{-7}	46,5	
	1×10^{-7}	42,2	
		0	0
Diepe ontwatering (h = 100 cm-m.v.)	$1,6 \times 10^{-5}$	50×10^{-7}	99,9
		5×10^{-7}	99,6
		1×10^{-7}	99,0
		0	0
		102×10^{-5}	50×10^{-7}
	5×10^{-7}	96,5	
	1×10^{-7}	92,2	
		0	0

Uit deze tabel blijkt, dat zodra enige afbraak wordt verondersteld, de omhoog diffunderende benzeen binnen 10 cm vanaf de grondwaterspiegel geheel is afgebroken. Voor een pessimistische schatting van de afbraaksnelheid ($\alpha = 1 \times 10^{-7} \text{ mg.cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) en een grote diffusieflux ($D_s = 102 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) is het concentratieverloop weergegeven in fig. 1. In deze situatie zal er dus geen benzeen in de kruipruimte terecht komen. Zelfs bij een 10 x lagere afbraaksnelheid ($\alpha = 1 \times 10^{-8} \text{ mg.cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) bereikt de benzeen de kruipruimte nog niet.

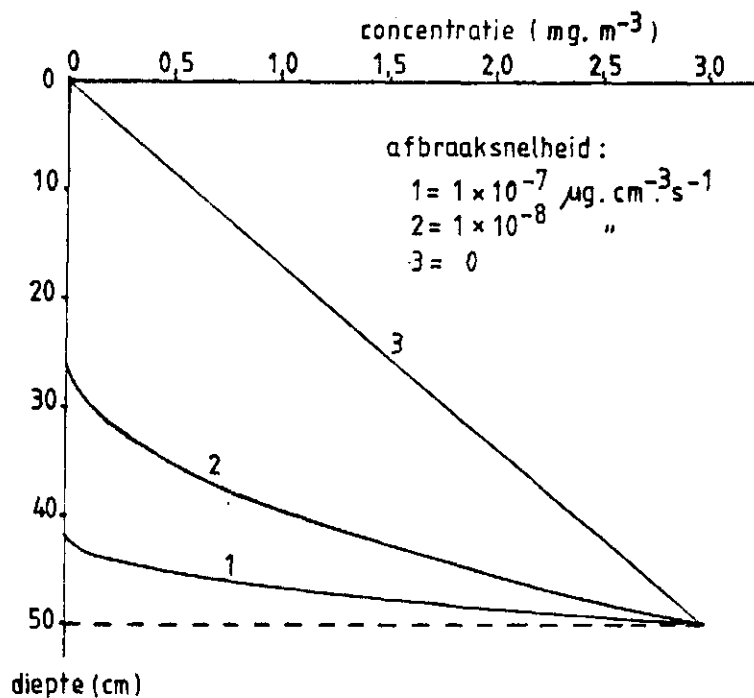


Fig. 1. Benzeenconcentraties in de bodemlucht (in mg.m^{-3}), berekend voor een ontwateringsdiepte van 50 cm met een relatief hoge diffusiecoëfficiënt ($D_s = 102 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\epsilon_g = 0,20$) en relatief zeer lage afbraaksnelheden ($\alpha = 1 \times 10^{-7}$ resp. $1 \times 10^{-8} \mu\text{g.cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$). Ter vergelijking zijn ook de concentraties berekend voor de situatie zonder afbraak

Aangezien bij een ontwateringsdiepte van 50 cm geen benzeen in de kruipruimte terecht komt, zal dit bij een ontwateringsdiepte van 100 cm uiteraard ook niet gebeuren. In dat geval is de benzeenvrije zone nog dikker, zoals blijkt uit tabel 3.

Het voorgaande betekent, dat er alleen benzeen in de kruipruimte terecht kan komen, als wordt uitgegaan van de 'worst case' benadering dat wil zeggen er vindt in het geheel geen afbraak plaats. De daarbij behorende concentratieprofielen zijn weergegeven in fig. 2 voor twee ontwateringsdiepten van 50 respectievelijk 100 cm diepte. Voor deze berekening zijn de diffusiecoëfficiënten gebruikt, zoals deze zijn gegeven in tabel 1. De concentratie aan het bodemoppervlak is hierbij gelijk nul gesteld, dat wil zeggen de kruipruimte is zeer goed geventileerd. In dat geval is de benzeenflux naar de kruipruimte maximaal, namelijk $1,45 \text{ g.m}^{-2}.\text{dag}^{-1}$ bij een ontwateringsdiepte van 50 cm en $0,74 \text{ µg.m}^{-2}.\text{dag}^{-1}$ bij een ontwateringsdiepte van 100 cm. Voor de eerder

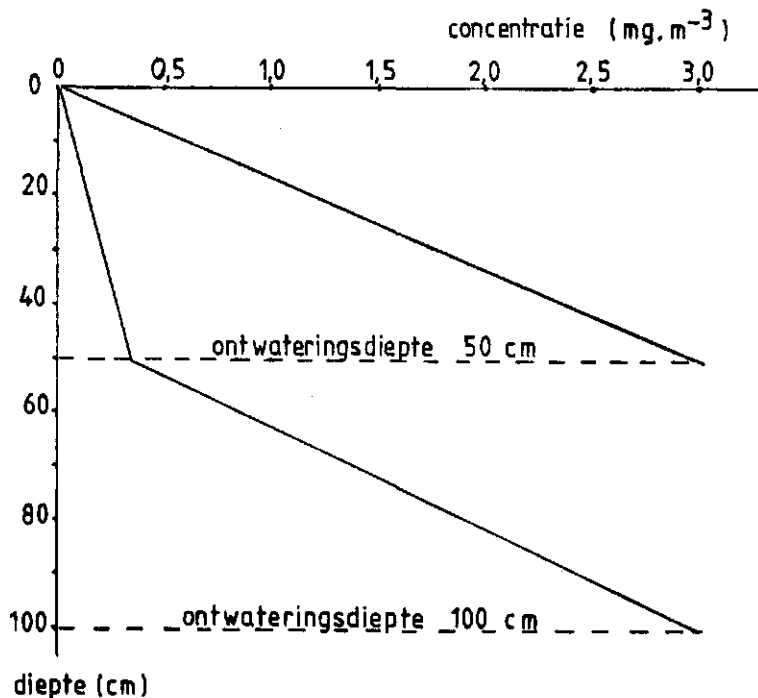


Fig. 2. Benzeenconcentraties in de bodemlucht (in mg.m^{-3}) voor de 'worst case' situatie zonder afbraak als functie van de ontwateringsdiepte, berekend met de diffusiecoëfficiënten zoals gegeven in tabel 1

veronderstelde situatie met een zeer hoge diffusiecoëfficiënt ($D_s = 102 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $\epsilon_g = 0,20$) zou de flux $52,9 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dag}^{-1}$ bedragen bij een ontwateringsdiepte van 50 cm en $26,4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dag}^{-1}$ bij een ontwateringsdiepte van 100 cm. De benzeenconcentratie in de lucht in de kruipruimte is sterk afhankelijk van de ventilatiemogelijkheden, welke op hun beurt weer afhankelijk zijn van de weersomstandigheden. In tabel 4 zijn een aantal mogelijkheden onderscheiden: geen ventilatie, verversing 2 x per dag, verversing 5 x per dag en verversing 20 x per dag. De hoogte van de kruipruimte is daarbij aangehouden op 50 cm. Bedacht moet worden dat deze concentraties alleen gelden voor de situatie waarbij in het geheel geen afbraak in de bodem optreedt, hetgeen niet erg waarschijnlijk is. Zodra sprake is van afbraak is de benzeenflux naar het oppervlak nihil en is de concentratie in de kruipruimte dus nul.

Tabel 4. Benzeenconcentraties in de kruipruimtelucht, berekend voor een 'worst case' situatie zonder afbraak

Benzeenflux naar kruipruimte ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{dag}^{-1}$)	Ventilatie kruipruimte (aantal keren verversing per dag)	Benzeenconcentratie in kruipruimte ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)
0,75	2 x	0,75
	5 x	0,30
	20 x	0,08
1,50	2 x	1,50
	5 x	0,60
	20 x	0,15
5,0	2 x	5
	5 x	2
	20 x	0,5
10,0	2 x	10
	5 x	4
	20 x	1
25,0	2 x	25
	5 x	10
	20 x	2,5
50,0	2 x	50
	5 x	20
	20 x	5
afnemend tot nul	geen ventilatie	>1000

Als de kruipruimte volledig gasdicht is en in het geheel niet geventileerd is dan kan in principe de concentratie oplopen tot deze maximaal gelijk is aan die op grondwaterniveau ($3 \mu\text{g}.\ell^{-1}$ ofwel $3000 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$). Het is echter waarschijnlijk dat in de bodem wel enige afbraak optreedt. In dat geval bereikt de benzeen de kruipruimte niet en blijft de concentratie dus nul.

Behalve via diffusie zou benzeen toegevoerd kunnen worden naar de kruipruimte via de waterfase als gevolg van verdamping en capillaire opstijging. In de kruipruimte zijn de volgende factoren van belang in verband met de verdamping:

- er vindt geen toevoer van water plaats in de vorm van neerslag;
- de temperatuur is vrij constant en kan variëren van 10 tot 20°C (afhankelijk van de aanwezigheid van verwarmingsbuizen);
- er is geen beplanting aanwezig op de bodem;
- relatieve vochtigheid is afhankelijk van weersomstandigheden en ventilatiemogelijkheden.

Voor deze situatie is het waarschijnlijk dat het bovenlaagje van de grond zover uitdroogt dat er sprake is van 'mulch' vorming. De verdamping bedraagt in dat geval naar schatting slechts $0,1 \text{ à } 0,3 \text{ mm}.\text{dag}^{-1}$, dat wil zeggen dat de benzeenflux via de waterfase maximaal $0,3-0,9 \mu\text{g}.\text{m}^{-2}.\text{dag}^{-1}$ kan bedragen. In feite zal de flux veel kleiner zijn omdat ook in de waterfase afbraak van benzeen zal plaatsvinden.

6. CONCLUSIES

Uit de berekeningen en de daarbij gebruikte aannamen kan worden geconcludeerd dat het niet waarschijnlijk is dat benzeen ontwijkt in de kruipruimte. Dit geldt zowel voor een ontwateringsdiepte van 50 cm als voor een ontwateringsdiepte van 100 cm. De belangrijkste reden daarvoor is, dat de uitgangskoncentratie op grondwaterniveau zeer laag is.

Alleen in het geval, dat wordt aangenomen dat in het geheel geen afbraak optreedt, kunnen in de kruipruimte benzeenconcentraties optreden van naar schatting $0-50 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$, afhankelijk van de ventilatie in de kruipruimte. Gehalten van $5 \mu\text{g}.\text{m}^{-3}$ of meer zijn alleen te verwachten als een onwaarschijnlijk hoge diffusiecoëfficiënt wordt aangehouden.

In het uitzonderlijke geval dat geen afbraak optreedt en de kruipruimte niet geventileerd en gasdicht is zou in principe de concentratie kunnen oplopen tot meer dan $1000 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ($= 1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$).

De 'worst case' benaderingen, waarbij geen afbraak van benzeen optreedt in de bodem, zijn voor de praktijk onwaarschijnlijk. De conclusie op grond van de hier uitgevoerde berekeningen moet dan ook zijn, dat het zeer onwaarschijnlijk is dat benzeen in de kruipruimten terechtkomt na ontwatering tot 50 of 100 cm diepte. Dit geldt eveneens voor de andere aromaten, toluen en xylenen, waarvoor als uitgangskoncentraties zijn opgegeven $0,08 \mu\text{g}/\ell$ respectievelijk $2,7 \mu\text{g}/\ell$.

Wordt afbraak mee in beschouwing genomen, dan kan met behulp van vergelijking (6) en tabel 3 worden vastgesteld, dat bij een pessimistische schatting van de afbraaksnelheid en een reële schatting van de diffusiecoëfficiënt benzeen aantoonbaar is tot ca. 1 cm boven de grondwaterspiegel. Toluene en xyleen zijn, vanwege hun lagere afbraaksnelheid, aantoonbaar tot ca. 2 cm boven de grondwaterspiegel.

Voor zeer pessimistische schattingen met betrekking tot de afbraaksnelheid (nog 10 x lager) en de diffusiecoëfficiënt (40-50 x hoger) blijkt benzeen omhoog te diffunderen tot maximaal 11 cm boven de grondwaterspiegel. Xyleen bereikt in dat geval een hoogte van maximaal 25 cm boven de grondwaterspiegel. Dit betekent dat ook bij deze zeer pessimistische benadering geen aromaten zullen ontwijken in de kruipruimte, zelfs niet bij een ontwatering van slechts 50 cm diepte.

LITERATUUR

HOEKS, J., 1984. Transport en afbraak van vluchtige aromaten in de bodem. Nota 1497, ICW, Wageningen.

Bijlage 1

BODEMPROFIELEN

Nummer	Ontwaterings- diepte (cm)	Laag (cm)	Lucht- gehalte vol. %	Omschrijving
P1	100	0-100	4	fijn zand, leembandjes, humeus
	200	0-100	9	idem
		100-200	4	idem
P2	100	0-100	11	leem, zandhoudend, humusresten
	200	0-80	25	idem
		80-200	17	fijn zand, sintels/puin, zwart
P3	100	0-100	10	zand, puin, bruin tot zwart
	200	0-140	22	idem
		140-200	6	zand, puin + afval, zwart
P4	100	0-100	10	fijn zand, puin + afval, grijs/bruin
	200	0-160	18	idem
		160-200	16	sintels, afval
DB1	100	0-100	7	matig fijn -grof zand, humusrijk
	200	0- 50	10	idem
		50-200	16	zand, afval, puin, kleibrokken
DB2	100	0-100	3	matig fijn zand, humusrijk
	200	0-100	8	idem
		100-200	15	specie, puin, sintels, zwart
DB3	100	0-100	4	matig fijn zand, humusrijk
	200	0-150	15	zand, puinresten, humeus
		150-200	4	slappe bagger, puinbrokjes
DB4	100	0-100	5	matig fijn zand, klei + afval, humusrijk
	200	0- 50	10	matig fijn zand, humusrijk
		50-200	7	verteerd afval, klei, sintels
DB5	100	0-100	3	matig fijn zand, humusrijk
	200	0-150	15	matig fijn -grof zand, humusrijk
		150-200	4	verteerd huisvuil, zand