

Praktijkervaring met biofilmreactoren voor zuivering van grondwater verontreinigd met organische microverontreinigingen

1. Inleiding

Nederland telt meer dan 100.000 verontreinigde lokaties [1]. Componenten die veelvuldig in verontreinigde bodems voorkomen, zijn organische microverontreinigingen [2] (zie tabel I). Deze verontreinigingen zijn afhankelijk van de stoffeïenschappen en de bodemsamenstelling geadsorbeerd aan de bodem, opgelost in het grondwater en/of aanwezig in de bodemlucht.



IR. E. H. MARSMAN
Tauw Milieu BV



ING. J. J. M. APPELMAN
Tauw Milieu BV

bodemsaneringen opgepompt grondwater op biologische wijze gezuiverd [4].

In dit artikel worden aan de hand van enkele praktijkvoorbeelden de werking en de kosten van biologische grondwaterzuiveringsinstallaties geïllustreerd.

2. Biologische grondwaterzuivering

Micro-organismen zijn in staat om organische microverontreinigingen te



IR. B. A. BULT
Tauw Milieu BV



IR. L. G. C. M. URLINGS
Tauw Milieu BV

TABEL I – *Overzicht van aangetroffen organische microverontreinigingen op verschillende lokaties.*

Componenten	Lokaties/bronnen
– minerale olie	– (chemische) industrie
– aromaten	– voormalige gasfabrieken
– chloorhoudende oplosmiddelen en aromaten	– tankstations
– cyanide	– stortplaatsen
– PAK's	– lekkende olie-opslagtanks
– fenolen	– chemische wasserijen
– cresolen	

mineraliseren tot onschadelijke verbindingen zoals biomassa, kooldioxyde en zouten [5]. De componenten dienen als groeisubstraat voor de micro-organismen waardoor de schadelijke verbindingen vergaand uit het grondwater worden verwijderd. De K_m (Michaëlis/Menten-constante) voor bijvoorbeeld toluen en naftaleen is laag ($< 1 \mu\text{g/l}$) met als gevolg dat activiteit van biomassa ook bij lage concentraties maximaal is [6].

De concentratie microverontreinigingen in het grondwater is vaak laag: enkele tientallen microgrammen tot milligrammen verontreiniging per liter. Het onttrekkingsdebiet van grondwater bij bodemsaneringen bedraagt afhankelijk van de grootte van de lokatie en de doorlaatbaarheid van de bodem enkele m^3 per uur tot tientallen m^3 per uur. De aanvoerde vracht verontreiniging is daarom laag: doorgaans enkele tientallen grammen per uur.

Voor de zuivering van verontreinigd grondwater worden over het algemeen geen actief-slibsystemen toegepast. De slibbelasting is laag en bij de gewenste lage hydraulische verblijftijden (HVT < 1 uur) worden geen goed bezinkende slibvlokken gevormd. Daarentegen zijn biofilmreactoren, waarin de micro-organismen zijn gehecht op een dragermateriaal, wel geschikt [7]. Tauw Milieu b.v. heeft sinds 1986 ervaring met de toepassing van biofilmreactoren (biorotor en oxydatiebed [8, 9]) en ontwikkelde een nieuwe biofilmreactor (BIOPUR®), die

Samenvatting

Nederland telt veel lokaties waar de bodem is verontreinigd met organische microverontreinigingen: (gechloreerde) aromaten, vluchtige en niet-vluchtige minerale olie, PAK's, etc.

Tallose van nature in de bodem voorkomende micro-organismen zijn in staat om deze verontreinigingen af te breken. Bij de sanering van verontreinigde lokaties wordt grondwater onttrokken, dat gezuiverd moet worden voordat het kan worden geloosd. Hiervoor kunnen biofilmreactoren worden toegepast, waarbij de biofilm opgebouwd is uit in het grondwater aanwezige micro-organismen. In dit artikel worden praktijkresultaten gepresenteerd van door aannemers bij bodemsaneringen toegepaste biorotoren en BIOPUR®-installaties. Uit de resultaten blijkt dat biofilmreactoren in staat zijn om bij korte hydraulische verblijftijden (circa 20 tot 45 minuten) de verontreinigingen tot beneden de detectiegrens ($0,5 \mu\text{g/l}$) uit grondwater te verwijderen. Ook blijken de kosten van biologische grondwaterzuiveringssystemen ($f 0,40-0,90$ per m^3) vaak lager te zijn dan fysisch/chemische zuiveringstechnieken.

naast grondwater tegelijkertijd ook bodemlucht kan zuiveren [10, 11, 12]. Een systeem dat zich in de onderzoekfase bevindt is het droogbedfilter [13]. Daarnaast worden in de luchtreiniging steeds meer biotricklingfilters toegepast voor de verwijdering van koolwaterstoffen of ammoniak.

Voorbeelden van toegepaste dragermaterialen zijn Rashigringen en PVC-platen (biorotor), zand (het droogbedfilter) en gereticuleerd polyurethaan (BIOPUR®). Door dragermateriaal te selecteren met een hoog specifiek oppervlak kunnen hoge biomassaconcentraties worden gerealiseerd waardoor bioreactoren compact zijn. De biomassa heeft voor de groei nutriënten nodig, die soms onvolgende in het grondwater aanwezig zijn. Daarom moeten stikstof en fosfaat in zeer kleine hoeveelheden aan het opgepompte grondwater worden toegevoegd.

Voor biologische grondwaterzuivering worden in de praktijk vooral de biorotor en BIOPUR® toegepast. Deze biofilmsystemen zijn onderhoudsvriendelijk door

Sanering van verontreinigde bodems gaat veelal gepaard met het onttrekken van grondwater, dat alvorens het geloosd kan worden moet worden gezuiverd. Het te lozen grondwater moet aan strenge lozings-eisen voldoen, die onder andere zijn geformuleerd in de Leidraad Bodemsaneringen [3].

De zuivering van organische microverontreinigingen bevattend grondwater gebeurde tot voor kort voornamelijk door actieve-koolfiltratie of strippen. Veel organische microverontreinigingen kunnen volledig door micro-organismen worden afgebroken [4]. Biologische behandeling is daarom een interessante techniek met een aantal specifieke voordelen in vergelijking met fysisch/chemische technieken. Ten eerste worden organische microverontreinigingen in één trap volledig afgebroken en niet geconcentreerd op een adsorbens, die vervolgens moet worden nabehandeld. Ten tweede zijn de kosten van biologische methoden gelijk of zelfs lager dan actieve-koolfiltratie en strip-technieken.

Momenteel wordt ongeveer 10% van bij

de eenvoudige constructie en bedrijfsvoering. Door het modulaire opgebouwde systeem kunnen bioreactoren worden bijgeplaatst of juist verwijderd als de grondwateraanvoer, kwantitatief en/of kwalitatief wijzigt.

Op verschillende lokaties is onderzoek naar de toepasbaarheid van biofilmreactoren verricht. Een tweetal projecten, waarbij uiteindelijk is gekozen voor de biorotor, wordt in dit artikel beschreven. Verder worden resultaten besproken waarbij BIOPUR[®] is toegepast bij de sanering van tankstations voor de zuivering van grondwater. Als laatste worden de resultaten besproken waarbij deze biofilmreactor is toegepast bij in situ saneringen voor de simultane bodem-, lucht- en grondwaterbehandeling.

3. Praktijkresultaten

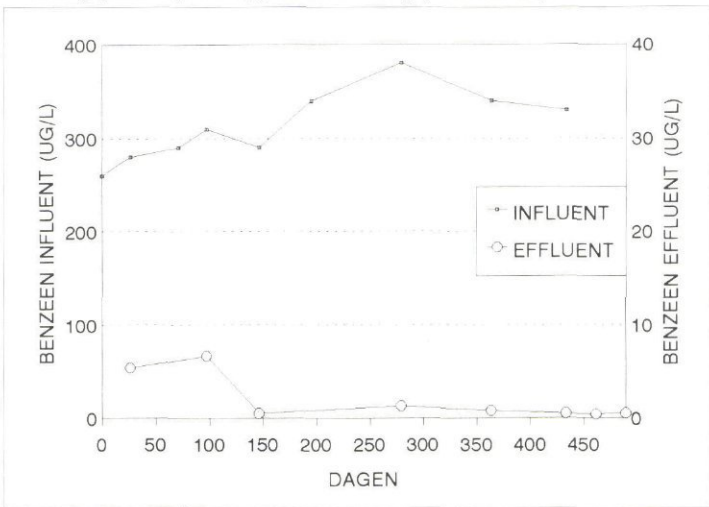
Voormalige lokatie voor produktie van pesticiden

Op een lokatie, waar het grondwater is verontreinigd met hexachloorhexaan, benzeen en monochloorbenzeen, zijn in eerste instantie een oxydatiebed en een biorotor, beide op kleine schaal, getest [8]. Het onderzoek is later met biorotoren op praktijkschaal voortgezet. De gemiddelde samenstelling van het grondwater is weer- gegeven in tabel II.

TABEL II - Gemiddelde samenstelling van het grondwater tijdens het onderzoek.

HCH-totaal	(µg/l)	200
Benzeen	(µg/l)	350
Monochloorbenzeen (MCB)	(µg/l)	350
CZV	(mg O ₂ /l)	56
BZV	(mg O ₂ /l)	4
N-Kjeldahl	(mg N/l)	3,5
Nitraat	(mg N/l)	0,1
P-totaal	(mg P/l)	0,3
Temperatuur	(°C)	10

Afb. 1 - Verloop van benzeen in influent en effluent van de biorotor, lokatie voormalige pesticidenfabriek (hydraulische verblijftijd 25 minuten).



Het onderzoek heeft aangetoond dat benzeen en monochloorbenzeen nagenoeg volledig werden verwijderd door biologische afbraak. De verwijdering van beide componenten bedroeg gemiddeld meer dan 95% bij een hydraulische verblijftijd van 25 minuten. Veelal werden in het effluent waarden kleiner dan 0,5 µg/l gemeten. Hexachloorhexaan (HCH), waarvan meerdere isomeren bekend zijn, werd gedeeltelijk afgebroken. De verwijdering van α- en γ-HCH bedroeg gemiddeld 70%-90%, δ-HCH werd gedeeltelijk verwijderd, terwijl β- en ε-HCH nagenoeg niet werden verwijderd. Metingen aan het afgas van de ge-ventileerde biorotor en aan het slib hebben aangetoond dat vluchtige verbindingen vrijwel niet werden gestript (< 2%) en adsorptie aan het slib nauwelijks optrad. Al enkele dagen na opstart werden de aromaten, α-HCH en γ-HCH bijna geheel afgebroken.

Een uitvoerige kostenberekening toonde aan dat de bestaande fysisch/chemische zuiveringsinstallatie bestaande uit twee zandfilters gevolgd door drie actieve-koolfilters, aanzienlijk goedkoper kon worden uitgevoerd als een biologische zuivering werd voorgeschakeld. Naar aanleiding van het onderzoek is daarom besloten om het grondwater te zuiveren met een biorotor en een nageschakeld actieve-koolfilter.

Sinds mei 1992 wordt in het kader van een beheersing (looptijd ~ 30 jaar) van de bodemverontreiniging, grondwater opgepompt (debiet = 1 m³/uur). Zuiveringsresultaten van de biorotor met benzeen en monochloorbenzeen zijn weergegeven in de afbeeldingen 1 en 2. Uit de resultaten blijkt dat benzeen en monochloorbenzeen constant voor meer dan 95% zijn ver-

wijderd. De verwijdering van HCH bedroeg gemiddeld 30-60%. De investeringskosten van deze beheersing bedroeg f 460.000,- (zuiveringsinstallatie, gebouw, bestek en directie bouw) en de exploitatiekosten bedragen ongeveer f 30.000,- per jaar (milieukundige begeleiding, exclusief begeleiding aannemer).

Voormalige lokatie voor houtverduurzaming

Op een terrein in Zwolle is de bodem en het grondwater verontreinigd met carbo- lineum: benzeen, toluen, ethyleenzuur, xyleen en polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK), zie tabel III. Voor de

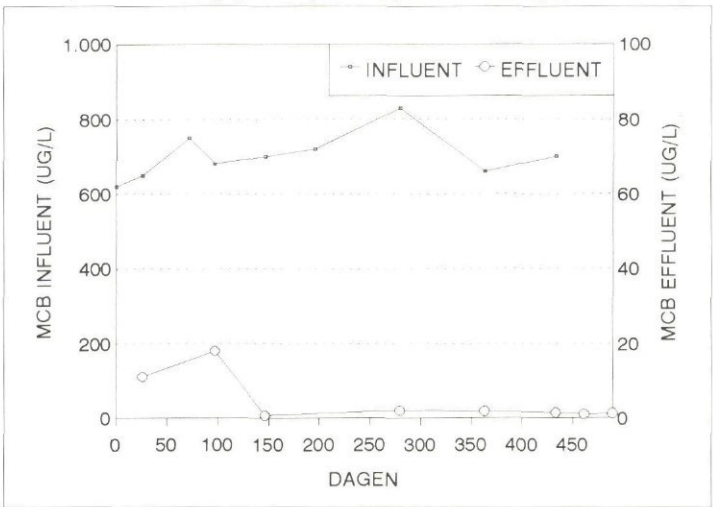
TABEL III - Gemiddelde samenstelling van het influent in de onderzoeksfase.

Benzeen	(µg/l)	95
Tolueen	(µg/l)	1
Ethylbenzeen	(µg/l)	40
Ortho-xyleen	(µg/l)	6
Meta- en para-xyleen	(µg/l)	6
Naftaleen	(µg/l)	30
BZV	(mg O ₂ /l)	< 1
N-Kjeldahl	(mg N/l)	14
Totaal fosfaat	(mg P/l)	0,2
Ijzer	(mg Fe/l)	10

provincie Overijssel heeft Tauw Milieu b.v. onderzocht in hoeverre het grondwater biologisch kan worden gezuiverd als alternatief voor de bestaande fysisch/chemische zuivering.

Het onderzoek naar de toepasbaarheid van biologische grondwaterzuivering is uitgevoerd met een biorotor met een troghoud van 4,4 m³ en een oppervlak van 700 m². De rotor was overkapt en de lucht boven de biorotor werd afgezogen (debiet 20 Nm³/uur) en over een compostfilter geleid om eventueel gestripte componenten uit de lucht te verwijderen.

Afb. 2 - Verloop van monochloorbenzeen (MCB) in influent en effluent van de biorotor, lokatie voormalige pesticidenfabriek (hydraulische verblijftijd 25 minuten).



Het doel van dit onderzoek was tweeledig: a. het bepalen van het zuiveringsrendement van de biorotor; b. het vaststellen van ontwerpparameters. Door de hydraulische belasting stapsgewijs te verhogen kon het effect hiervan op de zuiveringscapaciteit worden bepaald.

Het onderzoek werd in september 1989 opgestart met een niet-geënte biorotor. De verwijderingsrendementen van zowel BTEX als naftaleen bedroegen meer dan 99% bij een hydraulische verblijftijd van 50 minuten. Bij het verhogen van de hydraulische belasting daalde het zuiveringsrendement tot ongeveer 70% (HVT = 18 minuten). Maximaal 0,3% van de aangevoerde verontreiniging vervluchtigde via de ventilatielucht van de biorotor.

Aan de hand van de gunstige resultaten besloot de provincie Overijssel tot het laten plaatsen van een gecombineerde biologische en fysisch/chemische zuiveringsstraat. Het opgepompte grondwater wordt voorgezuiverd in een biorotor, gevolgd door een zandfilter waarin uitgespoeld slib uit het grondwater wordt verwijderd en twee actieve-koolfilters in serie als beveiliging. Het gezuiverde grondwater kan worden geloosd op het oppervlaktewater. De kosten van het proces bedragen circa f 0,90/m³, inclusief aanneemsom, energie, milieukundige begeleiding, exclusief analyses. Sinds november 1991 is de biologische grondwaterzuiveringsinstallatie in bedrijf. Het debiet bedraagt 25 m³/uur en de verblijftijd in de biorotor 12 minuten. In de afbeeldingen 3 en 4 is het verloop van aromaten (BTEX) en naftaleen in de biorotor weergegeven. De resultaten van de biorotor liggen ver boven de verwachte 75% verwijdering en na zandfiltratie

blijken de verontreinigingen niet meer detecteerbaar te zijn (< 0,5 µg/l). De verwachting is dan ook dat het actieve-koolverbruik beduidend lager uit zal vallen dan waar vooraf op gerekend was.

Biologische grondwaterzuivering bij benzinestations

Bij benzinestations is de bodem vaak verontreinigd met organische componenten afkomstig van benzine en diesel. Door het vluchtige karakter van brandstoffen zijn zowel bodemlucht en water verontreinigd. Brandstoffen zijn over het algemeen goed biologisch afbreekbaar. In Nederland wordt bij een aantal tankstations het grondwater en soms tegelijkertijd de bodemlucht gereinigd met een nieuwe biofilmreactor [10, 12].

De zogenaamde BIOPUR[®] bestaat uit meerdere beluchte vakken in serie, die gevuld zijn met gereticuleerd polyurethaan als dragermateriaal voor de micro-organismen. Het dragermateriaal is volledig ondergedompeld. Lucht en water stromen volgens meestroomprincipe door elk vak. Ieder vak wordt belucht met de lucht afkomstig uit het vorige vak om strippen van vluchtige componenten te voorkomen. In tabel IV zijn zuiveringsrendementen weergegeven van enkele lokaties waar grondwater is gezuiverd met behulp van een biofilmreactor volgens het BIOPUR[®]-principe.

In afbeelding 5 is het verloop van BTEX in influent en effluent gemeten van een BIOPUR[®] die is toegepast bij een bodemsanering van een benzinestation. Tabel V geeft de resultaten weer van een biofilmreactor die is toegepast voor de gelijktijdige zuivering van bodemlucht en grondwater.

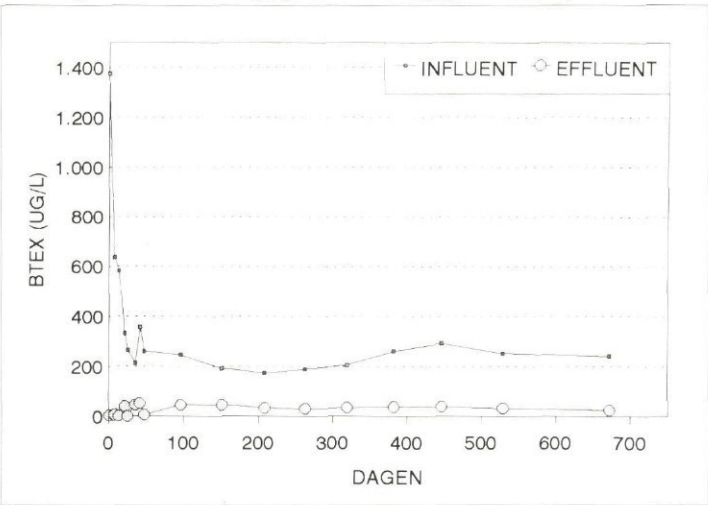
Afbeelding 5, tabel IV en V illustreren dat

bioreactoren volgens het BIOPUR[®]-procédé kunnen worden toegepast om grondwater en ook bodemlucht te zuiveren. Door meerdere aannemers zijn tot nu toe 17 biofilmreactoren volgens dit concept gebouwd, die op talloze lokaties zijn toegepast om grondwater verontreinigd met organische microverontreinigingen te zuiveren. De onderhoudskosten zijn gering gebleken. De kosten van deze biofilmreactoren bedragen f 0,35 tot f 0,55 per m³ opgepompt grondwater, afhankelijk van het opgepompte debiet. Korte hydraulische verblijftijden kunnen worden gerealiseerd. De aangroei van anorganisch en organisch slib is laag. In tegenstelling tot strippers is de gevoeligheid van biofilmreactoren voor ijzer gering. Bij ijzergehalten van 10-15 mg/l hoeven geen maatregelen te worden genomen om ijzer uit grondwater te verwijderen. Het energieverbruik van beluchte biofilmreactoren wordt veroorzaakt door ventilatoren, die nodig zijn voor de beluchting van de afzonderlijke vakken (0,35-1,5 kW/ventilator).

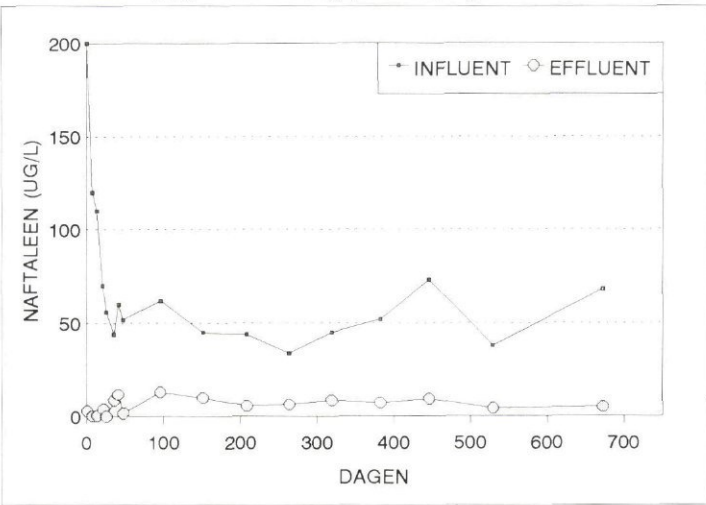
4. Conclusies en perspectieven

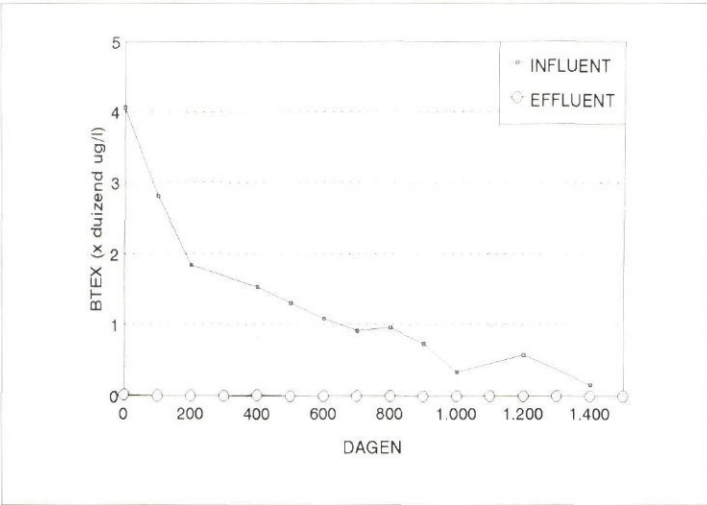
Grondwater dat vrijkomt bij bodemsaneringen en -beheersingen en dat verontreinigd is met organische microverontreinigingen, kan biologisch worden gezuiverd in biofilmreactoren. Op het dragermateriaal ontwikkelt zich een specifieke, geadapteerde biofilm, die de verontreinigingen vergaand en in relatief korte tijd afbreken tot onschadelijke componenten. Doordat de verontreinigingen als groeisubstraat dienen voor de biomassa, kunnen deze componenten tot op zeer laag niveau, dat wil zeggen tot beneden de detectiegrens (0,5 µg/l), worden verwijderd. Directe lozing van het gezuiverde grondwater zonder verdere

Afb. 3 - Verloop van BTEX in influent en effluent van de biorotor, lokatie voormalige houtverduurzaming (hydraulische verblijftijd 12 minuten).



Afb. 4 - Verloop naftaleen in influent en effluent van de biorotor, lokatie voormalige houtverduurzaming (hydraulische verblijftijd 12 minuten).





Afb. 5 - Verloop van BTEX in influent en effluent van een BIOPUR® bij een benzinepompstation (hydraulische verblijftijd < 45 minuten).

TABEL IV - Zuiveringsrendementen die op verschillende lokaties met BIOPUR®-systemen zijn behaald (BTEX = benzeen, toluen, ethylbenzeen en xyleen; PAK = polycyclische aromatische koolwaterstoffen; min. olie = minerale olie met kookpunt > 175°C; n.g. = niet gemeten).

Lokatie	HVT (min)	Verontreiniging	Influent (µg/l)	Effluent (µg/l)	Verwijderingsrendement(%)	Vervluchtiging (%)
Zeist	20-30	BTEX	296- 456	1,4- 33	89- 97,5	< 1
		PAK	930- 1.300	10- 65	94- 99	< 0,4
		min. olie	7.000-10.000	250- 1.400	84- 96	< 0,1
Raalte II	60	BTEX	1- 1.980	< 1	90- > 99,5	n.g.
		PAK	1- 3	< 1		n.g.
		min. olie	50- 330	50- 100	33- 86	n.g.
Utrecht	35-70	BTEX	140- 4.060	< 1- 85	99,9	n.g.
		PAK	1- 17	< 1- 83	99	n.g.
		min. olie	140- 890	< 10- 170	53- 99	n.g.
Overslag	55-70	BTEX	40- 460	< 1	> 99,9	n.g.
		min. olie	50- 2.300	50- 100	78- 97	n.g.
Borculo	90	BTEX	990- 2.600	< 1- 17	98- > 99,9	< 0,1
		min. olie	6.000-18.000	40- 2.800	80- 98	< 0,1
Amersfoort	24-45	BTEX	2.120-10.390	1- 308	95- > 99	< 1,5
		min. olie	200- 2.400	< 100	50- > 96	n.g.

TABEL V - Zuiveringsrendementen van een BIOPUR® voor simultane verwijdering van BTEX en vluchtige en niet-vluchtige koolwaterstoffen (KWS) uit bodemlucht en grondwater, lokatie Raalte.

Contaminanten	Concentratie	Zuiveringsrendement (%)
water	grondwater (µg/l)	effluent (µg/l)
	aromaten (BTEX)	320-1.600 < 1-5 > 99,9
	vluchtige KWS	100-2.200 < 50 > 97,7
lucht	bodemlucht (mg/Nm³)	afgas (mg/Nm³)
	niet-vluchtige KWS	100-1.800 < 100 > 95
	BTEX	1.000-3.000 < 10 > 99
	C ₅ -C ₉ alkaan-KWS	1.000-5.000 < 10 > 99

nabehandeling op het oppervlaktewater of riool is mogelijk. Als 'cocktails' van verontreinigingen moeten worden behandeld, kan een nazuivering met zandfiltratie en actieve-kool noodzakelijk zijn om een volledige verwijdering te waarborgen. De kosten van biologische grondwaterzuiveringssystemen zijn meestal lager of gelijk aan fysische zuiveringssystemen zoals actieve-kooladsorptie en strippen.

Het onderzoek van Tauw naar het toepassen van biofilmreactoren in relatie met het ontwikkelen van in situ bodemsaneringstechnieken heeft geresulteerd in een nieuwe biofilmreactor: de BIOPUR®.

Naast de behandeling van grondwater kan deze biofilmreactor ook verontreinigde bodemlucht zuiveren wat deze reactor bovendien geschikt maakt voor de toepas-

sing bij in situ bodemsaneringen van benzinerankstations.

De conclusie luidt dan ook dat biologische grondwaterzuiveringssystemen milieuvriendelijke en kostentechnisch interessante methoden zijn om verontreinigd grondwater te zuiveren.

5. **Literatuur**

1. *De omvang van de bodemverontreiniging in Nederland*, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, Bodembescherming nr. 76, ISBN 9012 06386 8, 1989.

2. *Commissie bodemsanering van in gebruik zijnde bedrijfsterrainen*, Eindrapport Sdu Uitgeverij Plantijnstraat, Den Haag 1991.

3. *Toetsingstabel voor de beoordeling van de concentratievolumes van diverse verontreinigingen in de bodem*, Leidraad Bodembescherming (1990).

4. *Inventarisatie praktijkgegevens van grondwaterzuiveringstechnieken*, februari 1994, Tauw Milieu R3257320v05/BAB

5. *Fundamental Aspects of Bioremediation of Soil and Groundwater*, G. Schraa, Studiedag Biologische reiniging van grond en grondwater, Nederlands Studiecentrum, 1992.

6. Alexander, M. (1985). Environm. Sci. Technol., 18.

7. *De ontwikkeling van bioreactoren voor de reiniging van grondwater*, Landbouwniversiteit Wageningen, JS/JCu/PBe/C- 1223/87.

8. *Biologische zuivering van grondwater verontreinigd met HCH's, benzeen en chloorbenzeen*, DBW/RIZA nota 88.061, 1989.

9. Hoek, J. P. van den Urlings, L. G. C. M. en Grobber, C. M. e.a. (1989). *Biological removal of polycyclic aromatic hydrocarbons, benzene, toluene, ethylbenzene, xylene and phenolic compounds from heavily contaminated groundwater and soil*. Environmental Technology Letters, 10, pp. 185-194.

10. *Biologische reiniging beste alternatief voor bodemsanering*, Marsman, E. H. Bult, B. A. Urlings, L. G. C. M. (1991). PT Polytechnisch Tijdschrift, 12.

11. Urlings, L. G. C. M., Spuij, F. Coffa, S. en Vree, H. B. R. J. van (1991). *Soil vapour extraction of hydrocarbons, in situ and on site biological treatment, presented at symposium: In situ and on site bio-reclamation*, 19-21 March 1991, San Diego, California.

12. *BIOPUR®: A Cost Effective Bioreactor for the Treatment of Groundwater and Soil Vapor*, Marsman, E. H., Appelman, J. J. M., Urlings, L. G. C. M., Bult, B. A. Proceedings Petro Safe 1993, 4th Annual Environmental Safety and Health Conference and Exhibition for the Oil, Gas and Petroleum Industries, Houston, Texas, USA.

13. Oosting, R., Urlings, L. G. C. M., Riel, P. H. van, Driel, C. van (1991). *BIOPUR®: Alternative packaging for biological systems, presented at symposium: Biotechniques for air pollution abatement and odour control policies*, 27-29 October 1991, Maastricht, the Netherlands.