

Sediment als biobarrière voor grondwater verontreinigd met gechloreerde alifatische koolwaterstoffen

In steden en industriegebieden kan vervuild grondwater een bron van verontreiniging vormen voor beken en rivieren. De toxische stoffen die vanuit het grondwater in de sedimentlaag van waterlopen infiltreren kunnen hierin echter biologische en fysisch-chemische veranderingen ondergaan voordat ze het oppervlaktewater bereiken. In deze studie werd onderzocht hoever deze natuurlijke afbraakcapaciteit reikt in riviersediment van de Zenne te Vilvoorde-Machelen, waar grondwater verontreinigd met gechloreerde alifatische koolwaterstoffen ('Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons', CAHs) door de sedimentlaag stroomt. Door de in situ monitoring van fysisch-chemische parameters, de PCR detectie van CAH-afbrekende bacteriën en hun afbraakgenen en het uitvoeren van batch afbraaktesten, werd een hoge microbiële afbraakactiviteit in het Zenne sediment aangetoond. Dit afbraakpotentieel volstaat echter niet om op alle onderzochte locaties in de rivierbedding het oppervlaktewater te vrijwaren van contaminatie. De sedimentlaag van de Zenne kan bijgevolg enkel mits enige stimulatie als efficiënte 'biobarrière' fungeren en zo het risico op diffuse contaminatie van het oppervlaktewater volledig elimineren.

¹ Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Afdeling Milieu- en Procestechnologie
² Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen, Afdeling Bodem- en Waterbeheer

1. De interfase tussen grond- en oppervlaktewater: een biologisch actieve zone

Kennis over het transport en het lot van polluenten in de transitiezone tussen grondwater en oppervlaktewater is belangrijk aangezien vele verontreinigde industriële, stedelijke en agrarische sites in een straal van 1 km van een waterloop gelegen zijn. Op ongeveer 50% van de vervuilde sites zou de grondwatervervuiling zich tot aan de waterloop verspreiden (EPA, 2000). De infiltrerende polluenten uit het grondwater dienen voordat ze het oppervlaktewater bereiken echter een zone met een groot potentieel voor natuurlijke attenuatie te passeren, de interfase tussen grond- en oppervlaktewater.

Door menging van grond- en oppervlaktewater, twee watermassa's met een verschillende chemische samenstelling, wordt de interfase over het algemeen gekarakteriseerd door scherpe fysische en chemische gradiënten zodat een breed spectrum van metabolische reacties binnen relatief kleine ruimtes kan optreden (Fraser en Williams, 1998). Door de sterk veranderende redox-potentiaal bijvoorbeeld, vormt de interfase een niche voor een brede waaier van micro-organismen met een verschillend metabolisme waardoor een verhoogde biologische afbraak van polluenten kan plaatsvinden. Interfasen zijn ook belangrijke opslagplaatsen voor organische koolstof (Bretschko en Moser, 1993) en zijn bijgevolg niet enkel hot spots in diversiteit aan organismen, maar ook in productiviteit (Push *et al.*, 1998). Ze kunnen dan ook een substantiële bijdrage leveren tot de koolstof-, nutriënt- en energieflex in het riviersysteem (Naegeli en Uehlinger, 1997). Processen waar micro-organismen niet in tussenkomen, zogenaamde abiotische processen zoals verdunning of sorptie, treden ook op in de interfase maar leiden niet noodzakelijk tot een gereduceerd risico voor de mens en het ecosysteem. Indien door natuurlijke microbiologische afbraakprocessen daarentegen zowel de concentratie als de toxiciteit van de vervuiling afnemen, kan de sedimentzone als een efficiënte biobarrière voor de polluenten functioneren en als natuurlijke bioremediatietechniek aanvaard worden. In deze

studie werd dan ook de biologische afbraak van polluenten in de interfase onderzocht.

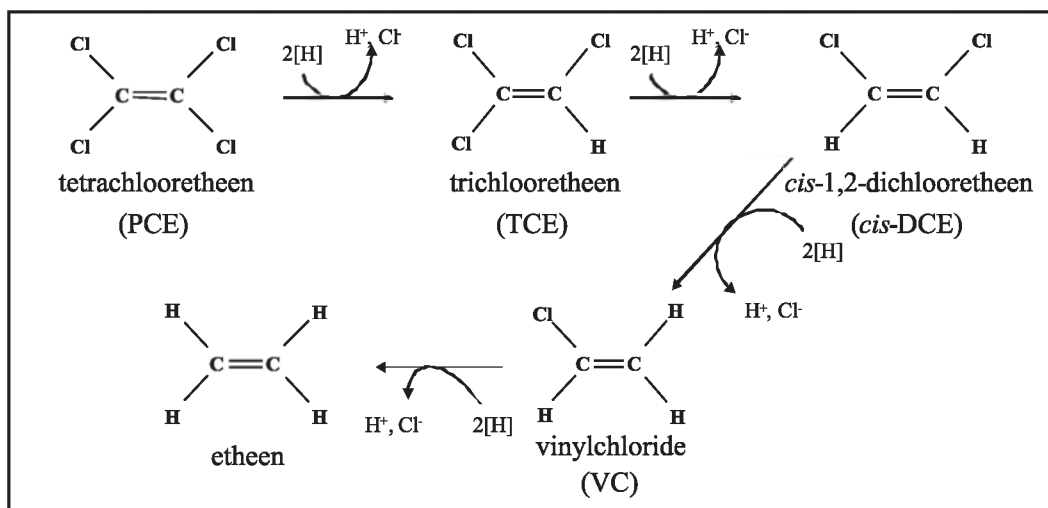
2. Modelpolluent: gechloreerde alifatische koolwaterstoffen

Gechloreerde alifatische koolwaterstoffen ('Chlorinated Aliphatic Hydrocarbons', CAHs) zijn een groep vluchtige polluenten die ondermeer worden aangetroffen in de buurt van chemische industrie en droogkuis bedrijven. Door hun veelvuldig gebruik als solvent of ontvettingsmiddel zijn ze één van de meest voorkomende grondwatercontaminanten in de geïndustrialiseerde wereld (Fischer *et al.*, 1987). CAHs zijn gekend voor hun toxiciteit en persistentie in het milieu. Door hun hoge wateroplosbaarheid en lage sorptiecapaciteit zijn de CAHs erg mobiel in de bodem waardoor ze gemakkelijk de watertafel bereiken en zich via het grondwater verspreiden. Voor dergelijke gechloreerde solventpluimen zijn traditionele remediatietechnieken zoals 'pump and treat' inefficiënt, tijdsrovend en kostelijk. Biologische afbraak van deze CAHs in de sedimentlaag van waterlopen biedt dus een beloftevol en goedkoop alternatief als bioremediatiestrategie.

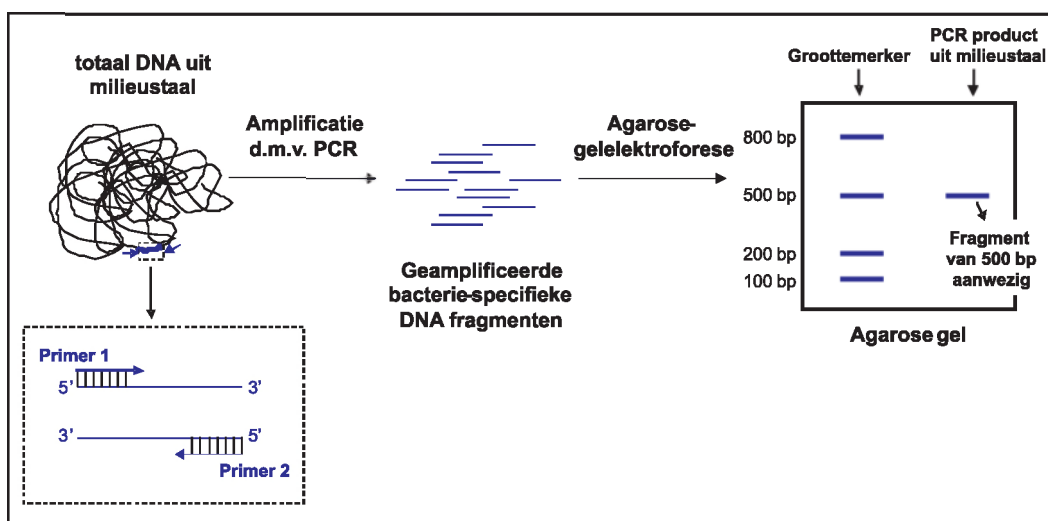
3. Biologische afbraak van CAHs via reductieve dechlorinatie en detectie van dehalogenerende bacteriën en hun afbraakgenen

Bepaalde anaërobe micro-organismen die in de bodem of het grondwater voorkomen, kunnen door een biologisch proces, reductieve dechlorinatie genoemd, de chlooratomen van de CAHs verwijderen en vervangen door waterstofatomen wat in niet-toxische eindproducten zoals etheen resulteert (Figuur 1). De CAHs worden hierbij als terminale elektronacceptor aangewend, terwijl waterstof als elektron donor fungeert. Wanneer deze reactie gekoppeld is aan de groei van de dechlorerende micro-organismen wordt het proces dehalorespiratie genoemd. Bacteriële dehalorespiratie wordt momenteel als belangrijk-

Figuur 1: Anaërobe reductieve dechlorinatie van PCE. In elke stap van dit proces wordt een chlooratoom vervangen door een waterstofatoom. De dechlorinatie van PCE tot cis-DCE is een relatief snel proces en kan gemakkelijk gestimuleerd worden, terwijl de verdere reductie van cis-DCE tot VC, en vooral van het zeer toxische VC tot etheen, significant trager verloopt (Middeldorp et al., 1999).



Figuur 2: Polymerase Chain Reaction (PCR), een techniek om een DNA fragment in grote hoeveelheden te amplificeren. Met behulp van twee startermoleculen of primers die op een relatief korte afstand van elkaar op complementaire strengen van het DNA binden, wordt het bacterie-specifiek DNA fragment tussen deze primers in grote hoeveelheden synthetisch aangemaakt. Door de lengte van dit geamplificeerde DNA-fragment met behulp van agarose-gelelektroforese (een scheidingstechniek volgens grootte van het DNA-fragment) te bepalen, kan de aan- of afwezigheid van het bacterie-specifieke gen in milieu-stalen worden nagegaan. Wanneer het gen-fragment, waarvan de lengte bekend is, in het DNA extract aanwezig was, zal een PCR product met de juiste lengte worden bekomen.



ste proces beschouwd voor de detoxificatie van gechlorideerde verbindingen onder anaërobe omstandigheden.

Voor de chloorethenen wordt het reductieve dechlorinatieproces weergegeven in Figuur 1. Vermits een relatief diverse groep van bacteriën (ondermeer *Dehalococcoides*, *Desulfuromonas*, *Dehalobacter* of *Desulfitobacterium* species) de reductie van PCE of TCE tot cis-DCE uitvoert, is dit een relatief snel proces. De verdere reductieve dechlorinatie van cis-DCE tot VC en etheen wordt echter door een specifieke cluster van bacteriën gekatalyseerd en verloopt hierdoor veel trager. Deze laatste cluster is sterk gerelateerd met *Dehalococcoides ethenogenes* (Middeldorp et al., 1999). Vermits er een goede correlatie bestaat tussen de aanwezigheid van deze soort bacterie en het CAH-afbraakpotentieel werden PCR-primersets ontwikkeld (bv. Löffler et al., 2000) die zeer specifiek deze *Dehalococcoides* species

detecteren in bodem- of grondwaterstalen (Figuur 2).

Naast deze fylogenetische 16S rRNA genen, kunnen ook afbraakgenen met een eenvoudige PCR reactie worden opgespoord. Deze genen coderen voor enzymen die in de afbraak van pollutanten tussenkomen. Via detectie van afbraakgenen kan geverifieerd worden of het microbiologisch afbraakproces metabolisch of co-metabolisch gebeurt. Zo kunnen *Dehalococcoides ethenogenes* stam 195 en stam FL-2 wel energie halen uit de afbraak van PCE tot VC, maar gebeurt de verdere omzetting van VC naar etheen co-metabolisch. VC kan door deze twee bacteriestammen dus niet als energiebron aangewend worden en de omzetting naar onschadelijk etheen gebeurt enkel 'toevallig' doordat het enzym dat TCE en DCE metabolisch omzet tot VC per vergissing ook dit laatste substraat aanvalt en omzet tot etheen (Müller et al., 2004). Volledige afbraak

van het mutagene en carcinogene VC tot etheen is echter van cruciaal belang voor een geslaagd bioremediatieproces. Tot nu toe werden drie isolaten gevonden die energie voor hun groei halen uit de afbraak van VC tot etheen, *Dehalococcoides* sp. stam VS (Müller et al., 2004), *Dehalococcoides* sp. stam BAV-1 (Krajmalnik-Brown et al., 2004) en *Dehalococcoides* sp. stam GT (Sung et al., 2006). Deze bacteriestammen kunnen met behulp van PCR opgespoord worden door detectie van hun afbraakgenen, coderend voor het VC reductief dehalogenase enzym dat VC omzet tot etheen. Voor *Dehalococcoides* sp. stam VS en stam GT is dit het *vcrA* gen terwijl het *bvcA* gen voor het VC reductief dehalogenase enzym van *Dehalococcoides* stam BAV-1 codeert. Door PCR detectie van de afbraakgenen die ofwel in de eerste (PCE tot DCE, VC) of laatste stappen (DCE, VC tot etheen) van het PCE reductief dechlorinatieproces tussenkomen, kan bijgevolg geëvalueerd worden welke (co-)metabolische afbraakprocessen *in situ* kunnen optreden en wordt een beeld bekomen van het aanwezige microbiologisch afbraakpotentieel.

4. Riviersediment van de Zenne te Vilvoorde-Machelen als biobarrière voor CAHs uit infiltrerend grondwater?

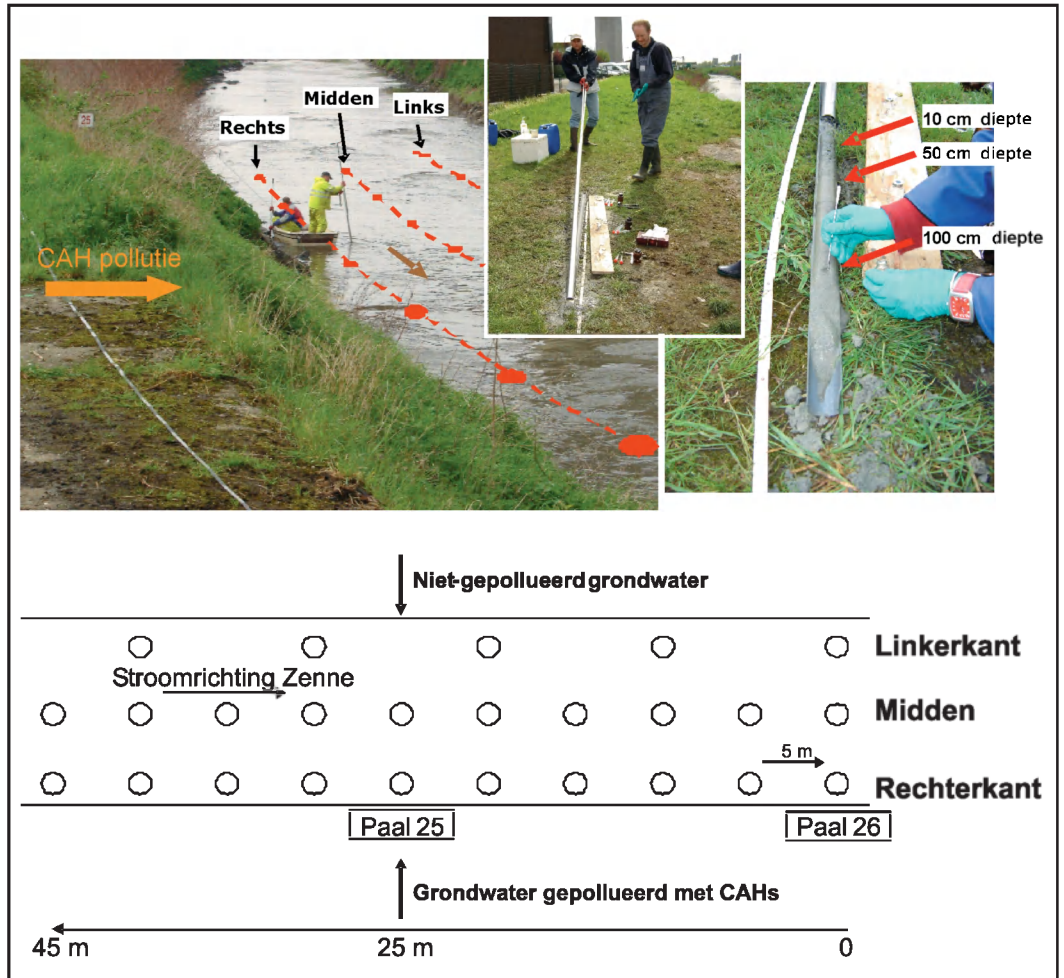
In deze studie werd de biologische afbraak van CAHs onderzocht in de interfase van de Zenne te Vilvoorde-Machelen. In het bestudeerde gebied komt er over een afstand van 1,2 km een CAH grondwaterpluim in de rivier terecht, afkomstig van verschillende brongebieden in de nabijgelegen industriezone. Ter hoogte van de bronnen trad er hoofdzakelijk vervuiling op met PCE en TCE, dewelke vervolgens in de aquifer (watervoerende bodemlaag) via reductieve dechlorinatie omgezet werden tot DCE en VC, terwijl het grondwater richting Zenne stroomde. De voornaamste grondwaterpolluenten die de Zenne bereiken zijn 1,1-dichloorethaan (1,1-DCA), chloorethaan, cis-DCE en vooral het zeer toxische VC. Via bemonstering van zowel sediment- als poriënwaterstalen uit de rivierbedding werd nagegaan waar deze CAHs in de sedimentlaag opkwellen en in welke concentraties ze er voorkomen. Door het sterk eutrofe karakter van het Zenne sediment (rijk aan organisch materiaal door de lozing van rioolwater) heersen er zeer anaërobe omstandigheden waardoor de sedimentlaag een ideale omgeving vormt voor *Dehalococcoides* species, die het organisch materiaal als elektrondonor en de CAHs als elektronacceptor kunnen aanwenden en op die manier de CAHs uit het instromende grondwater kunnen verwijderen. Door middel van PCR detectie van deze *Dehalococcoides* sp. en hun afbraakgenen en het uitvoeren van anaërobe batch afbraaktesten met sedimentmateriaal uit de interfase van de Zenne werd onderzocht of dit verhoogd microbiologisch afbraakpotentieel werkelijk aanwezig is.

4.1. Bepaling van de CAH influx zones in de rivierbedding van de Zenne

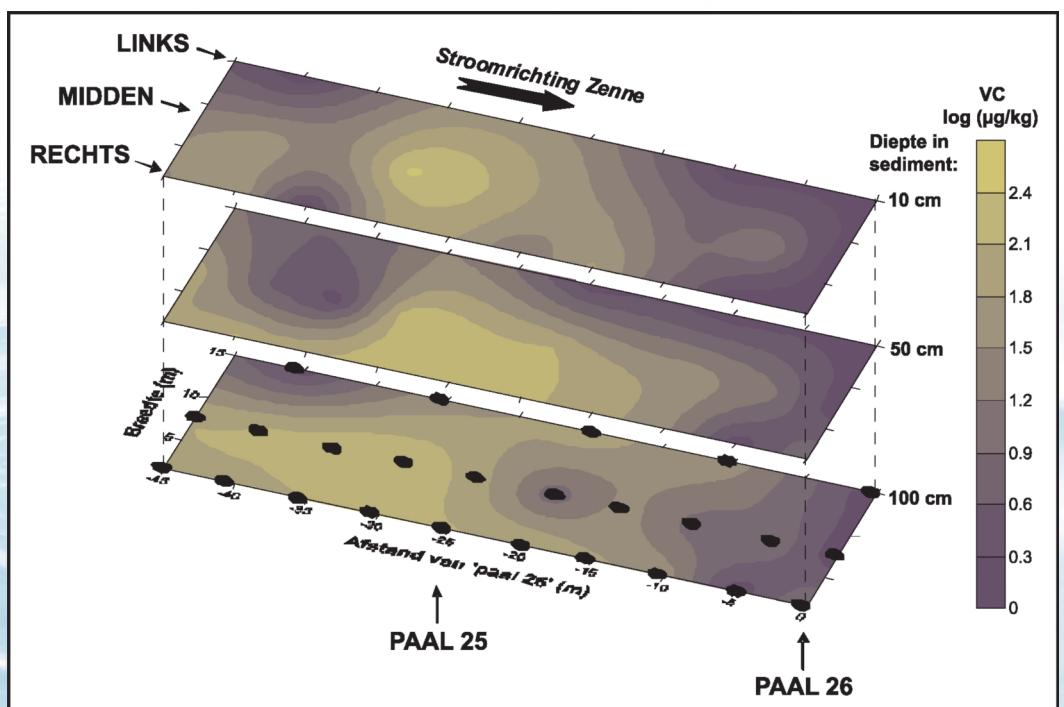
De CAH influx zones werden bepaald in een 45 m lang testgebied, dat in de verontreinigde zone geselecteerd werd waar de hoogste concentraties VC (2212 µg/l), cis-DCE (1212 µg/l) en 1,1-DCA (150 µg/l) in het instromende grondwater werden vastgesteld. Om een gedetailleerd beeld te bekomen van de CAH influx zones in de rivierbedding werden aan de rechterkant (vanwaar de gepollueerde grondwaterpluim de Zenne binnestroomt) en in het midden om de 5 m, en aan de linkerkant van de rivier om de 10 m op drie verschillende dieptes (10, 50 en 100 cm) sedimentstalen (met een zuigerboor) of poriënwaterstalen genomen waarin de concentraties aan CAHs en hun afbraakproducten etheen en ethaan werden bepaald (Figuur 3).

Verschillende staalnamecampagnes leverden gelijkaardige patronen van CAH influx zones in de rivierbodempluim van de Zenne op. Terwijl VC en 1,1-DCA over het volledige testgebied werden gedetecteerd (zie Figuur 4 voor VC), werd cis-DCE slechts in een beperkt deel ervan teruggevonden (data niet getoond). De hoogste concentraties aan VC werden aan de rechterkant van de rivier opgemeten, waarlangs het gecontamineerde grondwater de rivier bereikt. Terwijl aan paal 26, het referentiepunt van het testgebied, geen of nauwelijks VC in de rivierbedding aanwezig is, stroomt er wel VC door de sedimentlaag tussen 15 en 45 m stroomopwaarts van paal 26, met een maximale concentratie aan VC van 285 µg/kg droog sediment. Alhoewel deze concentratie onder de Belgische saneringsnorm voor VC in bodem (350 µg/kg droge stof) ligt, wordt de saneringsnorm voor VC in grondwater (5 µg/l) wel overschreden in het poriënwater op de meeste staalname locaties, met een maximale concentratie van 2100 µg/l VC die op 20 cm diepte in de rivierbodempluim werd gedetecteerd (data niet weergegeven). Op deze positie (en vermoedelijk ook op andere locaties in de rivierbedding waar het grondwater met een hoge snelheid opkwelt) komt er dus waarschijnlijk nog een behoorlijke hoeveelheid VC in het rivierwater terecht. Alhoewel de concentraties aan etheen en ethaan die in de rivierbedding gedetecteerd werden, aangeven dat volledige dechlorinatie van VC wel degelijk optreedt in het Zenne sediment (data niet getoond), is het afbraakpotentieel blijkbaar niet op alle onderzochte locaties voldoende groot om het rivierwater te vrijwaren van contaminatie. Een gedetailleerde screening van het microbiologisch afbraakpotentieel over de volledige oppervlakte van het testgebied (op alle staalname locaties en dieptes) bleek dus noodzakelijk voor een goede evaluatie van het mogelijk gebruik van de sedimentlaag als biobarrière voor de CAHs.

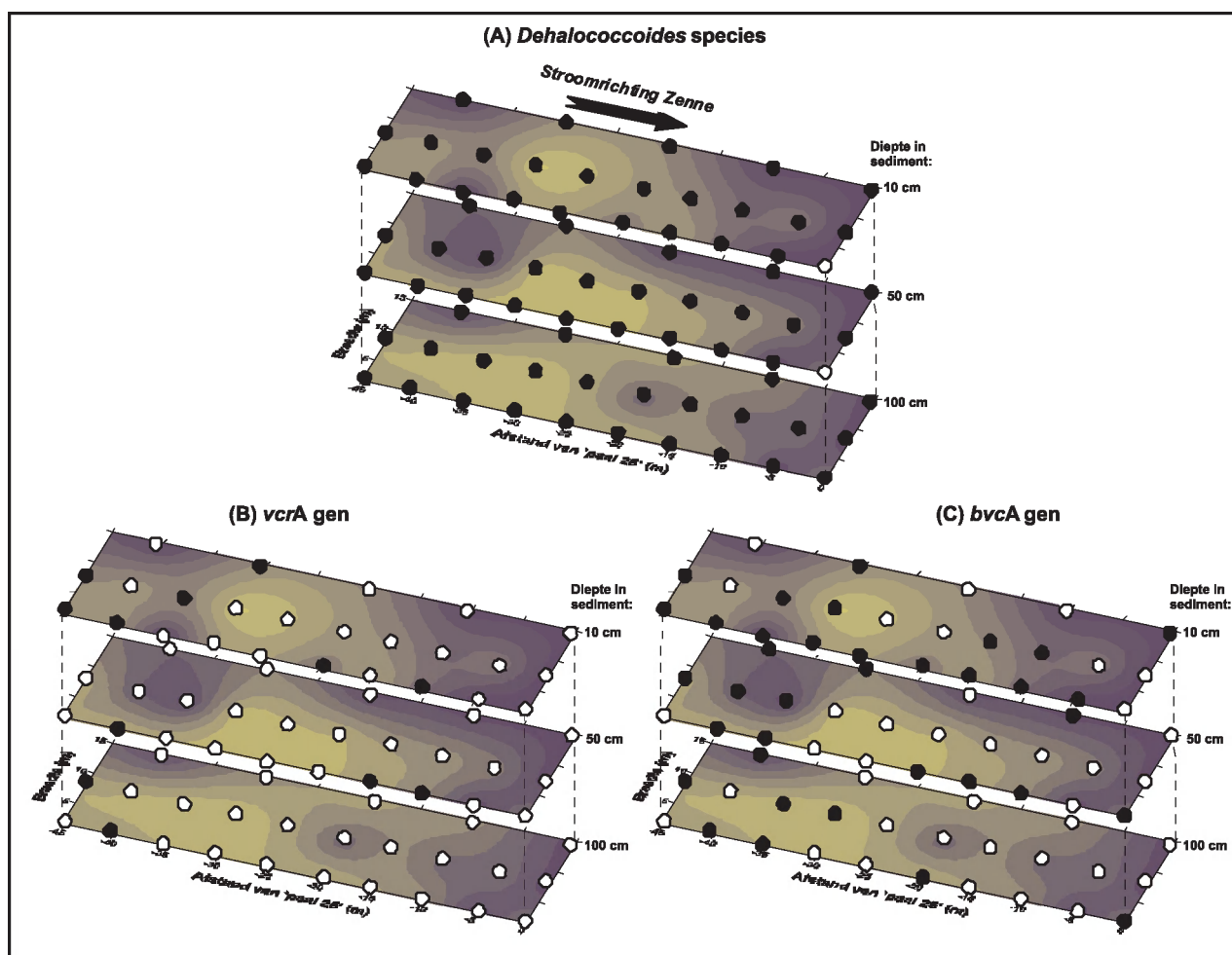
Figuur 3: Weergave van de staalnamelocaties (cirkels) in het testgebied van de Zenne waar sedimentstalen genomen werden met een zuigerboor (foto bovenaan).



Figuur 4: Weergave van de concentraties aan VC die werden gemeten in sedimentstalen uit de rivierbedding van de Zenne. Over een lengte van 45 m werden telkens om de 5 m aan de rechterkant en in het midden van de rivier en om de 10 m aan de linkerkant op 10, 50 en 100 cm diepte stalen genomen, waarvan de concentratie aan VC met Surfer werd genterpoleerd.



Figuur 5: PCR detectie van *Dehalococcoides* species (A) en de VC reductase-afbraakgenen *vcrA* (B) en *bvcA* (C) in sedimentstalen uit de rivierbedding van de Zenne. Cirkels geven de staalname locaties aan, gekleurde cirkels wijzen op detectie van de bacterie of het afbraakgen.

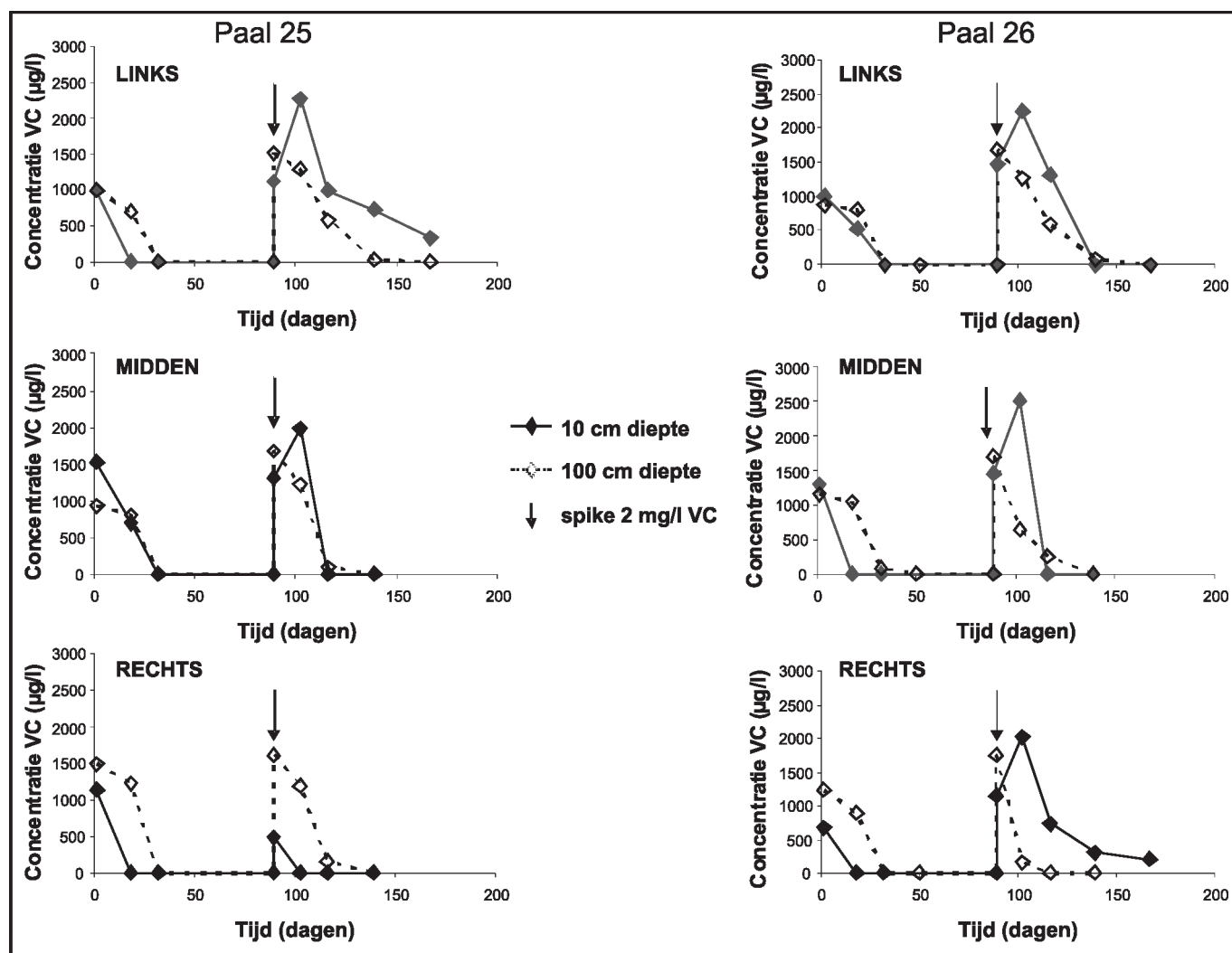


4.2. Bepaling van het aanwezige microbiologisch afbraakpotentieel voor CAHs in het sediment van de Zenne door middel van PCR analyses en anaërobe afbraaktesten

Voor de karakterisering van het microbiologisch afbraakpotentieel in de rivierbodem van de Zenne over de volledige oppervlakte van het studiegebied, werden PCR analyses voor CAH-afbrekende bacteriën (*Dehalococcoides* species) en VC-dehalogenase genen (*bvcA* en *vcrA*) uitgevoerd op de sedimentstalen die om de 5 meter aan de rechterkant, in het midden en aan de linkerkant van de rivier op drie verschillende dieptes (10, 50 en 100 cm) genomen werden. *Dehalococcoides* species werden over het hele testgebied en op alle onderzochte dieptes in de rivierbodem teruggevonden (Figuur 5A). Ook de afbraakgenen werden in het Zenne sediment aangetroffen en dit vooral in de top 10 cm van de sedimentlaag (waar het organisch stofgehalte het hoogst is) en aan de rechterkant van de rivier (vanwaar de gepollueerde grondwaterpluim de Zenne binnestroomt) (Figuur 5B en 5C). Het *bvcA* gen van *Dehalococcoides* sp. BAV-1 bleek het dominante afbraakgen te zijn (Figuur 5C), resulterend in de omzetting van VC tot het onschadelijke etheen. Ondanks het feit dat op bepaalde locaties in het

testgebied van de Zenne hoge concentraties aan VC in het poriënwater werden aangetroffen, bleken de juiste bacteriën en zelfs afbraakgenen voor een goede en efficiënte afbraak van de CAHs toch aanwezig te zijn in het testgebied op alle onderzochte locaties en dieptes in het sediment. Aangezien via PCR analyses enkel de aanwezigheid van de bacteriën werd nagegaan, werd hun activiteit onderzocht in anaërobe batch afbraaktesten. Meer dan 1 mg/l VC werd in minder dan 19 dagen volledig gereduceerd tot onschadelijk etheen en ethaan, zowel in de afbraaktesten met sediment afkomstig van 10 en 100 cm diepte in de rivierbedding (Figuur 6). Bovendien werden deze hoge dechloratiesnelheden in alle afbraaktesten geobserveerd, ongeacht hun staalname locatie (rechts, midden of links in de rivier), voor zowel het gepollueerde (paal 25) als het nietgepollueerde (paal 26) gebied. Wanneer na ongeveer 100 dagen opnieuw 2 mg/l VC aan de afbraaktesten werd toegevoegd, werd deze opnieuw binnen 50 dagen volledig afgebroken tot etheen (Figuur 6). Er werd dus een hoge afbraakactiviteit voor VC (en ook voor cis-DCE, resultaten niet getoond) waargenomen in het Zenne sediment waarvoor de gedetecteerde species *Dehalococcoides* stam VS en stam BAV-1 waarschijnlijk verantwoordelijk zijn. De juiste bacteriën

Figuur 6: Anaërobe afbraak van VC in batch afbraaktesten met riviersediment afkomstig van een diepte van 10 of 100 cm in de rivierbedding aan de rechterkant, in het midden en aan de linkerkant van een gepollueerd (paal 25) en een niet-gepollueerd deel (paal 26) van de Zenne. Sediment werd hiervoor in een anaëroob medium gesuspenderd en 2 mg/l VC werd bij aanvang van de test en na ongeveer 100 dagen aan de vials toegevoegd, waarna de concentratie in functie van de tijd werd opgevolgd door middel van GC-FID analyse.



voor een goede en efficiënte afbraak van de CAHs zijn dus blijkbaar niet enkel aanwezig in het Zenne sediment, maar ze breken er ook actief de grondwaterpolluenten af.

5. Conclusie

Biologische afbraak van polluenten in de sedimentlaag van waterlopen biedt een kosteloos en beloftevol alternatief als bioremediatiestrategie voor gecontamineerd grondwater dat in deze waterlopen infiltreert. Vooral op megasites waar complex vervuilde grondwaterpluimen voorkomen, zou deze natuurlijke bioremediatietechniek voor een aanzienlijke reductie in de saneringskosten zorgen en de diffuse contaminatie van het nabijgelegen rivierwater volledig kunnen elimineren.

Uit deze studie bleek dat ondanks het hoge afbraakpotentieel voor CAHs in het eutrofe riviersediment van de Zenne te Vilvoorde-Machelen, deze 'biobarrière' in het onderzochte testgebied niet voldoende bescherming biedt tegen

contaminatie van het oppervlaktewater. Hoewel hoge dechlorinatiesnelheden werden waargenomen, werden op sommige onderzochte locaties in de rivierbedding nog steeds concentraties aan CAHs boven de saneringsnorm teruggevonden nabij de top van de sedimentlaag. Op deze locaties 'lekt' de biobarrière als het ware en vindt er doorbraak van de contaminanten plaats naar het rivierwater. Vooral de goede permeabiliteit van de zanderige rivierbodem van de Zenne en daardoor de hoge grondwatersnelheden en bijgevolg korte verblijftijd van de CAHs in de sedimentlaag spelen hierbij een belangrijke rol. Ook al worden er in het rivierwater van de Zenne geen CAHs gedetecteerd (wegens verdunning), blijkt enige stimulatie van de afbraak noodzakelijk opdat het Zenne sediment als efficiënte biobarrière optreedt en als natuurlijke bioremediatiestrategie aanvaard kan worden.

6. Dankwoord

Dit onderzoek werd mogelijk gemaakt door financiering van VITO (via een doctoraatsbeurs aan K. Hamonts) en de Europese Unie (EC- project SEDBARCAH, n° 511254).

7. Referenties

Bretschko, G. en Moser, H. (1993). Transport and Retention of Matter in Riparian Ecotones. *Hydrobiologica* 251(1-3): 95-102.

EPA. (2000). Proceedings of the Ground-Water/Surface-Water Interactions Workshop. EPA/542/R-00/007.

Fischer, A.J., Rowan, E.A. en Spalding, R.F. (1987). VOCs in Groundwater Influenced by Large-scale Withdrawals. *Groundwater*, 25: 407-413.

Fraser, B.G. en Williams, D.D. (1998). Seasonal Boundary Dynamics of a Groundwater/Surface Water Ecotone. *Ecology* 79(6): 2019-2031.

Krajmalnik-Brown, R., Hölscher, T., Thomson, I.N., Saunders, F.M., Ritalahti, K.M. en Löffler, F.E. (2004). Genetic Identification of a Putative Vinyl Chloride Reductase in *Dehalococcoides* sp. Strain BAV1. *Applied and Environmental Microbiology* 70(10): 6347-6351.

Löffler, F.E., Sun, Q., Li, J. en Tiedje, J.M. (2000). 16S rRNA Gene-based Detection of Tetrachloroethene-dechlorinating *Desulfuromonas* and *Dehalococcoides* species. *Applied and Environmental Microbiology*, 66: 1369-1374.

Middeldorp, P. J. M., Luijten, M.L.G.C., Van de Pas, B.A., Van Eekert, M.H.A., Kengen, S.W.M., Schraa, G.W.M. en Stams, A.J.M. (1999). Anaerobic Microbial Reductive Dehalogenation of Chlorinated Ethenes. *Bioremediation Journal*, 3: 151-169.

Müller, J.A., Rosner B.M., von Abendroth, G., Meshulam-Simon, G., McCarty P.L. en Spormann, A.M. (2004). Molecular Identification of the

Catabolic Vinyl Chloride Reductase from *Dehalococcoides* sp. Strain VS and Its Environmental Distribution. *Applied and Environmental Microbiology* 70(8): 4880-4888.

Naegeli, M.W. en Uehlinger, U. (1997). Contribution of the Hyporheic Zone to Ecosystem Metabolism in a Prealpine Gravel-Bed River. *Journal of the North American Benthological Society* 16(4): 794-804.

Push, M., Fiebig, D., Brettar, I., Eisenmann, H., Ellis, B.K., Kaplan, L.A., Lock, M.A., Naegeli, M.W. en Traunspurger, W. (1998). The Role of Micro-Organisms in the Ecological Connectivity of Running Waters. *Freshwater Biology* 40(3): 453-495.

Sung, Y., Ritalahti, K.M., Apkarian, R.P. en Löffler, F.E. (2006). Quantitative PCR Confirms Purity of Strain GT, a Novel Trichloroethene-to-Ethene-Respiring *Dehalococcoides* Isolate. *Applied and Environmental Microbiology*, 72 (3): 1980-1987.

K. Hamonts^{1,2},
M. Maesen¹,
A. Ryngaert¹,
J. Bronders¹,
D. Springael² en
W. Dejonghe¹

¹ Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Afdeling Milieu- en Procestechnologie,
Boeretang 200, B-2400 Mol

² Katholieke Universiteit Leuven,
Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen,
Afdeling Bodem- en Waterbeheer,
Kasteelpark Arenberg 20, B-3001 Heverlee

Correspondentie-auteur:

Kelly Hamonts

Doctoraatsstudent

Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek (VITO), Afdeling Milieu- en Procestechnologie,
Boeretang 200, B-2400 Mol

Tel.: +32 14 33 51 21, Fax: +32 14 58 05 23
kelly.hamonts@vito.be