

University of Groningen

Biologische bodemsanering. Een natuurlijk antwoord

Janssen, D.B.

Published in:
Natuur en Techniek

IMPORTANT NOTE: You are advised to consult the publisher's version (publisher's PDF) if you wish to cite from it. Please check the document version below.

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

Publication date:
1992

[Link to publication in University of Groningen/UMCG research database](#)

Citation for published version (APA):

Janssen, D. B. (1992). Biologische bodemsanering. Een natuurlijk antwoord. *Natuur en Techniek*, 60(4), 246-257.

Copyright

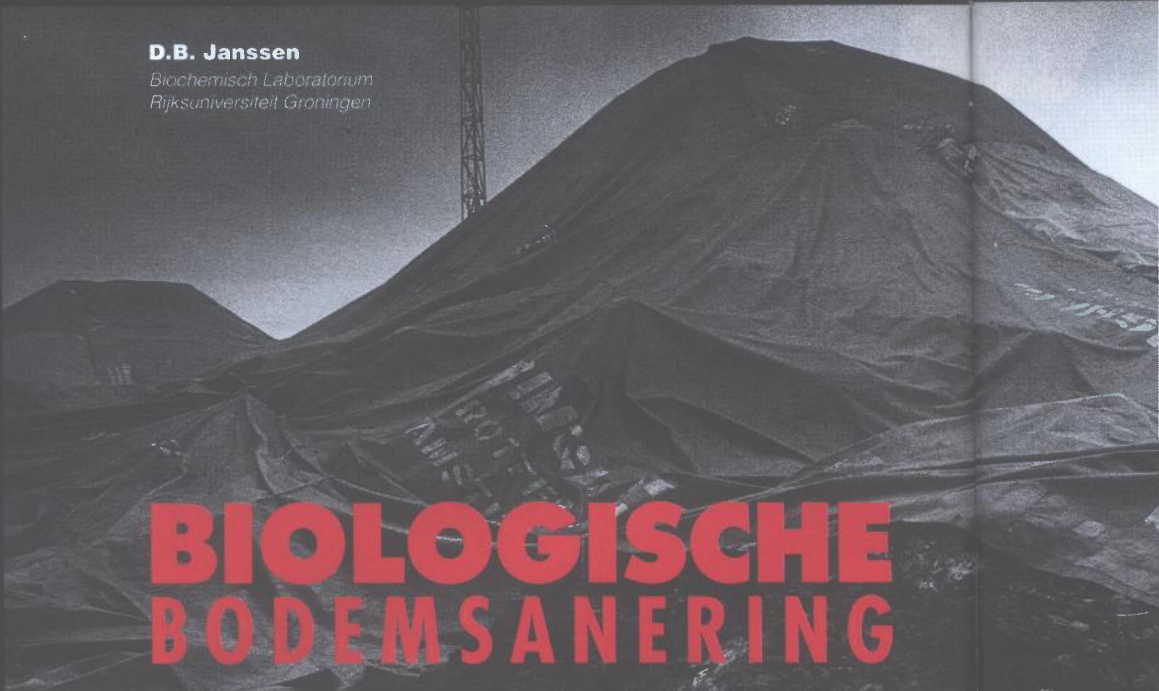
Other than for strictly personal use, it is not permitted to download or to forward/distribute the text or part of it without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license (like Creative Commons).

The publication may also be distributed here under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license. More information can be found on the University of Groningen website: <https://www.rug.nl/library/open-access/self-archiving-pure/taverne-amendment>.

Take-down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from the University of Groningen/UMCG research database (Pure): <http://www.rug.nl/research/portal>. For technical reasons the number of authors shown on this cover page is limited to 10 maximum.



D.B. Janssen

*Biochemisch Laboratorium
Rijksuniversiteit Groningen*

BIOLOGISCHE BODEMSANERING

Micro-organismen weten wel weg met de meeste stoffen die de mens als verontreiniging in de bodem heeft gebracht. Bacteriën, schimmels en gisten in de bodem zijn specialisten in de afbraak van allerlei afvalmateriaal. Zij kunnen talloze natuurlijke en door de mens geproduceerde stoffen omzetten. Uiteindelijk blijven er eenvoudige, onschadelijke stoffen over. Willen we micro-organismen ons afval laten opruimen, dan moeten we ze daarbij wel een handje helpen. Bodemverontreiniging is een enorm milieuprobleem, maar de natuur heeft haar antwoord al klaar.



Een natuurlijk antwoord

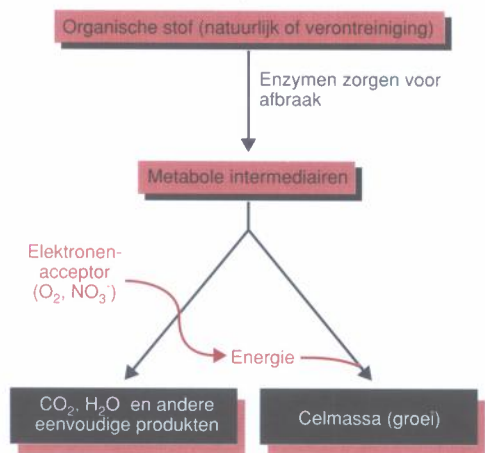
Biologische afbraak van organische verbindingen, *biodegradatie*, vindt plaats door bacteriën, schimmels en gisten, die op die manier in hun energiebehoefte voorzien. Het maakt voor die micro-organismen in wezen niet uit of ze teren op natuurlijke stoffen of op wat wij zoal in het milieu hebben gebracht. Bedrijven die de sanering van vervuilde terreinen ter hand nemen, maken dankbaar gebruik van dit natuurlijke afbraakproces. Zij beschikken inmiddels over een aardig arsenaal *biotechnologische bodemsaneringstechnieken*.

In dit artikel wordt uiteengezet hoe micro-organismen organische verbindingen omzetten, welke factoren daarbij van belang zijn en welke maatregelen de afbraak van bodemverontreinigende verbindingen stimuleren.

Biodegradatie verloopt in het ideale geval onder invloed van micro-organismen die organische verbindingen *mineraliseren* – afbreken tot eenvoudige, anorganische stoffen. De eerste stap in de mineralisatie is opname van de organische verbindingen en omzetting daarvan tot stoffen die deel uitmaken van de centrale stofwisseling van het organisme (zoals acetaat, citraat, pyruvaat en methanol). Deze stoffen worden vervolgens geoxydeerd tot CO₂ en



2



1

1. Micro-organismen zetten organische verontreinigingen bij afbraak eerst om in *metabole intermediairen*, stoffen die deel uitmaken van de normale stofwisseling van de organismen. De intermediairen worden met

behulp van een elektronen-acceptor geoxydeerd tot CO₂ en H₂O. De energie die daarbij vrijkomt, gebruikt het organisme voor de opbouw van celonderdelen en voor celdeling, zodat de cellen in aantal toenemen.

H₂O. Bij deze reacties komt energie vrij, die de cel kan gebruiken voor de opbouw van celmateriaal en voor deling. De organismen nemen in aantal toe en er is sprake van groei (afb. 1).

In chemische termen kunnen we mineralisatie beschouwen als een reeks redoxreacties, met andere woorden, er worden steeds elektronen overgedragen van de ene op de andere stof. Als elektronenacceptor (oxydator) gebruiken de meeste micro-organismen zuurstof, O₂, maar er zijn ook andere mogelijkheden, zoals nitraat, sulfaat en organische stoffen. Al deze omzettingen verlopen onder invloed van enzymen, de door het organisme geproduceerde eiwitmoleculen die als katalysator optreden.

Voor afbraak van milieuvreemde stoffen (*xenobiotica*) moeten organismen beschikken over speciale enzymen die deze verbindingen kunnen aanpakken en omzetten in producten die passen in de centrale stofwisseling. Voor synthetische stoffen die sterk afwijken van verbindingen van natuurlijke oorsprong, zijn de noodzakelijke enzymen – of beter gezegd, de

micro-organismen nauwelijks dan niet *tente* verbroken wanneer

Omzetti

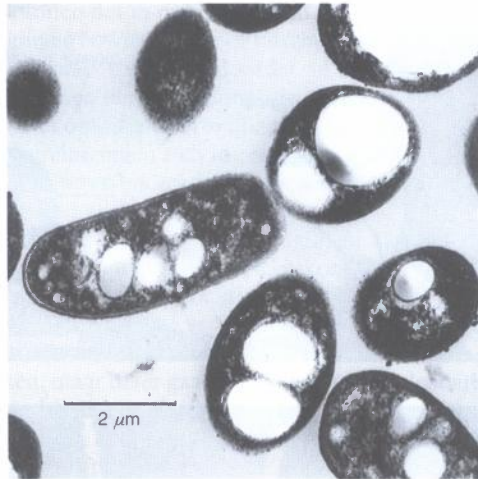
Vaak zijn voor de n bindingen nauwke meer or van ruw watersto acrylver koholen sommige

Veel c tig afbr splitsing stof en o



2. In afwachting van sloop en sanering is een verontreinigde straat geïsoleerd met behulp van een damwand. Die moet voorkomen dat de vervuulende stoffen zich via het grondwater verspreiden.

3. Deze bacteriën slaan de afbraakproducten van olie als polymeer in zichzelf op. Het is nog niet duidelijk wat er met de was gebeurt wanneer de bacterie sterft en zijn celinhoud in het milieu verspreidt.



3

micro-organismen die ze maken — vaak niet of nauwelijks voorhanden. De afbraak verloopt dan niet of langzaam. We spreken van *persistent* verbindingen wanneer ze niet worden afgebroken en van *recalcitrante* verbindingen wanneer de afbraak maar langzaam verloopt.

Omzetting van milieuvreemde verbindingen

Vaak zijn organismen die verantwoordelijk zijn voor de mineralisatie van verontreinigende verbindingen in het laboratorium geïsoleerd en nauwkeurig bestudeerd. Zo kennen we onder meer organismen die alkanen (componenten van ruwe olie en dieselolie), aromatische koolwaterstoffen (uit benzine en oplosmiddelen), acrylverbindingen (polymeerprecursors), alcoholen, esters en ketonen (oplosmiddelen) of sommige pesticiden voor hun rekening nemen.

Veel organische chloorverbindingen zijn lastig afbreekbaar. Dat komt doordat daarbij splitsing van chemische bindingen tussen koolstof en chloor nodig is. Hiervoor produceren

sommige micro-organismen speciale enzymen, maar slechts een minderheid van de in de bodem aanwezige organismen is daartoe in staat. Bij dergelijke verontreinigingen moeten de omstandigheden dus geheel aan de eigenschappen van enkele soorten worden aangepast voor het verkrijgen van snelle afbraak.

Soms breken micro-organismen de vervuulende verbindingen maar gedeeltelijk af, waarna producten vrijkomen die zich ophopen in de micro-organismen of hun omgeving. Een voorbeeld daarvan is de vorming van wasachtige polymeren uit olie. Of dergelijke stoffen een milieurisico met zich meebrengen staat nog niet vast.

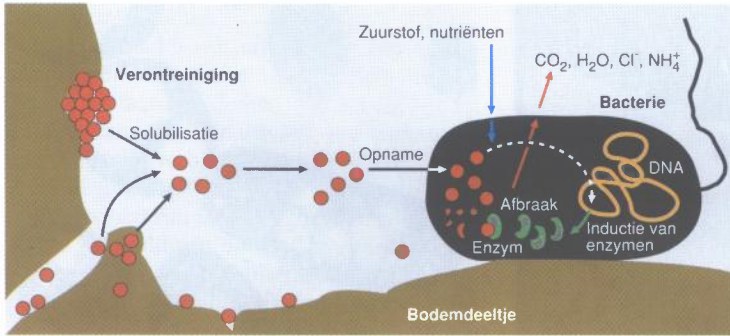
Gedeeltelijke afbraak betekent vaak dat de verontreinigende verbinding geen geschikte koolstofbron is voor de groei van het micro-organisme dat de betreffende omzetting uitvoert. De stofwisselingsproducten worden uitgescheiden, zonder dat het micro-organisme voordeel had van de omzetting. Dit proces wordt *cometabolisme* genoemd, en is het ge-

volg van het feit dat enzymen niet altijd volledig selectief zijn. Wanneer een bepaalde stof erg lijkt op een natuurlijke stof, kunnen de in de bacterie aanwezige enzymen die soms toevallig omzetten in stoffen waar het organisme verder niets aan heeft. Voor een aantal verontreinigingen staat inmiddels vast dat cometabolisme de enige manier is waarop afbraak plaatsvindt.

Beschikbaarheid van verontreinigingen

Voordat micro-organismen een verontreiniging kunnen afbreken, moet die oplossen in het water dat de bodemdeeltjes omgeeft. Dit proces staat bekend als *solubilisatie*. De meeste organische bodemverontreinigingen zijn lipofiel en lossen dus slecht op in water maar goed in

vetachtig, loste deel demmate zijn de ve de micro verbindir koolwater langzaam



4



5

4. Biodegradatie stap voor stap. Verontreinigingen kunnen onopgelost als deeltjes aanwezig zijn of geabsorbeerd aan bodem-materiaal. Na solubilisatie en transport, kan de bacterie de opgeloste verontreinigingen opnemen. In de bacterie zetten de verontreinigingen het DNA aan tot de aanmaak van enzymen die de stoffen afbreken.

5 en 6. Verontreinigde bodems bieden tal van aanknopingspunten voor microbiologisch onderzoek. Als slurry in kleine flessen (5) kunnen afbraak en bacteriegroei nauwgezet worden gevolgd door telkens met een spuit een monster uit de fles te nemen en dat te analyseren. De molen zorgt voor een voortdurende menging van water en

grond. RIVM-onderzoekers staken met stalen cilinders grondkolommen uit een verontreinigde bodem (6) en namen de gevulde cilinders mee naar het lab. Daar konden zij onder verschillende omstandigheden de omzettingen in de bodem volgen. Toediening van waterstofperoxide bleek de afbraak te versnellen.



6

vetachtige stoffen. Ze komen vaak als onopgeloste deeltjes of geabsorbeerd in organisch bodemmateriaal in de grond voor. In deze vorm zijn de verontreinigingen niet beschikbaar voor de micro-organismen. Erg slecht oplosbare verbindingen, zoals polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's), kunnen maar heel langzaam worden afgebroken.

Solubilisatie is een proces dat beter verloopt naarmate de temperatuur en het vochtgehalte hoger zijn en de grond en verontreinigingen beter gehomogeniseerd zijn. Technisch is aan deze voorwaarden vrij eenvoudig te voldoen. Voor de afbraak van olieproducten in de bodem is het vaak nodig de microbiologische activiteit in het algemeen op te voeren. Dat kan door voedingstoffen toe te voegen of door de temperatuur te verhogen. Micro-organismen kunnen het in oplossing gaan van verontreinigingen bevorderen door uitscheiding van emulgerende stoffen of doordat ze enzymen uitscheiden die de verontreinigingen omzetten in beter oplosbare verbindingen. Wanneer de verontreinigingen zich in onopgeloste vorm in de poriën van bodemdeeltjes bevinden, zijn ze niet beschikbaar voor afbraak.

De opgeloste verontreinigingen moeten bij de micro-organismen terechtkomen, of omgekeerd. Dit kan door stroming of door diffusie. Diffusie zal traag verlopen bij grote en lipofiele stoffen die sterk aan het bodemmateriaal hechten, maar beter gaan bij kleine, wateroplosbare verbindingen. Bij *in-situ*-technieken voor biologische bodemreiniging laten de saneerders de grond zitten waar zij zit. Zij leggen een grondwaterstroming aan die het transport van verontreinigingen en de groei van micro-organismen stimuleert.

Afbraak

Afbraak vindt meestal in de cel plaats. Daar bevinden zich immers de enzymen die de afbraak van kleine verbindingen katalyseren. Voor afbraak op kan treden, moet het micro-organisme de verontreinigingen dus eerst opnemen. De opname van apolaire verbindingen verloopt vermoedelijk via diffusie door de celmembraan, een stap die doorgaans snel verloopt. Transporteiwitten in de membraan kunnen polaire stoffen actief in de cel opnemen.

Zodra een verbinding is opgenomen, staat soms een nieuwe hindernis afbraak in de weg. Er kan eerst nog een proces van *inductie* aan vooraf moeten gaan. Dat betekent dat het micro-organisme de enzymen die de afbraak van de verontreiniging katalyseren, pas vormt wanneer het met deze stof in contact komt. Deze inductie verloopt soms alleen wanneer het organisme geen andere, eenvoudiger afbreekbare, koolstofbron tot zijn beschikking heeft.



Aangezien de bacteriële enzymen zijn toegesneden op omzettingen van natuurlijke stoffen, hebben zij niet veel vat op verontreinigende stoffen waarvan de structuur sterk afwijkt van in de natuur voorkomende verbindingen. De mate waarin een verontreiniging 'natuurvreemd' is, bepaalt mede de snelheid van afbraak. Trage afbraak treedt onder meer op bij gechloreerde oplosmiddelen en organochloorpesticiden. Vaak hebben synthetische chemicaliën een moleculaire structuur die chemisch veel stabiel is dan die van verbindingen die micro-organismen in de natuur hebben leren afbreken. Stoffen als DDT, aldrin, hexachloorbenzeen, perchlooretheen en PCB's kunnen zich dan ook jarenlang in het milieu ophouden zonder dat ze worden afgebroken. Als gevolg van dit persistente gedrag kunnen de stoffen zich ophopen in voedselketens en de dieren aan het einde van zo'n keten schade berokkenen.

Milieucondities

De voor afbraak verantwoordelijke micro-organismen hebben voor hun groei behalve organische verbindingen ook *water, zuurstof en anorganische nutriënten* (zoals fosfaat, stikstof, zwavel en metalen) nodig. Wanneer we bacteriën het vuile werk voor ons willen laten opknappen, zullen we er dus voor moeten zorgen dat zij over deze stoffen kunnen beschikken. Maar er is meer nodig voor een snelle afbraak. Temperatuur en pH spelen ook een belangrijke rol. In een gesloten systeem kunnen we zelf de beste omstandigheden voor groei scheppen. Zo kan de temperatuur op zo'n twintig à dertig graden celsius worden gebracht, het optimum voor veel micro-organismen uit de bodem.



Wanneer we bovendien kalk aan de grond toevoegen, bereikt die al snel de gewenste pH, die meestal tussen 7 en 7,5 ligt.

Aangezien de meeste verbindingen het best onder aërobe omstandigheden worden afgebroken, met zuurstof als elektronenacceptor, speelt de toevoer van zuurstof een onmisbare rol. Beluchting of toediening van een andere

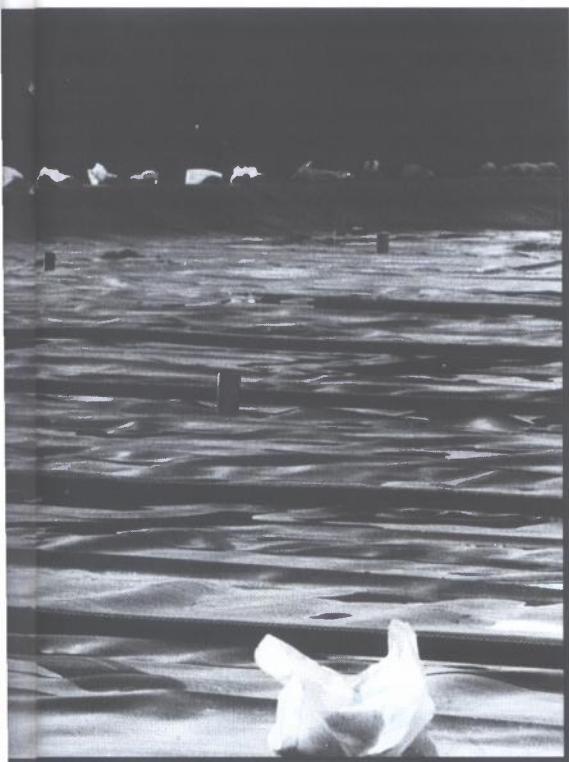
bron van :
xide, dat
zuurstof,

Bij *la*
grond in
kunststof
laag wor
ploegd. *z*
luchttoev
laag voel
procent
lucht nee
bodem st
als slurri
nauwelij
dat geval

Bij *in*-
gen bene
stoftransj
zuurstoff
dat wate
peroxide
toegevoe

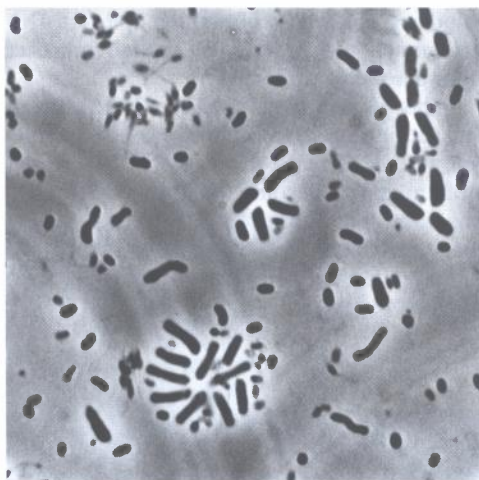
Tabel Afbraak-belemmerende factoren

Verontreiniging	Milieucondities	Recalcitrante structuur	Beschikbaarheid
Olieproducten	■		■
Polycyclische aromaten			■
Aromatische oplosmiddelen	■		■
Gechloreerde oplosmiddelen		■	■
PCB's		■	■
Teerproducten		■	■
Organochloorpesticiden		■	■
Synthetische polymeren		■	■



7. Vaak vindt verontreinigde grond tijdelijk een plaats in een depot. Kunststoffolie moet voorkomen dat de verontreiniging uit de bergplaats die hier komt naar de ondergrond weglekt. Drainagebuizen voeren straks het verontreinigde water dat uit de berg grond zal sijpelen af naar een zuiveringsinstallatie.

8. Hoewel in een willekeurig bodemonmonster vele bacteriesoorten voorkomen, krijgen meestal slechts enkele soorten de kans om onder gegeven omstandigheden goed te groeien. In dit monster zijn dat een paar soorten die in staat zijn gechloroeerde koolwaterstoffen af te breken.



8

bron van zuurstof, bijvoorbeeld waterstofperoxide, dat gemakkelijk ontleedt in water en zuurstof, bevordert de afbraak.

Bij *landfarming* wordt de verontreinigde grond in een dunne laag uitgespreid op een kunststoffolie. De circa dertig centimeter dikke laag wordt goed bemest en regelmatig omgeploegd. Ze is dan ook goed doorlucht. De luchttoevoer via diffusie gaat het best bij een laag vochtgehalte. Wanneer minder dan tien procent van het poriënvolume is gevuld met lucht neemt de snelheid van de gasdiffusie in de bodem sterk af. Bij behandeling van de grond als slurry kan zuurstoftoevoer door diffusie nauwelijks optreden. Intensieve menging zal in dat geval noodzakelijk zijn.

Bij *in-situ*-behandeling van verontreinigingen beneden de grondwaterspiegel moet zuurstoftransport via het water plaatsvinden door zuurstofhoudend water rond te pompen. Aan dat water kan eventueel nitraat of waterstofperoxide als extra elektronenacceptor worden toegevoegd.

Aërobe of anaërobe afbraak

Biodegradatie van organische verbindingen gebeurt vooral door heterotrofe, aërobe micro-organismen. Zij krijgen energie uit de oxydatie van organische verbindingen die ze tegelijk gebruiken als koolstofbron voor de groei. In de praktijk tracht men bij biologische bodemsanering vooral gebruik te maken van deze aërobe afbraak.

Lange tijd werd aangenomen dat zuurstof absoluut noodzakelijk is voor de afbraak van koolwaterstoffen. Recent onderzoek heeft echter aangetoond dat afbraak met nitraat ook mogelijk is, bijvoorbeeld bij de stoffen xyleen en toluen, zij het met lagere snelheid. Welke koolwaterstoffen precies met nitraat als elektronenacceptor kunnen worden afgebroken, is nog onbekend.

Het komt ook voor dat microbiële omzetting uitsluitend onder anaërobe omstandigheden verloopt. De micro-organismen die bij die omzetting betrokken zijn, verdragen geen zuur-

stof. Anaërobie organismen kunnen een aantal gechloreerde koolwaterstoffen gedeeltelijk van chloor ontdoen. Dit is onder andere aange- toond voor hexachloorbenzeen, perchloor- etheen, tetrachloormethaan en hoog-gechlo- reerde PCB's. Voor enkele gechloreerde stof- fen, zoals perchlooretheen en chloorbenzooat, geldt dat ze zelfs als elektronenacceptor kun- nen optreden (zie afb. 1), waarbij de vervan- ging van chlooratomen door waterstofatomen minder-gechloreerde produkten oplevert. De- ze kunnen meestal verder worden omgezet door aërobie organismen.

In het algemeen verloopt de aërobie afbraak van verbindingen, en zeker van koolwaterstof- fen, veel sneller dan de anaërobie. Een aantal stoffen, zoals oliecomponenten, wordt onder anaërobie omstandigheden zelfs nauwelijks omgezet. Praktijkvoorbeelden van succesvolle projecten met anaërobie bodemreiniging zijn nog niet te geven.

De afbraaksnelheid

Afbraak levert energie voor de groei, waardoor de micro-organismen die de verontreinigingen kunnen afbreken, zich vermenigvuldigen. Zo kan in grond die is verontreinigd met olie, het aantal organismen dat in staat is één of meerde- re componenten van olie om te zetten, toene- men van circa 10^6 tot 10^8 bacteriën per gram grond. In grond die is verontreinigd met pen- tachloorfenol is een toename van het aantal pentachloorfenolafbrekende bacteriën van $1,5 \cdot 10^2$ tot $5 \cdot 10^6$ per gram waargeno- men.

In principe neemt bij onbeperkte beschik- baarheid van nutriënten het aantal organismen exponentieel toe, en daarmee dus ook de af- braaksnelheid. In de praktijk wordt dit echter alleen waargenomen onder optimale condities in het laboratorium. In de bodem treden de ex- ponentiële groei en afbraak door een aantal

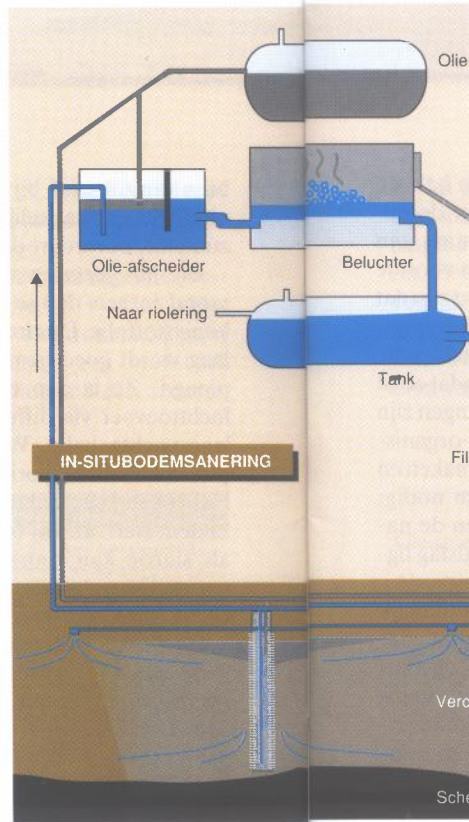


9

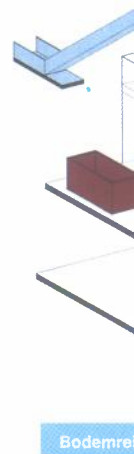
9. Bij landfarming krijgen de bacteriën in dunne lagen verontreinigde grond volop de kans hun werk te doen. De grond wordt regelmatig omgewerkt en be- mest, opdat er steeds voldoende zuurstof en nutriënten beschikbaar zijn. In een kas blijft de grond goed op temperatuur, zodat de microbiële activiteit er veel hoger is dan in de open lucht.

10. In-situ-reiniging bestaat uit het rondpompen van water door de verontreinigde grond, die daarbij gewoon op z'n plaats kan blijven. Het water spoelt de verontreinigingen uit. Soms kan het vervuilde water via het riool worden afgevoerd, maar vaak be- vindt zich bij de te reinigen plek een installatie voor de behandeling van afvalwater.

11 en 12. Aan de TU Delft experimenteren bodemreini- gers met een slurriereactor (12), waarin 4 m^3 vervuilde modder kan worden be- handeld. In de homogene slurrie is de beschikbaar- heid van verontreinigingen voor de bacteriën erg hoog. De afbraak verloopt dan ook snel. Er bestaan al plannen om de methode toe te passen op industriële schaal (11).

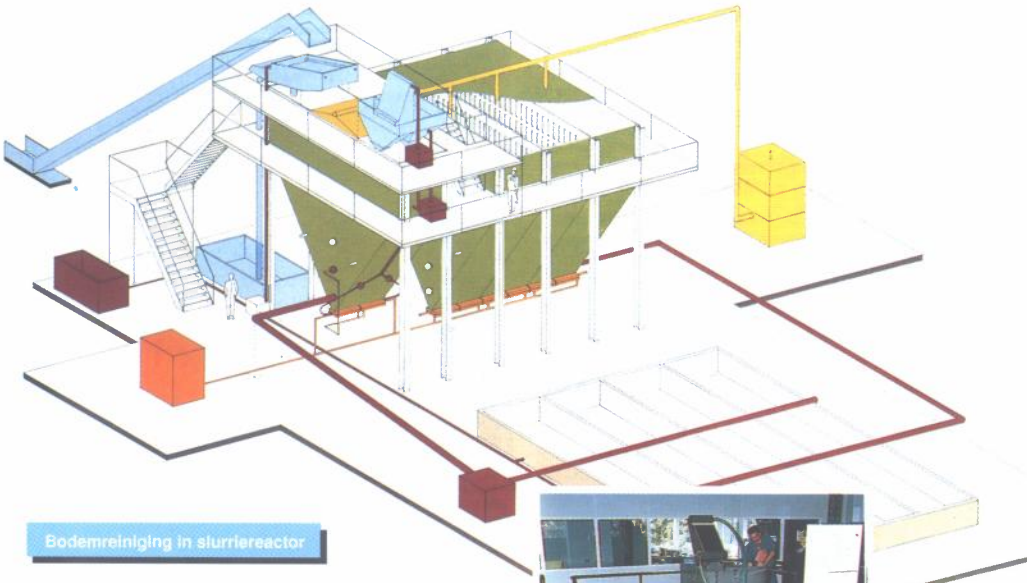


10



Bodemre...

11

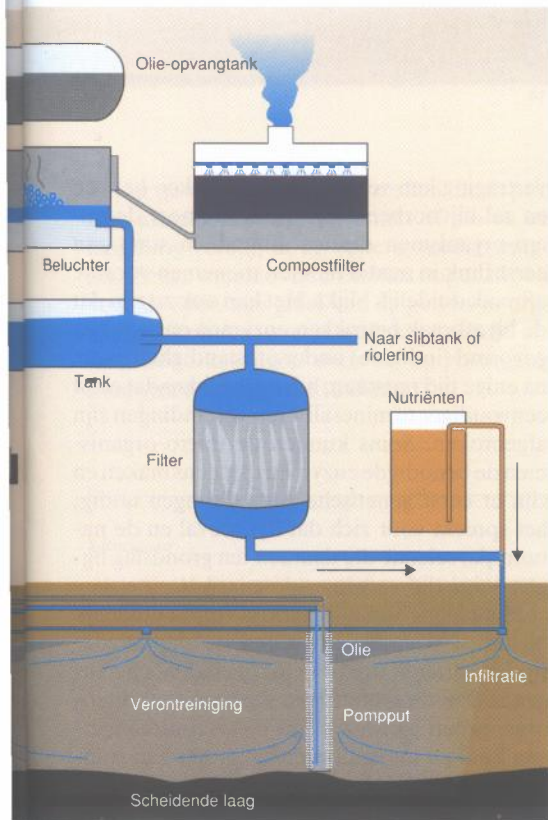


Bodemreiniging in slurrereactor

11



12

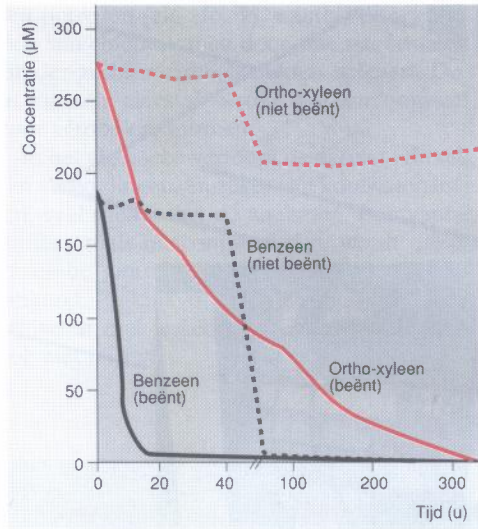


oorzaken niet op. Zo is de toevoer van nutriënten en zuurstof beperkt. Veel van de verbindingen komen in sterk wisselende hoeveelheden in de bodem voor en vaak blijven na gedeeltelijke afbraak componenten over die slecht beschikbaar zijn. De meeste verontreinigingen bestaan uit mengsels van stoffen die met verschillende snelheden worden omgezet. De stoffen komen vaak in zulke lage concentraties voor, dat ze onvoldoende energie leveren voor exponentiële groei. Als de organismen al goed groeien, vallen er vele ten prooi aan predatoren, bijvoorbeeld protozoën (eencellige dieren) die in de bodem aanwezig zijn.

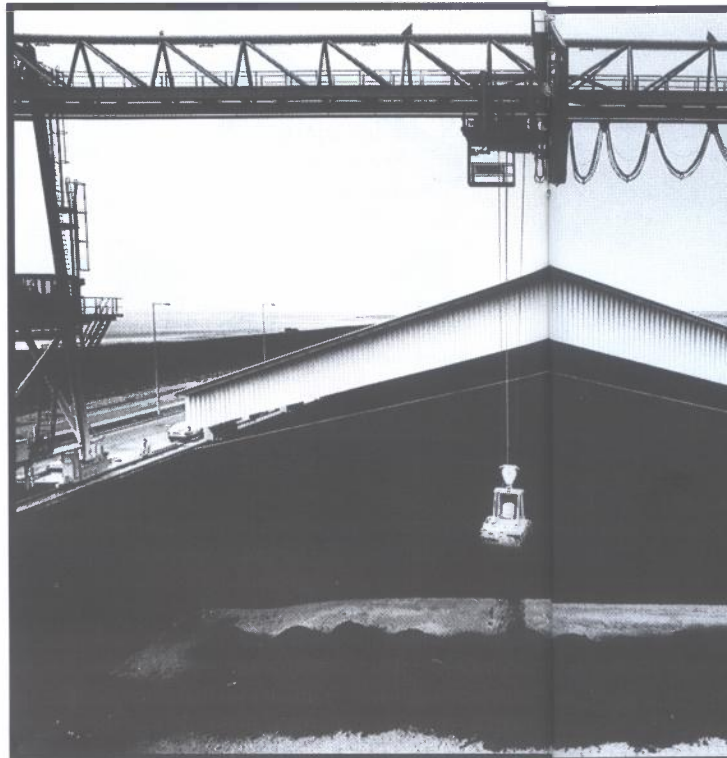
In plaats van exponentieel, verloopt de afbraak van verontreinigingen in grond volgens

13. Enten blijkt van grote invloed op de afbraaksnelheid van verontreinigingen in een slurry. De afbraak van benzeen komt sneller op gang bij enting terwijl o-xyleen alleen goed wordt afgebroken wanneer de juiste micro-organismen zijn toegevoegd.

14. Soms is grond zo ernstig vervuild, dat geen enkele betaalbare reinigingsmethode soelaas kan bieden. Op de Maasvlakte is een depot in gebruik waar dergelijke grond, samen met ander zwaar chemisch afval, tot in lengte van dagen kan blijven.



13



14

de *eerste-orde kinetiek*: de afbraaksnelheid is evenredig met de concentratie, en neemt dus af in de tijd. Het verwijderen van restconcentraties kan ten gevolge daarvan lang duren, mede doordat vooral de lastigste componenten, die vaak in bodemdeeltjes zijn geabsorbeerd, overblijven.

Bij cometabolische afbraak vermenigvuldigen de organismen die voor afbraak zorgen zich niet, omdat er geen energie vrijkomt voor groei. In dit geval kan het nodig zijn andere maatregelen te treffen om het aantal actieve micro-organismen in de grond te vergroten. Zo kunnen bacteriën die cometabolisch gechloroerde koolwaterstoffen afbreken, worden gestimuleerd door toediening van methaan of aromatische verbindingen.

Adaptatie en enten

Het verschijnsel dat biodegradatie van een stof eerst niet optreedt maar na een bepaalde tijd wel op gang komt, noemt men *adaptatie*. De

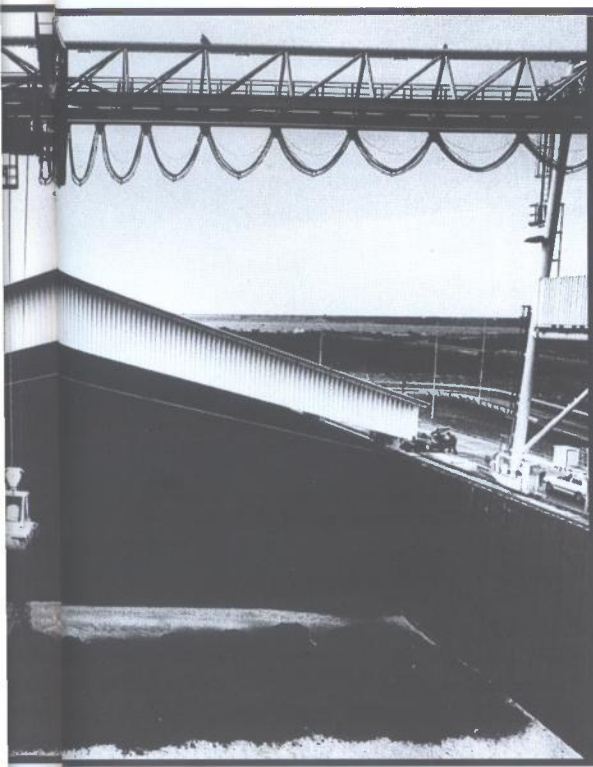
vertraging kan verschillende oorzaken hebben en zal bijvoorbeeld optreden wanneer de micro-organismen die tot afbraak in staat zijn eerst flink in aantal moeten toenemen voor de afbraak duidelijk blijkt. Het kan ook zo zijn dat de bij afbraak betrokken enzymen pas worden gevormd (inductie) onder omstandigheden die na enige tijd ontstaan, bijvoorbeeld nadat eerst eenvoudiger te mineraliseren verbindingen zijn afgebroken. Soms kunnen de micro-organismen de benodigde enzymen niet eens maken en zijn er eerst genetische veranderingen nodig; het spreekt voor zich dat het toeval en de natuurlijke selectie die daaraan ten grondslag liggen enige tijd vergen.

Het belang van adaptatie is vooral duidelijk bij milieuvreemde verbindingen. Adaptatieperiodes variëren van uren tot maanden, en hangen af van de grondsoort. De kans dat micro-organismen aanwezig zijn die verontreinigingen kunnen mineraliseren zal groter zijn wanneer al enige tijd blootstelling aan die verontreinigingen heeft plaatsgevonden.

Het ge...
cipe afbr...
langdurig...
zet. Zeker...
voor de s...
nismen, l...
licht bev...
men van

Literatuur

Alexander...
tal con...
Gibson D...
pounds...
Veel publi...
schritte...
plied a...
tion.



Het gevolg hiervan is dat stoffen die in principe afbreekbaar zijn soms niet of pas na een langdurig verblijf in de bodem worden omgezet. Zeker wanneer de condities ongunstig zijn voor de spontane groei van de gewenste organismen, kunnen we een snellere adaptatie wellicht bewerkstelligen door de micro-organismen van buiten af toe te dienen.

In het laboratorium is inmiddels aangetoond dat door middel van dit enten stoffen kunnen worden afgebroken die anders nauwelijks worden gemineraliseerd. Op praktisch schaal zijn de ervaringen met het enten van organismen nog beperkt. Kort geleden zijn in het buitenland op kleine schaal successen geboekt bij *in-situ*-enting met organismen die cometafobisch trichlooretheen omzetten en met organismen voor de afbraak van pentachloorfenol. De resultaten geven duidelijk aan dat wanneer organismen worden gebruikt die een sterk concurrerend vermogen hebben er in een aantal situaties door enting een versnelde afbraak bereikt kan worden.

Milieubiotechnologie

De afbraakcapaciteit van de micro-organismen in de bodem maakt het mogelijk tal van verontreinigingen onschadelijk te maken. Knelpunten liggen er nog bij de tamelijk hoge restconcentraties die na een behandeling overblijven. Gericht onderzoek naar de factoren die op microschaal de snelheid van biodegradatie beïnvloeden, dient meer inzicht te geven in de oorzaken van beperkte beschikbaarheid. Dit onderzoek zal tevens onmisbaar blijken voor het verder ontwikkelen van efficiënte processen voor biologische bodemreiniging. Ook een ecotoxicologische beoordeling van behandelde bodems is gewenst.

De veelzijdigheid van micro-organismen heeft microbiologen steeds weer verstedeld doen staan. Het is te verwachten dat microbiële activiteiten steeds meer zullen betekenen voor biologische bodemreiniging en andere milieubiotechnologische processen.

Literatuur

- Alexander M. Biodegradation of chemicals of environmental concern. Science 1981; 211: 132-138.
 Gibson DT, red. Microbial degradation of organic compounds. New York: Marcel Dekker, 1984.
 Veel publikaties over dit onderwerp verschijnen in de tijdschriften *Environmental Science and Technology*, *Applied and Environmental Microbiology* en *Biodegradation*.

Bronvermelding illustraties

- Hollandse Hoogte, Amsterdam: pag. 246-247 (Chris de Jongh), 2 (Michiel Wijnbergh), 7 (Eduard de Kam) en 14 (Freek van Arkel)
 R. van den Berg/RIVM, Bilthoven: 6
 Heidemij Reststoffendiensten BV, Waalwijk: 9
 Vakgroep Bioprocestechnologie, TU Delft: 11 en 12
 Afbeelding 10 werd gemaakt naar een tekening van De Ruiter Milieutechnologie BV, Halfweg. De overige afbeeldingen zijn afkomstig van de auteur.