

SKB

De Stichting Kennisontwikkeling Kennisoverdracht Bodem (SKB) draagt zorg voor de kennisontwikkeling en kennistransfer die actoren nodig hebben om op een kosteneffectieve wijze een maatschappelijk gewenste afstemming en functioneel bodemgebruik en bodemkwaliteit te kunnen realiseren. SKB richt zich hierbij primair op de eindgebruikers: de probleemeigenaren die een kosteneffectieve oplossing zoeken voor de sanering van 'hun' verontreinigde bodem. SKB reikt daarvoor kennis over technieken aan en bevordert bredere acceptatie hiervan in de markt.

SKB Cahiers

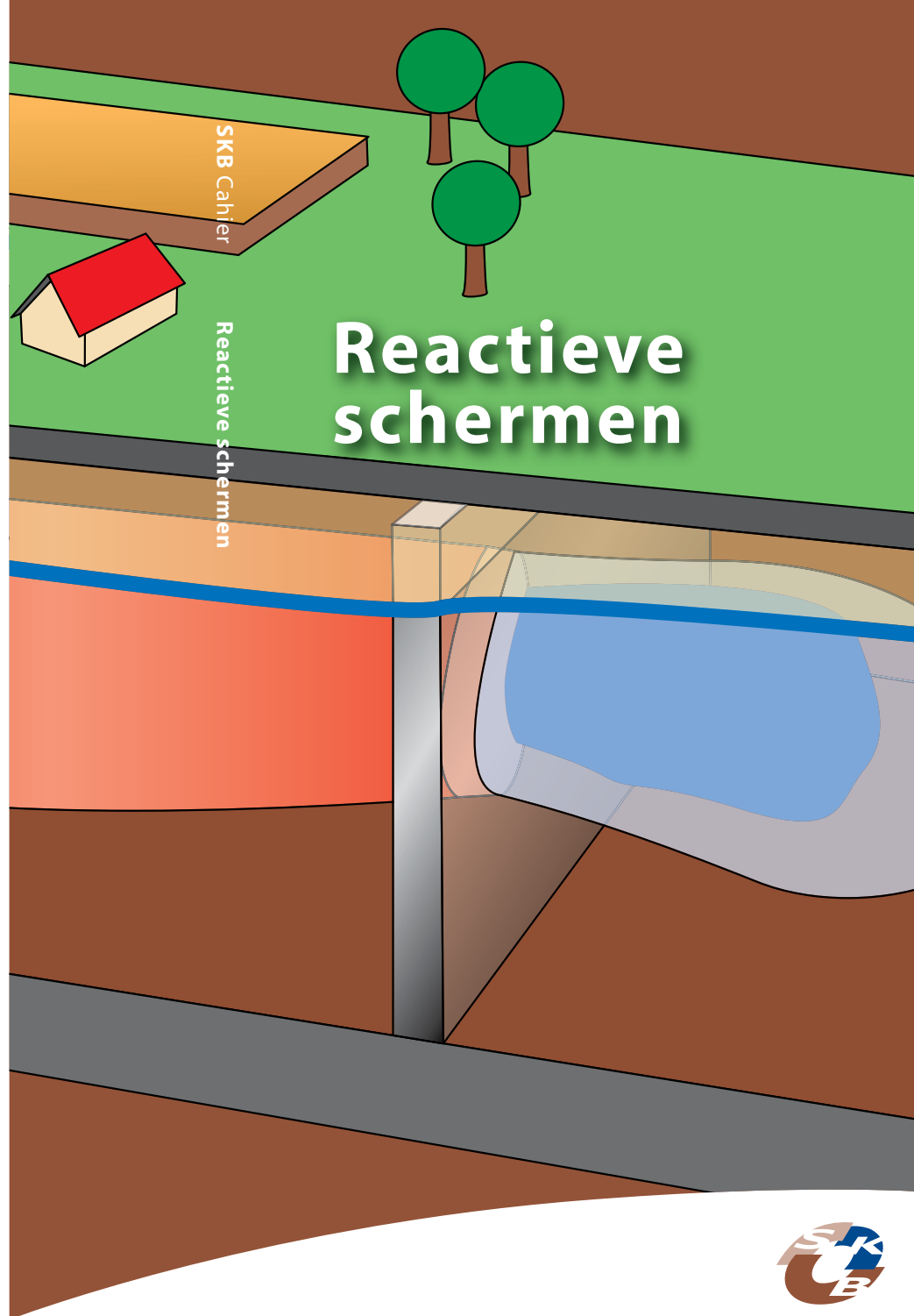
SKB Cahiers zijn cahiers waarin op een beknopte en bondige wijze belangrijke onderwerpen over de bodem aan de orde komen. De SKB Cahiers zijn gericht op een breed publiek en leesbaar en toegankelijk geschreven. Op basis van toepassingsgerichte praktijkvoorbeelden moeten de lezers met het onderwerp in hun eigen beroepspraktijk aan de slag kunnen.

De titels die in deze reeks zijn verschenen, kunt u vinden op www.skbodem.nl. Hier kunt u deze ook bestellen.



**Stichting
Kennisontwikkeling
Kennisoverdracht
Bodem**

Büchnerweg 1
Postbus 420
2800 AK Gouda
Tel. (0182) 54 06 90
Fax (0182) 54 06 91
programmabureau@skbodem.nl
www.skbodem.nl



Doen en laten in de bodem

Type verontreiniging	Voorbeeld stoffen	Mogelijk reinigingsmechanisme	Mogelijk schermtype en mate van toepasbaarheid		
			IJzerscherm	Anaeroob bioscherm	Aeroob bioscherm
Aromatische koolwaterstoffen					
- Vluchtig	Benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen, styreen, naftaleen	- Aerobe microbiologische afbraak (mineralisatie) - Anaerobe microbiologische afbraak	P	P	S
- Polycyclisch	PAK, creosoten	- Aerobe microbiologische afbraak (lichte fracties) - Chemische oxidatie (soms)	N	N	P
Vluchtige alifatische koolwaterstoffen					
- Meervoudig gechloreerd	Per, tri, trichloorethaan, tetrachloormethaan	- Microbiologische reductieve dechlorering - Chemische reductieve dechlorering (ijzer)	S	S	N
- 1-2 voudig gechloreerd	Cis, dichloorethaan, vinylchloride, chloorethaan	- Aerobe microbiologische afbraak (mineralisatie) - Microbiologische reductieve dechlorering - Chemische reductieve dechlorering (ijzer)	S ¹	S ²	S
- Geoxygeneerd	Alcoholen, ketonen, esters, ethers, fenolen	- Aerobe microbiologische afbraak (mineralisatie) - Anaerobe microbiologische afbraak	S	S	S
Gechloreerde aromatisch koolwaterstoffen					
- Meervoudige gechloreerd	Pentachloorbenzeen, tetrachloorfenol, hexachloorbenzeen	- Microbiologische reductieve dechlorering - Chemische reductieve dechlorering (ijzer)	S	S	N
- 1-2 voudig gechloreerd	Chloorbenzeen, dichloorbenzeen, chloorfenol	- Aerobe microbiologische afbraak (mineralisatie) - Reductieve dechlorering - Chemische oxidatie	S	S	S
Overige koolwaterstoffen					
- Lichte minerale olie	C6-C16	- Microbiologische oxidatie	N	N	S
- Zware minerale olie	C16-C40	- Microbiologische degradatie	N	N	P
- Cyclisch	Hexachloorhexaan (lindaan)	- Microbiologische reductieve dechlorering	I	I	N
- Explosieven	TNT, RDX, HMX	- Microbiologische reductie - Chemische oxidatie	P	P	N
Anorganische verbindingen					
- Metalen en metaloïden	Chroom, koper, nikkel, lood, kwik, cadmium, zink, arseen, seleen, etc.	- In situ precipitatie - Coprecipitatie met ijzersulfide	S	S	N
- Radioactieve verbindingen	Uranium, plutonium	- In situ precipitatie - Coprecipitatie met ijzersulfide	P	P	N
- Anionen	Nitraat, sulfaat, perchloraat	- Microbiologische reductie (denitrificatie, sulfaatreductie etc.)	I	I	N

- S

State of the art
- I

In ontwikkeling
- P

Potentie
- N

Niet toepasbaar

¹ niet voor 1,2-dichloorethaan, chloorethaan en chloormethanen

² niet voor 1,1-dichloorethaan

Reactieve schermen



Stichting
Kennisontwikkeling
Kennisoverdracht
Bodem

Inhoud

Voorwoord	7	5. Bioschermen of geactiveerde zones	37
1. Wat zijn reactieve schermen?	9	5.1 Anaeroob of Aeroob?	37
2. Welke soorten schermen zijn er?	13	5.2 Ontwerp	37
2.1 In welke situaties worden schermen toegepast?	13	5.2.1 Algemeen	37
2.2 Welke uitvoeringsvormen worden onderscheiden?	15	5.2.2 Anaeroob bioscherm	38
3. Hoe werken reactieve schermen?	17	5.2.3 Aeroob bioscherm	46
3.1 Voor welke verontreinigingen worden schermen toegepast?	17	5.3 Installatie en uitvoering	46
3.2 De belangrijkste werkingsprincipes toegelicht	18	5.4 Bedrijfsvoering en monitoring	47
3.2.1 Afbraak van VOCI's met anaerobe microbiologie	18	5.5 Aandachtspunten, voor- en nadelen	49
3.2.2 Afbraak van VOCI's met nulwaarde ijzer	20	Meervoudig anaeroob bioscherm voor de aanpak van een diepe VOCI-pluim	50
3.3 Microbiologische oxidatie	22	6. Funnel and gate systemen	53
3.4 Precipitatie van metalen	23	6.1 Hoe en waarom funnel and gate?	53
3.5 Reduceren van nitraat en sulfaat	23	6.2 Welke schermtypen kunnen worden gebruikt?	54
4. IJzerschermen	25	6.3 Aandachtspunten, voor- en nadelen	55
4.1 IJzer als voorbeeld	25	Funnel and gate met biologisch hekwerk	58
4.2 Ontwerpaspecten	26	7. Trends en ontwikkelingen	60
4.3 Installatie en uitvoering	28	8. Aanvullende informatie	62
4.4 Bedrijfsvoering en monitoring	31	8.1 Internet	62
4.5 Aandachtspunten, voor- en nadelen	32	8.2 Literatuur	63
Realisatie reactief ijzerscherm	34	8.3 Overige literatuur	63
		8.4 Projectreferenties	64

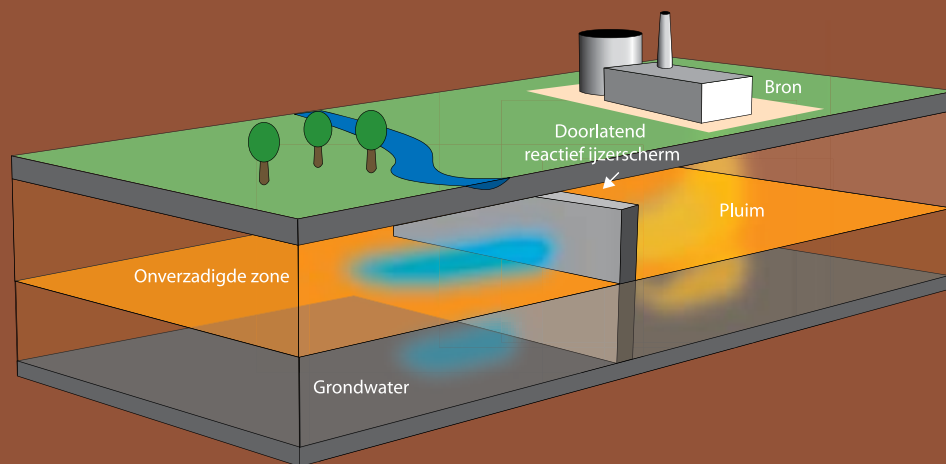
Voorwoord

In SKB cahiers wordt op beknopte en bondige wijze informatie gegeven over een techniek, een stof of proces, die in één of meerdere SKB-projecten aan de orde is geweest. Voor u ligt het cahier dat ingaat op reactieve schermen. Reactieve schermen worden toegepast om verontreinigende stoffen uit de grondwaterstroming te halen. De cahiers gaan minder diep in op de materie als de afzonderlijke SKB-projecten, maar bieden voldoende informatie voor de lezer zodat hij met het onderwerp aan de slag kan gaan. Ze zijn bedoeld voor een breed publiek van mensen die zich professioneel met de bodem bezighouden. Voor diegenen die meer over een onderwerp willen weten zijn in de cahiers verwijzingen opgenomen.

Dit cahier is tot stand gekomen door de inspanning en samenwerking van de betrokkenen bij SKB-projecten op het gebied van reactieve schermen. In overleg met een lezersgroep is de inhoud van het cahier vastgesteld en getoetst voor aansluiting bij de praktijk van de doelgroep.



1



Het principe van een reactief scherm

Wat zijn reactieve schermen?

Mobiele verontreinigingen verspreiden zich met het grondwater. Niet in alle situaties is het mogelijk om de bron van verontreiniging te saneren. Soms is de bronzone niet bereikbaar, of is sanering eenvoudigweg te kostbaar. De huidige Wet Bodembescherming heeft multifunctionaliteit ook niet meer als uitgangspunt. Wel is het vaak nodig om ontoelaatbare nalevering van verontreiniging te stoppen. Zeker als de natuurlijke afbraak gering is, of als de verontreiniging een kwetsbaar object bedreigt, is het wenselijk om de verspreiding van verontreiniging tegen te gaan. De verontreiniging kan worden tegengehouden met een dicht scherm, maar dit heeft als nadelen dat grondwater moet worden opgepompt en gezuiverd. Dat kost energie en levert afval op. Ook een geohydrologisch scherm, dat bestaat uit een rij onttrekkingen heeft deze nadelen.

Reactieve schermen vormen een alternatief dat deze nadelen niet kent. Reactieve schermen kunnen worden ingezet om verontreinigende stoffen uit de natuurlijke grondwaterstroom te verwijderen. Het scherm laat grondwater ongehinderd door (=permeabel), maar vormt een barrière voor de verontreinigende stoffen. In de Engelstalige landen wordt daarom ook wel gesproken van Permeable Reactive Barriers (PRB's). De verontreinigende stoffen kunnen afhankelijk van het type scherm microbiologisch of chemisch worden afgebroken of worden vastgehouden in het scherm. Een reactief scherm kan worden vergeleken met een visnet. De verontreinigende stoffen zijn de vissen die uit het water worden afgevangen.

Een reactief scherm is een passieve techniek; een techniek die wordt ingezet om de verspreiding van verontreiniging te beheersen. Een scherm leidt niet tot actieve sanering van de bronzone van de verontreiniging.

De eerste onderzoeken naar reactieve schermen stammen uit de VS en Canada in de late jaren 80. In toenemende mate werd men zich bewust van bodemverontreiniging. Er was behoefte aan een duurzame en extensieve oplossing. Nadat de Universiteit van Waterloo (Gillham & O'Hannesin, 1994) de toepassing van zero-valent ijzer (Fe^0) voor de dechlorering van vluchtige organochloorverbindingen patenteerde en uitontwikkelde, nam de toepassing van ijzergranulaat een vlucht. Inmiddels zijn meer dragermaterialen bekend, maar granulair ijzer blijft wel de voornaamste toepassing. Bij een ijzerscherm wordt een deel van de bodemmatrix vervangen door reactief materiaal, dit in tegenstelling tot de bioschermen of reactieve zones waarbij gebruik wordt gemaakt van het oorspronkelijke bodemmateriaal.

De bioschermen kwamen in de tweede helft van de jaren 90 op. Een groot aantal verontreinigingen kan onder de juiste omstandigheden microbiologisch worden afgebroken tot onschadelijke eindproducten. Omdat deze reacties plaatsvinden in het grondwater (microbiologische reacties zijn 'watergedragen' redoxreacties, in tegenstelling tot reactief ijzer, waarbij de ijzermatrix zelf een rol speelt in de productie van de voor de afbraak benodigde componenten), hoeft de bodemmatrix zelf niet vervangen te worden maar kan volstaan worden met het injecteren van hulpstoffen in het grondwater. Hierdoor is het niet langer noodzakelijk om een sleuf te graven tot grote diepte. Het boren van verticale bronnen is voldoende voor het inbrengen van hulpstoffen en vervolgens het creëren van een biologisch geactiveerde zone in de oorspronkelijke bodem.

Ijzerschermen en bioschermen hebben met elkaar gemeen dat verontreinigd grondwater het scherm binnen stroomt, en (grotendeels) gereinigd het scherm verlaat. Door de verblijftijd van het grondwater in de reactieve zone hebben processen de tijd om verontreinigingen om te zetten, te binden dan wel af te breken.

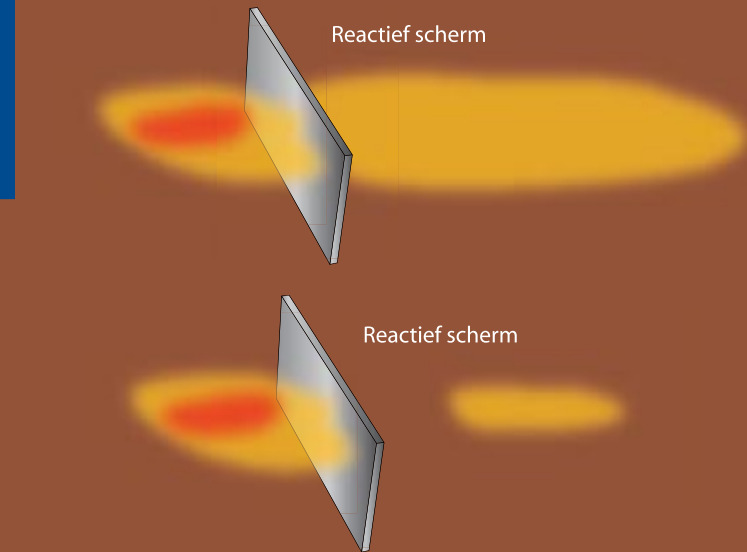
Het verschil tussen ijzer- en bioschermen zit in de aanleg en het onderhoud. Voor een ijzerscherm moet ijzergranulaat in een sleuf in de bodem worden aangebracht. Dit vergt vaak hoge investeringen. Daarna is het onderhoud nihil. Een bioscherm daarentegen vergt

weinig investering, maar wel regelmatige monitoring en bijsturing van de microbiologie. Bij een bioscherm brengt de exploitatie meer kosten met zich mee.

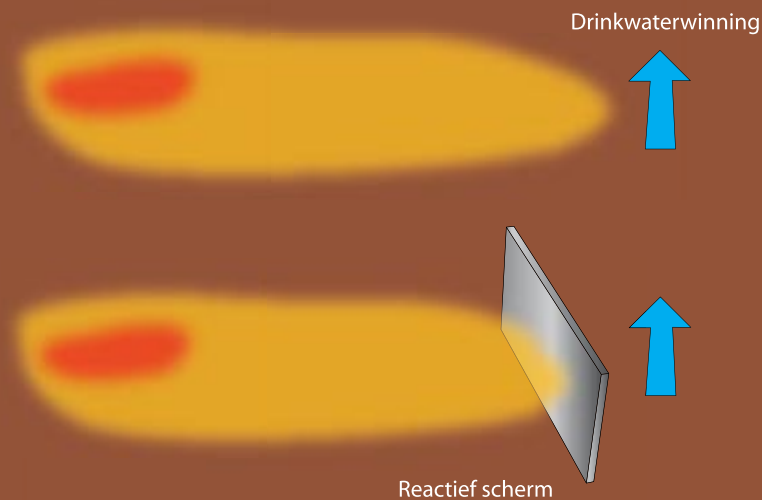
Met een zogenaamd funnel and gate systeem (trechter en poort) kan de verontreinigde grondwaterstroom naar een smallere, en beter controleerbare zone worden gevoerd. In deze zone of gate wordt reactief materiaal aangebracht of de biologie gestimuleerd. Dit heeft als voordeel dat een beperktere investering in het reactieve materiaal nodig is. Voor bioschermen geldt dat de zone die moet worden gemonitord en gestuurd kleiner is.



2



1. Splitsen bron en pluim



2. Vangnet voor het front van de pluim

Welke soorten schermen zijn er?

2.1 In welke situaties worden schermen toegepast?

Het basisprincipe bij alle schermen is dat de verontreinigende stoffen door het natuurlijke grondwaterverhang naar het scherm worden getransporteerd, wat deze toepassing tot een passieve techniek maakt. In tegenstelling tot meer actieve saneringstechnieken is geen energie nodig voor het transport van verontreiniging naar de stoffen (reagentia, nutriënten etc.) die de afbraak bewerkstelligen. Dit basisprincipe leidt ertoe dat schermen op verschillende plaatsen en met verschillende doelen in een verontreiniging kunnen worden geplaatst en dat verschillende toepassingsvormen denkbaar zijn.

1. Splitsen bron en pluim

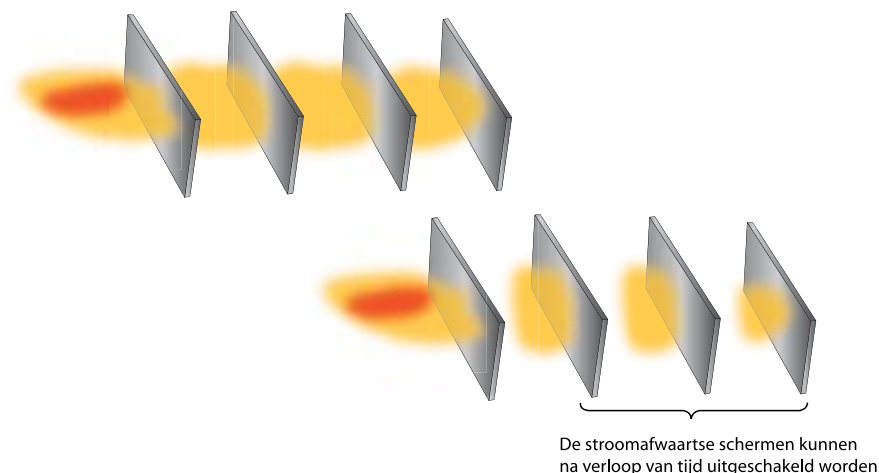
In veel gevallen is sprake van een bronzone met puur product die sterk nalevert naar een pluim in het grondwater. Tegelijkertijd is het moeilijk om de bron te verwijderen omdat de bronzone bebouwd is, of omdat sanering technisch lastig is (bijvoorbeeld bij zaklagen). Als de pluim van nature afbreekt of actief wordt gesaneerd, kan een reactief scherm worden ingezet om de uitstroom van verontreiniging naar de pluim te beperken, zonder dat de bronzone hoeft te worden verwijderd. Zie de illustraties op de linkerpagina.

2. Vangnet voor het front van de pluim

Het komt voor dat de afstand tussen de verontreiniging en een kwetsbaar object (of het eigendom van derden) klein is, terwijl de bron van de verontreiniging niet wordt gesaneerd, bijvoorbeeld omdat de verontreiniging zich onder bebouwd gebied of op grote diepte bevindt (of omdat sanering uiterst kostbaar is). Niettemin is actie nodig om de verdere verspreiding tegen te gaan. In dat geval kan een reactief scherm worden geplaatst bij het front van de pluim.

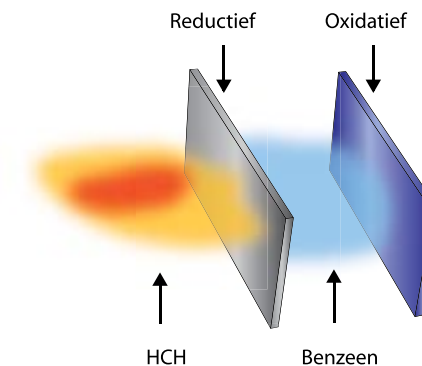
3. Sanering van de verontreiniging door segmentering van de pluim

In toenemende mate worden reactieve schermen ingezet om langgerekte pluimen te saneren. Als meerdere schermen achter elkaar in de pluim worden gezet, dan zal de verontreiniging met de grondwaterstroming door de schermen stromen. De verontreiniging wordt opgeknipt in partjes. Als de afstand tussen de schermen wordt afgestemd op de snelheid van het grondwater (en de retardatie van de verontreinigende stoffen) is sanering van de pluim mogelijk.



4. Omzetting in een beter afbreekbare vorm, of afvang van limiterende stoffen

Niet altijd is een verontreiniging in één stap afbreekbaar tot een niet milieuschadelijke verbinding. Bijvoorbeeld HCH (lindaan) moet eerst onder sterk anaerobe condities worden omgezet naar chloorbenzeen of benzeen, voordat verdere (oxidatieve) afbraak mogelijk is. De verontreiniging moet achtereenvolgens (sequentieel) door verschillende redoxcondities worden geleid. Soms zorgt de omgeving zelf voor een goede tweede stap (oxisch achtergrond, of kwel naar zuurstofrijk oppervlaktewater), soms is een opeenvolging van verschillende schermen nodig.



2.2 Welke uitvoeringsvormen worden onderscheiden?

In de vorige paragraaf is uiteengezet in welke situaties reactieve schermen kunnen worden ingezet. Afhankelijk van de omgevingscondities kan een reactief scherm op verschillende manieren worden uitgevoerd:

1. Volledig reactief scherm of Permeabele Reactieve Barrière (PRB), waarbij een doorgaande gleuf in de bodem is gevuld met reactief materiaal (ijzergranulaat, compost, turf, actief kool). De gleuf wordt gemaakt met een sleuvenfrees of diepwandtechniek (zie 4.3).
2. Bioscherm of biologisch geactiveerde zone. De oorspronkelijke bodem wordt door de injectie van hulpstoffen (electrondonor/acceptor, nutriënten) 'geactiveerd' voor de natuurlijke, gestimuleerde afbraak of de precipitatie/immobilisatie van de verontreiniging. De afbraak kan aeroob of anaeroob zijn. Er zijn 3 uitvoeringswijzen:
 1. Gas- of persluchtinjectie;
 2. Substraatdosering;
 3. Electrodeenscherm (electrobio).
3. Funnel and gate (trechter en poort): Dit is een combinatie van een dicht civieltechnisch scherm (damwand, gespoten bentonietwand, diepwand, foliescherm) in de vorm van een trechter, waarmee het verontreinigde grondwater naar openingen in de wand wordt geleid. In deze openingen kan een reactor zijn geplaatst, een bio-scherm of reactief materiaal (bijvoorbeeld ijzergranulaat).

3



Hoe werken reactieve schermen?

3.1 Voor welke verontreinigingen worden schermen toegepast?

In principe zijn voor alle mobiele verontreinigingen reactieve schermen beschikbaar. Het principe van funnel and gate met actief kool in de reactoropening voldoet bijvoorbeeld voor nagenoeg alle verontreinigende stoffen.

Op basis van de fysisch-chemische eigenschappen van een stof en op bekende afbraakmechanismen voor een bepaalde stof(groep) kan worden vastgesteld welk scherm kan worden toegepast. De reactiemechanismen hierbij zijn biologische omzettingen in de aan- of juist de afwezigheid van zuurstof, precipitatie van metaalzouten onder gereduceerde omstandigheden of fysieke verwijdering uit het grondwater door adsorptie aan organisch koolstof.

De meest gangbare toepassingen zijn:

Reinigingsprincipe	Verontreinigende stof	Schermtypen
Microbiologische reductie	VOC, Chloorbenzenen, nitraat, sulfaat	Anaeroob bioscherm, Turf of compostscherm ¹
Chemische reductie	VOC, Chloorbenzenen, nitraat, sulfaat	IJzerscherm
Anaerobe microbiologische afbraak	BTEX	Anaeroob bioscherm ² met nitraat/sulfaat
Microbiologische oxidatie (mineralisatie)	BTEX, styreen, lichte PAK en lichte olie	Aeroob bioscherm of Persluchtscherm
Precipitatie en/of reductie van metalen	Metalen	Anaeroob bioscherm IJzerscherm
Adsorptie	Vrijwel alle stoffen	Actief kool, Turf of compostscherm ¹

¹ Mogelijk ook met houtsnippers, maar allen nog niet vaak toegepast/onzeker.

² Komt vooral de laatste jaren op, nog niet vaak toegepast in schermconfiguraties.

Er zijn meer toepassingen en ontwikkelingen bekend. In de tabel op de omslag is een uitgebreider en gedetailleerd overzicht opgenomen. Daarbij is een onderscheid gemaakt tussen technieken die zichzelf in de praktijk hebben bewezen en technieken die nog in opkomst zijn.

Daarnaast zijn ook de concentraties waarin de verontreiniging voorkomt belangrijk voor de afweging of een scherm redelijkerwijs toepasbaar is. Als sprake is van een brongebied, dan moet plaatsing in puur product, of concentraties die daarop wijzen, worden vermeden. Niet alleen schiet de werking van nagenoeg alle schermtypen tekort, ook de nalevering wordt niet gereduceerd. Er is immers verontreiniging in hoge concentraties al achter het scherm aanwezig. Redelijkerwijs toepasbaar houdt in dit kader tevens in dat de sanering kosteneffectief en praktisch uitvoerbaar moet zijn, en daarbij een voldoende milieurendement moet bezitten. Een actief koolscherm voor een verontreiniging met hoge concentraties is niet redelijkerwijs toepasbaar, omdat het actief kool in dat geval te vaak vervangen of geregenereerd moet worden.

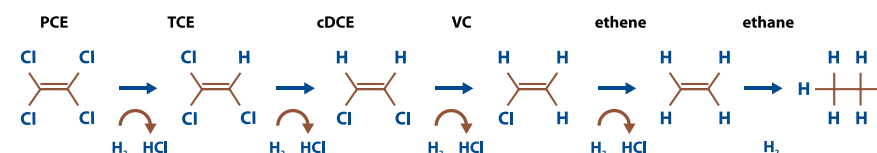
In principe kunnen ook de reguliere in situ technieken worden ingezet in een lijnopstelling. Omdat een schermtoepassing per definitie een beheerstechniek is, en dus langdurig in stand moet worden gehouden, zijn alleen extensieve in situ technieken geschikt. Typische bronverwijderingstechnieken als chemische oxidatie met Fenton reagens, of six phase heating, verbruiken veel grondstof of energie, en leiden bij langdurige toepassingen tot (te) hoge exploitatiekosten.

3.2 De belangrijkste werkingsprincipes toegelicht

3.2.1 Afbraak van VOCl's met anaerobe microbiologie

De afbraakroutes van de meest bekende VOCl's, per en tri, zijn intensief bestudeerd en bekend. In het zuster cahier VOCl (Nipshagen 2007) wordt de afbraak uitgebreid toegelicht. Het basisprincipe berust op de toevoeging van complex organisch materiaal; de electronendonor. De omzetting van organisch materiaal tot waterstof is een microbiologisch proces, waarbij verschillende bacteriestammen betrokken kunnen zijn. Voor de volledige, achtereenvolgende substitutie van chloor door waterstof

tot aan etheen (zie onderstaand schema: reductieve dechlorering) is maar één bacteriestam bekend, de Dehalococcoïdes ethenogenes. Er zijn wel meer stammen bekend die per kunnen afbreken tot cis. Daarnaast zijn meerdere mechanismen bekend die cis afbreken tot CO₂ (mineraliseren).



Het principe van reductieve dechlorering is toepasbaar op meerdere gechloreerde verbindingen zoals chloorbenzenen, chloorfenolen en HCH. Bij de complexere verbindingen zoals PCB's en dioxinen treedt ook reductieve dechlorering op, maar afhankelijk van de exacte structuur kan dit proces variëren van vlot tot zeer langzaam.

Veel gebruikte substraten voor het stimuleren van reductieve dechlorering zijn:

Substraat	Voordelen	Nadelen
Melasse (rietsuikerstroop)	Beproefd, redelijk lang werkzaam	Stroperig, moeilijker verwerkbaar, verstoppingsrisico
Protamylasse (restproduct aardappelzetmeel)	Beproefd, redelijk lang werkzaam, bevat nutriënten	Verstoppingsrisico, wisselend van samenstelling, zwevende stof
Lactaat, acetaat	Werkt snel, goed verwerkbaar	Kostbaar, bevat geen nutriënten, snel uitgewerkt
Methanol	Zeer goed verwerkbaar, snel	Snel uitgewerkt

De keuze van het substraat is onder meer afhankelijk van: bodem-chemie, grondwaterstromingsnelheid, samenstelling en concentratie verontreiniging. Om de voor- en de nadelen van verschillende substraten te combineren worden in de praktijk ook combinaties toegepast, bijvoorbeeld van Protamylasse en Methanol.

Effect op redoxcondities en zuurgraad

Reductieve dechlorering treedt pas effectief op als nitraat en sulfaat uit het grondwater zijn gereduceerd (deze elektronenacceptoren concurreren met de verontreinigingen). De dosering van organisch materiaal leidt tot een lagere redoxpotentialaal (-150 Eh of minder) en de reductie van nitraat, Fe^{3+} en sulfaat. Als sulfaat is gedaald tot minder dan 10 mg/l (nitraat is dan volledig weg), dan wordt de gechloreerde verbinding een interessante elektronenacceptor voor de microbiologie. Bij hogere concentraties sulfaat is dechlorering in het veld weliswaar mogelijk, maar wordt in de praktijk niet vaak waargenomen. De fermentatie van organisch materiaal leidt tot de vorming van vetzuren, en vervolgens ontstaan bij het proces van reductieve dechlorering H^+ en Cl^- . Door deze oorzaken zal de zuurgraad dalen. Onder een zuurgraad van 5 - 5,5 wordt de microbiologie sterk geremd. Vooral bij hogere concentraties en grotere doseringen elektronendonor is de kans aanwezig dat de pH te ver daalt en de afbraak stagneert.



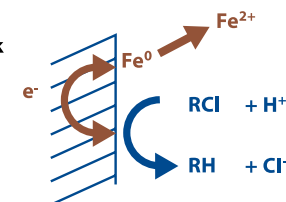
Veel voorkomende VOCl zoals per en 1,2-dichloorethaan kunnen volledig anaeroob microbiologisch worden afgebroken. De volledige biologische afbraak van 1,1,1-trichloorethaan is mogelijk, maar stagneert vaak bij 1,1-dichloorethaan (dit in tegenstelling tot de afbraak met Fe^0).

3.2.2 Afbraak van VOCl's met nulwaarde ijzer

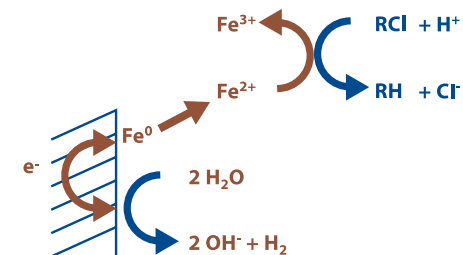
Naar het werkingsmechanisme van reductieve dechlorering door nulwaarde ijzer (Fe^0) is veel onderzoek verricht door de Universiteit van Waterloo. Duidelijk is dat een serie redox-reacties bij het proces betrokken is, die in alle gevallen leidt tot de oxidatie van nulwaardig ijzer (roesten) en de reductie van de gechloreerde verbinding RCl naar RH. De volgende 3 basismechanismen zijn beschreven.

1. Directe overdracht van elektronen van Fe^0 naar de gechloreerde verbinding RCl, waarmee de vervanging van chloor door waterstof mogelijk wordt. (bijvoorbeeld VC wordt etheen $\text{C}_2\text{H}_3\text{Cl} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4$)
2. Oxidatie van nulwaarde ijzer met water tot waterstof en Fe^{2+} . De verdere oxidatie van in de waterfase van Fe^{2+} naar Fe^{3+} levert vervolgens de elektronen die de vervanging van chloor door waterstof faciliteert.
3. Waterstof, dat ontstaat bij de oxidatie van Fe^0 , reageert met de gechloreerde verbinding, waarbij Cl^- en H^+ ontstaat.

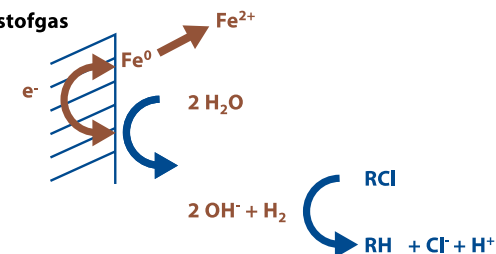
1. Directe reductie aan het metaaloppervlak



2. Reductie door Fe^{2+}



3. Reductie door waterstofgas



(Suthersan, 1997, Matherson & Tratnyek 1994)

Specifieke reacties en precipitaten in ijzer

In ijzerschermen worden dalingen van de redoxpotentiaal gemeten tot -400 mv. In tegenstelling tot bioschermen kan de pH in ijzerschermen stijgen tot 9 - 10 en meer.

Afhankelijk van de grondwaterchemie kunnen daardoor in ijzerschermen minder gebruikelijke reacties en neerslagen voorkomen. Behalve allerlei ijzer(Hydro)oxiden moet bij het ontwerp rekening worden gehouden met carbonaten (calciet, sideriet) en sulfides (pyriet, mackinawiet). Deze precipitaten of neerslagen hebben een negatieve invloed op de doorlatendheid en reactiviteit van ijzer en dus van het scherm.



In ijzerschermen worden de meest voorkomende VOCl (per, tri) goed afgebroken. In tegenstelling tot de microbiologische afbraak wordt 1,1,1-trichloorethaan wél afgebroken, maar is de afbraak van 1,2-dichloorethaan daarentegen nog niet aangetoond.

3.3 Microbiologische oxidatie

Microbiologische oxidatie of aerobe afbraak vindt plaats als de micro-organismen in een bodem onder zuurstofrijke omstandigheden een verontreiniging afbreekt. Zuurstof fungeert hierbij als de electronenacceptor en de verontreiniging als electronendonor. De verontreinigende stoffen worden afgebroken tot kooldioxide en water. Bacteriën koppelen de oxidatie van de verontreinigingen aan de reductie van zuurstof, waarbij de vrijkomende energie gebruikt wordt voor onder meer celgroei.

Verontreinigingen die op deze wijze kunnen worden afgebroken zijn bijvoorbeeld aromaten (BTEX), lichte minerale oliefracties en licht (enkel- of tweevoudig) gechlloreerde ethenen, ethanen en methanen.



Hoger gechlloreerde VOCl (per, tri) worden aeroob niet afgebroken. De aerobe afbraak van cis en VC is wel mogelijk.

3.4 Precipitatie van metalen

Zowel in (anaerobe) bioschermen als in de aanwezigheid van ijzer ontstaan reducerende omstandigheden¹. Onder die omstandigheden wordt sulfaat gereduceerd tot sulfide (SO_4^{2-} wordt S^{2-}). Het sulfide vormt met een groot aantal metaalionen een metaalsulfide-neerslag volgens:



Onder andere de volgende metalen kunnen deze neerslagen vormen (meest voorkomende): Koper (Cu), Zilver (Ag), Cadmium (Cd), Lood (Pb) en Zink (Zn), Kobalt (Co), Nikkel (Ni), IJzer (Fe) en Mangaan (Mn).

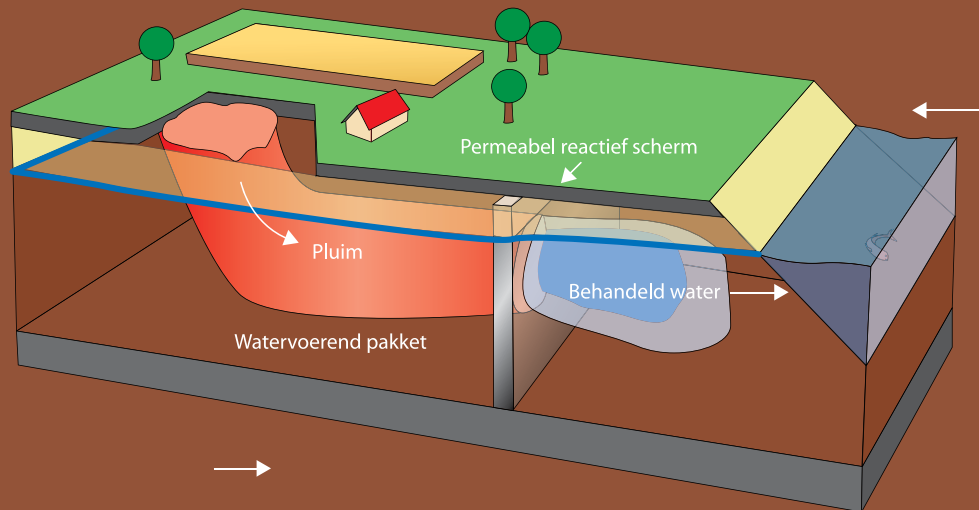
Een uitzondering op de sulfideneerslagen vormt zeswaardig chroom (Cr(VI)). Deze vorm van chroom wordt in een bio- of ijzerscherm gereduceerd tot driewaardig chroom, wat vervolgens neerslaat als een hydroxideneerslag (bij de juiste zuurgraad). Uranium (IV) vertoont een vergelijkbaar gedrag.

3.5 Reduceren van nitraat en sulfaat

Een bijkomend effect van het creëren van sterk reducerende omstandigheden met een bio- of ijzerscherm is dat de electronenacceptoren in het grondwater gereduceerd worden. Deze electronenacceptoren zijn in het algemeen geen verontreinigingsparameters waar streef- en interventiewaarde voor zijn opgesteld, maar hoge concentraties van dergelijke stoffen kunnen wel degelijk als ongewenst worden beschouwd. In het bijzonder voor nitraat en sulfaat speelt dit een rol. In een goed ontworpen bio- of ijzerscherm waarin sterk reducerende omstandigheden heersen (methanogene condities) worden zowel nitraat als sulfaat in het instromende water gereduceerd tot respectievelijk nitriet en sulfide. Nitriet zal in de afwezigheid van zuurstof verder omgezet worden in stikstofgas (dit proces heet denitrificatie en wordt in de afvalwatertechnologie al langer toegepast). Sulfide is zeer reactief en zal een neerslag vormen in de bodem of het ijzerscherm, doorgaans met de aanwezige metalen.

¹ In een persluchtscherm ontstaan deze sulfiden niet, een persluchtscherm is dan ook niet geschikt om metalen te saneren.

4



Ijzerschermen

4.1 IJzer als voorbeeld

In principe kunnen meerdere, vaste reactieve materialen worden toegepast als dragermateriaal (zie tabel in par. 3.1). Behalve ijzer zijn ook voorbeelden bekend van de toepassing van ijzerslakken, zeolieten, compost, turf etc. Deze laatste toepassingen zijn nog in ontwikkeling en niet vaak toegepast. Vrijwel al deze materialen zijn reducerende middelen in vaste vorm.

Bij alle toepassingen wordt het dragermateriaal aangebracht in de bodem, waarbij oorspronkelijk bodemmateriaal wordt verwijderd. Nagenoeg alle bekende dragermaterialen hebben een korrelige structuur. Het reactieve oppervlak telt.

Nulwaardig ijzer is het meest toegepaste dragermateriaal in reactieve schermen en wordt hier verder toegelicht. Ijzerschermen zijn werkzaam dankzij de aanwezigheid van reactieve ijzerkorrels of granules. De reactiviteit wordt bepaald door:

- contactoppervlak per volume-eenheid;
- proces en behandelingsprotocollen (de wijze van verwerken);
- legeringen en verontreinigingen in het materiaal.

Het is van belang dat zuiver ijzer wordt gebruikt met meer dan 95% Fe^0 , en een geringe hoeveelheid koolstof. De ijzergranules mogen maar een minimale oxide laag bezitten. Geschikte ijzersoorten zijn Conelly iron uit de VS en Metalpulver van Gotthart Maier uit Duitsland.

Het Conelly iron uit de VS heeft de hoogste reactiviteit, maar is relatief duur vanwege het overzeese transport. Het ijzer van Gotthart Maier heeft de op een na hoogste reactiviteit en wordt in Europa al veel toegepast. Dit ijzer wordt speciaal voor dit doeleinde geproduceerd, en heeft een groot specifiek oppervlak en een hoge doorlatendheid.

4.2 Ontwerpaspecten

Het Conceptueel model (ontwerpschets) als basis (zie pag. 24)

Het verontreinigde grondwater stroomt de doorlatende barrière binnen, reageert met reactief materiaal (in dit geval nulwaardig ijzer) en stroomt gereinigd aan de andere zijde verder. Het is van belang dat de volledige pluim door het reactieve scherm stroomt, en dat de verblijftijd in het reactieve materiaal voldoende is om de verontreinigende stoffen te verwijderen. Met behulp van een conceptueel model kan de interactie tussen de belangrijkste ontwerpaspecten duidelijk worden gemaakt:

- Grondwaterstroming, afmetingen en keuze geohydrologische maatregelen;
- Verblijftijd, reactiviteit en duurzaamheid, dikte en keuze reactief materiaal.

Daarnaast moet de volgende informatie worden verzameld voor het ontwerp:

Benodigde informatie:

- Site beschrijving en geschiedenis:
 - Huidig en toekomstig gebruik;
 - Historische informatie of activiteiten en calamiteiten;
 - Ligging infrastructuur, drainagesystemen en rioleringen;
- Bodemopbouw:
 - Locale en regionale bodemprofiel;
 - Doorlatendheden van de bodemlagen;
 - Ligging van slecht doorlatende lagen en onregelmatigheden;
- Verontreinigings aard-, locatie en omvang;
- Geohydrologie, stromingssnelheid, richting en fluctuaties;
- Grondwaterchemie en heersende redoxcondities/redoxkoppels;
- Verspreidingsgedrag van verontreinigingen.

Uitgebreidere informatie en checklisten zijn opgenomen in de handleiding van de UK-EA (Carey M.A. et al. 2002).

Grondwaterstroming

Op basis van deze gegevens kan de ligging en diepte van het ijzer-scherm worden bepaald. Het scherm moet voldoende breed zijn, om te voorkomen dat de verontreiniging onbehandeld om of onder het scherm doorstroomt. Daarnaast moet het scherm bij voorkeur aan de onderzijde in een slecht doorlatende laag steken. In de ontwerpschets of conceptuele model moet duidelijk zijn óf de pluim volledig door het scherm stroomt, en dat dit zo blijft bij eventuele fluctuaties in de grondwaterstromingsrichting. Het scherm werkt optimaal als aan boven- en onderzijde een duidelijke afbakening aanwezig is in de vorm van afsluitende lagen of de grondwaterspiegel. Een goed conceptueel model én begrip van de situatie bestaat dan ook uit een overzichtstekening en dwarsdoorsneden.

In de praktijk worden soms 'hangende' schermen geplaatst, schermen die aan de onderzijde niet in een minder doorlatende laag staan. Een zekere overmaat ten opzichte van de pluimdimensies is in dat geval aan te raden. In speciale gevallen kan ervoor gekozen worden om het grondwaterverhang kunstmatig te vergroten (door middel van grondwateronttrekking). Toepassing van meerdere schermen per verontreinigingslocatie is een optie, bijvoorbeeld als vrachtverwijdering een gewenst doel is, of de voorkeur uitgaat naar een eindige situatie.



De reactieve media voldoen doorgaans goed aan hun taak, maar zowel bioschermen als ijzerschermen hebben invloed op de grondwaterstroming. De stromingsrichting is daarnaast afhankelijk van seizoensinvloeden. Het goed functioneren van een reactief scherm is daarom primair afhankelijk van een goede inschatting én controle van de grondwaterstroming, om te voorkomen dat verontreiniging onder of om het scherm heen stroomt.

Verblijftijd, reactiviteit en duurzaamheid:

Dé bepalende parameter bij de dimensionering van een ijzer-scherm is de verblijftijd van de verontreinigingen in het scherm, en de tijd die nodig is om de gewenste afbraakreactie te bewerkstelligen (de

retentietijd). Voor het bepalen van de dikte en samenstelling van een ijzerscherm moeten laboratoriumproeven worden uitgevoerd. De samenstelling en keuze van ijzer kan na plaatsing in situ niet meer worden gewijzigd en moet daarom direct juist zijn. Vanwege kostenbesparingen wordt vaak zand of grind toegevoegd. Met kortdurende schudproeven kan de ijzersoort en zandbijmenging worden getoetst. In kolomexperimenten wordt het beoogde mengsel (of pure ijzer) toegepast, en doorstroomt met grondwater van de locatie. Daardoor kan verder inzicht ontstaan in:

- Samenstelling en werkzaamheid ijzergranulaat (koolstofgehalte/bijmenging andere metalen);
- Soort en hoeveelheid bijmenging zand;
- Mogelijke reactieproducten en precipitaten, duurzaamheid van het scherm;
- Noodzakelijke verblijftijd van de verontreiniging, en dus dikte van het scherm;
- De duurzaamheid. Bij herhaald doorspoelen van de kolom ontstaat een beeld van de levensduur van een ijzerscherm.

4.3 Installatie en uitvoering

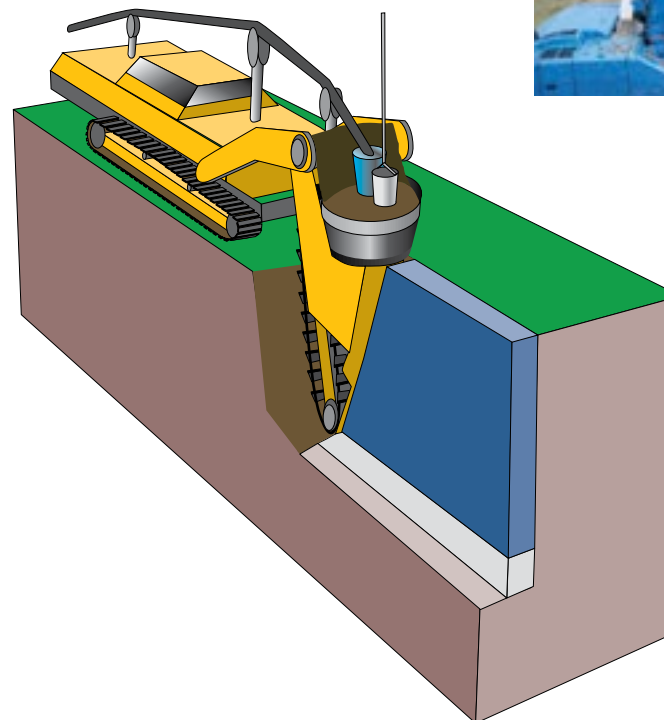
De diepte en dikte van het ijzerscherm volgen uit het conceptuele model, de kolomproeven en eventuele modellering van de geohydrologie. Tot een diepte van circa 7 m-mv wordt vooral gebruik gemaakt van een sleuvenfrees/kettingfreesmachine. Voor grotere diepten zijn andere technieken beschikbaar. De meest toegepaste technieken worden hier aangehaald.

Sleuvenfrees (tot 7 m-mv)

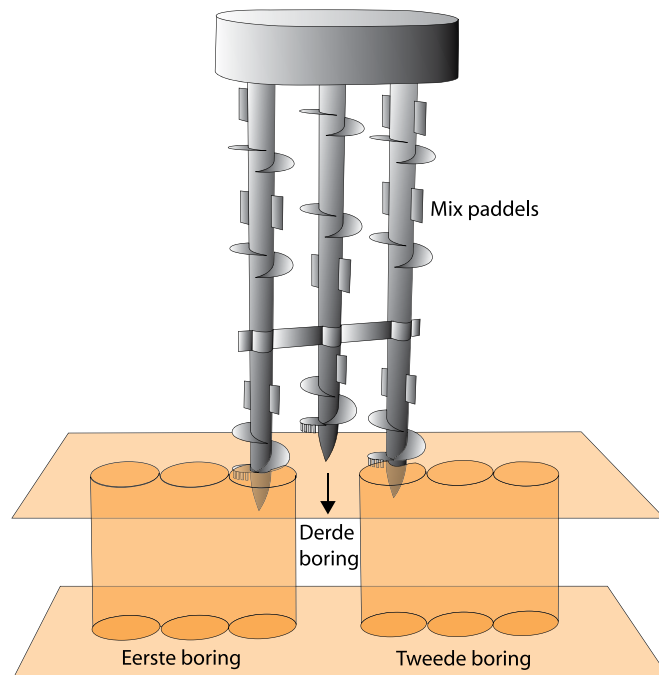
De meest gebruikte techniek is een sleuvenfrees. Sleuvenfreesen worden bijvoorbeeld ook gebruikt voor het aanbrengen van drainagebuizen. Met een frees wordt een diepe sleuf gemaakt, die direct wordt aangevuld met het reactieve materiaal. Dit vergt een goede logistiek². Een continu arbeidsproces is nodig om een constante schermdikte

te bereiken. Dit is een relatief goedkope techniek, waarvoor echter veel ruimte nodig is op maaiveld. De aanwezigheid van ondergrondse kabels en leidingen is soms een belemmering voor deze toepassing. In de nabijheid van zettinggevoelige bebouwing moet voorzichtig te werk worden gegaan. De installatie van een ijzerscherm met een sleuvenfrees kan in stedelijk gebied lastig zijn. In voorkomende gevallen kunnen problemen worden ondervangen door het aanbrengen van waterdichte secties met injectietechnieken of damwanden.

Aanleg ijzerscherm Katwijk



² De reactiviteit van nulwaarde ijzer neemt af vanaf het moment dat het geproduceerd is. In sommige gevallen moet het materiaal binnen 72 uur na productie toegepast worden.



Boorpalenwand

Reactief materiaal kan ook worden aangebracht met avegaren/boorpalentechniek (zie 6.2). Met deze techniek wordt de grond naar maaiveld geschroefd. Vervolgens wordt onder het geleidelijke trekken van de avegaar, het ijzer door de holle as in het boorgat gepompt. Het ijzer wordt gemengd met de resterende grond. Het principe wordt toegepast met een serie avegaren of met afzonderlijke avegaren, die in een patroon worden geplaatst. De boorpalen moeten overlappend worden geplaatst. Evenals voor dichte boorpalenwanden geldt hier een maximale diepte van 20 - 25 m.

Met behulp van sleufbekisting en/of cassettes

Door het aanbrengen van schotten op geringe afstand tot elkaar (tot 1-1,5 m) ontstaat een soort bekisting, en kan de tussenliggende grond

worden ontgraven en weer worden aangevuld met ijzergranulaat. Deze methode is geschikt voor schermen met geringe diepte, en is relatief arbeidsintensief en kostbaar. De schotten moeten na afloop weer worden verwijderd, of in het geval van cassettes moeten openingen in de wanden worden gecreëerd.

Plaatsing met een diepwand techniek

Met behulp van diepwand knijpers kan ook een ijzerscherm worden aangelegd. Omdat het scherm na plaatsing doorlatend moet zijn, kan geen gebruik worden gemaakt van bentoniet als steunvloeistof. Inmiddels zijn biologisch afbreekbare steunvloeistoffen bekend (biobore, guar gum etc.). Na graven wordt de gleuf opgevuld met ijzergranulaat en de vrijkomende steunvloeistof afgevoerd. De steunvloeistof in de ijzermatrix kan anaeroob worden afgebroken. Deugdelijk vooronderzoek of garanties omtrent de afbreekbaarheid van de boorvloeistof zijn nodig, en soms moet de afbraak worden gestimuleerd door de toevoeging van hulpstoffen.

4.4 Bedrijfsvoering en monitoring

Tijdens de operationele fase van een PRB moet de prestatie worden gevolgd en vastgelegd. Daarvoor moeten monitoringsbuizen worden geplaatst en bemonsterd. Vooral de levensduur van het reactieve medium is onzeker. In sommige gevallen wordt gasvorming waargenomen (H_2 in reactoren). Omdat de stroomsnelheid in natuurlijke situaties vaak laag is, moeten de peilbuizen dicht op en in het scherm worden gepland. Monitoring moet inzicht geven in:

- De afname van contaminanten;
- Ontstaan van de gewenste redoxcondities;
- Geohydrologisch patroon;
- Variatie en verandering in doorlatendheid;
- Microbiologische processen.

Evaluatiestudies (Radisav, 2001) tonen aan dat de levensduur en doorlatendheid weliswaar belangrijk zijn, maar niet de meest kritische factoren vormen voor het succes van een PRB. Vooral het niet juist inschatten van de invloed op de geohydrologie, en dus het intrekgebied van het scherm, en de verblijftijd in het scherm zijn de voornaamste

factoren voor het niet goed functioneren van de PRB's. Een ander aandachtspunt is de heterogeniteit over de verticaal. Op basis van peilbuismetingen worden de maximale concentraties van de verontreiniging vaak met enkele factoren onderschat.

4.5 Aandachtspunten, voor- en nadelen

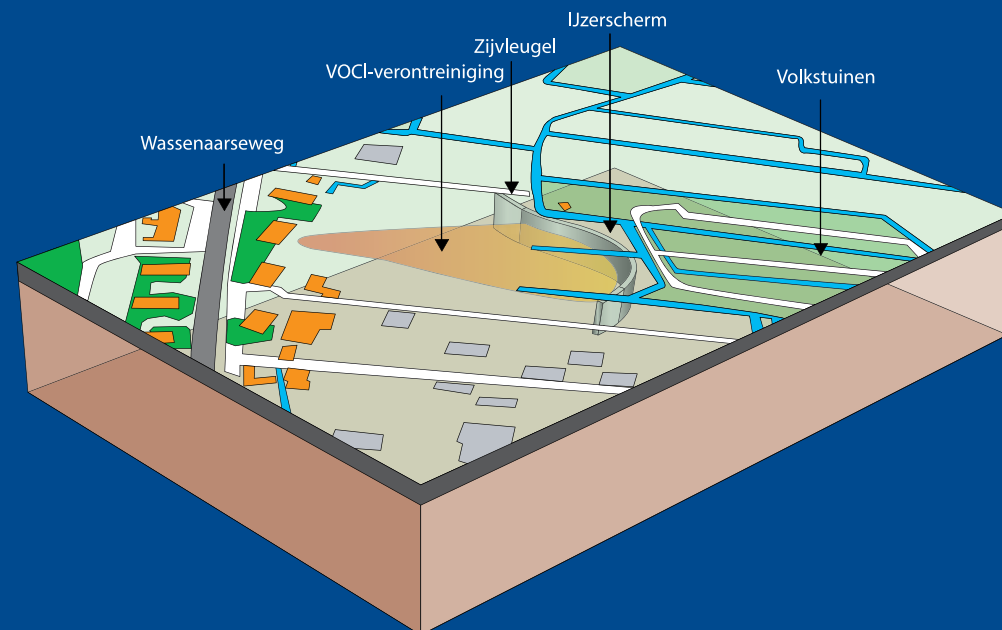
Voordelen	Nadelen
Robuust: Als het scherm eenmaal op de juiste plek staat met de juiste dikte, dan kan er weinig fout gaan.	Niet flexibel, gevoelig voor geohydrologie: Bij veranderende omstandigheden kan het scherm niet eenvoudig worden aangepast.
Lage onderhouds/ instandhoudingskosten: Na installatie in principe geen kosten, zelfs monitoring kan na verloop van tijd sterk worden gereduceerd.	Hoge aanlegkosten: Dure grondstoffen en kosten civiel-technische technieken afhankelijk van de diepte van de PRB.
Langdurige werking: afhankelijk van de dikte van het scherm, de levensduur van het ijzer en de te verwijderen vracht kan de werking van een scherm meerdere decennia zijn.	Beperkingen toepassingsmogelijkheden: Slecht toepasbaar in dicht bebouwd gebied. Bij grotere diepten wordt de installatie snel duurder en complexer.
Duurzaam: Geen energieverbruik, geen afvalstoffen, etc.	Beperkte ervaring in NL: Er zijn 2 ijzerschermen aangelegd in Nederland, wereldwijd zijn 125-150 schermen aangelegd.



Realisatie reactief ijzerscherm

Op de locatie van een voormalige vatenspoelerij is het grondwater verontreinigd met chloorkoolwaterstoffen. Ongeveer honderd meter stroomafwaarts van de locatie ligt een volkstuinencomplex dat door de verontreiniging wordt bedreigd. Ter plaatse worden in het grondwater tot een diepte van vier meter de interventiewaarden overschreden voor cis-1,2-dichlooretheen en vinylchloride. Daarom is overgegaan tot het nemen van een beheersmaatregel om verdere verspreiding te voorkomen en het volkstuinencomplex te beschermen. Door het plaatsen van een ijzerscherm wordt het complex nu tegen de instroom van chloorkoolwaterstoffen beschermd. Ijzerschermen zijn prima geschikt voor de verwijdering van chloorkoolwaterstoffen zoals per en tri. Met het ijzerscherm wordt de verontreiniging begrensd. Bijzonder aan dit ijzerscherm is dat het volledig is gevuld met een mix van reactief ijzergranulaat en zand.

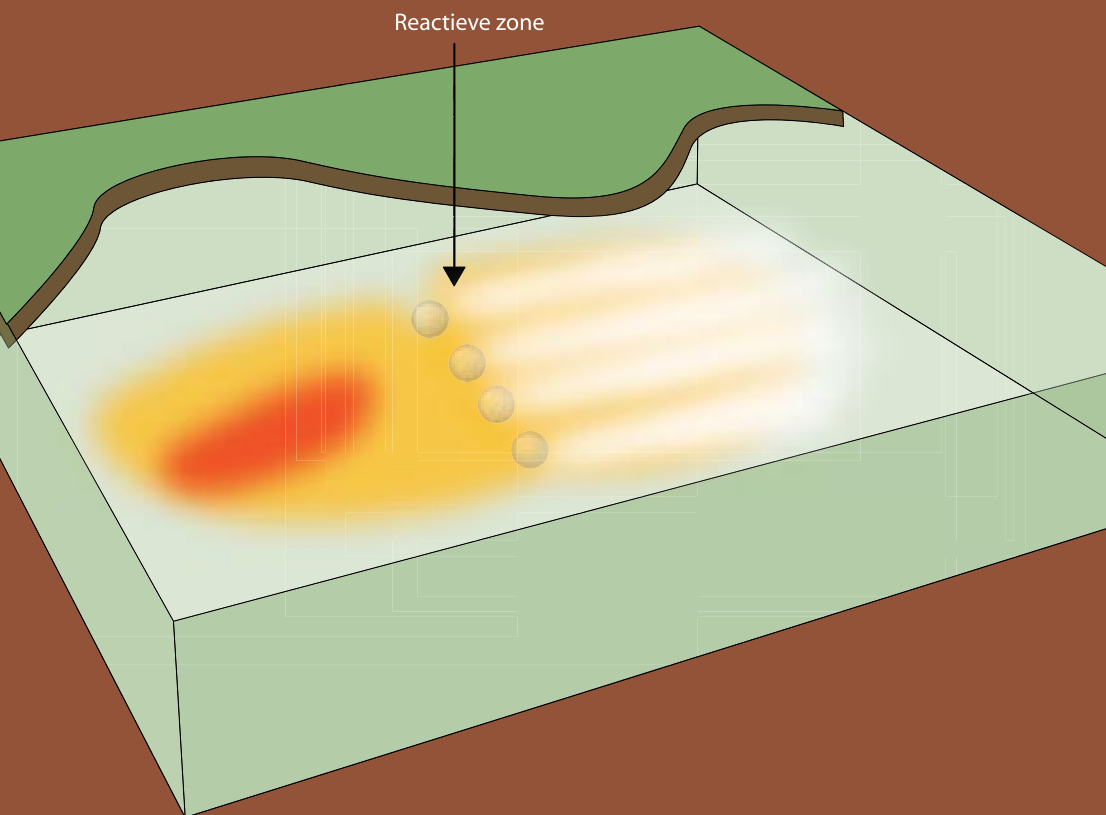
Het ijzerscherm is in de zomer van 2006 aangelegd. Voor het aanbrengen van het ijzerscherm is met een kettingfreesmachine een sleuf gegraven van 5,5 meter diep, 30 centimeter breed en 180 meter lang. Via een trechter werd de sleuf over 120 meter met een mengsel van zand en ijzergranulaat gevuld, waardoor het scherm ontstaat. In de zijvleugels van het ijzerscherm is een foliescherm van 30 m geplaatst om de benodigde hoeveelheid ijzergranulaat te beperken. Het ijzergranulaat is ijzer in pure vorm. Zodra de chloorkoolwaterstoffen in aanraking komen met het ijzer ontstaat een reactie en worden de stoffen omgevormd tot onschadelijke reststoffen. Op een diepte van 5,5 meter is het scherm aangesloten op een slecht doorlatende kleilaag, die het scherm aan de onderzijde afsluit. De hoeveelheid benodigd ijzer is vooraf bepaald aan de hand van resultaten van een kolomtest in het laboratorium en veldonderzoek naar de stroomsnelheid en de concentraties van het verontreinigde grondwater.



Na de installatie zijn de energiekosten voor het in stand houden van het systeem nihil. De natuurlijke stroomsnelheid van het water is de drijvende kracht achter het systeem. In vergelijking met andere saneringsconcepten worden op deze wijze de saneringskosten met wel 30 tot 50% gereduceerd.

Het op deze wijze toepassen van een ijzerscherm is tot nu toe uniek voor de Nederlandse bodemsaneringmarkt. De techniek, die onder licentie wordt verstrekt door EnviroMetal Technologies Inc. (ETI) in Canada, wordt nu wereldwijd op meer dan 100 locaties toegepast. De eerste projectreferentie heeft al zo'n 15 jaar van goede functionaliteit aangetoond.

5



Bioschermen of geactiveerde zones

Een bioscherm is een strook van de natuurlijke bodem, loodrecht op de verspreidingsrichting van de grondwaterverontreiniging, waarin door middel van injectie van een substraat (of reagens) omstandigheden worden gecreëerd in de ondergrond die de afbraak van de verontreinigingen bewerkstelligen of vergroten.

5.1 Anaeroob of Aeroob?

Een anaeroob bioscherm, in de meeste gevallen gericht op het afbreken van gechloreerde verbindingen door reductieve dechlorering, heeft als doel het creëren van een sterk reducerend milieu (sulfaatreducerend tot methanogene omstandigheden in en juist achter het scherm). Een aeroob scherm, in de meeste gevallen gericht op het afbreken van BTEX, lichte minerale oliefracties en licht gechloreerde koolwaterstoffen zoals vinylchloride, heeft als doel het creëren van een oxiderend milieu in het scherm. Inmiddels is ook de anaerobe afbraak van BTEX met nitraat of sulfaat in opkomst, dit wordt hier niet verder aangehaald. De toepassing is vergelijkbaar met anaerobe bioschermen voor VOC's, vooral de hulpstoffen verschillen.

De ontwerpisen van bioschermen worden toegelicht aan de hand van twee voorbeelden:

1. Anaeroob bioscherm door recirculatie en dosering;
2. Aeroob bioscherm door luchtinjectie.

5.2 Ontwerp

5.2.1 Algemeen

Ook voor bioschermen is een conceptueel model in horizontale en verticale zin noodzakelijk. (zie ook 4.2 van het hoofdstuk ijzerschermen voor ontwerpaspecten en benodigde informatie).

Het sanerend effect van een bioscherm is afhankelijk van de regelmaat

waarmee toeslagstoffen toegediend (moeten) worden. Als de injectie stopt, zullen de omstandigheden in het grondwater na verloop van tijd terugkeren naar de uitgangssituatie. Daarmee is een bioscherm strikt gesproken geen **passieve** barrière, en afhankelijk van de zorg waarmee de juiste condities worden gehandhaafd. De werking van een bioscherm is tevens afhankelijk van de doeltreffendheid waarmee de toeslagstoffen kunnen worden gemengd met het grondwater. De anaerobe en aerobe schermen verschillen voor wat betreft de aard van de condities die nodig zijn, en de wijze waarop de toeslagstoffen worden gemengd.

5.2.2 Anaeroob bioscherm

Bereiken en handhaven juiste condities

De doelstelling van een anaëroob bioscherm is om de microbiologische ecologie om te vormen naar sulfaat reducerende of methanogene populaties door de injectie van een electronendonor (in de regel afbreekbaar koolstof, verder in het algemeen substraat genoemd). Als de toevoeging van deze electronendonor hoger is dan de natuurlijke instroom van electronenacceptoren als zuurstof en nitraat, dan zijn de condities voor microbiologische afbraak gunstig veranderd. Indien vervolgens afbraak optreedt, is sprake van een microbiologisch geactiveerde of reactieve zone.

Een goede geochemische grondwaterkarakterisatie is onontbeerlijk: wat zijn de redoxomstandigheden in het instromende grondwater? Hoeveel moeite kost het om de gewenste redoxcondities te realiseren? Hoeveel substraat moet worden toegevoegd om de natuurlijke omstandigheden te overwinnen? Is op de locatie al sprake van **natuurlijke** afbraak, of met andere woorden zijn de gewenste processen en bacteriën al aanwezig. Hiertoe kan gekeken worden naar trends, afbraakproducten, stabiele isotopen, micro-organismen. Daarnaast is het bufferende vermogen van de bodem bij sommige toepassingen van belang, in het bijzonder de gevoeligheid van de bacteriën ten aanzien van een lage zuurgraad. Als het vermoeden bestaat dat door de injectie van de koolstofbron een onacceptabele pH-daling gaat optreden, dan is het raadzaam het bufferende vermogen van de bodemmatrix in het laboratorium vast te stellen. Met dit laboratoriumonderzoek kan

de mengverhouding koolstof worden bepaald, die nog kan worden toegepast, zonder dat een ontoelaatbare pH-daling optreedt.

De duurzaamheid van injecties en de termijn waarop injecties moeten worden herhaald kunnen ook uit laboratoriumexperimenten worden afgeleid, maar moeten worden bevestigd door proeven of tijdens intensievere monitoring tijdens de opstartfase van het bioscherm.

Grondwaterstroming en menging

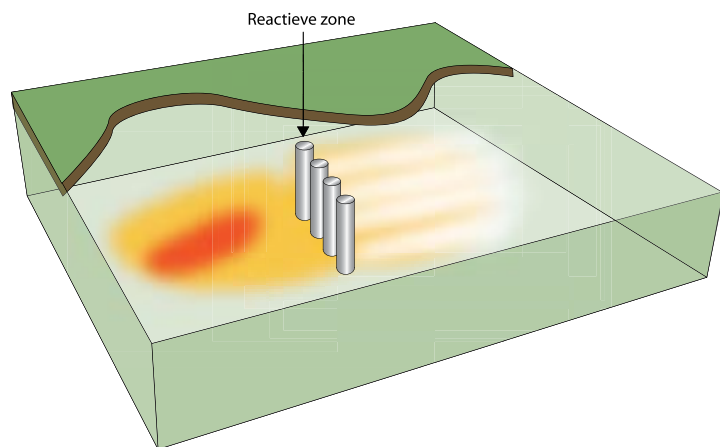
Het spreekt voor zich dat, conform de aandachtspunten bij ijzerschermen, de grondwaterstromingsrichting goed bekend moet zijn. Bovenop de aspecten die voor ijzerschermen zijn genoemd, is de menging van de toeslagstoffen met het grondwater essentieel. Voor anaerobe bioschermen zijn verschillende principes beschikbaar:

1. Injectie in verticale filters en menging door dispersie;
2. Recirculatie loodrecht op de grondwaterstromingsrichting en toevoeging stoffen;
3. Verticale recirculatie;
4. 'Oppakken' grondwaterstroming en stroomafwaartse infiltratie;
5. Horizontale injectie-elementen



Ad. 1: Dispersie

Bij de eenvoudigste vorm van anaerobe bioschermen vindt de menging tussen grondwater en substraat passief plaats. Het zijn bioschermen waarbij een koolstofbron (bijvoorbeeld een mengsel van afbreekbare suikers en water) via een rij van injectiefilters dwars op de stromingsrichting van een verontreiniging aan het grondwater wordt toegevoegd. Het substraat moet zich door dispersie en diffusie mengen met het grondwater. Vaak bestaat een injectiepunt uit meerdere filters op verschillende dieptes in het watervoerende pakket, om op die manier een groter verticaal gebied te bestrijken. De dekkingsgraad is afhankelijk van de afstand tussen de injectiefilters in horizontale zin en de dispersie. Stroomafwaarts van de injectiefilters ontstaan pluimen van organisch materiaal, die uiteindelijk moeten overlappen.



Injectie kan (bijna) continu of batchgewijs plaatsvinden, afhankelijk van de grondwatersstromingssnelheid, influx van verontreinigingen en afbraaksnelheden. Het geïnjecteerde organische materiaal wordt gefermenteerd, moleculair waterstof wordt gevormd als uiteindelijke electronendonor, de redoxomstandigheden verschuiven en de verontreinigingen worden afgebroken (middels reductieve dechlorering). Omdat de koolstofbron langzaam afgebroken wordt en meestroomt

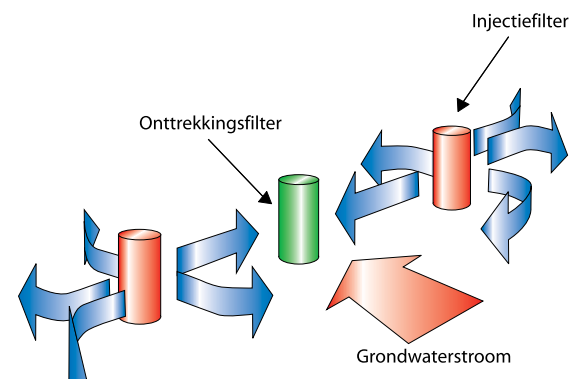
met het grondwater ontstaat stroomafwaarts van de injectiefilters een reactieve zone, waarin voldoende koolstofbron aanwezig is om de afbraakprocessen te laten verlopen. Meerdere injectieraden in een pluimgebied kunnen zorgen voor een actieve sanering van een pluim.



In de praktijk is diffusie en dispersie van geïnjecteerd substraat loodrecht op de stromingsrichting van het grondwater gering. De menging van substraat met het grondwater is passief, en kan niet worden bijgestuurd. Dit fenomeen wordt bij de aanleg van bioschermen met injectiefilters vaak over het hoofd gezien, waardoor een te grote afstand tussen de filters gehanteerd wordt. Om te voorkomen dat de verontreinigingen onbehandeld tussen de injectiefilters door glippen, moet het invloedsgebied van een injectiefilter realistisch worden ingeschat en worden overgedimensioneerd.

Ad 2.: Recirculatie loodrecht op de grondwaterstroming

Een meer actieve vorm van menging voor een gunstigere distributie van de toelagstoffen bestaat uit het recirculeren van grondwater loodrecht op de stromingsrichting. Aangezien het rondpompen energie kost, is strikt gesproken geen sprake meer van een passieve barrière en spreken we van semi-passieve schermen.



Het grondwater wordt onttrokken uit een verticaal filter, de toeslagstoffen worden in de leiding aan de waterstroom toegevoegd, en het grondwater wordt geherinfiltriseerd in meerdere verticale injectiefilters in dezelfde behandelingsraai.

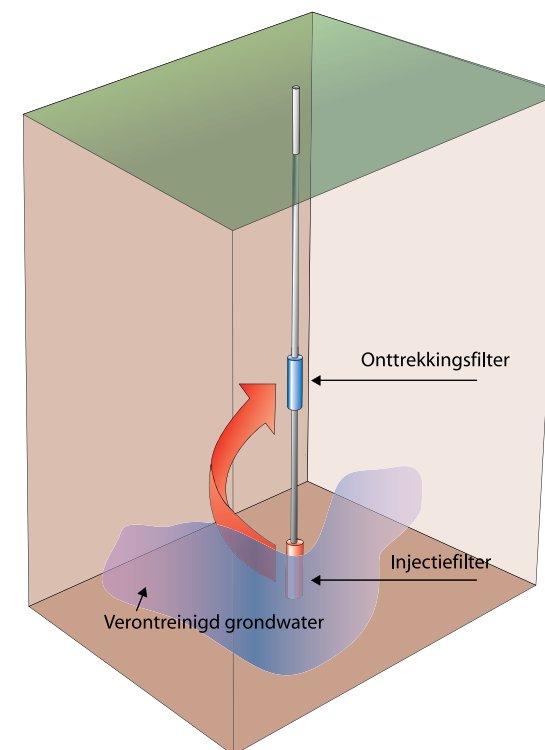
Door actief te onttrekken en infiltreren worden een grondwaterstroming gerealiseerd loodrecht op de natuurlijke grondwaterstroming. Een volledige aaneengesloten zone kan worden gemengd. De onderlinge afstand tussen de filters in een raai kan worden vergroot zonder het risico te lopen dat verontreinigingen onbehandeld door het scherm stromen. Het pompdebiet is afhankelijk van de natuurlijke grondwaterstromingssnelheid, maar in de meeste gevallen hoeft slecht af en toe actief te worden gepompt om voldoende menging te bereiken. Het verdient aanbeveling om pulsgewijs, bij het begin van een pompperiode, de toeslagstoffen te doseren. Daarmee wordt voorkomen dat toeslagstoffen in het injectiefilter achterblijven en zorgen voor verstoppingen. De praktijk heeft uitgewezen dat ondanks het pulsgewijze karakter toch goede menging optreedt, waarschijnlijk door de retardatie van de toeslagstoffen ten opzichte van het grondwater.



Het opnieuw onttrekken van al eerder gestimuleerd grondwater kan leiden tot verstoppingen. Sterke bacteriologische groei en sulfidevorming kunnen zorgen voor zwevende stof, dat zich verzamelt in onttrekkings- en injectiefilters, met verstopping tot gevolg. Een ontwerp waarbij alleen oorspronkelijk (onbehandeld) grondwater wordt onttrokken is robuuster.

Ad 3. Verticale circulatie

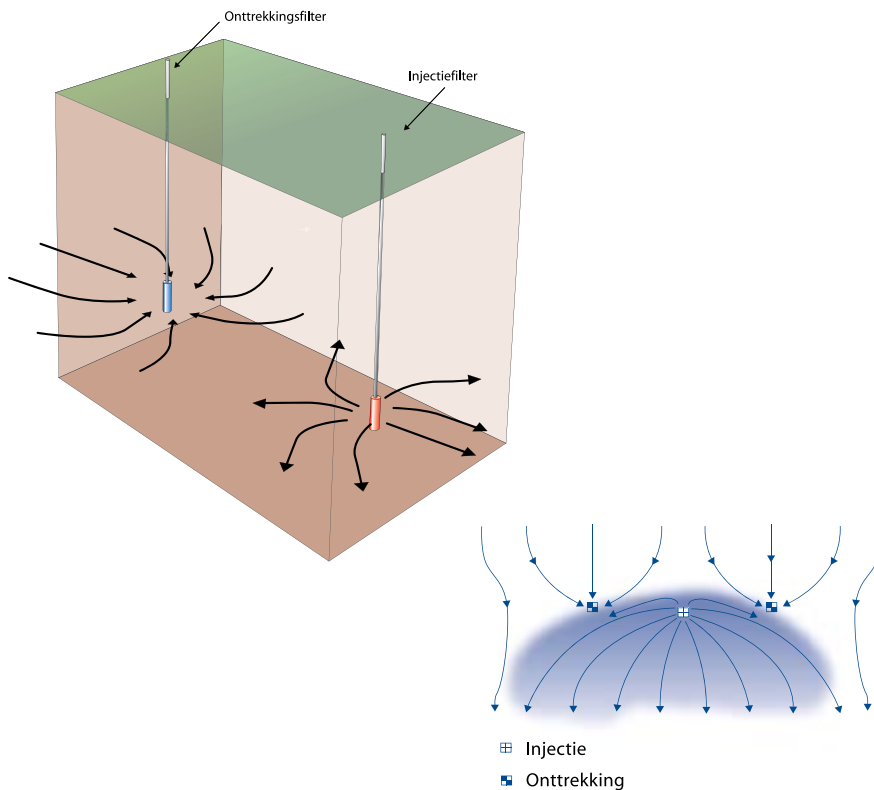
Dit principe is vergelijkbaar met horizontale recirculatie, maar bij deze toepassing wordt het grondwater onttrokken uit een verticaal filter en weer geherinfiltrerd in één of meerdere verticale injectiefilters op andere niveaus, maar op dezelfde plek. De toeslagstoffen worden aan de waterstroom toegevoegd. Hierdoor kan de onderlinge verticale afstand tussen de filters op één punt vergroot worden. De horizontale verspreiding van de verontreiniging is echter sterk afhankelijk van de gelaagdheid van de bodem.



De verspreiding loodrecht op de filters is afhankelijk van de gelaagdheid van de bodem. De techniek slaagt alleen als de filterstellingen zorgvuldig zijn gekozen.

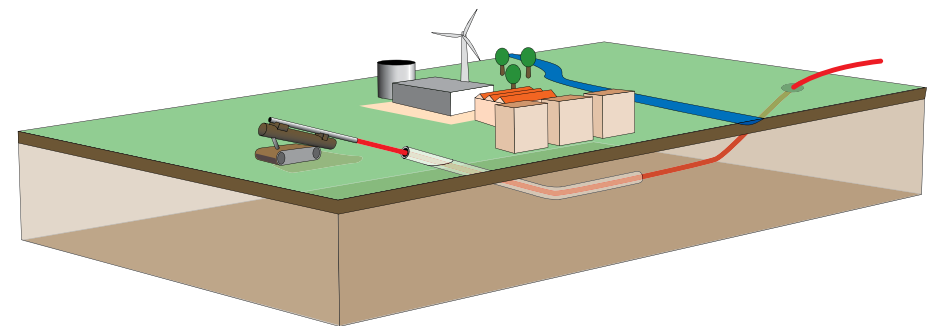
Ad. 4.: 'Oppakken' in de grondwaterstromingsrichting

Verstopningsproblemen bij het horizontale recirculeren volgens principe 2 heeft geleid tot een andere vorm van actief onttrekken en infiltreren. Bij deze toepassing wordt het grondwater onttrokken uit een verticaal filter, gemend met substraat, en stroomafwaarts weer geïnjecteerd. Doordat onttrekkingsfilter en infiltratieput op enige afstand van elkaar staan wordt behandeld grondwater niet meer onttrokken. Zwevende bestanddelen die ontstaan bij de microbiologische processen worden niet meer onttrokken, en het risico op putverstopping is daarmee kleiner. (Hoekstra et al. 2005). Het pompdebiet moet zijn afgestemd op de natuurlijke grondwaterstroming. Met een monitoringspunt tussen de filters wordt gewaakt dat geen te grote stroomopwaartse verspreiding van actief grondwater optreedt.



Ad. 5. Horizontale injectiefilters

Een minder vaak gebruikte toepassing van injectiefilters is de horizontale vorm, vaak toegepast in de vorm van drains. Met een horizontaal gestuurde boring of door het graven van een sleuf kan een drain in de ondergrond geplaatst worden. Dit type is vooral geschikt als het maaiveld boven de verontreiniging moeilijk toegankelijk is, of als de verontreiniging grote oppervlakten bestrijkt. Voor diepere verontreinigingen valt de laatstgenoemde variant vaak af, en zullen meerdere drains boven elkaar moeten worden geplaatst om het verontreinigde deel van het watervoerende pakket te behandelen. Met deze layout kan eenzelfde principe worden nagestreefd als bij principe 3. Door te onttrekken en te infiltreren op verschillende niveaus op dezelfde locatie wordt het substraat verspreid over de verticaal. Een probleem bij injectie via drains is dat het moeilijk is te verifiëren of het geïnjecteerde substraat het filter (de drain) op de juiste plaats verlaat. Omdat een geïnjecteerde vloeistof de weg van de minste weerstand kiest, is het moeilijk na gaan of het substraat ook vanuit het 'eind' van de drain het watervoerende pakket ingaat. Daarbij speelt drukverlies over de lengte van de drain ook een rol. Bij verticale filters is de filterlengte vaak veel korter, waardoor dat probleem veel minder speelt.

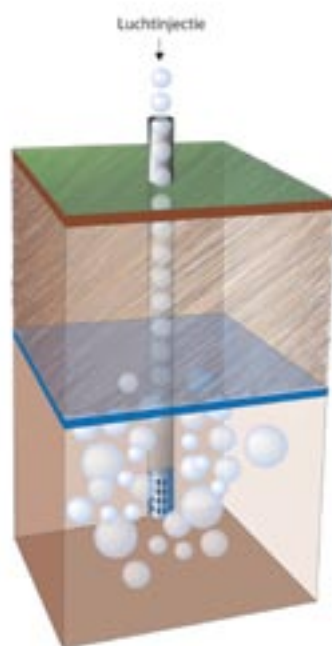


5.2.3 Aeroob bioscherm

Het spreekt bijna vanzelf dat bij een aëroob scherm juist het tegenovergestelde van de hierboven beschreven doeleinden worden nagestreefd. Bij een aëroob scherm is het creëren van een oxisch milieu het doel, gericht op het verhogen van de concentratie zuurstof in het grondwater. Het verhogen van de zuurstofconcentratie is nodig omdat bij aerobe biologische zuurstof fungeert als de electronen-acceptor (en de verontreiniging als electronendonor).

De bekendste voorbeelden van aerobe bioschermen zijn persluchtschermen, waarbij het reinigingsmechanisme verder gaat dan alleen biologische afbraak, verontreinigingen worden bij persluchtschermen tevens gestript uit het grondwater. In de meeste gevallen worden voor persluchtschermen verticale filters gebruikt.

De installatie en constructie van de injectiefilters voor het toedienen van lucht is vergelijkbaar als bij de injectiefilters voor vloeistoffen, met dien verstande dat bij de persluchtfilters vaak volstaan kan worden met kleinere diameters. Daarnaast zal de geïnjecteerde lucht naar het maaiveld ontsnappen, waardoor (met name verticaal) een grotere invloedssfeer bereikt kan worden dan bij de injectie van vloeistoffen. De maximale diepte van een persluchtfilter is niet zozeer afhankelijk van de maximale boordiepte, maar veel meer van de waterdruk die overwonnen moet worden.



5.3 Installatie en uitvoering

Het basisprincipe van bioschermen bestaat eruit dat substraat met injectiefilters wordt aangebracht in de oorspronkelijke bodem. De injectie is in de meeste gevallen discontinu. Periodiek worden de

hulpstoffen aan het grondwater toegevoegd met geautomatiseerde of handmatige systemen. In deze paragraaf gaat de aandacht uit naar de mogelijke uitvoeringswijzen van injectiefilters. Er kan onderscheid worden gemaakt in horizontale en verticale injectiefilters.

In Nederland is veel ervaring aanwezig met het plaatsen van filters. Verreweg de meeste toepassingen van bioschermen bestaan uit verticale injectiefilters. Deze filters worden geconstrueerd door een gat tot de gewenste diepte te boren³.

5.4 Bedrijfsvoering en monitoring

Injectie van substraat

De bedrijfsvoering bij een bioscherm bestaat uit het periodiek injecteren van het substraat via het injectiesysteem dat in de vorige paragrafen besproken is. Voor deze injectie kan gebruik gemaakt worden van een geautomatiseerd systeem, waarbij meerdere injectiefilters via een manifold zijn aangesloten op een controle-unit. Een dergelijke unit bestaat in hoofdzaak uit een doseerpomp (om het substraat aan de waterstroom toe te voegen), een injectiepomp (om het mengsel in de bodem te pompen) en een computer om de injecties tijdig en in de juiste volgorde uit te voeren. Daarnaast zijn verschillende buffer- en opslagtanks, kleppen en afsluiters, drukopnemers en dergelijke nodig. Het te injecteren water kan worden opgepompt op de locatie of drinkwater kan worden gebruikt (bijvoorbeeld via een 'brandweeraansluiting'). De koolstofbron wordt onverdund op de locatie opgeslagen, periodieke levering van koolstofbron blijft echter noodzakelijk omdat de meeste koolstofbronnen een beperkte houdbaarheid hebben.

Het alternatief voor een geautomatiseerd systeem is periodieke handmatige injectie. Hierbij wordt het toe te dienen middel (bijvoorbeeld een mengsel van melasse en water) in een van te voren bepaalde mengverhouding naar de locatie gebracht (bijvoorbeeld via een tankwagen), de injectiefilters worden één voor één of meerdere tegelijk

³ Er zijn vele verschillende boormethoden, met elk hun voor- en nadelen. Een nadere uitwerking van de verschillende boormethoden valt buiten het bestek van dit cahier. Voor verdere informatie wordt verwezen naar *Groundwater and Wells*, van Fletcher Driscoll.

aangekoppeld en het substraat wordt de bodem ingepompt. Zodra de gewenste hoeveelheid geïnjecteerd is, wordt het filter afgekoppeld en worden de volgende filters behandeld.

Het spreekt voor zich dat de inspanning bij handmatige injectie veel groter is dan bij een geautomatiseerd systeem. Daar staat tegenover dat de investering voor een geautomatiseerd systeem vaak aanzienlijk is en ook daarbij enig periodiek onderhoud (bijvoorbeeld regelmatig aanvullen voorraadvat) noodzakelijk is. De keuze van een koolstofbron en diens 'levensduur' in de bodem speelt daarbij een rol.

Monitoring

Net als bij een ijzerscherm moet tijdens de operationele fase van een bioscherm de prestatie worden gevolgd en vastgelegd. Daarvoor moeten monitoringsbuizen worden geplaatst en bemonsterd.

Monitoring moet inzicht geven in:

- De afname van contaminanten;
- Ontstaan van de gewenste redoxcondities;
- Geohydrologisch patroon;
- Variatie in doorlatendheid;
- Microbiologische processen.

Bij een bioscherm zijn twee soorten monitoring van belang:

'Procesmonitoring' om de verspreiding van het substraat en de vorming van de reactieve zone te volgen. Op basis van deze informatie kan de sterkte en frequentie van de hulpstoffeninjectie aangepast worden. Deze monitoringsrondes zijn minder belangrijk als het systeem eenmaal in werking is en de effecten van de techniek zichtbaar zijn in grondwatermonsters die in het behandelde gebied verzameld zijn. Bij proces monitoring wordt een zo beperkt mogelijk analysepakket gehanteerd.

'Voortgangsmonitoring' om de effectiviteit van de sanering te bepalen. Voortgangsmonitoring levert het bewijs dat het systeem de verontreinigingen saneert. Monitoringspeilbuizen (géén injectiefilters) in verschillende gedeelten van het te saneren gebied of op verschillende

afstanden stroomafwaarts van het injectiegebied worden hiervoor geselecteerd. Tijdens deze monitoringsronde worden de verontreinigingen, afbraakproducten en indicators voor omzetting (zoals etheen, ethaan en methaan bij reductieve dechlorering) geanalyseerd.

5.5 Aandachtspunten, voor- en nadelen

Voordelen	Nadelen
Flexibel: Het scherm kan eenvoudig worden uitgebreid of aangepast aan gewijzigde omstandigheden, door filters bij te plaatsen of van debiet en substraat te veranderen.	Minder Robuust: De voortdurende werking van de microbiologie is niet gegarandeerd. Door pH wijzigingen of nutriënten tekorten kan de microbiologie stilvallen. Monitoring is essentieel.
Lage investeringskosten: Een bioscherm hoeft uit niet veel meer te bestaan dan enkele filters, pompen en een doseerinstallatie. Ook de substraten zijn doorgaans niet duur.	Blijvende exploitatie en monitoring: Een bioscherm moet blijvend worden gemonitord en bijgestuurd. De voortdurende aandacht leidt tot hogere exploitatiekosten dan een ijzerscherm.
Overal toepasbaar: Op vrijwel alle locaties en tot op grote diepte kunnen bioschermen worden gerealiseerd.	Verstoppen en regeneratie: Bacteriegroei en sulfideneerslagen kunnen leiden tot putverstopping. Regeneratie is noodzakelijk, maar soms niet meer mogelijk.
Uitstraling in pluimgebied: De biologische activiteit en condities verplaatsen zich met de grondwaterstroom in de pluim. De pluim wordt versneld gesaneerd.	Gevoelig voor hogere concentraties: Puur product, en concentraties die wijzen op puur product, vormen een probleem voor bioschermen.
Ervaring in NL: In Nederland zijn meerdere bioschermen actief, en is veel ervaring met biologische bodemsanering.	

Meervoudig anaeroob bioscherm voor de aanpak van een diepe VOCl-pluim

Ter plaatse van een voormalige industriële chemische wasserij hebben morsingen met perchlooretheen (per) geresulteerd in een bodemverontreiniging. De wasserij is 75 jaar in bedrijf geweest. Het verontreinigde gebied beslaat ongeveer 75.000 m² en strekt zich uit tot een diepte van 50 meter beneden maaiveld.

Het ondiepe brongebied is in 2001 ontgraven. Daaropvolgend is een interim saneringsmaatregel gestart, waarbij gebruik is gemaakt van in situ biodegradatie. Er is gekozen voor deze maatregel om dat van nature reeds natuurlijke afbraak optrad. De anaerobe reductieve dechlorering van per en tri is extra gestimuleerd door de injectie van een koolstofbron.

De interim saneringsmaatregel is na circa 1 jaar succesvol afgerond, waarbij een aanzienlijke reductie in verontreinigingsmassa is gerealiseerd. In het grondwater zijn omstandigheden gecreëerd, die gunstig zijn voor de afbraak van VOCl. De informatie van de interim-maatregel is gebruikt om de full scale toepassing voor gestimuleerde reductieve dechlorering op deze locatie te ontwerpen. Voor de full scale sanering is gekozen voor een toepassing met meerdere anaerobe bioschermen, waarbij de pluim op drie plaatsen 'afgesneden' wordt. De bioschermen zijn niet toegepast als beheersmaatregel, maar als saneringsmaatregel, verdeeld over de pluim. Gezien het sterk stedelijke karakter van de locatie zijn de schermen geplaatst ter plaatse van het boven de pluim aanwezige straten netwerk, zodat blijvend toegang tot de injectiefilters mogelijk is. De injectie van de koolstofbron vindt periodiek plaats op



meerdere niveaus in de pluim. Over een periode van circa 3 jaar worden 10 - 15 injecties uitgevoerd, direct vanuit een tankwagen.

Tussentijdse resultaten tonen aan dat sprake is van methanogene omstandigheden in het grondwater. Dit zijn gunstige omstandigheden voor de afbraak van de VOCl. De concentraties per en tri, direct stroomafwaarts van het brongebied zijn afgenomen van enkele tienduizenden tot ca. 10 µg/l of minder. Tegelijkertijd nemen de concentraties cis 1,2-dichlooretheen en vinylchloride eerst toe en vervolgens af tot enkele tientallen µg/l verderop in de pluim, waarbij etheen en ethaan als onschadelijke eindproducten worden.

In het centrum van de pluim worden op korte afstand van het bioscherm (circa 75 meter) nog cis 1,2-dichlooretheen en vinylchloride aangetroffen in hogere concentraties. Het voorkomen van etheen en ethaan in dezelfde ordergrootte, en de sterk methanogene omstandigheden in deze monitoringsfilters, zijn een teken van bioactiviteit en van volledige reductieve dechlorering. Een bewijs dat stroomafwaarts van het scherm een reactieve zone is gecreëerd. In sommige peilbuizen nemen de concentraties cis 1,2-dichlooretheen en vinylchloride toe. Deze verwachte toename wordt veroorzaakt door de versterkte desorptie, als gevolg van de microbiologische activiteit. Inmiddels is in 1,5 - 2 jaar een afname van de vracht gerealiseerd van 60%.

Funnel and gate systems

6.1 Hoe en waarom funnel and gate?

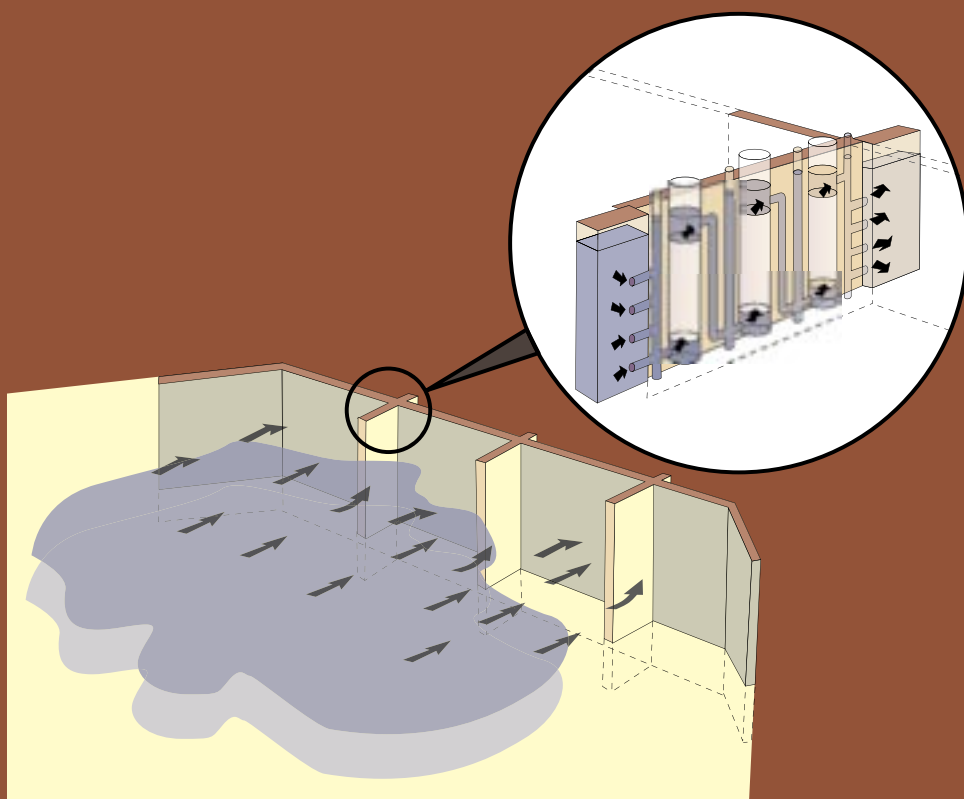
In Nederland zijn enkele funnel en gate (trechter en poort) systemen bekend. Door het aanbrengen van waterdichte schermen, wordt een funnel of trechter gemaakt voor de natuurlijke grondwaterstroming, en wordt het verontreinigde grondwater naar een reactor of reactieve zone geleid. In de reactor of reactieve zone worden de verontreinigde stoffen uit het grondwater gehaald, waarna het gereinigde grondwater verder stroomt.

De reactoropeningen in de dichte wand kunnen bestaan uit:

1. Korte PRB's, uit kostenoverwegingen wordt de totale lengte reactief scherm gereduceerd, en wordt een dichte wand gebruikt om de grondwaterstroming door de PRB te manipuleren;
2. Buisreactoren, dit zijn stalen buizen met openingen, waarin reactief materiaal is aangebracht (meestal Fe^0 , of actief kool);
3. Cassettes met reactief materiaal, geplaatst in de gate, die relatief eenvoudig kunnen worden verwisseld;
4. Een drain naar een verderop geplaatste reactor (zoals het ijzer-scherm in Amersfoort). In de meeste gevallen maakt de reactor onderdeel uit van de wand, in sommige gevallen is sprake van een aaneengesloten dichte wand met een drain ervoor (funnel and drain).

De reinigingsprincipes zijn de bekende principes, die al eerder zijn genoemd (hoofdstuk 3).

In de figuren op de linkerpagina is een funnel and gate geïllustreerd met een cassette van 2-3 sequentiële buisreactoren, die als set kunnen worden vervangen. Dit kan nodig zijn bij hoge concentraties, of bij een complexe mix aan verontreinigende stoffen.





Funnel and gate systemen leiden tot opstuwing van het grondwater. Dit houdt in dat de breedte van een funnel ruimschoots moet worden overgedimensioneerd ten opzichte van de natuurlijke grondwaterstroming om het 'overstromen' van de trechter te voorkomen. De opstuwing betekent tevens dat in vrijwel alle situaties de wanden met de voeten in een slecht doorlatende laag moeten worden geprojecteerd om te voorkomen dat de verontreiniging onder het scherm doorstroomt.

6.2 Welke schermtypen kunnen worden gebruikt?

De uitvoeringspraktijk van de civiele techniek kent veel dichte schermen. Deze schermen kunnen vrijwel allemaal worden toegepast in funnel and gate systemen. Ze zijn duurzaam, en het is oude, vertrouwde techniek met nagenoeg geen onderhoud. De volgende schermtypen kunnen worden gebruikt om een funnel te creëren:

Damwand

Een damwand bestaat uit stalen 'planken', die over de volle lengte met sloten in elkaar grijpen. Een damwand kan afhankelijk van het bodemprofiel en lokale omstandigheden de grond in worden gedrukt, geheid of getrild. De maximale diepte voor een damwand die praktisch nog haalbaar is bedraagt 15-25 m. Indien gewenst kunnen met extra voorzieningen de damwandsloten waterdicht worden gemaakt. Bij de grotere diepten neemt de kans op 'uit het slot' lopen toe.

Gespoten cement-bentonietwanden

Dit zijn cement-bentoniet wanden die met behulp van een stalen frame worden gespoten. Meestal wordt een groot stalen I-profiel de grond in getrild of gespoten, en vervolgens onder gelijktijdig injecteren van de cement-bentoniet slurry getrokken. Daarna zal de slurry geleidelijk uitharden. Cement-bentonietwanden hebben een geringe dikte en sterkte, maar een goede waterdichtheid. Soms wordt de waterdichtheid nog verbeterd door het aanbrengen van een HDPE folie. Bij diepten groter dan 12-15 m, gaat het I-profiel bij inbrengen steeds meer wijken. De praktisch maximale diepte ligt bij 15 m.

Groutwanden

Door overlappende injecties met grout (een mengsel van cement, water en fijn zand) kunnen schermen worden gemaakt. De overlap tussen injecties is afhankelijk van de indringing van grout en is minder zeker. Deze techniek kan worden toegepast als het maaiveld minder goed toegankelijk is. De betrouwbaarheid neemt af met de diepte, en dieptes groter dan 10-15 moeten worden vermeden.

Boorpalenwanden

Deze techniek is vergelijkbaar met het maken van geboorde funderingspalen. Met grote avegaren worden betonpalen in de grond gevormd. Door een uitgekende plaatsingsvolgorde, waarbij de palen elkaar overlappen, ontstaat een waterdicht scherm met constructieve sterkte. Er zijn ook systemen, waarbij met één stelling tegelijkertijd 3 of meer palen overlappend worden geboord. Boorpalen worden aangebracht tot ca. 20-25 m diep.

Diepwanden

Een diepwand wordt aangebracht door een diepwandmachine. Tussen geleidebalken kan met behulp van een diepwandgrijper tot grote diepte worden ontgraven en nagevuld met beton of cement-bentoniet. Tijdens het graven moet een steunvloeistof worden gebruikt om de sleuf open te houden, meestal een bentonietsslurry. Vervolgens wordt beton onderin de sleuf gepompt. Het beton verdringt van onder naar boven tijdens het navullen de bentonietsslurry. Behalve een goede waterdichtheid bezitten diepwanden ook constructieve sterkte (afhankelijk van het aanbrengen van wapeningsstaal). Diepwanden kunnen worden aangebracht tot 60-80 m diep.

6.3 Aandachtspunten, voor- en nadelen

In funnel and gate systemen worden de voor- en nadelen van doorgaande reactieve - of bioschermen gecombineerd. De specifieke voor- en nadelen van elk systeem zijn afhankelijk van de keuze van reinigingsprincipe.

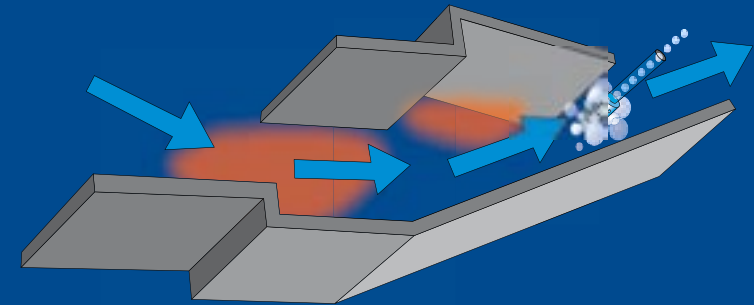
Er wordt doorgaans een besparing bereikt op de hoeveelheid reactief materiaal dat nodig is, en de in- en uitgaande waterstroom kan beter worden gemonitord. Dit laatste is zeker het geval indien gebruik

wordt gemaakt van het funnel and drain principe. Men kan zich alleen afvragen of dan nog moet worden gesproken van een reactief scherm.

Voordelen	Nadelen
Besparing op reactief materiaal: De grondwaterstroming wordt gebundeld en de hoeveelheid reactief materiaal is aanzienlijk kleiner dan bij een doorgaand scherm of bioscherm.	Niet flexibel, gevoelig voor geohydrologie: Bij veranderende omstandigheden, of grillige geohydrologie kan het scherm niet eenvoudig worden aangepast.
Betrouwbare en goedkope monitoring: Het te monitoren oppervlak is aanzienlijk kleiner, en de meetverschillen zijn kleiner door de bundeling van stroombanen.	Hoge aanlegkosten: De constructie van de funnel en de reactor wordt snel duurder met toenemende diepte, maar grotere diepten zijn wel goed mogelijk.
Robuust: Een scherm op de juiste plek staat met een goed functionerende reactor is betrouwbaar.	Beperkingen toepassingsmogelijkheden: Minder makkelijk toepasbaar in dicht bebouwd gebied of de aanwezigheid van kabels en leidingen.
Mogelijkheid tot vervangen dragermateriaal: Indien gebruik wordt gemaakt van een reactor, kan het dragermateriaal worden vervangen en neemt de levensduur en betrouwbaarheid toe.	Beperkte ervaring in NL: Slechts enkele projecten in uitvoering



Funnel and gate met biologisch hekwerk



Door de bedrijfsactiviteiten van een vetgasfabriek is een omvangrijke verontreiniging ontstaan met teerachtige olie en vluchtige aromaten. Deze vetgasfabriek produceerde gas uit gasolie voor de verlichting van treinen.

Op basis van een groot aantal onderzoeken blijkt dat op de locatie sprake is van een verontreiniging met puur product (teer) met een bodemvolume van circa 40.000 m³. Het puur product is teerachtig en vormt zaklagen in de bodem. Uit het teerachtige product lost vooral benzeen en naftaleen op in het grondwater. De interventiewaardecontour van de verontreiniging in het grondwater heeft een oppervlakte van circa 12 hectare. De bodemopbouw bestaat uit fijn, siltige zandlagen en meer grofzandige lagen tot ongeveer 13 meter minus maaiveld met een doorlatendheid van circa 80 m²/dag.

Vanwege de aard van de verontreiniging en de grilligheid van de bodem, is de bron van verontreiniging moeilijk te verwijderen. Omdat op 13 meter minus maaiveld een afsluitende laag aanwezig is, leent de locatie zich wel goed voor een beheersing van de bron met een funnel and gate, ofwel trechter & poort principe. Het doel van de maatregel is het isoleren van de bron en het bereiken van een stabiele eindsituatie voor de pluim stroomafwaarts.

De grondwaterstroming wordt door een tweetal stalen damwanden (trechter) gestuurd door de verontreinigingskern naar een biologisch

hekwerk in de poort. De damwanden zijn met behulp van silent piling geplaatst tot in de afsluitende laag. Het biologische hekwerk bestaat uit 18 persluchtinjectiefilters. Vooraf is tijdens een pilot de invloedssfeer van de persluchtfilters bepaald op 5 à 6 meter. De verontreiniging bestaat voor het merendeel uit benzeen, naftaleen en voor een kleiner deel uit fenantreen en creosoten. De injectie van lucht stimuleert de biologie dusdanig dat de passerende grondwaterverontreiniging wordt afgebroken.

Het biologisch hekwerk in de poort is geplaatst in een gebied zonder grondverontreiniging, zodat de gehalten aan benzeen en naftaleen ter plaatse van het scherm nooit zo hoog zijn dat onvoldoende zuurstof kan worden ingebracht en de verontreiniging door het scherm kan ontsnappen.

De kosten voor het instandhouden van het biologisch hekwerk zijn gemiddeld, aangezien een compressor continu in bedrijf moet zijn om het zuurstofgehalte op het gewenste peil te houden. Uit metingen tijdens de monitoring is gebleken dat de passerende grondwaterverontreiniging met deze methode volledig biologisch wordt afgebroken.

Trends en ontwikkelingen

Injectie van Nano-ijzer

De toepassing van ijzerdeeltjes met een grootte van 100-200 nm wordt ook wel 'nanoscale emulsified zero-valent iron' (NZVI) genoemd. Deze deeltjes hebben een groot reactief oppervlak en kunnen als emulsie in de bodemmatrix worden geperst. De uitvoeringswijze met injectielansen maakt grillige toepassingen mogelijk, anders dan alleen verticale barrières. De emulsie wordt gemaakt van water, plantaardige olie en een emulgator. VOCl hebben een voorkeur voor olie en in de oliedruppeltjes vindt de reactie met ijzer plaats. Daarnaast leidt de plantaardige olie tot goede condities voor anaerobe microbiologische afbraak. Door het hoge reactieve oppervlak is NZVI minder lang actief. NZVI is al in de praktijk toegepast, maar er zijn nog geen schermtoepassingen bekend.

Electrobioschermen

Met behulp van elektroden wordt de productie van waterstof of zuurstof bewerkstelligd. Dit leidt vervolgens tot de microbiologische afbraak van VOCl of BTEX/olie. In sommige uitvoeringen worden elektroden ook gebruikt voor de opwarming van de bodem. Voor langdurige toepassingen leidt dit tot hoge energiekosten. Er zijn nog geen praktijkprojecten bekend.

Combischermen

In deze schermen worden verontreinigingen aangepakt die niet in één stap kunnen worden afgebroken. Een voorbeeld hiervan is de afbraak van HCH, dat eerst anaeroob moet worden afgebroken naar benzeen of chloorbenzeen, alvorens de aerobe stap naar volledige mineralisatie mogelijk is. Een mogelijke toepassing is de anaerobe afbraak in een scherm, en vervolgens de aerobe afbraak in (gecontroleerd)

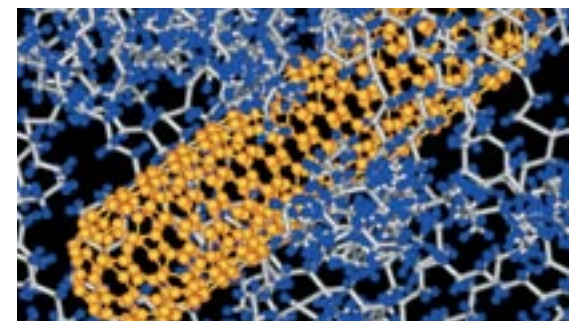
zuurstofrijk oppervlakte water, waarbij de aerobe afbraak optreedt op het grensvlak tussen grondwater en oppervlaktewater. Een dergelijk combischerm is toegepast op een locatie in Hengelo.

Compost, houtsnipper of turfschermen

Deze schermen leiden tot een gereduceerd milieu, de productie van waterstof, en de omzetting van sulfaat naar sulfide. De meeste metalen vormen met sulfide slecht oplosbare verbindingen die neerslaan. Waterstof zorgt voor de reductieve dechlorering van VOCl.

Saneren met schermen

Steeds vaker worden schermen toegepast om een pluim met verontreinigende stoffen ook daadwerkelijk te saneren. Door meerdere schermen achter elkaar te verdelen over een pluim, zal afhankelijk van de stroomsnelheid de pluim worden gesaneerd. Vooral bij bioschermen, waarvan de reinigende werking sterk uitstraalt in de pluim, is dit een effectieve toepassing.



Aanvullende informatie

8.1 Internet

Inmiddels is veel informatie beschikbaar over reactieve schermen, vooral ijzerschermen. De informatie op het internet is goed toegankelijk en voor iedereen beschikbaar. De sites die het meeste overzicht of informatie bieden zijn:

www.bodemrichtlijn.nl

Het voormalige handboek Bodemsaneringstechnieken heeft een nieuw onderdeel Reactieve schermen (deel B11)

<http://clu.in.org/products/newsletters/>

Site van de EPA met veel voorbeelden van barriers, onderzoek etc.

www.rtdf.org/public/permbarr/PRBSUMMS/default.cfm

Site van het Remediation Technologies Development Forum. Een van de meest gedocumenteerde en uitgebreide site. Veel projecten en fact-sheets.

www.science.uwaterloo.ca/research/ggr/PermeableReactiveBarriers/PermeableReactiveBarriers.html

Waterloo University heeft als eerste ijzer getest voor toepassing in reactieve schermen. Ze hebben de licentie verkocht aan EnviroMetal (ETI). Op de site worden verschillende projecten en toepassingen toegelicht.

www.eti.ca

EnviroMetal Inc. Heeft de licentie voor ijzerschermen, en heeft de techniek nagenoeg wereldwijd geïmplementeerd.

www.rubin-online.de

Reaktionswände Und - Barrieren Im Netzwerkverbunden (RUBIN) is

het Duitse R&D-netwerk voor PRB's. Twaalf projecten zijn aangesloten. Wel de Duitstalige versie kiezen, de Engelse is vrijwel leeg.

www.prb-net.org

Permeable reactive barrier network.

8.2 Literatuur

Voor de totstandkoming van dit cahier is de volgende literatuur gebruikt:

Carey, M.A. et al. 2002, Guidance on the use of permeable reactive barriers for remediating contaminated groundwater, Environment Agency UK NC/01/51.

Gillham, R.W., S.F. O'Hannesin 1994, Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero valent iron. Ground Water, 32, 958-967.

Hoekstra N.K., Middeldorp P. Slenders H. 2005, Pilot Bioscreen DAF Trucks, Final Evaluation biological groundwater remediation system for chlorinated aliphatics, B&O-A R 2005/078.

Matherson, L.J. P.G. Tratnyek. 1994. Reductive dehalogenation of chlorinated methanes by iron metal. Environ. Sci. Technol. 28, 2045-2053.

Nipshagen A., Praamstra T. 2007, Cahier VOCl, SKB.

Radisav D.V. 2001. Permeable Reactive Barriers: Case Study Review. GWRTRAC TE-01-01.

Suthersan, S.S. 1997. Remediation Engineering: Design concepts Ed. Stein & Orloff. CRC Press. US.

8.3 Overige literatuur

CL:AIRE project TDP13, A Permeable Reactive Barrier for Remediation of Extremely Polluted Groundwater Associated with a Highly Pyritic Abandoned Colliery Spoil Heap, ISBN 1-905046-10-3 2006.

Slenders, H. Verslag van de bijeenkomst van het deskundigenplatform Permeabele Reactieve schermen in Oak Ridge Tennessee. CUR/NOBIS, TNO-MEP CR 99/052.

Suthersan, S.S., Payne, F. 2004 , In Situ Remediation Engineering, CRC Press.

8.4 Projectreferenties

Voorbeelden van uitgevoerde projecten in Nederland zijn:

1. Den Haag, Funnel and gate met bioreactor voor BTEX.
2. Katwijk, continu ijzerscherm voor VOCL.
3. Wageningen (VADA), Bioscherm door injectie substraat voor VOCL afbraak tot 20-30 m-mv.
4. Botlek gebied (Biohek), Bioscherm door persluchtinjectie in BTEX/olie verontreiniging.
5. Amersfoort, Funnel and gate vetgasfabriek, met persluchtinjectie voor PAK en olie.
6. Eindhoven, Bioscherm door injectie substraat voor VOCL afbraak tot 20 m-mv.
7. Hengelo, Bioscherm voor de sequentiële afbraak van HCH (lindaan).
8. Utrecht, Pluimaanpak VOCL met meerdere bioschermen door injectie electronendonor tot 50 m-mv.
9. Amersfoort, Funnel and gate met ijzerreactor voor verontreiniging met VOCL.



Colofon

Auteurs

Hans Slenders	<i>ARCADIS</i>
Pieter Dols	<i>ARCADIS</i>

Lezersgroep

Ari van Mensvoort	<i>Provincie Utrecht</i>
Vincent Breij	<i>OTUS</i>
Peter Assenberg	<i>Afvalzorg</i>
Jan Pals	<i>SBNS</i>

Met dank aan

Nanne Hoekstra	<i>TNO</i>
Han de Kreuk	<i>BioSoil</i>
Christian Soeter	<i>Grontmij</i>
Willem Havermans	<i>NTP Milieu</i>
Johan van Leeuwen	<i>SBNS</i>
Peter Middeldorp	<i>TTE</i>

<i>Vormgeving</i>	Van Lint Vormgeving, Zierikzee
-------------------	--------------------------------

<i>Druk</i>	Quantes, Rijswijk
-------------	-------------------

<i>Beeldmateriaal</i>	Bewerkingen ARCADIS illustraties door Van Lint Vormgeving Grontmij en NTP Milieu (foto's pagina's 11, 29 en 33) SKB (pagina's 6, 16 en 65) www.ipt.arc.nasa.gov/nanopore.html (pagina 61)
-----------------------	---

Maart 2007