

KIS meten en monitoren van biologische afbraak

Eindrapportage, 8 november 2007



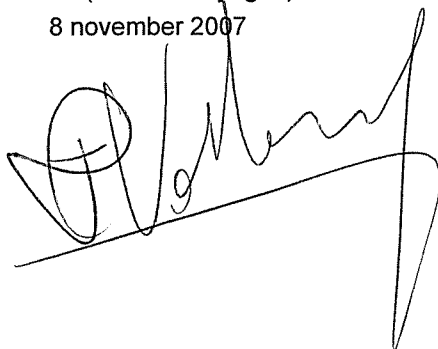
KIS meten en monitoren van biologische afbraak

Papendal Arnhem, 18 en 19 september 2007

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

Verantwoording

Titel KIS meten en monitoren van biologische afbraak
Opdrachtgever SKB
Projectleider Frank Volkering
Auteur(s) Cathrien Heusinkveld-Bakker, Niels van Ras en Frank Volkering
Projectnummer 4533849
Aantal pagina's 26 (exclusief bijlagen)
Datum 8 november 2007
Handtekening



Colofon

Tauw bv
afdeling Bedrijven Bodem
Handelskade 11
Postbus 133
7400 AC Deventer
Telefoon (0570) 69 99 11
Fax (0570) 69 96 66

Dit document is eigendom van de opdrachtgever en mag door hem worden gebruikt voor het doel waarvoor het is vervaardigd met inachtneming van de rechten die voortvloeien uit de wetgeving op het gebied van het intellectuele eigendom. De auteursrechten van dit document blijven berusten bij Tauw. Kwaliteit en verbetering van product en proces hebben bij Tauw hoge prioriteit. Tauw hanteert daartoe een managementsysteem dat is gecertificeerd dan wel geaccrediteerd volgens:

- NEN-EN-ISO 9001.

Inhoud

Verantwoording en colofon	5
1 Inleiding	9
1.1 Doel van de sessie	9
1.2 Overzicht aanwezigen	9
2 Opzet en uitvoering	11
2.1 Opzet.....	11
2.2 Uitvoering	11
3 Resultaten	13
3.1 Besproken technieken en matrix	13
3.2 Toelichting geavanceerde meetmethoden	14
3.2.1 Waterstof – Alette Langenhof	14
3.2.2 Stabiele isotopen - Frank Volkering	15
3.2.3 Moleculaire analyses - Nanne Hoekstra.....	17
3.2.4 Isotrap - Alette Langenhoff	17
3.3 Bespreking meetmethoden	18
3.4 Discussiepunten	18
4 Conclusies en aanbevelingen	24
4.1 Conclusies	24
4.2 Aanbevelingen.....	25

Bijlage(n)

1. Uitdraaien spreadsheets

1 Inleiding

Door SKB is aan Tauw en Bioclear opdracht verleend voor de voorbereiding en begeleiding van de KIS (Kennis Integratie Sessie) Monitoring van natuurlijke en gestimuleerde biologische afbraak en de verslaglegging hiervan. Deze KIS sessie is gehouden op 18 en 19 september 2007 in conferentiecentrum Papendal te Arnhem.

1.1 Doel van de sessie

Deze KIS had als doel om kennis en ervaringen te delen over meetmethoden voor biologische afbraak. Hieronder vallen bestaande en geaccepteerde metingen als redoxparameters, TOC en afbraakproducten maar ook relatief nieuwe technieken als DNA-analyses, stabiele isotopen en Isotrap. De nieuwe technieken zijn kort toegelicht door enkele deelnemers aan de KIS. Voor een overzicht van de bediscussieerde meetmethoden wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

Er is gediscussieerd met de deelnemers van de KIS (zie paragraaf 1.2) over de informatie die deze meettechnieken leveren, de interpretatie van parameters, de randvoorwaarden voor toepassing en in welke fase van een bodemsaneringsproject ze ingezet kunnen worden of nuttig zijn. Leidraad bij deze discussie waren de tabellen uit het VKB protocol 6002 van de BRL SIKB 6000, waarin onder andere een lijst met de belangrijkste systeem- en bodemprocesparameters voor natuurlijke en gestimuleerde biologische afbraak zijn opgenomen.

In de KIS het draagvlak gepeild voor de parameters die zijn genoemd in het VKB-protocol en is een aanzet gedaan tot meer richting geven aan de inzet van deze bodemprocesparameters. De KIS is verder afgebakend tot een onderbouwing van welke parameters zinvol zijn in welke fase (matrix). Er is niet gesproken over meetfrequenties of situering van meetpunten (bron/pluim en dieptes).

Gedurende de discussie zijn hiaten in methodes en kennis in beeld gebracht en deze zijn aan het eind van de KIS besproken.

1.2 Overzicht aanwezigen

- John Dijk, Biosoil BV
- Johan Gemoets, VITO
- Nanne Hoekstra, TNO Bouw en Ondergrond
- Alette Langenhoff, TNO Bouw en Ondergrond
- Adri Nipshagen, Royal Haskoning Nederland BV
- Frank Pels, Hannover Milieu- en Veiligheidstechniek
- Dirk Tijdeman, Ingenieursbureau Oranjewoud BV

- Edward van de Ven, Verhoeve Milieu bv Groep Oost
- Hans Slenders, ARCADIS BV Regio Zuid
- Ted Vendrig, Mateboer Milieutechniek BV
- Leon Voogd, Groundwater Technology BV
- Peter de Vries, The Three Engineers
- Niels van Ras, Bioclear BV
- Frank Volkering en Cathrien Heusinkveld, Tauw BV

2 Opzet en uitvoering

2.1 Opzet

Door de KIS-begeleiders is op basis van VKB protocol 6002 een overzicht van meetmethoden opgesteld waarbij onderscheid is gemaakt in standaard en geavanceerde meetmethoden. Om deze meetmethoden gestructureerd te kunnen bespreken is een matrix opgesteld van fasen in een sanering waarin de verschillende meetmethoden kunnen worden ingezet. Deze matrix, aangevuld met algemene aspecten van de meetmethoden heeft als basis gediend voor de discussie. Een overzicht van de meetmethoden en de matrix is weergegeven in hoofdstuk 3.

2.2 Uitvoering

De KIS 'Monitoring van natuurlijke en gestimuleerde biologische afbraak' is als volgt uitgevoerd:

- Voorafgaand aan de KIS is door de KIS-begeleiders het overzicht van meetmethoden en de matrix van fasen van inzet toegezonden aan de deelnemers
- Op de avond van 18 september 2007 is de opzet geverifieerd met de deelnemers en naar aanleiding van deze verificatie hebben enkele aanpassingen plaatsgevonden. Vervolgens is een start gemaakt met de bespreking van de meetmethoden
- Op 19 september 2007 zijn de overige meetmethoden besproken en zijn de geavanceerde meetmethoden door de kennisdragers toegelicht
- In de plenaire sessie met de overige KIS-deelnemers aan het eind van de middag van 19 september 2007 zijn de uitkomsten van de sessie kort toegelicht
- De resultaten zijn aansluitend op de sessie door de opdrachtnemers uitgewerkt in onderhavige rapportage

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

3 Resultaten

3.1 Besproken technieken en matrix

Deze KIS is afgebakend tot de meetmethoden/procesparameters die specifiek zijn voor onderzoek naar en sanering middels biologische afbraak. Algemene parameters zoals stijghoogte of temperatuur zijn niet behandeld. Onderstaand is een overzicht gegeven van de technieken die tijdens de KIS zijn besproken.

Tabel 3.1 Overzicht besproken meetmethoden/parameters

Standaard	Geavanceerd
pH	moleculaire analyses
zuurstof	stabiele isotopen analyse
TOC/DOC	waterstof analyse
POC/ vluchtige vetzuren	Isotrap
nitraat (nitriet)	
ijzer(II)/ ijzer totaal/ijzer (III)	
sulfaat	
sulfide	
methaan	
alkaliteit	
nutriënten (N, P, ...)	
specifieke afbraakproducten	
geleidbaarheid	
redoxpotentiaal	

Om deze meetmethoden gestructureerd te kunnen bespreken is een matrix opgesteld van fasen in een saneringstraject waarin de verschillende meetmethoden kunnen worden ingezet. Deze matrix is hieronder weergegeven.

Tabel 3.2 Matrix voor bespreking van bodemprocesparameters, indeling naar afbraakproces en fase

	Haalbaarheidsonderzoek	Sanering
Natuurlijke afbraak		
aërobe oxidatie		
anaërobe oxidatie		
anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak		
aërobe oxidatie		
anaërobe oxidatie		
anaërobe reductie		

3.2 Toelichting geavanceerde meetmethoden

De geavanceerde meetmethoden zijn door enkele KIS deelnemers toegelicht vóór de bespreking van de parameters. Onderstaand is deze toelichting kort weergegeven.

3.2.1 Waterstof - Alette Langenhof

Waterstof speelt een sleutelrol bij anaërobe omzettingsprocessen in de bodem. De energiewinst die de micro-organismen kunnen halen uit de oxidatie van waterstof is afhankelijk van de gebruikte elektronenacceptor. Als gevolg van de competitie om waterstof spelen bepaalde redoxprocessen zich af bij vaste ranges van waterstofconcentraties. Onderstaand is een tabel gegeven van de waterstofranges en bijbehorende redoxprocessen.

Tabel 3.3 Empirische range van waterstof concentraties en bijbehorende redoxprocessen

Waterstof concentratie (nM)		Redoxproces
< 0.1	→	nitraatreductie
0,2 tot 0,8	→	ijzer(III)-reductie
1 tot 4	→	sulfaatreductie
> 1	→	reductieve dechlorering
5 tot 20	→	methanogenese

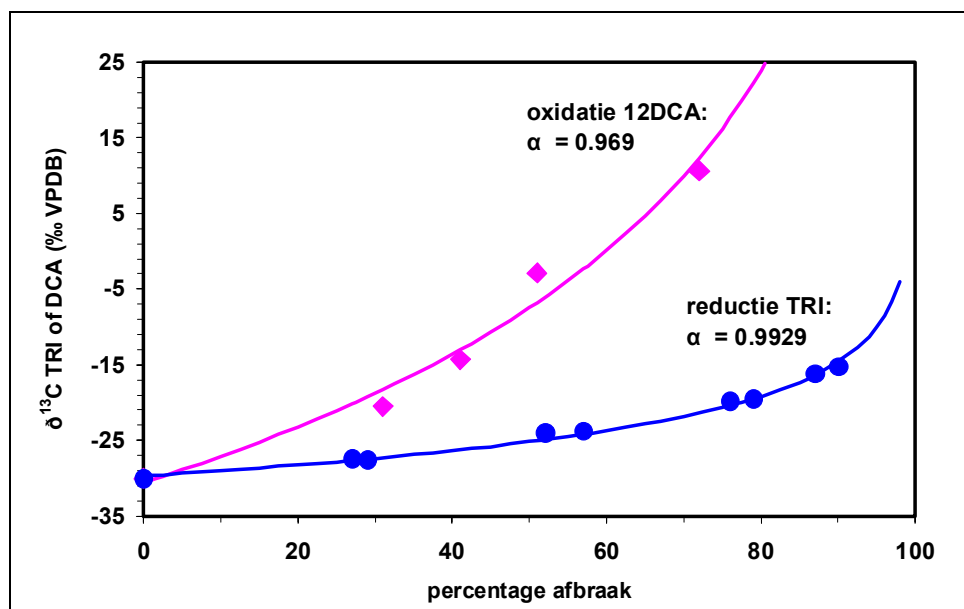
Uit de gemeten waterstofconcentraties kan worden afgeleid welk(e) redoxproces(sen) optreden op een locatie.

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

Tevens kan de meting worden gebruikt als maat voor de beschikbare hoeveelheid elektronendonoren voor reductieve dechloreringsprocessen en daarmee als sturingsparameter voor gestimuleerde anaërobie reductie van CKW (chloorkoolwaterstoffen). Waterstof moet in het veld in het grondwater worden gemeten vanwege de hoge reactiviteit van waterstof.

3.2.2 Stabiele isotopen - Frank Volkering

De meeste atomen bestaan uit meerdere stabiele isotopen. Zo bestaat waterstof uit ^1H en ^2H , koolstof uit ^{12}C en ^{13}C en chloor uit ^{35}Cl en ^{37}Cl . Deze stabiele isotopen zijn vrijwel identiek, maar gedragen zich in zeer geringe mate verschillend bij met name chemische en biologische processen. Het principe van stabiele isotopen analyse is gebaseerd op het feit dat de lichtste isotoop (bijvoorbeeld ^1H , ^{12}C , ^{35}Cl) sneller wordt afgebroken dan de zwaardere isotoop. Als gevolg hiervan neemt het aandeel zwaardere isotopen in de resterende verontreiniging steeds verder toe naarmate de afbraak toeneemt: de verontreiniging wordt 'zwaarder'. Als het afbraakproces bekend is, geeft de fractionering een kwantitatieve maat voor de afbraak. De onderstaande figuur geeft een voorbeeld voor de aërobe oxidatie van 1,2-DCA en de biologische reductie van TRI.



Figuur 3.1 Voorbeelden van isotopenfractionering bij biologische afbraakprocessen

Deze methode is toepasbaar voor vrijwel alle verontreiniging waarbij biologische afbraak een rol speelt, onder andere CKW, BTEXN en MTBE. Bij verontreinigingen met een hoog molecuulgewicht (hogere PAK, PCB, et cetera) is de fractionering beperkt. Een combinatie van twee stabiele isotopen levert een sterker en specifiek bewijs, bijvoorbeeld ^2H en ^{13}C bij benzeen of ^{13}C en ^{35}Cl bij CKW.

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

3.2.3 Moleculaire analyses - Nanne Hoekstra

Moleculaire (DNA) detectie van micro-organismen en/of enzymen op niveau van genen is te gebruiken voor de identificatie van organismen en voor de aanwezigheid van specifieke eigenschappen. Hiermee kan de potentie van een locatie voor een sanering op basis van natuurlijke of gestimuleerde afbraak worden ingeschat. Deze analyses zijn ook geschikt om een toename in de bacteriepopulatie tijdens de sanering vast te stellen.

Vooralsnog worden DNA analyses in de praktijk alleen toegepast voor micro-organismen die betrokken zijn bij de reductieve dechlorering van CKW. Er zijn analyses beschikbaar voor meerdere soorten micro-organismen, die verschillende stappen in de afbraak kunnen uitvoeren. Hiervan is *Dehalococcoides sp.* de meeste relevante omdat deze groep van micro-organismen als enige volledige afbraak van PER en TRI kan uitvoeren. Daarnaast zijn er analyses beschikbaar waarbij functionele genen kunnen worden gedetecteerd. Het belangrijkste hierbij zijn de genen die coderen voor VC-reductase, het enzym dat de omzetting van VC naar etheen katalyseert.

Naast kennis over micro-organismen en enzymen die zijn betrokken bij de afbraak van CKW is inmiddels ook informatie vergaard over de micro-organismen en enzymen voor de anaërobe afbraak van TEXN en MTBE. De wetenschappelijke kennis van de micro-organismen die betrokken zijn bij de anaërobe afbraak van met name benzeen is echter nog beperkt, en daarom is een DNA-analyse nog geen geschikte methode voor het aantonen van dit proces.

3.2.4 Isotrap - Alette Langenhoff

Isotrap is een recent ontwikkelde methode waarmee het mogelijk is om in het veld aan te tonen dat natuurlijke afbraak van een specifieke verontreiniging optreedt.



Er wordt gebruik gemaakt van een teflon buisje gevuld met BioSep beads. Dit zijn korrels met een groot specifiek oppervlak bestaande uit een mengsel van actieve koolstof en een coating waaraan met ^{13}C gelabelde verontreiniging wordt toegevoegd. Wanneer deze buisjes in een grondwaterfilter worden gehangen, kunnen micro-organismen zich eraan hechten en de verontreiniging omzetten.

Bij de afbraak van de verontreiniging wordt de ¹³C-label ingebouwd in biomassa. Door extractie van de biomassa van de BioSep beads en analyse van de biomassa kan worden vastgesteld of de gelabelde verontreiniging is gebruikt om celmateriaal op te bouwen en de gelabelde verbinding dus is afgebroken. De Isotrap wordt binnenkort door TNO getest met een combinatie van

- *In situ* batchproeven
- Stabiele isotopenmetingen
- Identificatie van de microbiële populatie

Hierbij worden Isotraps in een aantal peilbuizen op de locatie geplaatst en na een periode van incubatie worden analyses uitgevoerd. Deze meetmethode is geschikt voor oxidatieve afbraakprocessen waarbij de verontreiniging wordt gebruikt als koolstofbron en daarmee voor opbouw van celmateriaal.

3.3 Bespreking meetmethoden

De meetmethoden zijn besproken aan de hand van de matrix uit tabel 3.2. Bijlage 1 geeft de matrix per meetmethode.

Voor een aantal parameters zijn kanttekeningen gemaakt over de betrouwbaarheid van de meetwaarde ervan. In de meeste gevallen gaat het om methoden waarbij de monstername kritisch is: zuurstof, redoxpotentiaal en ijzer(II). Bij de interpretatie dient hiermee rekening te worden gehouden. De betrouwbaarheid van de methode is opgenomen in de matrices in bijlage 1.

3.4 Discussiepunten

Naast de inhoudelijke bespreking van de meetmethoden (zie paragraaf 3.3 en bijlage 1) zijn in de groep enkele punten bediscussieerd. De kern van deze discussies is onderstaand kort weergegeven. In hoofdstuk 4 zijn de conclusies en aanbevelingen opgesomd.

Risico van protocolisering

Er is opgemerkt dat protocolisering van meetmethoden de suggestie kan wekken dat alle parameters altijd moeten worden bepaald. Nadrukkelijk is gesteld dat de parameterlijst in VKB protocol 6002 een handvat is en niet als bindend moet worden beschouwd. Het is een goede gereedschapset; welke parameters daadwerkelijk worden gemeten is een keuze van de betrokken adviseur of aannemer. Belangrijk hierbij is dat deze keuze wordt onderbouwd en gemotiveerd naar het bevoegd gezag en de opdrachtgever.

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

Toepasbaarheid geavanceerde meetmethoden

Er is consensus in de groep dat de geavanceerde meetmethoden zoals besproken in deze KIS nog geen vervanging zijn voor de gangbare meetmethoden en alleen in specifieke complexe situaties worden toegepast, bijvoorbeeld wanneer het beeld op basis van de gangbare meetmethoden geen of onvoldoende duidelijkheid/zekerheid biedt of wanneer het optreden van afbraak van één specifieke component cruciaal is. Stabiele isotopen analyse en moleculaire analyses worden al regelmatig in de praktijk toegepast.

Er is een behoefte aan verdere optimalisatie en/of validatie van de geavanceerde metingen. Hiervoor lopen reeds SKB-projecten.

Faalkans van biologische afbraak als sanering

Zoals bij elke in situ sanering wordt ook bij biologische saneringen het grootste faalrisico veroorzaakt door een onjuiste bepaling van de verontreinigingsvracht voorafgaand aan de sanering. Het gaat hierbij om de aanwezige vracht, de ruimtelijke verdeling hiervan (hotspots) en de eventuele aanwezigheid van puur product (LNAPL of DNAPL). Een goed conceptueel model van bodemopbouw, geohydrologie en verontreinigingssituatie is onontbeerlijk om een goed saneringontwerp te kunnen maken en zou gangbare praktijk moeten worden. Meettechnieken als MIP en ROST-sonderingen maar ook bodemluchtmetingen kunnen hierbij behulpzaam zijn, maar er is ook behoefte aan methoden om onderscheid te kunnen maken tussen grote verontreinigingskernen en losse puntbronnen in een groter gebied en om meer zekerheid te verkrijgen in de eventuele aanwezigheid, hoeveelheid en locatie(s) van puur product.

Specifiek voor gestimuleerde biologische saneringen is het voor het slagen van de sanering van belang dat:

- Hulpstoffen voor de afbraak (substraat, elektronen acceptoren, nutriënten, eventueel micro-organismen) op de juiste plaats in de bodem terecht komen
- Voldoende hulpstoffen (kunnen) worden gedoseerd. Dit is met name van belang bij hoge concentraties aan verontreiniging: wanneer de vracht aan verontreiniging wordt onderschat worden mogelijk ook te weinig hulpstoffen gedoseerd
- De levensduur van de hulpstoffen voldoende is. Dit geldt met name voor anaërobe saneringen waar een substraat wordt gedoseerd om de afbraak te stimuleren: wanneer er veel verontreiniging aanwezig is of wanneer de verontreiniging langzaam beschikbaar komt voor afbraak (nalevering vanuit een bronzone, DNAPL) dient mogelijk meerdere keren substraat gedoseerd te worden of dient gedurende langere tijd een kleinere hoeveelheid substraat toegediend te worden. Inzicht in de dynamiek van stoftransportprocessen is dan belangrijk

In het algemeen zijn de beschikbare meetmethoden wel geschikt voor het aantonen van het optreden van natuurlijke en gestimuleerde afbraak en voor het vaststellen van de verspreiding en/of effect van toevoegingen. De meetmethoden zelf vormen dus geen knelpunt.

Bepaling van organische stof

Voor de bepaling van de hoeveelheid organische stof als elektronendonator voor reductieve dechlorering zijn analyses mogelijk op TOC, DOC en/of vetzuren. TOC/DOC wordt gebruikt bij natuurlijke en gestimuleerde afbraak, vluchtige vetzuren worden met name bij gestimuleerde afbraak toegepast om afbraak van het toegevoegde substraat inzichtelijk te maken.

Er wordt niet consequent gekozen voor TOC of DOC-analyses, mensen/bureaus hebben hun eigen voorkeur. Voor een kwalitatieve beoordeling is er geen algemene voorkeur voor TOC danwel DOC.

Middels meer specifieke analyses kan dit organisch materiaal worden uitgesplitst en worden ingedeeld in wel/mogelijk/niet geschikt als substraat voor reductieve dechlorering. Deze uitsplitsing wordt weinig meer gebruikt omdat slechts 40-60 % van de organische stof is te karakteriseren en de karakterisering daarmee niet sluitend is. Voor de drinkwaterwinning is er een assimileerbare organisch koolstof analyse waarbij de geschiktheid van organisch materiaal voor aërobe afbraak wordt bepaald (vergelijkbaar met de BZV-analyse). In hoeverre deze toepasbaar is voor anaërobe afbraak is nog niet duidelijk. Geconcludeerd wordt dat er nog geen geschikte meetmethode is voor kwantificering van organisch materiaal dat voor reductieve dechlorering gebruikt kan worden. Een interpretatie van TOC/DOC-gegevens in combinatie met andere parameters geeft wel een eerste indicatie: zo wijst de aanwezigheid van een hoog TOC/DOC-gehalte in combinatie met nitraat op slecht afbreekbaar organisch materiaal.

Beoordeling van parameters

Uit alle discussies blijkt dat parameters in samenhang moeten worden beoordeeld om een uitspraak te doen over het verloop van processen en dat niet kan worden volstaan met bepaling van één parameter. Hierbij is sprake van een grote mate van expert judgement.

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

Fe(III)

Er is gediscussieerd over de waarde van de bepaling van biobeschikbaar Fe(III). Deze hoeveelheid Fe(III) verschaft informatie over de duurzaamheid van anaërobe oxidatieve afbraak, namelijk of er voldoende biobeschikbaar Fe(III) is om alle verontreiniging af te breken. Daarnaast is biobeschikbaar ijzer van belang bij het bepalen van de hoeveelheid elektronendonor die nodig is om de bodem voldoende gereduceerd te maken voor volledige reductieve dechlorering.

Er zijn op dit moment twee methodes voor het bepalen van biobeschikbaar ijzer. De eerste methode is gebaseerd op milde chemische extractie; bij de tweede methode wordt het optreden van biologische ijzerreductie onder optimale condities gemeten. Beide methoden zijn in principe geschikt, door de VITO is een onderzoek uitgevoerd waaruit bleek dat de resultaten goed met elkaar overeenkomen.

Fe(III) is onoplosbaar en komt dus alleen voor in de vaste fase. Voor de analyse van Fe(III) moeten grondmonsters anaëroob worden genomen en gehouden.

Remming van biologische CKW-afbraak door aanwezigheid van sulfaat

De centrale vraag is bij welke sulfaatconcentraties je met een gerust hart natuurlijke of gestimuleerde afbraak als saneringsmethode kunt toepassen.

Voor gestimuleerde afbraak is er consensus dat sulfaat volledig moet worden omgezet om een snelle en volledige afbraak van CKW te kunnen realiseren.

Over het effect van sulfaat op het optreden van natuurlijke CKW-afbraak is geen consensus. Een deel van de aanwezigen is van mening dat om natuurlijke afbraak te kunnen vertrouwen, sulfaat afwezig moet zijn. Andere deelnemers delen deze mening niet. Wel is het duidelijk dat bij hoge sulfaatconcentraties de volledige afbraak niet of langzaam verloopt. Over de vraag wat hoog is, verschillen de meningen dan weer.

In elk geval is duidelijk dat je de potentie van de locatie niet alleen op de sulfaatconcentraties moet baseren maar ook DOC, redox, afbraakproducten en de aanwezigheid van specifieke micro-organismen mee moet nemen.

Snelheid van natuurlijke afbraak

Voor het bepalen van de haalbaarheid van natuurlijke afbraak (is of wordt een pluim stationair?) wordt vrijwel altijd gebruikt gemaakt van een modelberekening.

De aan te nemen afbraaksnelheid speelt hierbij een grote rol. In de praktijk wordt deze ingeschat op basis van laboratorium experimenten, literatuurgegevens, monitoringsgegevens, redox en expert judgement of door een vereenvoudigde fit van veldgegevens. Stabiele isotopen analyse kan een betere onderbouwing bieden, maar dit wordt nog weinig toegepast.

Gezien de onzekerheid in het bepalen van de afbraaksnelheid en het belang ervan voor de uitkomst van de berekening is het essentieel dat bij de modellering een gevoeligheidsanalyse voor de afbraaksnelheid wordt uitgevoerd.

Moleculaire analyses voor anaërobe oxidatieve afbraak

Moleculaire analyses zijn voornamelijk beschikbaar voor reductieve afbraak van CKW. Er bestaat ook behoefte aan moleculaire analyses (DNA) die specifiek zijn voor anaërobe oxidatieprocessen van met name benzeen, omdat deze verbinding van de BTEXN groep vaak de moeilijkst afbreekbare en meest mobiele component is. De wetenschappelijke ontwikkelingen zijn echter nog niet ver genoeg om hier op afzienbare termijn toepasbare methodes voor te hebben. Het probleem is dat de micro-organismen en enzymen die de anaërobe afbraak van benzeen uitvoeren nog onbekend zijn en mogelijk te algemeen zijn. Hierdoor zijn ze niet geschikt als indicator-organisme voor de capaciteit van anaërobe afbraak van benzeen.

Anaërobe afbraak van benzeen

Er is consensus dat anaërobe afbraak van benzeen mogelijk is, het treedt echter niet altijd op. De huidige meetmethoden zijn wel geschikt om aan te tonen of er afbraak optreedt, maar het is nog onduidelijk waarom er op sommige locaties wel en op andere geen afbraak optreedt. Hierdoor is toepassing van natuurlijke of gestimuleerde anaërobe afbraak voor benzeen nog geen standaard aanpak.

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

Trendanalyse

Interpretatie van bodemprocessen gebeurt vaak aan de hand van trends in ruimte of in tijd.

Statistische onderbouwing hiervan ontbreekt meestal. Er is sterke behoefte aan een eenvoudige methode voor trendanalyse. Bij deze methode moet rekening gehouden kunnen worden met de interpretatie van combinaties van parameters. Verder is vrijwel nooit sprake van een eenduidige trend bij alle parameters, welke (combinatie van) trends is minimaal nodig voor een uitspraak?

Er wordt opgemerkt dat de wijze van interpretatie van gegevens niet in het VKB protocol 6002 is voorgeschreven en vaak ook niet in het saneringsplan is opgenomen. Dit laatste zou wel moeten, want de ijkmomenten zouden moeten aansluiten bij de trends en niet bij concentraties.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Onderstaand zijn de conclusies van de KIS Monitoring van natuurlijke en gestimuleerde biologische afbraak opgesomd:

- Er is een goede gereedschapsset voor het meten en monitoren van natuurlijke en gestimuleerde afbraak
- Er is draagvlak voor de parameters uit het VKB 6002 protocol met een kanttekening over de betrouwbaarheid van monsternamen voor een aantal parameters
- De lijst van parameters moet niet als bindend worden beschouwd: er is altijd expert judgement nodig om te besluiten welke parameters worden bepaald. Dit dient te worden gemotiveerd richting bevoegd gezag
- De uitdaging ligt in de interpretatie van (combinaties van) parameters, ook hierbij is sprake van een grote mate van expert judgement
- De geavanceerde meetmethoden (analyse van waterstof, stabiele isotopen en DNA en de Isotrap methode) zijn geen vervanging voor de standaard meetmethoden, maar worden ingezet in complexere situaties waar de standaard metingen niet voldoende zekerheid/duidelijkheid bieden. Dit geldt in iets mindere mate voor analyse van DNA en van stabiele isotopen, deze methoden zullen naar verwachting vaker toegepast gaan worden dan de andere. Er is een behoefte aan optimalisatie van de geavanceerde metingen, maar hiervoor lopen reeds SKB-projecten
- Het succes van gestimuleerde afbraak is niet afhankelijk van het kunnen meten en monitoren. Voor het inschatten van de haalbaarheid en het volgen van het proces is een goede gereedschapsset beschikbaar, die natuurlijk wel op de juiste manier moet worden ingezet. Met name de kwaliteit van de informatie over de verontreinigingssituatie die voorafgaand aan de sanering beschikbaar is en van de mate waarin het mogelijk is de juist hoeveelheid hulpstoffen op de juiste plaats te krijgen is van belang. Naast de conclusie dat het opstellen van een goed conceptueel model van de verontreiniging en bodem onontbeerlijk is en gangbare praktijk zou moeten worden, is er ook behoefte aan onderzoekstechnieken om onderscheid te kunnen maken tussen grote verontreinigingskernen en losse puntbronnen in een groter gebied en de eventuele aanwezigheid, hoeveelheid en locatie(s) van puur product
- Er is nog behoefte aan moleculaire analyses (DNA) die specifiek zijn voor anaërobe oxidatieprocessen. De wetenschappelijke ontwikkelingen zijn voor de anaërobe oxidatie van benzeen niet ver genoeg om hier op afzienbare termijn toepasbare methodes voor te hebben, voor andere anaërobe oxidatieprocessen (TEXN, MTBE, gechlloreerde aromaten en alifaten) is deze ontwikkeling wel mogelijk
- Er is consensus over de mogelijkheid van anaërobe afbraak van benzeen, het is echter geen standaard aanpak

4.2 Aanbevelingen

Geschikte onderwerpen voor de tender zouden zijn:

- De duurzaamheid van NA: kunnen we er ook op de lange termijn op vertrouwen dat de gewenste NA processen blijven verlopen en kunnen we op basis van dat vertrouwen het meten en monitoren afbouwen en staken en een beschikking van het bevoegd gezag hierop krijgen. In de VS is dit inmiddels geïmplementeerd in de regelgeving; de verwachting is dat dit ook in de Europese richtlijnen zal worden opgenomen. In een aantal Nederlandse en Belgische onderzoeksprojecten zijn protocollen opgesteld om deze duurzaamheid te beoordelen, maar er is behoefte aan optimalisatie en demonstratie van specifieke meetmethoden die gegevens opleveren waarmee de duurzaamheid kan worden ingeschat. Meest concreet zijn een sluitende beoordeling van de kwaliteit van organisch stof als substraat voor anaërobe reductieprocessen en een maat voor de biologische beschikbaarheid van Fe(III)
- Er is een duidelijke behoefte aan een eenvoudige methode voor trendanalyse. Zo'n methode is zowel bruikbaar voor trends in verontreinigingsconcentraties als voor redoxparameters etc. Het moet een eenduidige, begrijpelijke en breed geaccepteerde methode zijn. In de huidige praktijk van monitoringsplannen is interpretatie vaak onderbelicht en niet onderbouwd. Statistische methodes zijn voorhanden maar moeten in een bruikbare vorm worden gegoten

Daarnaast is er een aantal belangrijke onderwerpen waarover duidelijke verschillen van meningen bestaan. Hiervoor lijkt de uitvoering van een SKB-project niet de meest voor de hand liggende oplossing. Het gaat om:

- Het optreden van anaërobe oxidatie van Cis en VC
- Het invloed van sulfaat/sulfaatreductie op reductieve dechlorering
- Het bepalen van (natuurlijke) afbraaksnelheden

Een mogelijke oplossing hiervoor is om een beperkt aantal relevante kennisdragers met een goede voorbereiding en onder strakke regie van de SKB intensief hun projectervaring te laten uitwisselen.

Kenmerk R001-4533849CDR-sbk-V01-NL

Bijlage

1

Uitdraaien spreadsheets

pH

	lab	veld
meetmethode		pH-elektrode
betrouwbaarheid		hoog
toelichting	De pH is een algemene parameter voor afbraak in grondwater en is optimaal tussen 6 en 8. Afbraak van PAK is ook bij lagere pH mogelijk. De pH is een cruciale parameter voor elk type natuurlijke en gestimuleerde afbraak, dus altijd meten in haalbaarheidsonderzoek en saneringsfase. Kan van belang zijn bij rare situaties, specifieke processen en veranderingen: dus altijd voor de zekerheid meten.	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	pH < 6 ongunstig voor volledige afbraak chloorethenen en chloorethanen	pH < 6 ongunstig voor volledige afbraak chloorethenen en chloorethanen
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak	pH verandering door biosparging in anaërobe pakketten ? Sulfide-oxidatie leidt tot pH-verlaging	
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	pH < 6 ongunstig voor volledige afbraak chloorethenen en chloorethanen	pH < 6 ongunstig voor volledige afbraak chloorethenen en chloorethanen

TOC/DOC

	lab	veld
meetmethode	TOC/DOC analyzer	veldkit/colorimeter
betrouwbaarheid	hoog (hoge concentraties VOCl, BTEX, olie kunnen bijdragen aan meetwaarde TOC)	
toelichting	Natuurlijke elektronendonor. Hoog gehalte (> 10 mg/L) is gunstig voor reductieve afbraak, ongunstig voor oxidatieve afbraak. Laag DOC/TOC (< 5 mg/L) is ongunstig voor reductieve afbraak. TOC/DOC worden beide gebruikt, zijn geen maat voor kwaliteit organisch stof	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	Beoordelen kwaliteit organische stof?? POC/vetzuren...	Bij het zoeken naar de verschillen tussen actieve en passieve fase in de saneringsfase. Afname natuurlijk DOC in CKW verontreinigingen
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		Ook andere metingen voor substraat mogelijk

Zuurstof

	lab	veld
meetmethode		zuurstof elektrode / LDO sonde
betrouwbaarheid		goed < 1 mg/l matig (geldt niet voor LDO sonde)
toelichting	Beste natuurlijke elektron acceptor; stimuleert aërobe afbraak en remt anaërobe afbraak (reductieve dechlorering)	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	Zuurstof wordt gemeten in de haalbaarheidsfase, niet in de saneringsfase, tenzij problemen worden verwacht. Voorbeelden van zuurstofgevoelige situaties zijn anaerobe systemen met circulatie om substraat in te brengen (chemische of biologische putverstopping, vestoring van het anaerobe proces door infiltratie van zuurstof) of bij aanvoer c.q. instroom van zuurstofrijk water.	

POC (Purgable Organic Carbon)

	lab	
meetmethode	TOC/DOC analyzer	
betrouwbaarheid	hoog	
randvoorwaarden		
toelichting	<p>Maat voor vluchtige componenten die geschikt kunnen zijn als elektronendonor voor reductieve dechlorering maar die met de normale TOC methode niet worden geanalyseerd. Methode was beschikbaar bij Alcontrol, nu niet meer en er is nog geen goed alternatief. Met name belangrijk bij het bepalen van de kwantiteit van de aanwezige organische stoffen als elektronendonor voor reductieve dechlorering onder natuurlijke condities. Daarmee mede belangrijk voor het inschatten van de duurzaamheid van NA. Aandachtspunt: bij de methode wordt methaan, etheen, ethaan en deels ook de verontreiniging mede bepaald. Deze moet dus separaat worden geanalyseerd om hier voor te kunnen corrigeren. Wordt beschouwd als aanvullende parameter, zeker niet standaard.</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	<p>Behulpzaam bij het berekenen van de balans tussen aanwezige en benodigde hoeveelheid elektronendonor voor reductieve dechlorering. Geeft nog geen kwaliteitsoordeel en is daar ook niet voor geschikt. Bestaande methode om splitsing te maken tussen bruikbaar en niet-bruikbaar organisch materiaal voor reductieve dechlorering is niet sluitend; er is nog geen alternatief. Kennishiaat.</p>	
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

vluchtige vetzuren

	lab	
meetmethode	HPLC of GC	
betrouwbaarheid	hoog	
randvoorwaarden		
toelichting	Maat voor vluchtige tussenproducten anaërobe omzetting (vluchtige vetzuren, c1-c6 zuren, tussenproducten uit je verzuringsstap). Kan onderdeel zijn om te bepalen of het natuurlijk organisch materiaal geschikte componenten bevat die kunnen dienen als elektronendonor voor reductieve dechlorering maar wordt met name toegepast bij gestimuleerde afbraak om de omzetting/uitputting van de toegevoegde elektronendonor te volgen.	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	Onderdeel van kwaliteitsbepaling van natuurlijk organisch materiaal. Bestaande methode hiervoor is echter niet sluitend, wordt daarom weinig toegepast.	
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		Analyseren van specifieke vluchtige vetzuren, een aantal (meestal C2-C5) als indicator analyseren, acetaat zie je, je ziet ze komen en gaan

Nitraat (nitriet)

	lab	veld
meetmethode	ionchromatografie, colorimetrie	veldkit, (nitraat elektrode) gaat goed, buisjes en strips voor eerste indicatie, divers in ontwikkeling
betrouwbaarheid	hoog	redelijk
toelichting	Elektronen acceptor; remt volledige CKW afbraak, kan anaërobe oxidatieve afbraak stimuleren. Minder betrouwbare analysemethode kan toegepast worden in een actieve (gestimuleerde) saneringsfase: bepalen van veranderingen (verschillende nauwkeurigheden)	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie	Meting van nitraat is voldoende, nitriet hoeft niet te meten	Trends, niet in hoge frequentie, bepalen verloop proces of redoxtoestand vaststellen. Dat laatste is lastig. Nitriet voegt dan weinig toe, liever ammonium, niet standaard meenemen maar slim doen
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		Bij het gebruik als stikstof bron voor aërobe afbraak van bijvoorbeeld minerale olie, dient dan niet als elektronenacceptor (zie nutriënten)
Anaërobe oxidatie		Bij het stimuleren van nitraatreductie ook nitriet meten. Hoge nitrietconcentraties kunnen toxisch zijn voor bodemleven. 1 millimolair nitriet (40-50 mg/l) is de grens voor nitraatreduceerders. De pH kan ook van invloed zijn.
Anaërobe reductie		Mits van nature aanwezig.

Ijzer(II) / Ijzer totaal/Fe(III)

	lab	veld
meetmethode	ICP, colorimetrie	veldkit
betrouwbaarheid	redelijk	redelijk
toelichting	<p>Fe(II) wordt gevormd bij de reductie van de onoplosbare elektronen acceptor Fe(III). Fe(II) meten of Fe-totaal? Verwaarloosbaar verschil bij stortplaatsen. Combinatie met overige redoxparameters, geochemische modellering: berekende ijzer-waardes kloppen beter dan gemeten waardes: onbetrouwbare meting alleen te interpreteren in combinatie met DOC en redoxpotentiaal. Meestal is de meetwaarde een overschatting, hoe exact wil je het weten? Mag best op grof niveau bepaald worden, interpreteer trend met DOC.</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie	Combinatie zuurstof, redox	Combinatie zuurstof, redox, Fe(III) in grond ? Reductief ijzer: hydroxiden, vnl. Fe(III), dit is maar een klein deel biobeschikbaar reductief ijzer, heb je niet zo veel aan. Hoeveelheid biobeschikbaar ijzer is te bepalen met milde zuurextractie of met een speciale kit. Potentiele vracht aan geschikte elektronenacceptor voor BTEX, ook in reactorvat stroomafwaarts van de pluim.
Anaërobe reductie		Monitoringsprogramma met natrium, calcium, magnesium, het is een hulpmiddel voor bepaalde processen die je wilt kunnen vaststellen en onderscheiden van afbraak.
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	niet standaard, alleen bij uitzondering, input voor koolstofbrontoevoeging. Potentiele sink voor je substraat in geval van gestimuleerde afbraak van VOCl.	

Sulfaat

	lab	veld
meetmethode	ionchromatografie	veldkit
betrouwbaarheid	hoog	laag
toelichting	Elektronenacceptor, omzetting met sulfaat als elektronenacceptor verloopt onder strikt anaërobe condities	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	Sulfaat remt volledige dechlorering door competitie of inhibitie door sulfide. Er is geen consensus over concentratie waarbij dit gebeurt. Meninge varieren van hoog (> 200 mg/L) tot laag (< d.l.)	
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		Bij stimuleren sulfaatreductie
Anaërobe reductie	Sulfaat moet volledig worden gereduceerd voor optimale CKW-afbraak	indicator effectiviteit sanering

sulfide

	lab	veld
meetmethode	colorimetrisch	veldtest
betrouwbaarheid	hoog	hoog
toelichting	Product van sulfaatreductie, reactief en slaat snel neer met kationen als Fe ²⁺ . Aanwezigheid bewijs voor sulfaatreductie, afwezigheid geen bewijs voor niet optreden sulfaatreductie	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie	Om sulfaatreducerende omstandigheden te verifiëren, met analyses op sulfaat en ijzer, om aanpak te bepalen: oxidatie of reductie, om redoxcondities in te schatten	
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		Bij stimuleren sulfaatreductie
Anaërobe reductie		

Methaan

	lab	veld
meetmethode	gaschromatografie	headspacemeting
betrouwbaarheid	hoog	niet gangbaar
toelichting	Omzettingproduct van strikt anaërobe processen, afbraakproduct chloormethanen. Monsternametechniek kritisch, maar ordegrrootte is voldoende informatie. In samenhang met andere redoxparamaters beoordelen en verloop volgen tijdens de sanering	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	Hoog methaangehalte is een indicatie voor goede condities voor dechlorering, maar pas op: methaan kan elders geproduceerd zijn en met grondwater mee zijn getransporteerd.	
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		Indicator voor goede omstandigheden van afbraak (reductieve dechlorering). Meten in combinatie met koolstofbron. Ontgassing van methaan en stripeffecten van VC, risico op ontploffingsgevaar bij ophoping? Kleine kans maar groot effect, vnl bij shockload (hoge concentraties elektronendonor) onder bebouwing, in kruipruimte meten. Remming dechlorering door methanogenese niet overdrijven (dechlorering bij lagere waterstofconcentraties dan methanogenese). Wel heeft dit als gevolg dat de elektronendonor eindigt in methaan en niet voor dechlorering beschikbaar is.

Alkaliteit

	lab	veld
meetmethode	titratie	titratie
betrouwbaarheid	hoog	
toelichting	<p>Maat voor carbonaat, universeel afbraakproduct van de oxidatie van organische verbindingen. TIC meten met TOC ook calcium en magnesium meten om oplossen van kalk te bepalen, is er tekort of overschot van CO₂: rekenen, hoeveel mensen doen dat? Sleutelparameter net als pH, gebeurt weinig, pH kan gebufferd zijn en niet wijzigen dus geen vervangende parameter, doel van de meting is aantonen dat afbraak optreedt: meting wordt weinig toegepast, combinatie met redoxparameters. Let op: er zijn meer CO₂-bronnen dan afbraak, maak je een massabalans of niet? Parameter is te weinig specifiek om afbraak aan te tonen, wel voor de geochemische balans. Dan meten in samenhang met sulfaat en chloride</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		Wordt wel eens gemeten in de saneringsfase bij bodemluchtexttractie, geen sturingsparameter, maar vooral zuurstof meten
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

Nutriënten (N,P, ...)

	lab	veld
meetmethode	diverse	
betrouwbaarheid	hoog	
toelichting	<p>N en P de belangrijkste, andere nutrienten en sporenelementen zijn doorgaans voldoende aanwezig. Micro-nutrienten en sporenelementen toevoegen als het misgaat maar in concentraties die niet te meten zijn/hoeven worden. Zit doorgaans wel in complexe substraten. Fosfaat moeilijk te meten vanwege neerslag: is het dan ook wel zinvol om het toe te dienen? Evt. andere P-bron, P-bron en P-meting niet 1 op 1 te relateren, orthofosfaat is rekeneenheid uit de landbouw ongeacht wijze van voorkomen van P. Ga na hoe het lab bepaalt en rapporteert. Binding aan ijzerhydroxide vooral niet aan rekenen maar in ijzerrijke omstandigheden fosfaattoediening minder effectief, planten en bacterien kunnen P uit complexen halen dus geen fosfaat meten betekent niet dat het niet beschikbaar is dus geen goede sturingsparameter</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie	minder gericht op biomassa, is er doorgaans wel, anaërobe processen zijn er niet zo gevoelig voor, lagere	
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak	Bij aanvang weten hoe het zit: referentiepunt bepalen, door lage kosten geen reden om het in de haalbaarheidsfase niet tenminste een keer te doen, techniekonafhankelijk, nulmeting kan evt ook door meting in de omgeving te doen	Metten als er weinig gebeurt/als het stagneert. Hoe zit het met de nutrienten, goedkope analyse dus uitsluiten of nutrienten het probleem zijn ondanks dat je nutrienten zijn toegevoegd, niet in eerste instantie op monitoren maar gewoon toevoegen. Geen minimumconcentraties, wel C/N/P-ratios variërend van 100:40:10 tot 250:10:5
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

Specifieke afbraakproducten

	lab	veld
meetmethode	diversen	
betrouwbaarheid	hoog	
toelichting	Vormen direct bewijs voor optreden afbraak, analysepakket afstemmen op oorspronkelijke verontreiniging	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak	Fenolindex bij benzeen en BTEX afbraak, oliekar voor profielen, TBA bij MTBE	Oliekar ook bij monitoring, zowel verontreiniging als afbraakproduct, aromaten/alifatenverhouding, hogere-n-alkanen weg is indicatief voor afbraak, kosten relatief hoog: chromatogram GC-analyse interpreteren kan ook.
Anaërobe oxidatie	Fenol bij benzeenafbraak. BTEX: benzylsuccinaat. Altijd vergelijken met niet verontreinigde peilbuis want humuszuren leveren fenol, alkylfenolen en benzoaten. Fenolen kunnen ook in teer zitten; niet geschikt als afbraakproductmeting voor gasfabrieksterreinen. TBA meten bij MTBE	
Anaërobe reductie	Etheen/ethaan/(methaan). Kwaliteit van de meting en de monsternamen is belangrijk. Ordegrootte is voldoende of ook massabalansen opstellen? Etheen wordt vaak kwantitatief gebruikt. Afbraakproducten van chloorethanen zitten niet allemaal in standaard pakketten (11DCE, chloorethaan).	
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie	zie NA	voortgang sanering

Geleidbaarheid

	lab	veld
meetmethode		geleidbaarheidselektrode
betrouwbaarheid		hoog
toelichting	Altijd meten als controle monsterkwaliteit; controle bij toevoeging van ionen, trigger voor rare situaties, infiltratie/wegzijing bij peilverschillen van rivieren/kanalen, zien waar je verontreiniging zit bij stortplaatsen en hoge concentraties, rapportage-eenheid zou eenduidiger kunnen (milliS versus microS en cm versus m)	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

Redoxpotentiaal

	lab	veld
meetmethode		redoxmeter
betrouwbaarheid		laag, moeilijk te meten, als het goed gemeten is binnen een locatie te vergelijken
toelichting	Algemene indicator van redoxconditie grondwater. In combinatie met redoxparameters, pH met pE betrouwbaarder voor redoxtoestand, indicatieve parameter, ter controle van zuurstofconcentraties. Redoxpotentiaal meet dominant proces, metaalcomplexen inzicht in hoofdprocessen maar geen nauwkeurigheid, stabiliteitslijnen van ijzerverbindingen bij pH/pE, is veldmeting daarvoor betrouwbaar genoeg? Redoxpotentiaal meting is heel indicatief, maar nuttig bij lopende saneringen: ordegrootte, algemeen beeldondersteunend.	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

Moleculaire analyses

	lab	veld
meetmethode	PCR	
betrouwbaarheid	hoog	
randvoorwaarden		
toelichting	<p>Moleculaire (DNA) detectie van micro-organismen en/of enzymen op niveau van genen is te gebruiken voor de identificatie van organismen en voor de aanwezigheid van specifieke eigenschappen. Hiermee kan de potentie van een locatie voor een sanering op basis van natuurlijke of gestimuleerde afbraak worden ingeschat. Deze analyses zijn ook geschikt om een toename in de bacteriepopulatie tijdens de sanering vast te stellen. Vooralsnog worden DNA analyses in de praktijk alleen toegepast voor micro-organismen die betrokken zijn bij de reductieve dechlorering van CKW. Er zijn analyses beschikbaar voor meerdere soorten micro-organismen, die verschillende stappen in de afbraak kunnen uitvoeren. Hiervan is Dehalococcoides sp. de meeste relevante omdat deze groep van micro-organismen als enige volledige afbraak van PER en TRI kan uitvoeren. Daarnaast zijn er analyses beschikbaar waarbij functionele genen kunnen worden gedetecteerd. Het belangrijkste hierbij zijn de genen die coderen voor VC-reductase, het enzym dat de omzetting van VC naar etheen katalyseert. Naast kennis over micro-organismen en enzymen die zijn betrokken bij de afbraak van CKW is inmiddels ook informatie vergaard over de micro-organismen en enzymen voor de anaërobe afbraak met name benzeen is echter nog beperkt, en daarom is een DNA-analyse nog geen geschikte methode voor het aantonen van dit proces.</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

Stabiele isotopen analyse

	lab	veld
meetmethode	GC-IRMS	
betrouwbaarheid	hoog	
randvoorwaarden		
toelichting	<p>Stijging gehalte aan zware isotopen in verontreiniging is specifiek bewijs voor afbraak. Het is mogelijk 2 isotopen toe te passen (bijvoorbeeld koolstof en chloor) als je het omzettingsproces niet kent. Als het proces wel bekend is, is 1 isotoop voldoende. De analyses zijn prijzig, in NL worden de analyses alleen uitgevoerd door TNO. De metingen kunnen aanvullend bewijs leveren dat afbraak nog zal verlopen en voor de afbraak van benzeen is het een duidelijk bewijs. De meting kan worden gezien als een laatste redmiddel als andere uitgevoerde analyses niet eenduidig zijn. Bijvoorbeeld voor het aantonen dat anaerobe oxidatie van cis en vc plaatsvindt, wanneer alle andere stoplichten op rood staan en de indruk toch bestaat dat er iets gebeurt. In een dergelijk geval zijn isotopenanalyses erg eenduidige analyses. De analyses zijn voornamelijk geschikt voor natuurlijke afbraak, niet voor gestimuleerde afbraak. De analyses worden doorgaans uitgevoerd in minimaal 4-6 peilbuizen en kosten EUR 300 per analyse excl interpretatie. Er is sprake van een gewone (recht toe recht aan) monsternamen. Middels de analyses wordt de verschuiving ten opzichte van oorspronkelijke product gemeten. Het is daarom van belang te weten wat je eerste meting betreft: puur product of product opgelost in grondwater. Middels een stroombaanalyse is het mogelijk snelheden af te leiden, maar dat geeft wel onzekerheden. Hoe groter de verschuiving hoe minder monsters je nodig hebt. Bij de keuze voor de isotoop dient hiermee rekening gehouden te worden. De methode maakt het mogelijk om makkelijker langzame afbraakprocessen aan te tonen. Bij een pluim met een hoge leeftijd wordt gekeken naar processen die sinds het ontstaan van de verontreiniging zijn verlopen maar de methode geeft geen uitsluitel wanneer de afbraak heeft plaatsgevonden. De detectielimit voor etheen is kritisch. Bij een relatief grote pluim ten opzichte van de omvang van het brongebied is deze methode toepasbaar (dus als bron als punt is te modelleren ten opzichte van de pluim). De methode is ook toepasbaar als er veel processen lopen en veel stoffen door elkaar gemengd zijn, aan de verschuiving van de isotopen is dan af te leiden welke processen optreden. Fractionering is verschillend per bacteriestam, aangezien de microbiologie kan verschuiven in de pluim is sprake van een bandbreedte, ook is sprake van een bandbreedte per stam daardoor zitten er haken en ogen aan het kwantificeren van de afbraak.</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		

Waterstof analyse

	lab	veld
meetmethode		GC
betrouwbaarheid		onduidelijk
randvoorwaarden		
toelichting	<p>Waterstof is de universele elektronendonor en een algemene indicator van de redoxconditie van het grondwater. Waterstof wordt in het veld gemeten vanwege de hoge reactiviteit. Hiervoor wordt een glazen doorstroombuis en veld-GC gebruikt en daardoor is het een relatief dure methode, (indicatie: 2 man 15 pb op een dag). De waterstofmeting wordt als te duur voor standaardsaneringen beschouwd, verschillende redoxinterpretaties, controle voldoende injectie per bodemlaag, correlatie doc - waterstof is specifiek. Het SKB-project IJlst is hiervan een voorbeeld: hier is waterstof dieper aangetroffen dan de diepte van substraatinjectie en daardoor treedt diep ook afbraak op. Waterstofmetingen zijn nuttig bij twijfels over afbraak en kunnen worden gebruikt als andere parameters geen uitsluitel geven en geldt daarmee als complementaire meting in de actieve fase (de meting wordt toegepast als men er niet uitkomt). Dit geldt ook als de omzetting van CKW bij cis en vc stopt aangezien waterstofconcentraties verschillen per verbinding. De waterstofmeting kan ook een indicatie geven of natuurlijke afbraak verloopt, de concentratie varieert van nature (tot wel 10 nM) dus het betreft een goede parameter om te sturen, verschillende plaatsen en in de tijd vergelijken. De waterstofmeting heeft vooral meerwaarde bij gestimuleerde afbraak. Algemeen: waar zit het optimum tussen investeren in onderzoek en overmaat substraat injecteren?</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		goede sturingsparameter
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		Er is ervaring bij aannemers, er zijn wat testen gedaan en bij hip-projecten. Wat is de meerwaarde ? Als je echt niet meer weet hoe, wat of waar en je hebt het project met risico aangenomen en hoeveel tijd heb je ?

Isotrap

	lab	veld
meetmethode		
betrouwbaarheid		
randvoorwaarden		
toelichting	<p>Isotrap is een recent ontwikkelde methode waarmee het mogelijk is om in het veld aan te tonen dat natuurlijke afbraak van een specifieke verontreiniging optreedt. Er wordt gebruik gemaakt van een teflon buisje gevuld met BioSep beads. Dit zijn korrels met een groot specifiek oppervlak bestaande uit een mengsel van actieve koolstof en een coating waaraan met 13C gelabelde verontreiniging wordt toegevoegd. Wanneer deze buisjes in een grondwaterfilter worden gehangen, kunnen micro-organismen zich eraan hechten en de verontreiniging omzetten. Bij de afbraak van de verontreiniging wordt de 13C-label ingebouwd in biomassa. Door extractie van de biomassa van de BioSep beads en analyse van de biomassa kan worden vastgesteld of de gelabelde verontreiniging is gebruikt om celmateriaal op te bouwen en de gelabelde verbinding dus is afgebroken. De Isotrap wordt binnenkort door TNO getest met een combinatie van in situ batchproeven, stabiele isotopenmetingen en identificatie van de microbiële populatie. Hierbij worden Isotraps in een aantal peilbuizen op de locatie geplaatst en na een periode van incubatie worden analyses uitgevoerd. Deze meetmethode is geschikt voor oxidatieve afbraakprocessen waarbij de verontreiniging wordt gebruikt als koolstofbron en daarmee voor opbouw van celmateriaal.</p>	

Natuurlijke afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		
Gestimuleerde afbraak	Haalbaarheidsonderzoek (planfase)	Sanering (uitvoeringsfase: actief en passief)
Aërobe afbraak		
Anaërobe oxidatie		
Anaërobe reductie		