



BestParc Utrecht

Vermindering van nazorg in het Griftpark

Fase 1: Onderzoek

December 2017 - mei 2022



Deltares



Titel	BestParc Utrecht – Vermindering van nazorg in het Griftpark
Opdrachtgever	Gemeente Utrecht, afdeling Ontwikkelingsorganisatie Ruimte Contactpersoon: Harry Boerma - h.boerma@utrecht.nl
Auteurs	Jan Gerritse (Microbial Expertise – info@microbialexpertise.nl) Tim Grotenhuis (Stadswende – tim.grotenhuis@stadswende.nl) Suzanne Faber (Tauw – suzanne.faber@tauw.com) Johan van Leeuwen (UU & KWR - johan.van.leeuwen@kwrwater.nl)
Datum	19 december 2025

Dit rapport is een samenvatting van het wetenschappelijk onderzoek van Fase 1 van het project BestParc Utrecht (periode december 2017 – mei 2022)

Het onderzoek is uitgevoerd door:

- Deltares (Jan Gerritse, André Cinjee, Johan van Leeuwen en Sophie Vermooten), in samenwerking met Aveco de Bondt (Patrick Broekhuizen en Antoine Booms)
- Universiteit Utrecht (Suzanne Faber, Alraune Zech, Johan van Leeuwen en Ruud Schotting)
- Milieutechnologie Wageningen Universiteit (Dilan Aydin, Andrea Aldas-Vargas, Huub Rijnaarts en Tim Grotenhuis).
- Gemeente Utrecht (Gert Leurink, Bart Manders en Peter Rood)

Omslagfoto: Luchtfoto van het Griftpark, uit het westen

Het Utrechts Archief, catalogusnummer 802311

Publiekssamenvatting

Het project BestParc Utrecht onderzoekt of de huidige nazorg van de teerverontreiniging in het Griftpark in de toekomst duurzamer kan worden ingericht door gebruik te maken van biodegradatie en andere natuurlijke beschermingsprocessen. Sinds de sanering in 1998 wordt verontreinigd grondwater uit het park opgepompt en gezuiverd, een proces dat eeuwigdurend door zou moeten gaan. In Fase 1 van het BestParc project is de verontreinigingssituatie nader bestudeerd, en er is onderzocht of bacteriële afbraak in de bodem voldoende kan zijn om de nazorg op termijn af te bouwen.

Achtergrond en doel van het onderzoek

Het Griftpark is gelegen op een voormalige gasfabrieklocatie waar teer in de bodem is achtergebleven. Deze teer veroorzaakt een ernstige verontreiniging van het grondwater. Een groot deel van verontreinigde bodem is aan de zijkanten met bentoniet-cement schermwanden geïsoleerd, tot een diepte van ongeveer 50 tot 60 meter onder het maaiveld. Kleilagen op een diepte van ongeveer 40 tot 60 meter verhinderen verticale verspreiding van de verontreiniging grotendeels. Daarnaast wordt de verontreiniging beheerst door het onttrekken van grondwater. Het opgepompte grondwater wordt afgevoerd naar een waterzuivering. In 2007 werd ontdekt dat er al biologische afbraak plaatsvindt in de pijpleiding van het Griftpark naar de waterzuivering in Overvecht. In Fase 1 van dit project is daarom onderzocht of biodegradatie van teer-gerelateerde verontreiniging ook in de bodem optreedt, en of dit afbraakproces kan worden gestimuleerd. Bij voldoende natuurlijke afbraak in de bodem kunnen de energie-intensieve grondwateronttrekking en waterzuivering verminderd of stopgezet worden.

Doel onderzoek BestParc Fase 1:

- Beter inzicht krijgen in locaties en verspreiding van teer en hieruit opgeloste verontreinigingen.
- Onderzoeken of natuurlijke afbraak in de bodem daadwerkelijk optreedt.
- Meten en beoordelen hoe goed de verontreiniging geohydrologisch is geïsoleerd.
- Onderzoeken wat de gevolgen zijn van het verminderen of stoppen van grondwateronttrekking.
- Nagaan of biologische afbraak, indien nodig, kan worden gestimuleerd als beheersmaatregel voor veilige nazorg.

Uitgevoerde onderzoeken en methoden

Het onderzoek is uitgevoerd door Deltares met Aveco de Bondt, Universiteit Utrecht (UU), en Wageningen Universiteit & Research (WUR). Hierbij zijn veldonderzoek in het Griftpark, computermodellen en laboratoriumexperimenten gecombineerd.

Veldonderzoek (Deltares): Er zijn boringen en peilbuizen geplaatst om grondmonsters en grondwater te analyseren. Met innovatieve technieken zoals Membrane Interface Probing (MIP sonderingen) en multilevel samplers is op diverse locaties een gedetailleerd beeld verkregen van de verticale verspreiding van verontreinigingen en afbraakprocessen.

Computermodellering (UU): Met behulp van een zelf opgebouwd en in het veld en laboratorium gevalideerd reactief transportmodel werd gesimuleerd hoe verontreinigende stoffen zich in grondwater in het geïsoleerde gebied verplaatsen. Het model is vervolgens gebruikt om te voorspellen wanneer biologische afbraak voldoende snel verloopt om verspreiding buiten het geïsoleerde gebied te voorkomen.

Natuurlijke afbraak (Deltares): Er is gekeken naar chemische en microbiologische bewijzen voor afbraak van verontreinigingen. Dit gebeurde via drie bewijslijnen voor natuurlijke afbraak, die zijn gericht op:

1. Verontreinigende stoffen (concentratieafname, isotopenanalyses, afbraakmetabolieten).
2. Grondwatersamenstelling (elektronenacceptoren, redox-omstandigheden).
3. Aanwezigheid van micro-organismen met afbraakcapaciteit (DNA-analyses en laboratorium afbraaktesten).

Gestimuleerde microbiologische afbraak (WUR): In laboratoriumproeven is onderzocht of de afbraak van opgeloste teercomponenten kan worden versneld door het toevoegen van zuurstof, nitraat, sulfaat of bacteriën. Daarnaast is gekeken naar de invloed van mengsels van verontreinigingen op de afbraak van individuele stoffen daarin.

Belangrijkste resultaten

Verspreiding van verontreiniging: De locaties en verspreiding van teerbronnen en de hieruit opgeloste verbindingen in het grondwater in het geïsoleerde gebied is complex en nog niet volledig in kaart gebracht. Uit het veldonderzoek blijkt dat teer lokaal tot op de diepere kleilagen aanwezig kan zijn. Met pompproeven is geohydrologische isolatie van verontreiniging in het Griftpark beter gekwantificeerd. Het reactief transportmodel toont aan dat de locaties en het volume van de teerverontreiniging, en de snelheid van biodegradatie de belangrijkste parameters zijn die bepalen in welke mate opgeloste verontreiniging zich kan verspreiden. Alleen met de laagste in de literatuur bekende biodegradatiesnelheden voorspelt het model dat zonder grondwateronttrekking binnen 100 jaar een overschrijding van de interventiewaarden van opgeloste verontreinigingen buiten het geïsoleerde gebied kan optreden.

Natuurlijke afbraak: In de bodem zijn micro-organismen aangetoond die in staat zijn om de belangrijkste verontreinigingen (benzeen, toluen, ethylbenzeen en xylenen, indeen, indaan en naftaleen) af te breken onder anaerobe (zuurstofloze) omstandigheden. Dit betekent dat natuurlijke processen daadwerkelijk bijdragen aan het verminderen van de verspreiding van de verontreiniging.

Effect van stimulatie: De afbraaksnelheid kan worden verhoogd door kleine hoeveelheden zuurstof (<0,5 mg/L O₂) of andere elektronacceptoren zoals nitraat of sulfaat toe te voegen. Dit maakt het mogelijk om na afbouw van grondwateronttrekking met biologische methoden lokaal biodegradatie te stimuleren wanneer de natuurlijke afbraakprocessen onvoldoende snel blijken te zijn.

Conclusies en aanbevelingen voor veilige nazorg

Afbouw nazorginspanning is mogelijk: De onderzoeksresultaten tonen aan dat opgeloste teerverontreiniging in het Griftpark (i) onder natuurlijke omstandigheden afbreekt, (ii) in substantiële mate geohydrologisch geïsoleerd is, en (iii) vermoedelijk door biosimulatie beheerst kan worden. Dit vormt goede basis is om gemonitorde natuurlijke afbraak verder te verkennen als potentiële nieuwe nazorgmaatregel voor het Griftpark. Het is aannemelijk dat de verontreinigingen door natuurlijke afbraak voldoende afnemen om onaanvaardbare verspreiding uit het geïsoleerde gebied te voorkomen. Hierdoor kan een geleidelijke, milieu-hygiënisch verantwoorde afbouw van de pomp- en zuiveringsmaatregelen overwogen worden.

Nader veldonderzoek noodzakelijk: Hoewel de laboratorium- en modelresultaten geen, of slechts beperkte verspreiding van opgeloste teerverontreiniging voorspellen, is aanvullend veldonderzoek nodig om de effectiviteit van natuurlijke afbraakprocessen te kwantificeren en te monitoren. Ten eerste verdient het aanbeveling om in Fase 3 van het BestParc project de afbraaksnelheid van in het grondwater mobiele teeraromaten in het veld te bepalen. Ten tweede is een nadere kartering van mogelijke bronzones met teerverontreiniging van belang, met name op locaties waar de beschermende kleilagen dunner en mogelijk onderbroken zijn. Deze informatie is cruciaal voor een goede beoordeling van mogelijke verspreidingsscenario's.

Op basis van de resultaten van Fase 1 wordt geadviseerd om veldonderzoek te doen waarin:

- De aanwezigheid van pure fase teer, smeer-, en pluimzones in het geïsoleerde gebied beter worden gekarteerd.
- De beschikbaarheid van de potentieel belangrijkste elektronenacceptoren voor anaerobe afbraak, driewaardig ijzer en sulfaat, wordt gekwantificeerd.
- Natuurlijke afbraaksnelheden van teeraromaten *in situ* worden gemeten, bijvoorbeeld door een combinatie van isotopenonderzoek, validatie van stroomsnelheden, en modellering.
- De risico's van verspreiding zonder actieve grondwateronttrekking beter worden ingeschat (stopproef, meten van grondwaterstroomsnelheden en -richting, en modellering).
- Het biodegradatiepotentieel in het 2^e watervoerend pakket wordt vastgesteld.
- De effectiviteit van verschillende biodegradatie stimulatiemethoden op pilotschaal wordt getest (BestParc Fase 2).

Pilots: Er wordt geadviseerd om in Fase 2 BestParc veldpilots uit te voeren waarin de toepasbaarheid, effectiviteit en robuustheid van biostimulatie en extensieve grondwaterzuivering in de praktijk getest worden. Dit is van belang om betrouwbare terugvalscenario's achter de hand te hebben om bij onacceptabele verspreiding van verontreiniging (lokaal) in te kunnen grijpen.

Duurzaam beheer: Indien deze Fase 2 succesvol is, kan in een volgende stap in Fase 3 verder worden onderzocht of de nazorg kan worden omgezet naar een systeem dat grotendeels berust op natuurlijke processen, met beperkte monitoring en interventies, indien nodig. Wanneer het mogelijk blijkt om over te schakelen op een nazorgstrategie gebaseerd op gemonitorde natuurlijke afbraak, kan de afhankelijkheid van energie-intensieve zuivering worden verminderd. Dit bespaart energie en vergroot de duurzaamheid van de nazorgmaatregelen in het park.

Slotopmerking

Dit onderzoek laat zien dat de combinatie van geohydrologische kennis en microbiologisch inzicht kan bijdragen aan het duurzamer beheren van locaties met historische verontreinigingen. Door slim gebruik te maken van natuurlijke processen kan het energieverbruik worden verminderd, terwijl de veiligheid behouden blijft. De opgedane kennis is niet alleen relevant voor het Griftpark in Utrecht, maar ook voor andere voormalige gasfabriekslocaties in Nederland en het buitenland.

Inhoud

Publiekssamenvatting.....	2
Achtergrond en doel van het onderzoek.....	2
Uitgevoerde onderzoeken en methoden.....	2
Belangrijkste resultaten.....	3
Conclusies en aanbevelingen voor veilige nazorg.....	3
Slotopmerking.....	4
Afkortingen.....	7
1. Inleiding.....	8
1.1 Aanleiding.....	8
1.2 Onderzoek, organisatie en samenwerking.....	9
1.3 Beschrijving Griftparklocatie.....	10
Historie.....	10
Verontreiniging.....	11
Bodemopbouw en geohydrologie.....	11
Conceptueel Site Model.....	12
1.4 Aanpak van het onderzoek en leeswijzer.....	15
1.5 Projectrandvoorwaarden.....	16
2. Veldonderzoek verontreinigingssituatie en natuurlijke afbraak (Deelonderzoek Deltares).....	17
2.1 MIP Sonderingen.....	18
2.2 Sonische boringen.....	19
2.3 Verticale verontreinigingsprofielen.....	22
2.4 Identificeren van risico-bepalende stoffen.....	23
2.5 Natuurlijke afbraak van teeraromaten.....	24
Bewijslijn 1. Verandering in verontreiniging.....	25
Bewijslijn 2. Verandering in grondwater.....	26
Bewijslijn 3. Micro-organismen met afbraakcapaciteit.....	27
3. Veldonderzoek en reactief transport modellering van biologisch afbreekbare aromatische koolwaterstoffen (Deelonderzoek Universiteit Utrecht).....	30
3.1 Hydraulisch onderzoek en pomptesten.....	32
3.2 Aanvullende karakterisering natuurlijke afbraak.....	32
3.3 Geohydrologisch grondwater flow model van het Griftpark.....	33
3.4 Reactief transportmodel met biodegradatie van teeraromaten.....	36
4. Gestimuleerde biologische afbraak (Deelonderzoek Wageningen Universiteit en Research)....	40

4.1 Nieuwe meetmethode voor opgeloste teeraromaten	40
4.2 Aerobe microbiologische afbraak van mengsels van teeraromaten	40
4.3 Biostimulatie en bioaugmentatie van anaerobe afbraak van mengsels van teeraromaten in batches	41
4.4 Micro-aerobe afbraak van mengsels van aromatische koolwaterstoffen	42
4.5 Effect van milieuomstandigheden op afbraak van toluen en benzeen in sulfaat- of nitraat-reducerende grondkolommen	43
Redox-omstandigheden en flow	43
Mengsels van aromaten	44
Microbiologische populaties in de kolommen	44
5. Synthese van de deelonderzoeken en vooruitblik op pilottesten en een nieuwe nazorg	46
5.1 Verontreinigingssituatie	46
5.2 Veilige nazorg met natuurlijke afbraak	47
5.3 Pilots gestimuleerde afbraak	47
Piloptie 1: Microbubbels (O ₂ -dosering)	47
Piloptie 2: Nitraatdosering	48
Piloptie 3: Sulfaatstimulatie	48
Piloptie 4: Helofytenfilter	48
10. Referenties	50

Afkortingen

BTEX	Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen, Xylenen
BTEXIelaN	Benzeen, Tolueen, Ethylbenzeen, Xylenen, Indeen, Indaan, Naftaleen
DNAPL	Dense Non-Aqueous Phase Liquid = zware niet in water opgeloste vloeistof
GC-IRMS	Gaschromatografie Isotopenratio Massaspectrometrie = analysemethode gebruikt voor het bepalen van de verhouding van stabiele isotopen ^{13}C : ^{12}C en ^2H : ^1H in aromatische koolwaterstoffen
GC-MS	Gaschromatografie Massaspectrometrie = analysemethode voor vluchtige koolwaterstoffen
IBC	Isoleren, Beheersen en Controleren = methode voor het beheer van locaties met historische bodem- en grondwaterverontreiniging
LC-qTOF-MS	Liquid Chromatography Quadruple Time Of Flight Mass Spectrometry = analysemethode voor organische stoffen zoals intermediären van aromatenafbraak
m-mv	meter onder het maaiveld
MAK	Monocyclische Aromatische Koolwaterstoffen
MIP	Membrane Interface Probing = sondeertechniek met gelijktijdige GC-MS analyse
MLS	Multilevel Sampler = methode voor het op een locatie bemonsteren van grondwater van meerdere dieptes
MNA	Gemonitorde Natuurlijke Afname
N	Naftaleen
NA	Natuurlijke Afbraak
NAP	Nieuw Amsterdams Peil
PAK	Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen
qPCR	quantitative Polymerase Chain Reaction = DNA-analysemethode waarmee gericht specifieke genen worden gekwantificeerd, bijvoorbeeld kenmerkend voor bepaalde micro-organismen of afbraakenzymen
WUR	Wageningen Universiteit en Research
UU	Universiteit Utrecht

1. Inleiding

1.1 Aanleiding

Op de locatie van het Griftpark, in Utrecht aan de Blauwkapelseweg, produceerde het gemeentelijk gasbedrijf gedurende een eeuw, van 1862 tot 1962, gas uit steenkool voor de inwoners en de bedrijven in de stad ^{1,2}. De kolen werden in de ovens van de fabriek verhit en de gassen die vrijkwamen werden opgevangen, gezuiverd en opgeslagen in gashouders. Bijproducten van dit proces waren teer, cokes, blauwsel (cyaniderestafval), ammoniak en zwavelverbindingen. Deze werden op het gasfabrieksterrein opgeslagen en later vaak hergebruikt, bijvoorbeeld als brandstof, asfaltgrondstof of kunstmest. Na de sluiting, ontmanteling en sloop van de fabriek in 1969, is in 1976 besloten om in het gebied een park, het “Griftpark”, aan te leggen en om een klein deel van het terrein te bestemmen voor woningen ¹. Door de ontdekking van bodemverontreiniging zijn deze plannen in 1980 echter gestopt, en is de gemeente Utrecht een onderzoek begonnen naar de omvang van de verontreiniging. Al snel bleek dat door de opslag van teer en blauwsel, de bodem op diverse plaatsen ernstig vervuild was met giftige aromatische koolwaterstoffen zoals benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylene (BTEX) en naftaleen (N), en cyanide. Na mislukte pogingen om de grond te saneren, en nadat de volle omvang van de verontreiniging duidelijk werd, is uiteindelijk in 1992 besloten om de verontreiniging in het Griftpark te isoleren, beheersen en controleren volgens de zogenaamde IBC-methode ¹.

Het implementeren van de IBC-methode is in 1993 gestart en bestond uit het aanleggen van een schermwand rondom de verontreiniging tot op de kleilaag tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket, het saneren van de randgebieden, het starten van grondwateronttrekking en -zuivering, en het aanbrengen van een isolatie- en herinrichtingslaag bovenop. De 80 centimeter dikke, 1235 meter lange, en 50 tot maximaal 64 meter diepe schermwand bestond uit bentonietklei, gemengd met zand en cement dat in een sleuf rondom het meest verontreinigde gebied werd gestort. Nadat in 1998 de saneringswerkzaamheden waren afgerond en de verontreiniging als het ware “in een bak was ingepakt”, is het Griftpark ingericht als stadspark. Om te voorkomen dat verspreiding van opgeloste verontreinigende stoffen naar de omgeving kan optreden wordt grondwater vanuit het Griftpark permanent weggepompt, zodat de stijghoogte van het 1^e watervoerend pakket binnen het scherm ca. 0,2 tot 0,4 m lager is dan buiten het scherm. Hierdoor wordt grondwater vanuit de omgeving aangezogen ^{3,4}. Om de effectiviteit van de IBC-oplossing te controleren wordt met een netwerk van peilbuizen het grondwater rondom het Griftpark gemonitord. Sinds 1998 wordt het Griftpark met deze nazorgmaatregelen eeuwigdurend veilig gehouden.

Het verontreinigde grondwater uit het Griftpark wordt twee kilometer verderop gezuiverd. In 2008 werd ontdekt dat in de pijpleiding tussen het park en de waterzuivering al afbraak van verontreinigingen optreedt door verschillende bacteriën die bekend werden als de ‘Griftparkbacterie’ ⁵⁻⁸. Deze ontdekking vormde de aanleiding om te onderzoeken of ook in de bodem van het Griftpark zelf al microbiologische afbraak van de verontreinigingen optreedt, en of het op termijn mogelijk is om veilig te stoppen met het actief oppompen en zuiveren van grondwater. Onderzoek naar de natuurlijke afbraak van benzeen en naftaleen in het buitengebied bevestigde eerder al de potentie van anaerobe afbraakprocessen ⁹. Daarom heeft de gemeente Utrecht in samenwerking met Wageningen Universiteit en Research (WUR), Universiteit Utrecht (UU) en Deltares het projectplan BestParc (Biological Engineered STimulation in a Public Accessible Recreation-area in the Center of Utrecht) ontwikkeld, waarvoor financiering is verstrekt door het Ministerie van Infrastructuur en Milieu ¹⁰.

1.2 Onderzoek, organisatie en samenwerking

Het BestParc project heeft als doel om de mogelijkheden te onderzoeken om de nazorgmaatregelen op een milieuhygiënisch verantwoorde wijze te beëindigen of te verlagen, door gebruik te maken van natuurlijke afbraakprocessen in de bodem van het Griftpark ¹⁰.

Het project heeft drie fases; Fase 1: Onderzoek, Fase 2: Pilots, en Fase 3: Implementatie.

In Fase 1 is onderzocht:

- Waar welke verontreinigende stoffen aanwezig zijn.
- Hoe snel verontreinigingen zich verspreiden in het grondwater.
- Of natuurlijke afbraak door micro-organismen in de bodem aantoonbaar is.
- Of deze afbraak versneld kan worden om verspreiding te voorkomen.

Als het Fase 1 onderzoek voldoende aanwijzingen oplevert voor effectieve natuurlijke afbraak, volgt Fase 2: pilotstudies waarin terugvalopties getest worden voor het geval afbraak toch onvoldoende blijkt na (gedeeltelijke) afbouw van de bestaande zuiveringsmaatregelen. In Fase 3 wordt toegewerkt naar een nieuw nazorgplan, waarin natuurlijke (en eventueel gestimuleerde) afbraak centraal staat. Zo'n plan kan bijdragen aan het verminderen van grondwateronttrekking en energiegebruik, en daarmee aan een duurzamer beheer van het Griftpark.

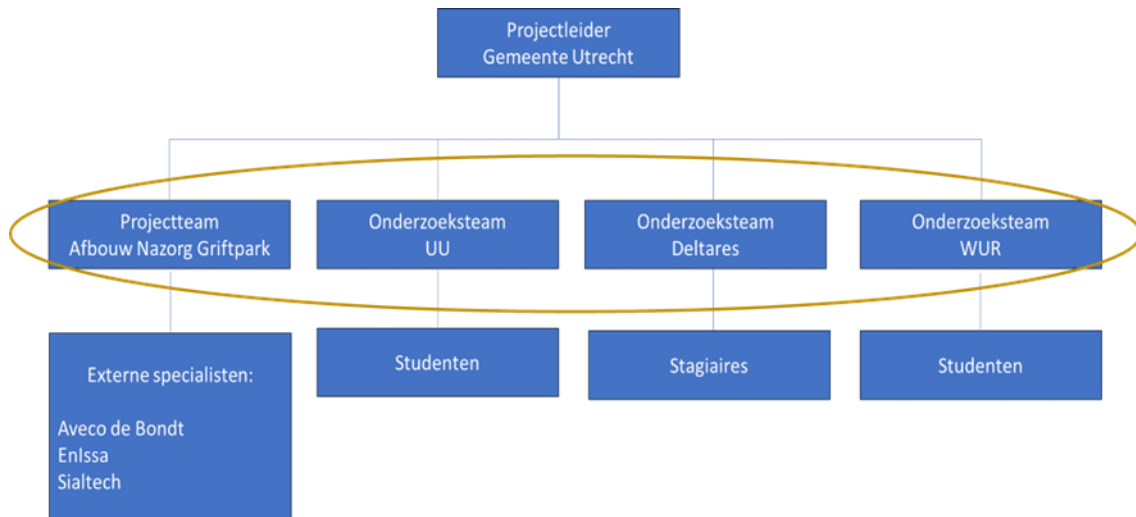
Dit rapport presenteert de resultaten van het onderzoek in Fase 1 (december 2017 - mei 2022). Dit bestond uit deelprojecten die op hoofdlijnen zijn aangestuurd door de Gemeente Utrecht, en uitgevoerd door UU, Deltares, en WUR.

Universiteit Utrecht richtte zich op de ontwikkeling van een 3D reactief transportmodel van het Griftpark. Met dit model wordt het transport van opgeloste verontreiniging, onderhevig aan biologische afbraak in het grondwater gesimuleerd. Het model helpt bij het bepalen van de haalbaarheid en veiligheid van mogelijke maatregelen in het Griftpark ¹¹.

Deltares voerde veld- en laboratoriumonderzoek uit naar het karakteriseren van de verontreiniging en het monitoren van natuurlijke afbraak in het Griftpark. Het veldonderzoek is samen met *Aveco de Bondt* uitgevoerd. Het betrof de karakterisering van teerverontreiniging, en onderzoek waarbij de bewijslijnen van natuurlijke afbraak door micro-organismen in de bodem van het Griftpark zijn vastgesteld ¹².

Wageningen University & Research legde het accent op laboratoriumonderzoek naar het stimuleren van natuurlijke afbraak. Hierbij zijn de milieumomstandigheden geoptimaliseerd zodat de biologische afbraaksnelheid van de opgeloste verontreinigingen verhoogd wordt ¹³.

De drie deelonderzoeken zijn complementair en in samenhang door het BestParc projectteam uitgevoerd (Figuur 1). De samenstelling van het projectteam, met de gemeente als opdrachtgever namens het ministerie, academische onderzoekers, studenten en stagiaires van twee universiteiten en een kennisinstelling, en inhuur van adviseurs en aannemers was bijzonder. Door deze brede opzet is het mogelijk om veel wetenschappelijke kennis, praktische ervaring en menskracht te bundelen wat nodig is voor het uitvoeren van dit complexe project. Tegelijkertijd was het een uitdaging om de soms uiteenlopende doelstellingen van projectpartners op elkaar af te stemmen. Voor de Gemeente Utrecht is een pragmatische aanpak van de afbouw van nazorg in het Griftpark leidend, terwijl universiteiten en kennisinstellingen vooral gericht zijn op het genereren en publiceren van nieuwe, breed toepasbare kennis. Om het BestParc project richting en balans te geven namen de onderzoeksteams ongeveer maandelijks deel aan overleggen (live en online) met het projectteam Afbouw Nazorg Griftpark om de voortgang en aanpak van het onderzoek te bespreken.



Figuur 1. Organogram BestParc project Utrecht Fase 1

1.3 Beschrijving Griftparklocatie

Historie

Het Griftpark ligt aan het riviertje de Biltse Grift, net ten oosten van het centrum van Utrecht, aan de noordzijde van de Kleinesingel en de westzijde van de Blauwkapelseweg (Omslagfoto). Het is een modern druk bezocht stadspark met een vijver, speeltuin, kinderboerderij en restaurant ¹⁴. In het noordwesten biedt een heuvel uitzicht over het park en de stad. Hoewel er nu een prachtig park is, heeft het Griffterrein een lange industriële geschiedenis. In 1862 is een koolgasfabriek (Westfaalse steenkolen) gestart en vervolgens zijn er gedurende 100 jaar gasfabrieken in bedrijf geweest (Figuur 2). In 1899 werd uitgebreid met een watergasfabriek (cokes en water), en in 1908 met een oliegasfabriek (olie en cokes). In 1962 is de gasproductie gestaakt. Na de sloop van de fabrieken, installaties en gashouders is het Griffterrein van 1965 tot 1972 tijdelijk nog gebruikt als gemeentelijke vuilstortplaats. Aan de westzijde van het Griftpark lag het Vaaltterrein, genoemd naar de historische vuilstort ("vaalt") die hier vanaf circa 1876 was gevestigd. Het Vaaltterrein maakte geen deel uit van de gasfabrieken, maar werd tot eind jaren zestig gebruikt als opslag- en overslaglocatie voor afval, huisvuil en puin van de Utrechtse stadsreinigingsdienst.



Figuur 2. Luchtfoto's van fabrieksgebouwen en gashouders op het Griffterrein (links 1923, en rechts 1967). Bron: het Utrechts Archief

Verontreiniging

De gasproductie, kolenopslag en vuilstort hebben geleid tot een grootschalige verontreiniging van de bodem en het grondwater in het gebied. Bij de productie van gas uit steenkool ontstaan bijproducten als teerachtige koolwaterstoffen (PAK, BTEX), ammoniawater, zware metalen en cyanides. Bij water- en oliegasproductie is het bijproduct voornamelijk teer. Vanaf 1893 werd kunstmest geproduceerd van het ammoniawater, waarvoor zwavelzuur werd gebruikt, hetgeen verklaart waarom er veel ammonium en sulfaat in het grondwater in het Griftpark aanwezig is.

Archiefonderzoeken laten zien dat er op het Griftterrein tientallen potentiële verontreinigingsbronnen waren, zoals voormalige gashouders, ondergrondse olie- en teertanks, leidingen, en teerputten^{15,16}. Voor het implementeren van de IBC-maatregelen is onderzoek gedaan naar het voorkomen van bodem en grondwaterverontreiniging in het Griftpark. In een veldonderzoek van Heidemij zijn 21 boringen geplaatst tot een maximale diepte van 40 m-mv¹⁷. In vier boringen is teer, PAK en andere teer-gerelateerde verontreiniging vastgesteld op dieptes >20 m-mv (maximaal 33 m-mv). Grondwaterverontreiniging met cyanide, aromaten en naftaleen is in dit onderzoek op meerdere plaatsen op 40 m-mv aangetroffen, en er wordt aangegeven dat de einddiepte van de verontreiniging vermoedelijk 45 à 50 m-mv tot de kleilagen is. Het Heidemij-onderzoek geeft een globaal beeld van de verspreiding van verontreiniging in het griftpark, maar deze is na het aanleggen van de IBC-maatregelen niet verder in detail gekarteerd en gekarakteriseerd.

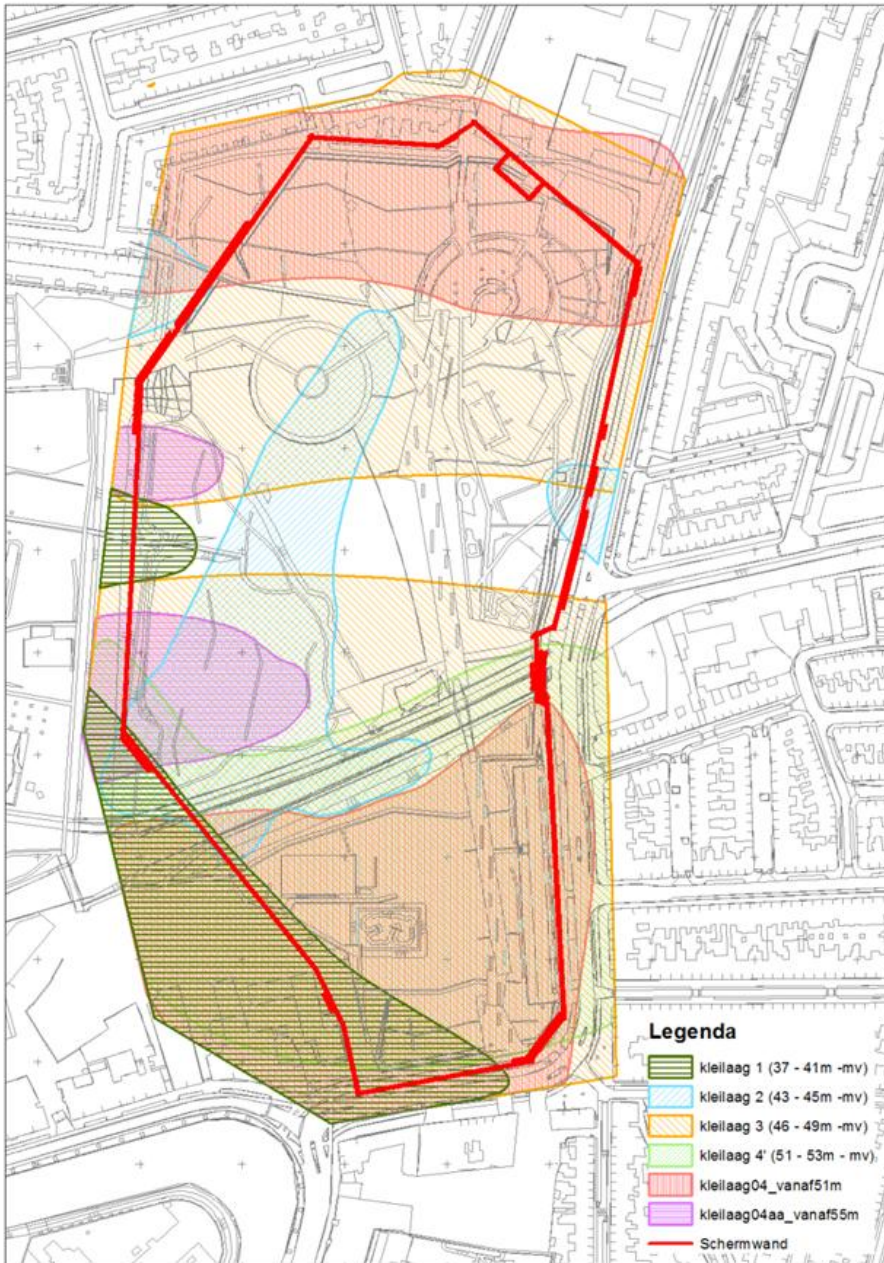
Bodemopbouw en geohydrologie

De bodemopbouw in het Griftpark, is vastgesteld op basis van sondeer- en boorgegevens, en weergegeven in Tabel 1¹⁸. De benaming van de geologische formaties is in 2003 vernieuwd¹⁹. Omdat in dit rapport gerefereerd wordt naar oudere rapporten is de oude benaming gebruikt.

Tabel 1. Bodemopbouw op basis van sondeer- en boorgegevens²⁰

Diepte	Ondergrens (m-mv)	Grondsoort	Geologische formatie	Tijdvak
I	~ 5	Klei en veen	Westland-Formatie	Holoceen
IV	~ 50	Zand, fijn tot grof, met dunne kleilaagjes	Formatie van Kreftenheye, Sterksel en Urk	Midden Pleistoceen
V	~ 60	Afwisselend zand en kleilagen	Klei formatie van Kedichem (nieuwe naam Waalre), Zand formatie van Harderwijk	Onder Pleistoceen
VI	~ 90	Zandpakket	Formatie van Harderwijk 2 ^e watervoerend pakket	Onder Pleistoceen

Voor het BestParc-onderzoek zijn met name de kleilagen van de formatie van Kedichem, tussen ca. 40 en 60 m-mv, belangrijk. Deze vormen namelijk een scheidende laag tussen het verontreinigde 1^e watervoerend pakket in het geïsoleerde gebied, en het te beschermen grondwater van het 2^e watervoerend pakket. De grenslijn van de formatie van Kedichem (tegenwoordig bekend als de formatie van Waalre) loopt door Utrecht, en wordt gekenmerkt door afwisselende zand- en kleiafzettingen. Met sonderingen zijn in de bodem van de Griftparklocatie zes elkaar deels overlappende kleilagen gevonden op een diepte van 37 tot 55 m-mv¹⁸. De sonderingsresultaten suggereren dat er dwars door het Griftpark een zone zonder kleilagen zou kunnen zijn die loopt van de oostelijke naar westelijke schermwand (Figuur 3). Hoewel met sonderingen de aanwezigheid van dunne laagjes klei niet goed is vast te stellen, is het niet uit te sluiten dat er in deze zone gebieden zijn waar een scheidende kleilaag ontbreekt, resulterend in een “gat” met een relatief grote doorlatendheid voor verticaal transport van grondwater en verontreiniging. Met of zonder zones zonder kleiafzetting, is hoe dan ook de laag tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket niet waterscheidend, omdat water tussen de verscheidene kleilagen door kan stromen.

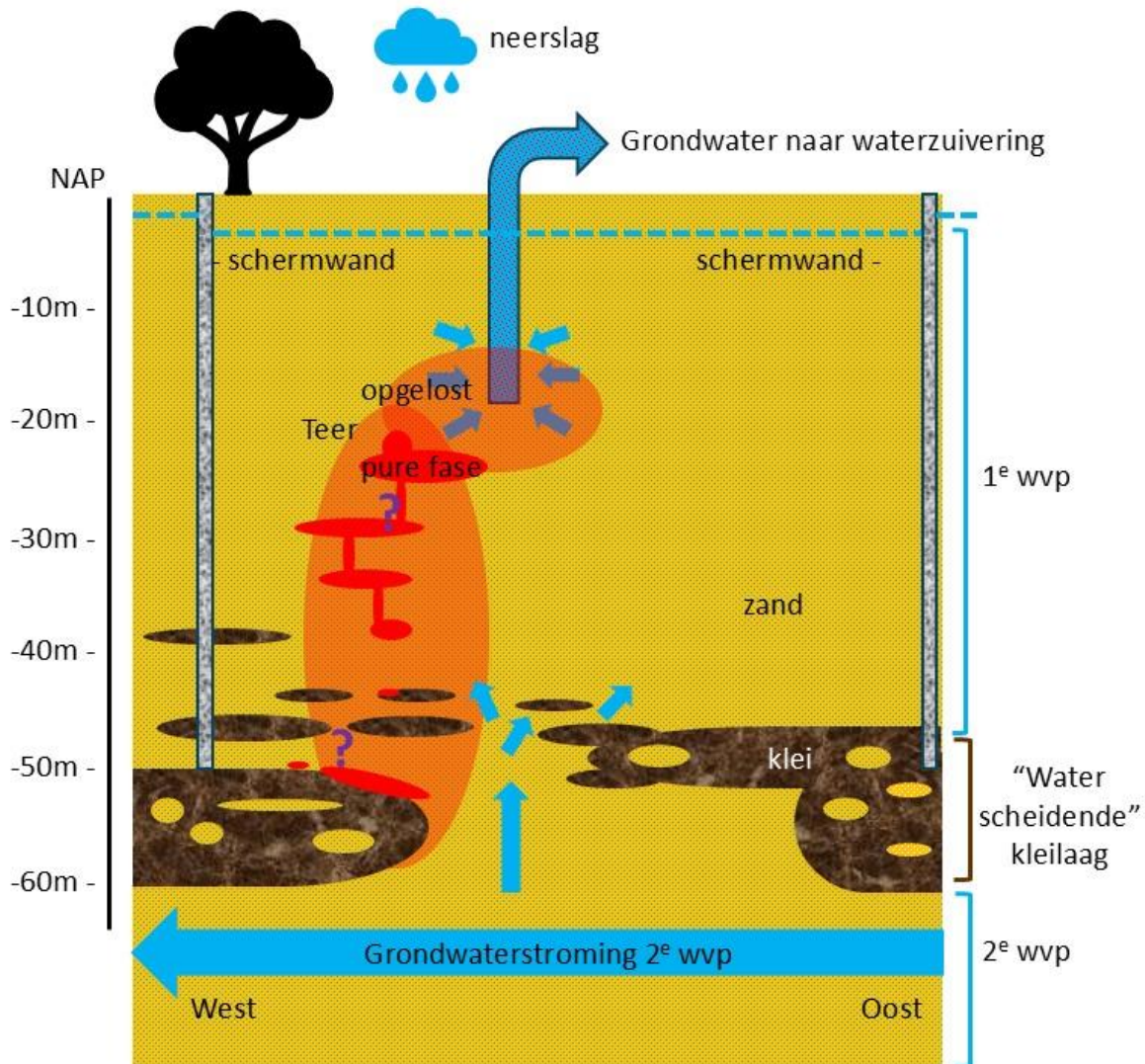


Figuur 3. Bovenaanzicht interpretatie ligging van de kleilagen van Kedichem op basis van sonderingen ^{20,21}

Conceptueel Site Model

Met de beschikbare kennis van de bodemopbouw, verontreinigingssituatie en IBC-maatregelen is een Conceptueel Site Model (CSM) van de huidige situatie in het Griftpark opgesteld (Figuur 4). De verontreiniging is van de omgeving geïsoleerd door de betoniet-cement schermwanden tot op de kleilagen van de formatie van Kedichem, op een diepte van ca. 50 tot 60 m-mv. Door grondwateronttrekking uit het geïsoleerde gebied (blauwe pijlen, ca. 8-10 m³/uur) wordt het grondwaterniveau in het Griftpark (blauwe stippellijnen) 0,2 tot 0,4 meter lager gehouden dan dat ten opzichte van het waterniveau zowel in het 1^e watervoerende pakket buiten de schermwanden als dat van het 2^e watervoerende pakket. Hierdoor ontstaat er een aanzuigende grondwaterflux en kan er geen opgeloste verontreiniging ontsnappen naar de omgeving. De waterdoorlatendheid van de schermwanden is zeer laag, waardoor het onttrokken grondwater vooral wordt aangevuld door regenwater en een flow door het mogelijk meer doorlatende gebied in de kleilagen van Kedichem ⁴. Teerverontreiniging is in het geïsoleerde gebied aanwezig als mobiele pure fase teer, als residuaire teer in smearzones als “kloddertjes” in poriën en capillair gevangen in de

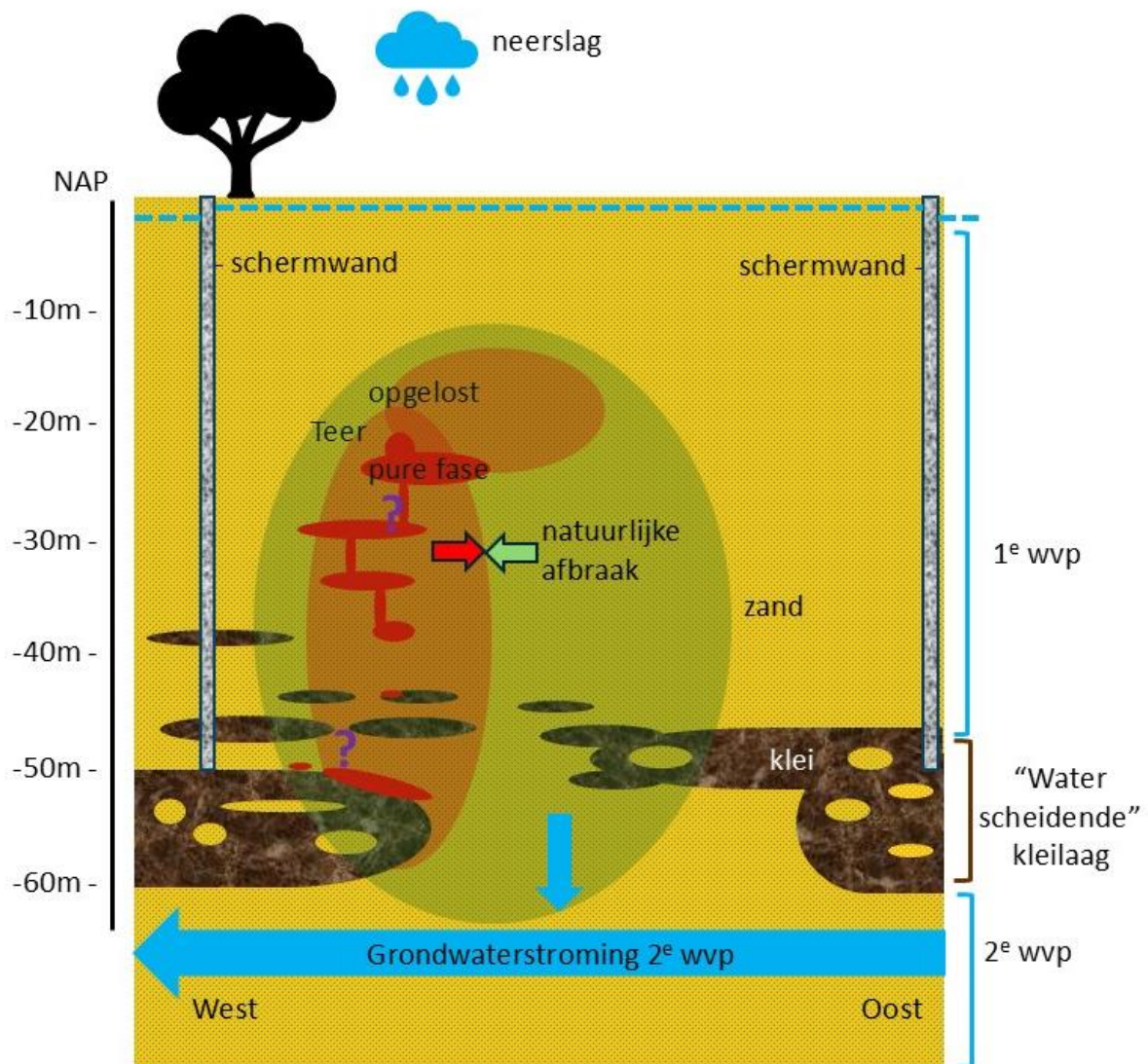
bodemmatrix, en als opgeloste componenten (m.n. mono-aromatische koolwaterstoffen en lichte PAKs) in het grondwater. Opgeloste teerverontreiniging in het grondwater is in het verleden vastgesteld tot 40 m-mv, en vermoedelijk aanwezig tot op de kleilagen ¹⁷. Bij de start van het BestParc project was niet aangetoond dat pure fase teer DNAPL tot op de waterscheidende kleilagen aanwezig is. Pure fase teer is een niet met water mengbare vloeistof. Omdat water een lagere viscositeit en oppervlaktespanning heeft, beïnvloed grondwateronttrekking de stroming van pure fase teer niet. De locaties van puur product zijn niet goed bekend, maar met mobiele teer moet wel rekening gehouden worden. Dit is aangegeven met de paarse vraagtekens in het CSM.



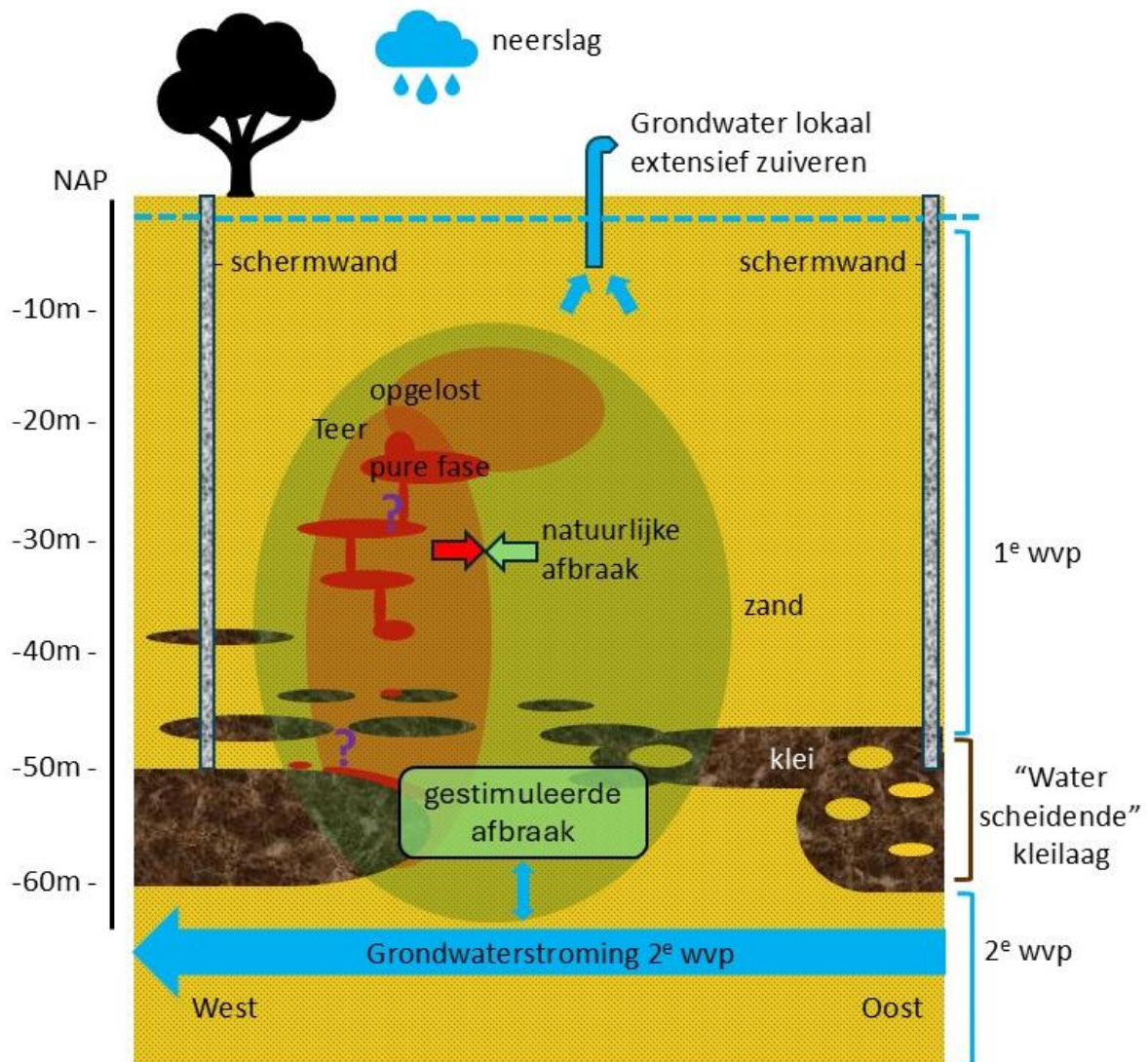
Figuur 4. Conceptueel model van een dwarsdoorsnede van de huidige situatie in het Griftpark

Alternatieve conceptuele modellen kunnen worden opgesteld van toekomstige gewenste varianten, waarin de grondwateronttrekking en reiniging in waterzuiveringsinstallatie zijn afgebouwd. Het meest eenvoudige en extensieve concept is volledig gebaseerd op natuurlijke afbraak (Figuur 5). Er is geen grondwateronttrekking, en door regenval is er een lichte verhoging van het grondwaterniveau in het met de schermwanden geïsoleerde gebied ten opzichte van de omgeving. Hierdoor ontstaat er een verticale grondwaterstroming van het 1^e naar het 2^e watervoerend pakket. De natuurlijke afbraakcapaciteit van de microbiële populaties in de bodem van het Griftpark (groene vlek in Figuur 5) is echter voldoende, en fungeert als een “vangnet” voor verspreiding van opgeloste verontreiniging. Verspreiding en afbraak zijn in balans, aangegeven met de rode en groene pijl in Figuur 5. Onderzoek in Fase 1 van het BestParc project moet vaststellen of nazorg die alleen gebaseerd is op gemonitorde natuurlijke afname van verontreiniging

(MNA) in is voor het Griftpark. Wanneer dit concept als kansrijk wordt beoordeeld, dan zal dat in de praktijk in Fase 3 gevalideerd moeten worden. Wanneer blijkt dat natuurlijke afbraak alleen onvoldoende is om alle verontreiniging te beheersen, dan is het belangrijk om robuuste terugvalsscenario's te hebben waarmee (lokaal) kan worden bijgestuurd (Figuur 6). Bijsturen kan bestaan uit het beperkt onttrekken van, zo schoon mogelijk, grondwater en bovengrondse zuivering in bijvoorbeeld een helofytenfilter. Hiermee wordt het stijghoogteverschil op peil gehouden en treedt er geen of nauwelijks uitstroom naar het 2^e watervoerend pakket op. Daarnaast kan de natuurlijke afbraak *in situ* in de bodem van het Griftpark worden gestimuleerd en versneld (lichtgroene zone in Figuur 6), bijvoorbeeld rondom bronzones om verspreiding te voorkomen, of bij zones met niet volledig aaneengesloten kleilagen, om de receptor, het 2^e watervoerend pakket, te beschermen. Het doel van Fase 2 van het BestParc project is het testen van verschillende mogelijke opties voor *in situ* gestimuleerde biodegradatie en extensieve *ex situ* reiniging van grondwater.



Figuur 5. Conceptueel model van een dwarsdoorsnede van het Griftpark na afbouw grondwateronttrekking; verspreiding en natuurlijke afbraak zijn in balans



Figuur 6. Conceptueel model van een dwarsdoorsnede van het Griftpark met natuurlijke, en lokaal gestimuleerde biodegradatie en beperkte grondwateronttrekking

1.4 Aanpak van het onderzoek en leeswijzer

In dit samenvattende rapport van Fase 1 van het BestParc project worden de deelonderzoeken van Deltares, Universiteit Utrecht en Wageningen Universiteit & Research in aparte hoofdstukken beschreven. Van de onderzoeksresultaten is beknopte publicatie geschreven in Vakblad Bodem ²².

Hoofdstuk 2 gaat over het onderzoek van Deltares. Dit veld- en laboratoriumonderzoek is in samenwerking met Aveco de Bondt gedaan, en richtte zich op het in beeld brengen van de verticale verdeling van teerverontreiniging op verschillende plaatsen in het Griftpark, het identificeren van risico-bepalende aromatische koolwaterstoffen, en het vaststellen van de natuurlijke afbraak daarvan.

In **hoofdstuk 3** wordt het onderzoek van de UU beschreven, waarin op basis van historisch en aanvullend hydrologisch- en bodemonderzoek een verbeterde en onderbouwde beschrijving van de geohydrologie, verontreinigingsbronnen, en natuurlijke afbraakprocessen in het Griftpark is opgesteld. Dit vormde de basis voor de ontwikkeling van een driedimensionaal grondwaterstromingsmodel (MODFLOW/MT3DMS) en een reactief transportmodel (MODFLOW/PHT3D). Met deze modellen zijn de verspreiding en de afbraak van relevante aromatische koolwaterstoffen met verschillende elektronenacceptoren in het geïsoleerde gebied, en daarbuiten, gesimuleerd en voorspeld. Dit onderzoek geeft inzicht in belangrijke processen die zich afspelen in de ondergrond en in de mogelijke verspreiding van in het grondwater opgeloste risico-

bepalende teercomponenten tijdens verschillende mogelijke nazorg scenario's. In het UU onderzoek is samengewerkt met Deltares en WUR.

Hoofdstuk 4 behandelt het laboratoriumonderzoek van de WUR, waarin de mogelijkheden voor het stimuleren van microbiologische afbraakprocessen zijn verkend. In batch- en grondkolomexperimenten is de stimulering van aromatenafbraak door dosering van de alternatieve elektronenacceptoren sulfaat, nitraat en zuurstof vastgesteld. Daarnaast is onderzocht hoe de afbraak van individuele aromatische koolwaterstoffen wordt beïnvloed door de aanwezigheid van mengsels van deze teercomponenten. Dit onderzoek is van belang voor het uitwerken van terugvalscenario's waarmee, indien nodig, de natuurlijke afbraakprocessen in het Griftpark kunnen worden ondersteund. In dit onderzoek werkte WUR samen met UU en Deltares.

Hoofdstuk 5 geeft een synthese van de deelonderzoeken, waarin de haalbaarheid van een meer extensieve en duurzame nazorg op basis van natuurlijke afbraakprocessen in de bodem van het Griftpark wordt geëvalueerd. Kennishiaten worden besproken, en concepten voor kansrijke pilots voor terugvalscenario's worden uitgewerkt. Hiermee wordt een route aangeduid voor de invulling van Fase 2 en Fase 3 van het BestParc project, welke leidt tot een moderne, veilige, technisch en economisch haalbare, en duurzame nazorg voor het Griftpark.

1.5 Projectrandvoorwaarden

De Gemeente Utrecht heeft de volgende randvoorwaarden voor de afbouw van nazorg gesteld ¹⁰:

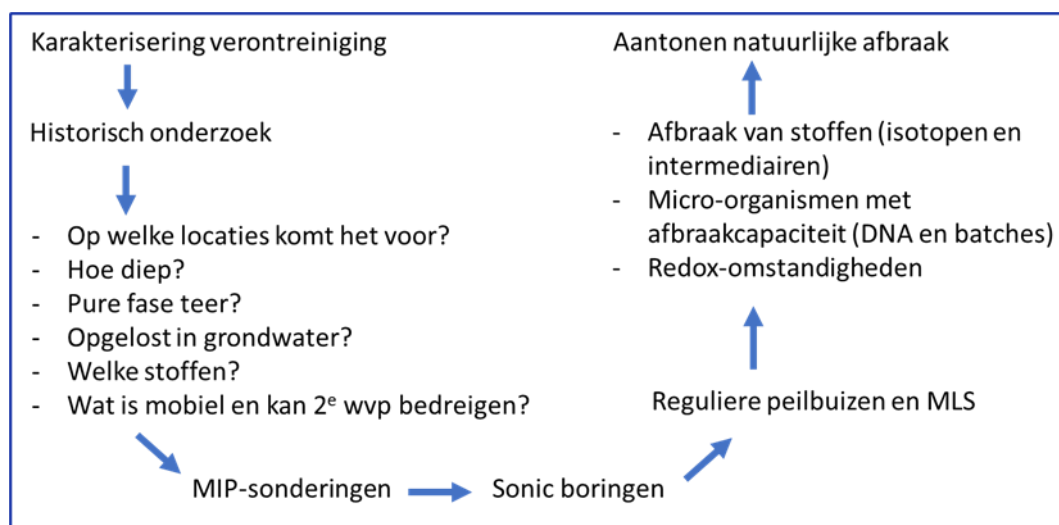
- Tijdens het BestParc onderzoek wordt het huidige nazorgpakket voor binnengebied gehandhaafd.
- Er dient altijd te worden voldaan aan de vergunningvoorschriften.
- Het onderzoek mag niet leiden tot nieuwe bodemverontreiniging of risico's.
- De bodemverontreiniging in het binnengebied mag zich niet verplaatsen naar het 2^e watervoerend pakket.
- De kosten voor de eventueel te implementeren nieuwe aanpak zijn lager dan de huidige.
- Het Griftpark blijft toegankelijk voor het publiek, en parkgebruikers en omwonenden worden geïnformeerd over het onderzoek.
- Alle opgedane kennis en ervaring is eigendom van de gemeente Utrecht en de gemeente zal deze zonder voorbehoud delen met eenieder die daarom vraagt.

2. Veldonderzoek verontreinigings situatie en natuurlijke afbraak (Deelonderzoek Deltares)

Van mei 2018 tot en met april 2019 is in drie periodes veld- en laboratoriumonderzoek uitgevoerd om een beter beeld te verkrijgen van de verontreinigings situatie, en om het potentieel en het optreden van natuurlijke afbraak binnen en buiten de schermwanden van het Griftpark te bepalen. Bij alle fases van het bodemonderzoek zijn omwonenden en parkgebruikers geïnformeerd over de werkzaamheden die zouden worden uitgevoerd²³. Publiek, pers en politiek hebben opvallend positief en nieuwsgierig gereageerd^{5,7,24-30}. De resultaten van het deelonderzoek in dit hoofdstuk zijn door Gerritse *et al.* in 2021 in detail beschreven, en tevens gerapporteerd in studenten afstudeerverslagen van UU, WUR en Radboud Universiteit Nijmegen^{12,31-33}.

Aanpak

De aanpak van dit deelonderzoek was om met een stapsgewijze inzet van veldonderzoek en laboratoriumtesten verontreiniging in het Griftpark te karakteriseren en in beeld te brengen, en om vervolgens de natuurlijke afbraak van de gevonden risicobepalende stoffen vast te stellen (Figuur 7). Eerst zijn met historisch onderzoek naar de gasfabrieken in het archief van Utrecht, locaties in het Griftpark in kaart gebracht waar naar verwachting teerverontreiniging aanwezig is¹⁵. Om de aanwezigheid van teer te bevestigen zijn vervolgens MIP sonderingen geplaatst (Figuur 8). Hierna zijn locaties geselecteerd waar met sonische boringen tot in het 2^e watervoerend pakket (ter hoogte van het mogelijke gat in de kleilagen van Kedichem) of op de kleilaag (ten westen en noordwesten van de uitzichtheuvel) multilevel sampler (MLS) filters geplaatst. De MLS geven een gedetailleerd profiel in de diepte van verontreinigende stoffen, redox-omstandigheden en micro-organismen, wat belangrijk is voor het vaststellen en interpreteren van natuurlijke afbraakprocessen. Om na te gaan of verontreiniging zich uit het binnengebied heeft verplaatst naar het 2^e watervoerend pakket, zijn hierin in een latere projectfase stroomafwaarts ten westen van het Griftpark nog drie MLS geplaatst met filters tot dieptes van 90 tot 107 m-mv (Figuur 8)³⁴. De positionering van deze MLS is gebaseerd op de mogelijke verspreiding van verontreiniging zoals voorspeld met het door de UU opgestelde grondwaterstromingsmodel.



Figuur 7. Aanpak karakterisering van verontreiniging en vaststellen van natuurlijke afbraak



Figuur 8. Overzicht van de in het BestParc project geplaatste MIP sonderingen (groene markeringen), sonische boringen (gele markeringen) en multi level sampler filters (blauwe markeringen)

2.1 MIP Sonderingen

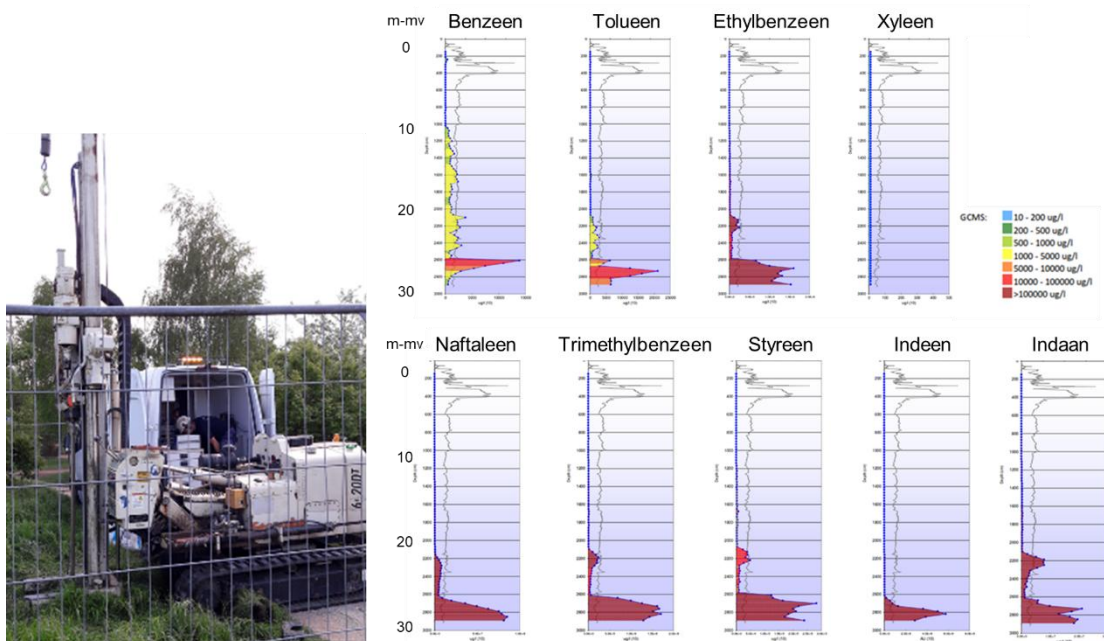
MIP staat voor Membrane Interface Probe. Bij MIP-sonderingen worden de gegevens van een klassieke HPT sondering (Hydraulic Profiling Tool, waarmee de waterdoorlatendheid van de bodem bepaald wordt), uitgebreid met een GC-MS systeem. Bij deze methode wordt door gaschromatografie (GC) een mengsel van onbekende stoffen gescheiden in afzonderlijke componenten, die vervolgens worden gedetecteerd en geïdentificeerd in een massaspectrometer (MS). Tijdens het indrukken van de sondeerconus wordt de bodem verhit, en de hierdoor vervluchtigende verontreinigende stoffen worden direct gemeten. Met MIP wordt dus real time informatie verzameld over de bodemopbouw, bodemdoorlatendheid, bodemtypen en de mate en soort van verontreiniging.

In het Griftpark zijn door Enissa in de periode mei-juni 2018 negen MIP sonderingen verricht, tot een met het ingezette materieel maximaal haalbare diepte van 29 meter (Figuur 8) ³⁵. De MIP-sonderingen bevestigen dat op de geselecteerde locaties sprake is van een zeer sterke verontreinigingssituatie. Op alle negen MIP locaties is verontreiniging met teeraromaten aangetoond. Naast benzeen, toluen, ethylbenzeen, xyleen en naftaleen (BTEXN) zijn hoge concentraties van andere mobiele aromaten zoals trimethylbenzeen, styreen, indeen en indaan gevonden (Figuur 9). Op zes van de locaties geven de MIP sonderingen aromatenconcentraties boven de maximale wateroplosbaarheid (>100.000 µg/L). Volgens Enissa suggereert dit dat teer hier als pure fase residuaire of niet-opgeloste vloeistof (DNAPL) in de bodem voorkomt (Figuur 8: M², M³, M⁴, M⁵, M⁷ en M⁹) ³⁵. Echter, omdat een MIP sondering de uit een niet specifiek bodemvolume verdampte stoffen detecteert, is de methode niet kwantitatief maar alleen indicatief voor

de aanwezige hoeveelheid verontreiniging. Op MIP locaties M¹, M², M³, M⁶ en M⁸ is verontreiniging gedetecteerd tot op de maximaal bereikte diepte van 29 m-mv. Het is daarom aannemelijk dat ook op grotere diepte in het Griftpark verontreiniging met teeraromaten aanwezig is.

Conclusies veldonderzoek MIP sonderingen:

- Verontreiniging is op alle MIP locaties gedetecteerd en varieert van lage opgeloste concentraties teeraromaten tot vermoedelijk puur product.
- De bodem in het Griftpark is op meerdere plaatsen tot ten minste 29 m-mv zwaar verontreinigd met teer-relateerde aromatische koolwaterstoffen.
- De bodem van het Griftpark is heterogeen en gelaagd, met afwisselend meer en minder doorlaatbare grove en fijne zandlagen.
- Ook in de zandlagen zijn dunne kleilaagjes aanwezig.



Figuur 9. Voorbeeld van een MIP-sondering bij locatie M3 met aromatische koolwaterstoffen gedetecteerd tot de einddiepte van 29 m-mv ³⁵

2.2 Sonische boringen

Sonische boringen zijn geplaatst voor het beoordelen van de bodemopbouw, het nemen van grondmonsters en het plaatsen van MLS filterbuizen (Figuur 1). Een roto sonische boring is een boorteknik die gebruik maakt van hoogfrequente trillingen en draibewegingen. Het is een methode waarmee met minimale verstoring, efficiënt en snel door verschillende bodemlagen kan worden geboord. Door te werken met de “core barrel” techniek, waarbij een mantelbuis om een kernboor (de core barrel) met boorbit wordt geschoven, konden relatief ongestoorde bodemmonsters naar het maaiveld worden gebracht en gebruikt voor het maken van nauwkeurige boorbeschrijvingen en het nemen van (anaerobe) grondmonsters voor analyses en experimenteel onderzoek ³⁶.

Tijdens het BestParc project zijn door Sialtech zeven sonische boringen gedaan in het gebied binnen de schermwanden, en ten westen van het Griftpark (Figuur 8, Figuur 11). Sonische boring S^A, S^B, S^{B2}, S¹⁰¹, S¹⁰² en S¹⁰³ zijn gedaan tot in het 2^e watervoerend pakket, tot een maximaal bereikte diepte van 107,5 m-mv, bij S¹⁰³. Bij boring S^C, nabij de uitkijkheuvel, is vanwege de aanwezigheid van pure fase teer gestopt op de kleilaag, op een diepte van 50,5 m-mv. Tijdens de boringen zijn bodemmonsters verzameld in potten en liners (steekbussen), die in het laboratorium gekoeld zijn bewaard voor gebruik tijdens onderzoek naar de

natuurlijke en gestimuleerde afbraak van teeraromaten (deelonderzoeken Deltares en WUR). Daarnaast zijn aan de bodemonsters chemische en korrelgrootte analyses gedaan die gebruikt zijn voor het reactief transportmodel (deelonderzoek UU). De tijdens het boren gemaakte beschrijvingen van de bodemopbouw, de aanwezigheid van grove en fijne zandlagen, klei, en verontreiniging, zijn op dezelfde dag gebruikt om de filters van de MLS buizen af te stellen, m.n. op de vastgestelde grensvlakken. De per boorgat nauwkeurig ontworpen MLS konden hierdoor de volgende dag al geplaatst worden, wat essentieel was voor het minimaal verstoren van de anaerobe micro-organismen in de bodem, en het in kaart brengen van natuurlijke afbraak langs verticale verontreinigingsprofielen (Figuur 11, Figuur 10). De MLS filters die voor het onderzoek zijn gebruikt, zijn HDPE buizen met zeven kanalen, waarin op elke gewenste diepte filters voor grondwaterbemonstering kunnen worden aangebracht ³⁷. Om tijdens grondwaterbemonstering cross-contaminatie te voorkomen, zijn de filters hydraulisch van elkaar gescheiden door een plastic kraag en bentoniet (Figuur 10). Voor dit onderzoek zijn per locatie twee of drie MLS buizen in boorgaten binnen ca. een meter naast elkaar geplaatst. Door hier ook reguliere 32 mm peilbuizen te plaatsen kan op een MLS locatie op maximaal 25 dieptes grondwater worden bemonsterd. Hierdoor kunnen met hoge resolutie verticale profielen van verontreiniging, geochemische parameters en microbiële populaties worden gemaakt.



Figuur 10. Multilevel samplers klaar voor installatie in het Griftpark



Figuur 11. Sonische boring in het Griftpark (linksboven) voor het bepalen van de bodemopbouw (rechts boven), het bemonsteren van grond, en het ontwerpen (linksonder) en plaatsen (rechtsonder) van multi level samplers

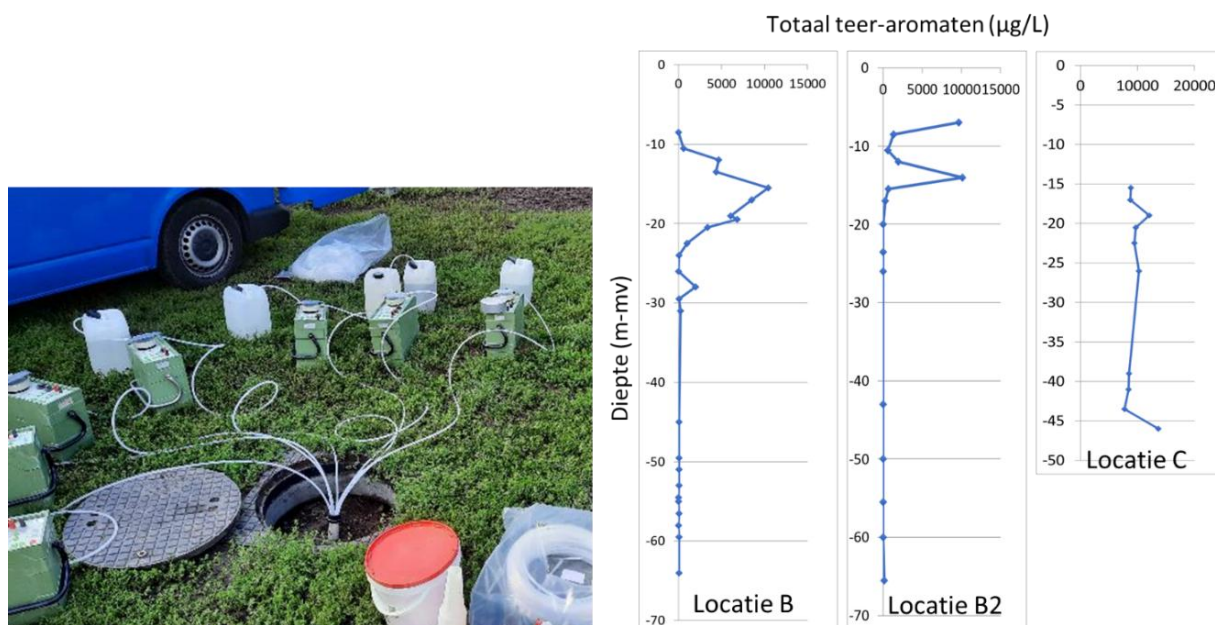
Conclusies sonische boringen^{11,12}:

- De “Core Barrel” techniek is geschikt voor het verkrijgen van ongestoorde bodemmonsters.
- De scherpe verontreinigingsprofielen tonen aan dat versmering niet optreedt, en dat wordt voorkomen dat tijdens het boren de verontreiniging deels naar andere bodemlagen verplaatst wordt.
- Visuele waarnemingen van teerverontreiniging tijdens sonische boringen S^B , S^{B2} en S^C , bevestigen de MIP resultaten die duiden op aanwezigheid van pure fase teer.
- Bij boring S^C , bij de heuvel in het park, is puur product 50 m-mv op de kleilaag in het 1^e watervoerend pakket aangetroffen.
- Bij boringen S^A , S^{101} , S^{102} en S^{103} , ten westen van de bentonietwand, is tijdens de sonische boringen zintuigelijk geen verontreiniging waargenomen in het 1^e en 2^e watervoerend pakket.
- Bij de boringen zijn ongestoorde anaerobe bodemmonsters beschikbaar gekomen waarvan een selectie is gemaakt voor laboratoriumonderzoek.

- De boorbeschrijvingen en korrelgrootteanalyses bevestigen dat de bodemopbouw in het 1^e watervoerend pakket heterogeen is, met grove en fijne zandlagen en diverse dunne en dikkere kleilagen.
- Bij alle sonische boringen, is klei van de formaties van Kedichem aangetroffen: S^A 52,0-55,5 m-mv; S^B 46,6 en 60,5-61,5 m-mv; S^{B2} 44,5-47,0; S^C 50 m-mv; S¹⁰¹ 49,5-51,5 en 66,5 m-mv; S¹⁰² 36,5-41,5 m-mv en nog zeven dunnere kleilagen tot 67,5 m-mv; S¹⁰³ 52,0-55,5 en 61,5-61,7 en 71,0-71,1 m-mv.
- In het centrale gebied van het Griftpark (bij het veronderstelde gat) zijn kleilagen aangetoond die dunner zijn dan in het noorden en ten westen van het Griftpark.

2.3 Verticale verontreinigingsprofielen

Eén tot enkele dagen na plaatsing zijn de MLS en reguliere peilbuizen afgepompt, en na een rustfase van ten minste een maand zijn ze bemonsterd voor de analyse van verontreiniging, redox-parameters en micro-organismen (DNA). Van een MLS buis zijn tijdens bemonstering alle zeven filters tegelijkertijd afgepompt om onderlinge beïnvloeding te voorkomen (Figuur 12). Bij de drie MLS in het buitengebied ten westen van het Griftpark (MLS M¹⁰¹, M¹⁰² en M¹⁰³) is geen significante verontreiniging in het 1^e en 2^e watervoerend pakket gevonden. Bij de MLS locaties in het binnengebied (MLS M^B, M^{B2} en M^C) duiden met GC-MS bepaalde totaal teer-aromatenconcentraties >10.000 µg/L op (de nabijheid van) pure fase teer (Figuur 12). Bij MLS locaties M^B en M^{B2}, ten oosten van de vijver, ter hoogte van het mogelijke gat in de kleilagen, is er een piek in verontreinigingsconcentratie op 15-16 m-mv. Dieper dan ca. 30 m-mv is hier geen significante verontreiniging gevonden. Bij MLS M^C zijn over de gehele bemonsterde diepte van 15,5 tot 46 m-mv teer-aromatenconcentraties gevonden die duiden op pure fase teer tot op de waterscheidende kleilaag. De met MLS gemeten aromatenconcentraties zijn meer dan 30 keer lager dan die gerapporteerd zijn voor de MIP sonderingen op deze locaties³⁵. Bovendien zijn de concentratiegradiënten scherper en minder uitgesmeerd in de diepte. Dit bevestigt dat de MIP sonderingen een overdreven beeld van de verontreinigingssituatie geven.



Figuur 12. Bemonsteren van MLS filters voor het met hoge resolutie bepalen van verticale profielen van verontreiniging en afbraakparameters

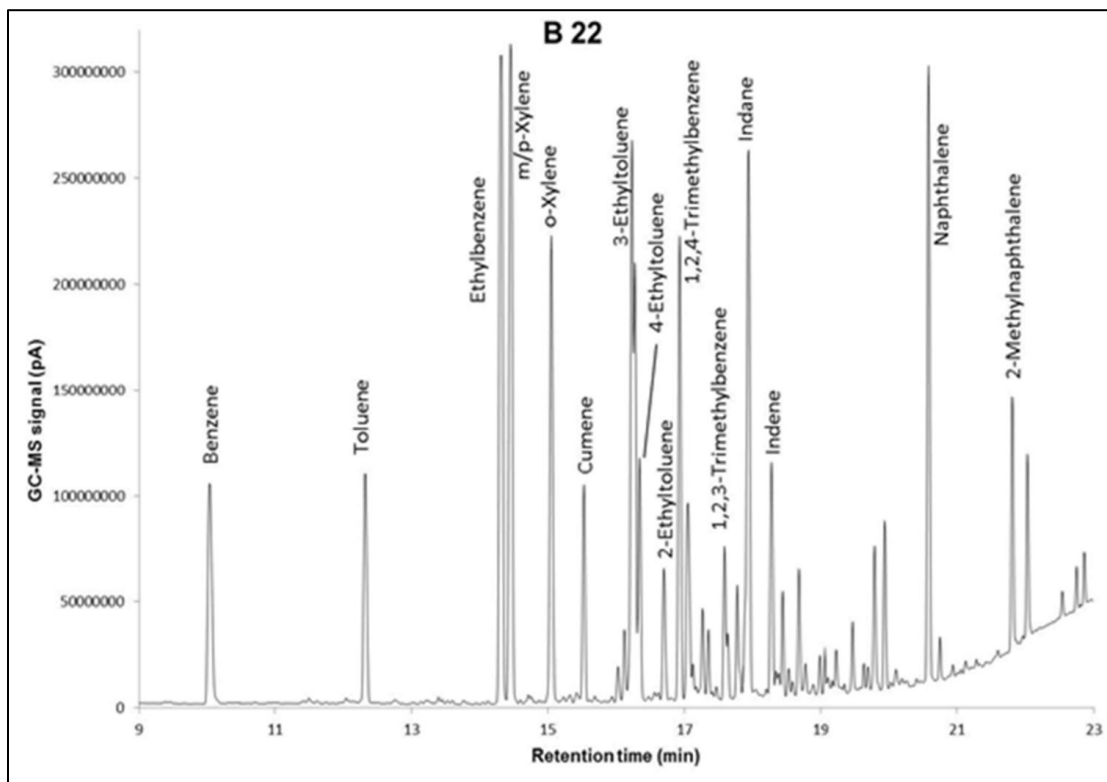
Conclusies veldonderzoek MLS:

- Met MLS kunnen verticaal met hoge resolutie concentraties van teeraromaten worden vastgesteld.

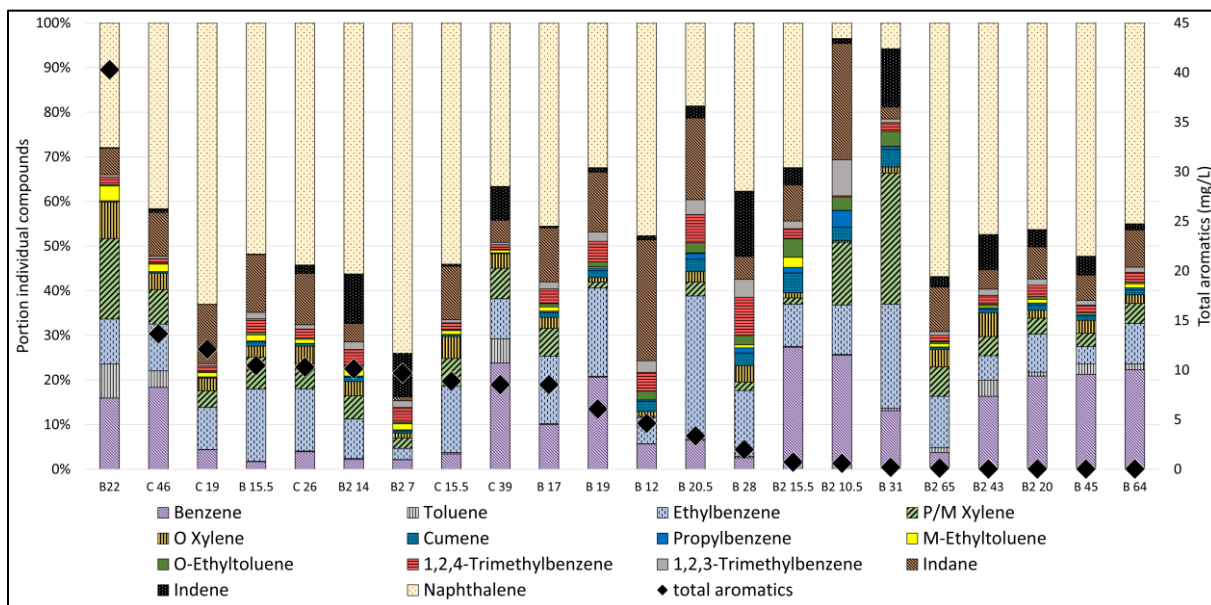
- Bij MLS-locatie M^B en M^{B2} zijn teeraromaten tot ongeveer 30 meter diepte aanwezig, met een piek rond 15 m-mv.
- Bij MLS-locatie M^C zijn teeraromaten over de gehele diepte van de bemonsterde filters aanwezig, tot de kleilaag, 46 m-mv. De hoge concentraties wijzen op de aanwezigheid van pure fase teer.
- De MLS analyses bevestigen dat MIP sonderingen de concentraties te hoog inschatten.
- MLS geven in detail inzicht in veranderende redox-omstandigheden en bieden een goede ondersteuning voor het onderzoek aan natuurlijke afbraak.

2.4 Identificeren van risico-bepalende stoffen

Om vast te stellen welke stoffen vanuit de teer oplossen in het grondwater en hierin mobiel zijn, is de samenstelling van de verontreinigingen onderzocht uit een peilbuis (44-45 m-mv) naast onttrekkingsbron B22 aan de noordzijde van de uitkijkeuvel ^{12,31,32}. Van deze bron is bekend dat er hoge concentraties aanwezig zijn. De observatie van teerbolletjes bevestigt dat het geanalyseerde B22 grondwater verzadigd was met teerverontreiniging. Met GC-MS analyse zijn 30 verschillende monocyclische aromatische koolwaterstoffen (MAK) en 25 twee- en drie-ring polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) in het B22 grondwater geïdentificeerd (Figuur 13). Daarnaast werden 12 heterocyclische aromaten, 8 fenolen en cresolen, en 4 alifatische koolwaterstoffen gedetecteerd. Deze GC-MS analyse laat zien dat een complex mengsel van verschillende stoffen uit de teer in het grondwater oplost. Verwacht werd dat de samenstelling van de verontreinigingen in B22 een goed beeld geeft van de samenstelling van de opgeloste componenten in dit gebied van het Griftpark. Dit wordt bevestigd door de analyses van aromatenconcentraties in filters van MLS M^C (Figuur 14) ¹¹. In filters van MLS M^B en M^{B2} zijn de verhoudingen tussen individuele aromaten anders, mogelijk door verschillende bronsamenstelling, sorptie en/of afbraak. Een belangrijke waarneming is echter dat ca. 90% van de met GC-MS gedetecteerde stoffen bestaat uit benzeen, toluen, ethylbenzeen, xylenen (BTEX), indeen, indaan en naftaleen. Het natuurlijke afbraakonderzoek heeft zich daarom vooral op deze stoffen gericht.



Figuur 13. GC-MS analyse van grondwater in peilbuis B22 met aangegeven de in hoge concentratie gedetecteerde aromatische koolwaterstoffen



Figuur 14. Fracties teearomaten (staafdiagrammen, linker y-as) in grondwater van peilbuis B22 en MLS filters bij afnemende totaal aromatenconcentraties (ruiten, rechter y-as) ¹¹

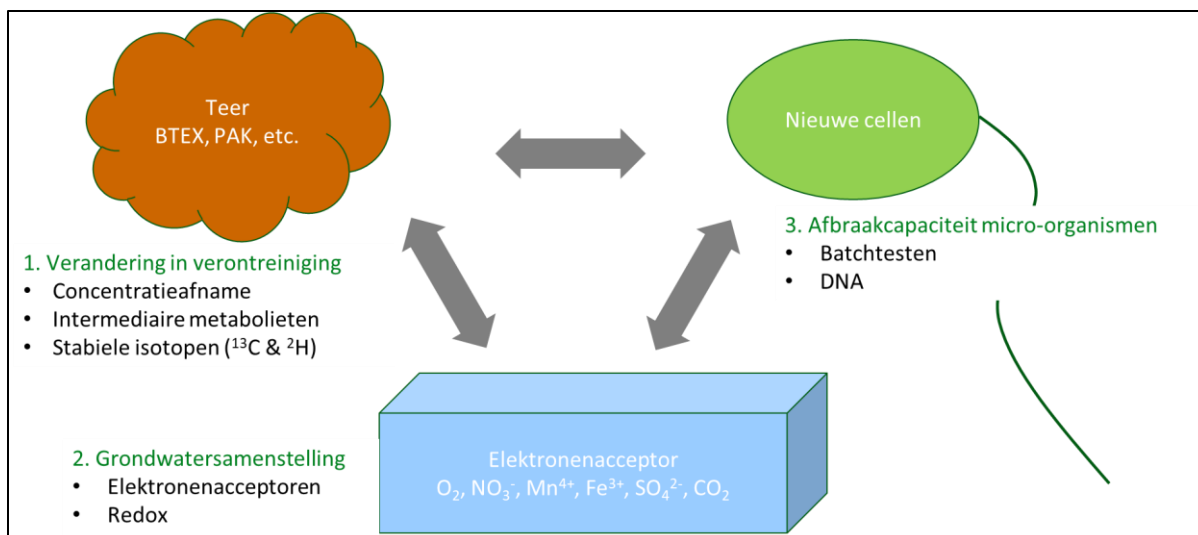
Conclusies identificatie van stoffen:

- Grondwater uit peilbuis B22 is verzadigd met teer en bevat een complex mengsel van stoffen (MAK's, PAK's, heterocyclische aromaten, fenolen en alifaten).
- De samenstelling van B22 verontreiniging is representatief voor de opgeloste teercomponenten in dit deel van het Griftpark.
- Ongeveer 90% van de opgeloste stoffen bestaat uit BTEX, indeen, indaan en naftaleen.
- Het afbraakonderzoek richt zich daarom op deze dominante verbindingen.

2.5 Natuurlijke afbraak van teearomaten

Om aan te tonen dat natuurlijke afbraak (NA) optreedt in de zuurstofloze bodem van het Griftpark, zijn door Deltares bewijslijnen hiervoor onderzocht in verschillende laboratorium- en veldonderzoeken. De bewijslijnen richten zich op het aantonen van (Figuur 15):

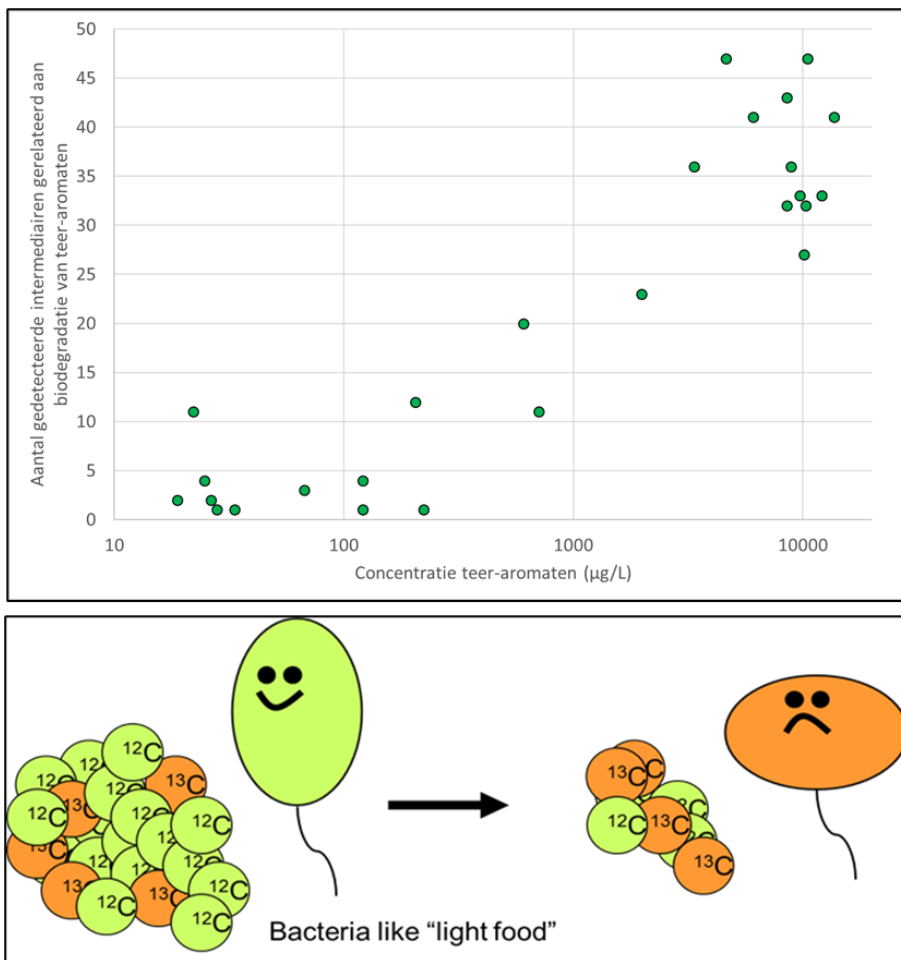
1. Veranderingen in de verontreinigende stoffen en afbraakproducten.
2. Veranderingen in de samenstelling van het grondwater (redox-omstandigheden).
3. De aanwezigheid van micro-organismen met afbraakcapaciteit, aangetoond met batchexperimenten en DNA-analyses.



Figuur 15. Bewijslijnen voor natuurlijke afbraak met in dit onderzoek toegepaste analyses die zich richten op de 1. verontreiniging, 2. grondwatersamenstelling, en 3. aanwezigheid van micro-organismen met afbraakcapaciteit

Bewijslijn 1. Verandering in verontreiniging

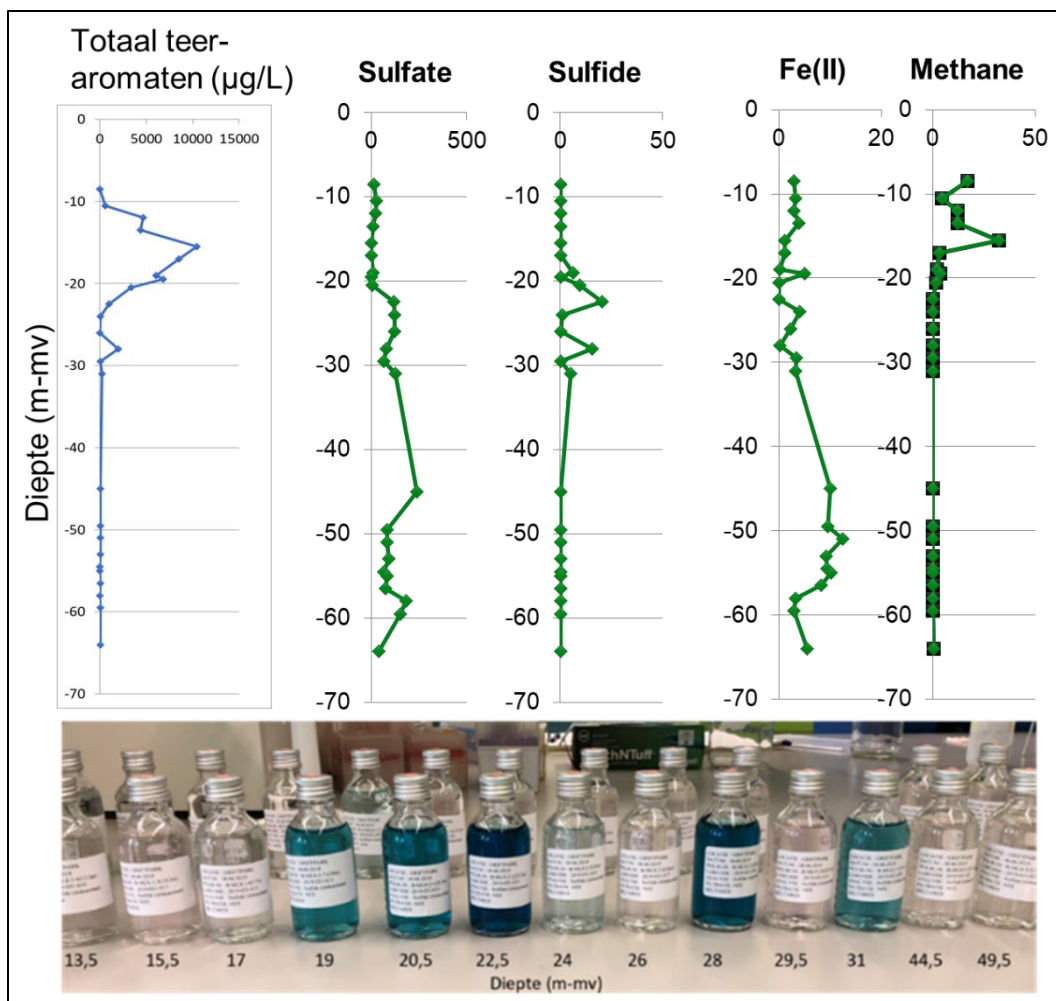
Natuurlijke afbraak leidt tot afname van de concentraties van verontreinigende stoffen in de tijd en langs grondwaterstroombanen. In het Griftpark zijn veel verontreinigingsbronnen en meerdere grondwateronttrekkingsfilters aanwezig. Door de complexiteit van de verontreinigingssituatie en onttrekkingen was het niet mogelijk om aan de hand van concentratieafname natuurlijke afbraaksnelheden te bepalen. Dicht bij de bronzones met pure fase teer waren de opgeloste concentraties aromaten wel aanzienlijk lager dan maximale verzadiging. Dit suggereert dat afbraak van teerverontreiniging in het Griftpark optreedt (Figuur 14)¹¹. Tijdens anaerobe afbraak worden teeraromaten via een cascade van enzymreacties uiteindelijk omgezet in eenvoudige componenten zoals CO_2 , CH_4 en H_2O . Tijdens dit proces worden stof-specifieke tussenproducten (intermediaire metabolieten) gevormd, die in lage concentraties in het grondwater aantoonbaar zijn. Dat actieve anaerobe afbraak van teeraromaten in de bodem van het Griftpark optreedt, is bewezen aan de hand van de vorming van karakteristieke intermediaire metabolieten (LC-qTOF-MS, in samenwerking met de Universiteit van Amsterdam). In grondwatermonsters van het Griftpark zijn 76 verschillende intermediaire metabolieten gevonden die ontstaan tijdens de anaerobe afbraak van BTEXN, styreen, indeen, indaan, en PAK (Figuur 16)^{12,33}. Hoge concentraties verontreiniging correspondeerden met meer metabolieten. Een methode waarmee het afbraakpercentage van specifieke stoffen kan worden bepaald is de analyse van de fractionering van stabiele isotopen van waterstof ($\delta^2\text{H}$) en koolstof ($\delta^{13}\text{C}$) (GC-IRMS analyse in samenwerking met Hydroisotop). Tijdens afbraak is er een toename van de verhouding van zwaardere stabiele isotopen van waterstof ($^2\text{H}:^1\text{H}$) en koolstof ($^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$) in de resterende verontreiniging. Deze verhouding kan gebruikt worden als een maat voor afbraak van een stof. De stabiele isotopenanalyses van teeraromaten laten zien dat in het Griftpark een aanzienlijke hoeveelheid van de verontreiniging die ooit in oplossing is gegaan (m.n. BTEX, indeen, indaan) door micro-organismen is afgebroken. Afhankelijk van de verontreinigende stof en locatie is er naar schatting 9% tot 97% afbraak¹².



Figuur 16. Bewijs van anaerobe afbraak door het aantonen van intermediaire metabolieten en verandering in de verhouding van stabiele isotopen van koolstof en waterstof in teeraromaten

Bewijslijn 2. Verandering in grondwater

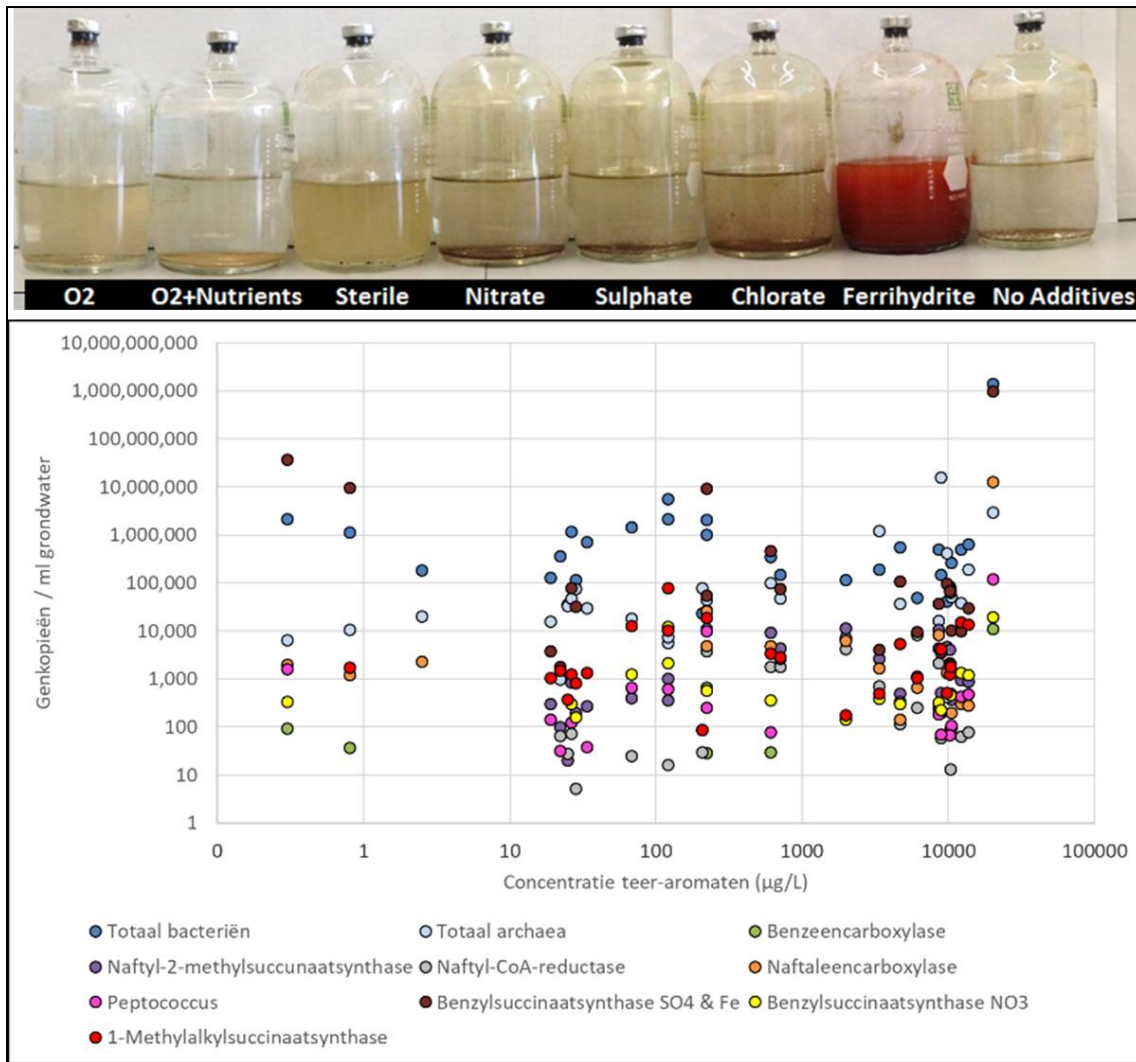
Voor de biodegradatie van teeraromaten kunnen micro-organismen verschillende elektronenacceptoren gebruiken, zoals zuurstof, nitraat, driewaardig ijzer, vierwaardig mangaan, sulfaat en koolstofdioxide (CO_2). In het Griftpark zijn vooral sulfaat en ijzer beschikbaar en gebruikt als elektronenacceptor voor natuurlijke afbraak. Bij afbraak van verontreiniging wordt sulfaat omgezet tot sulfide en driewaardig ijzer -Fe(III)- tot tweewaardig ijzer -Fe(II)- dat in het grondwater te meten is (Figuur 17) ¹². Opvallend is dat bij de bronzones van verontreiniging op diverse locaties in het Griftpark veel methaan in het grondwater gemeten wordt. Vermoedelijk raakt hier sulfaat en Fe(III) uitgeput en vindt methanogenese plaats met CO_2 als elektronenacceptor.



Figuur 17. Grondwatersamenstelling MLS locatie B, met methaanvorming in de bron van verontreiniging (15 m-mv) en sulfaat en ijzer-reductie in de filters daaronder. De blauwe flesjes zijn de sulfidemeting in het grondwater van verschillende dieptes.

Bewijslijn 3. Micro-organismen met afbraakcapaciteit

De derde bewijslijn voor NA richt zich op de aantonen van micro-organismen die in staat zijn om de verontreinigende stoffen af te breken. In dit onderzoek zijn hiervoor twee methoden gebruikt, DNA analyses en afbraaktesten in batchflessen (Figuur 18. Aantonen van micro-organismen met afbraakcapaciteit, in batchexperimenten met grondwater uit bronpomp B22 en verschillende elektronenacceptoren (boven) en DNA-concentraties van bacteriën en enzymen die teerverontreiniging kunnen afbreken (onder).). In batches met grondwater en grond uit het Griftpark is de afbraak van de belangrijkste teeraromaten gedurende drie jaar gevolgd in de aanwezigheid van verschillende elektronenacceptoren. De beste afbraak trad op in de batches met zuurstof, waarin alle aromaten binnen enkele weken volledig waren verdwenen. In de batches met sulfaat werd afbraak van BTEXN en indeen vastgesteld. In de batches met nitraat of Fe(III) brak alleen ethylbenzeen af, terwijl geen aromatenafbraak werd vastgesteld in batches waaraan geen elektronenacceptor was toegevoegd. Met de analysemethode qPCR is in grondwatermonsters uit het Griftpark gericht gekeken naar de aanwezigheid van DNA dat kenmerkend is voor specifieke micro-organismen en enzymen waarvan bekend is dat ze een rol spelen bij anaerobe aromatenafbraak. De DNA-analyses bevestigen de aanwezigheid van afbraakcapaciteit voor BTEXN (Figuur 18).



Figuur 18. Aantonen van micro-organismen met afbraakcapaciteit, in batchexperimenten met grondwater uit bronpomp B22 en verschillende elektronenacceptoren (boven) en DNA-concentraties van bacteriën en enzymen die teerverontreiniging kunnen afbreken (onder).

De verschillende bewijslijnen bevestigen het optreden van natuurlijke afbraak in het 1^e watervoerend pakket van het Griftpark. De bewijslijnanalyses vullen elkaar aan en wijzen op actieve anaerobe afbraak van alle kwantitatief belangrijke teeraromaten (Tabel 2)¹². Uit het isotopenonderzoek blijkt dat een significant deel van de teerverontreiniging die ooit vanuit de pure fase in grondwater is opgelost al is afgebroken. Het is nog niet mogelijk om op basis van het huidige onderzoek een nauwkeurige schatting te doen van *in situ* afbraaksnelheden. Aanvullend NA onderzoek in het veld, bij voorkeur in combinatie met reactief transportmodellering, is nodig om afbraaksnelheden in het Griftpark beter in beeld te brengen.

Tabel 2. Overzicht van anaerobe afbraak van teeraromaten in het Griftpark. Afbraak van BTEX is met alle bewijslijnen vastgesteld (rode kader) en uit de metabolietenanalyse blijkt dat ook biodegradatie optreedt van andere mono- en polycyclische aromaten worden (blauwe kader).

Stof	Batches	DNA	Metabolieten	Isotopen
Benzeen	+	+	+	+
Tolueen	+	+	+	+
Ethylbenzeen	+	+	+	+
Xylenen	+	+	+	+
Styreen	?	?	+	?
Indaan	-	?	+	+
Indeen	+	?	+	+
Naftaleen	+	+	+	-
≥3-ring PAKs	?	?	+	?

Conclusies natuurlijke afbraak teeraromaten:

- In het Griftpark treedt actieve anaerobe natuurlijke afbraak van teeraromaten op.
- Dit is aangetoond met drie samenhangende bewijslijnen:
 - Afbraakproducten + isotopenfractionering: 76 afbraakmetabolieten gevonden; 9–97% afbraak aangetoond van o.a. BTEX, indeen en indaan.
 - Redoxveranderingen: sulfaat- en Fe(III)-reductie, en methaanvorming bij uitputting van elektronenacceptoren.
 - Afbraakcapaciteit micro-organismen: batchproeven en qPCR tonen aanwezigheid van micro-organismen die aromaten afbreken.
- Alle kwantitatief belangrijke teeraromaten worden anaeroob afgebroken.
- Exacte in-situ afbraaksnelheden zijn nog niet bepaald; aanvullend veldonderzoek + modellering is hiervoor nodig.

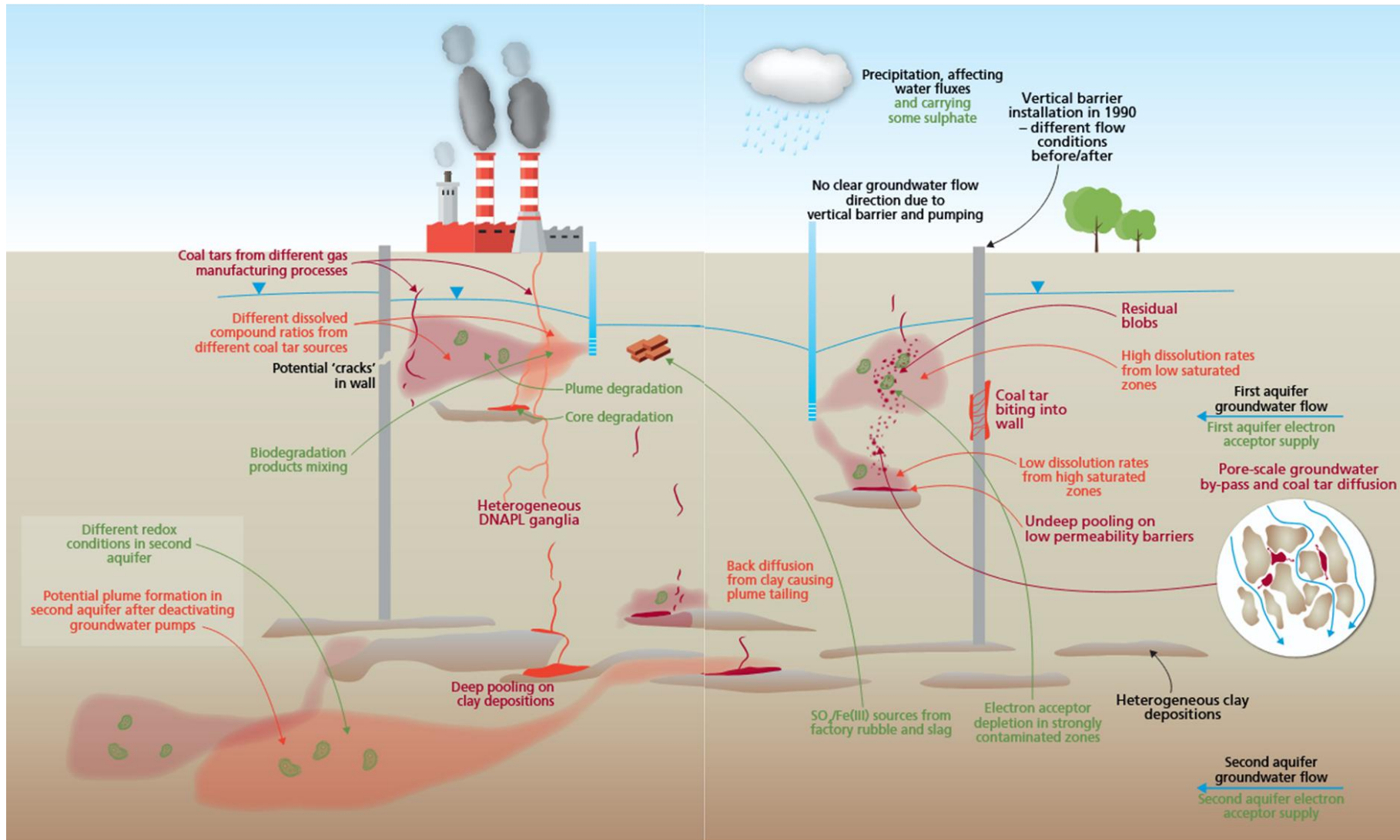
3. Veldonderzoek en reactief transport modellering van biologisch afbreekbare aromatische koolwaterstoffen (Deelonderzoek Universiteit Utrecht)

Voor het opstellen van een betrouwbaar computermodel waarmee het transport en de microbiologische afbraak van in het grondwater opgeloste teercomponenten kan worden gesimuleerd en voorspeld, is veel informatie over de geologie en hydrologie van het Griftpark nodig. Het stapsgewijs verzamelen van deze informatie in het veld, en het construeren van drie dimensionale computermodellen van de grondwater flow en het reactief transport van verontreinigende stoffen, is in detail beschreven in het proefschrift van Suzanne Faber ¹¹.

De verontreinigingssituatie en geohydrologische setting in het geïsoleerde gebied in het Griftpark zijn zeer heterogeen en complex en voor de start van het BestParc project nog maar beperkt in kaart gebracht. Door de onduidelijke en heterogene verdeling van bronzones, en de afwezigheid van een eenduidige grondwaterstromingsrichting en -flux, is het niet mogelijk om het volledige binnengebied met alle verontreinigingsbronnen, transport en afbraakprocessen te modelleren, en is een klassieke bron → pluim benadering, met redox-zonering door sequentieel elektronenacceptorgebruik, niet aan de orde.

Om inzicht te krijgen in de meest belangrijke parameters voor de modellering, is daarom in het eerste hoofdstuk van het proefschrift van Faber een uitgebreid overzicht gemaakt van verschillende processen die kunnen bijdragen aan de verspreiding, concentratie en nalevering van verontreiniging in het Griftpark (Figuur 19) ¹¹. Voor een betrouwbare beoordeling van de milieurisico's en bijbehorende onzekerheden van de teerverontreiniging is een zo nauwkeurig mogelijk driedimensionaal inzicht nodig in ¹¹:

- De locaties en omvang van bronzones met teer (m.n. pure fase residuair en mobiel).
- De fysische eigenschappen van de bodem (lithostratigrafie, korrelgrootte, porositeit en hydraulische geleidbaarheid, kleilagen, etc.).
- De integriteit c.q. doorlatendheid van de cement-bentoniet schermwand.
- De ligging en dikte van elkaar al dan niet overlappende kleilagen, en hierdoor bepaalde hydraulische connectiviteit tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket.
- Het optreden, en de snelheid van anaerobe afbraakprocessen, inclusief de effecten van mengsels.
- De in de bodem en het grondwater beschikbare elektronenacceptoren voor anaerobe afbraak.



Figuur 19. Uitgebreid overzicht van processen die kunnen bijdragen aan de verspreiding, concentratie en nalevering van verontreiniging in het Griftpark

3.1 Hydraulisch onderzoek en pomptesten

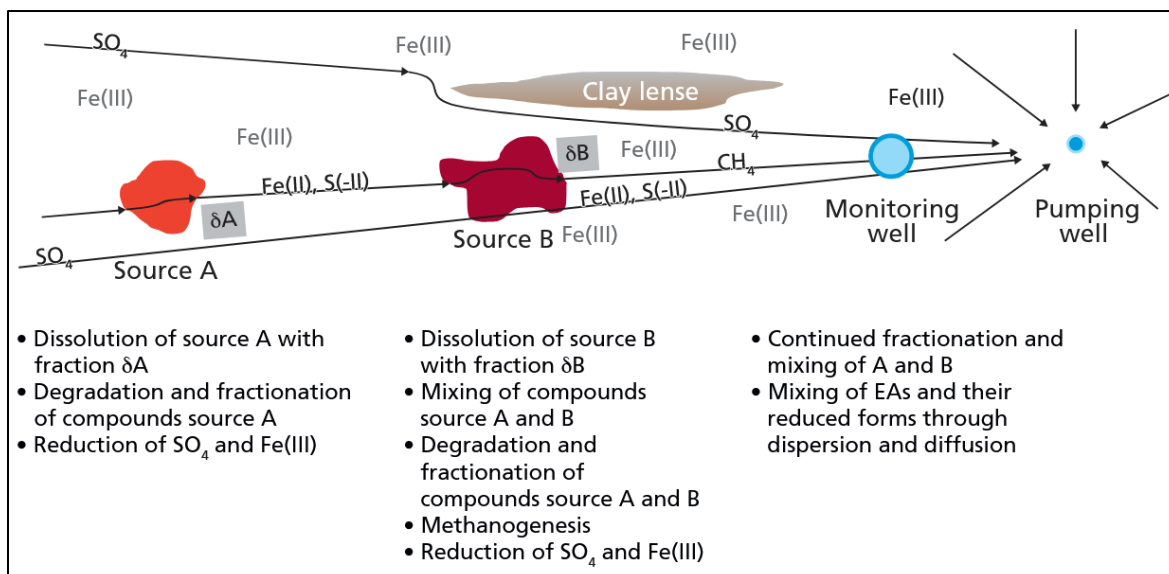
In aanvulling op de MIP-sonderingen en sonische boringen zijn in het Griftpark hydraulische analyses en pomptesten gedaan om velddata te verzamelen van de grondwaterstroming, en het effect van het aanzetten en stoppen van grondwateronttrekkingsbronnen daarop ¹¹. De resultaten hiervan geven inzicht in de doorlatendheid van de schermwand en de kleilagen, en zijn beschreven in hoofdstuk 2 van de thesis van Faber. De stijghoogte van het grondwater in peilbuis DV1, in het 2^e watervoerend pakket aan de noordwestzijde buiten het Griftpark, was gemiddeld 9 cm lager dan die in peilbuis LT4, in het 1^e watervoerend pakket. Beide peilbuizen vertoonden in de periode van 2006 tot 2021 dezelfde wisselingen in de seizoenen (lager in de zomer en hoger in de winter). Dit toonde aan dat er in ieder geval regionaal een hydraulische connectie is tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket, maar nog niet in welke mate dit direct onder het Griftpark het geval is. Om dit beter uit te zoeken is er een serie pomptesten gedaan waarin bronpompen binnen en buiten de schermwanden afwisselend zijn gestart en gestopt. Door het effect hiervan te meten op de grondwaterniveaus in peilbuizen binnen en buiten de schermwanden, en boven en onder de kleilagen, kon worden bevestigd dat er een hydraulische connectie is tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket in de bodem van het Griftpark. Deze connectie is echter niet sterk genoeg om te concluderen dat in het midden van het Griftpark sprake is van een groot gat voor transport van grondwater of directe verticale verplaatsing van DNAPL naar het 2^e watervoerend pakket. Deze bevindingen zijn in overeenstemming met de dunne kleilagen, die hier zijn gevonden tijdens de sonische boringen, en met de afwezigheid van significante verontreiniging in het 2^e watervoerend pakket. Het veldonderzoek bevestigt dat de huidige isolatie van de verontreiniging, in combinatie met grondwateronttrekking succesvol zijn.

Conclusies hydrologisch onderzoek:

- Veldmetingen en pomptesten bevestigen een regionale hydraulische verbinding tussen het 1e en 2e watervoerend pakket.
- De schermwand en kleilagen vertonen een beperkte doorlatendheid.
- Er zijn geen aanwijzingen voor een groot hydraulisch lek of “gat” tussen de kleilagen onder het geïsoleerde gebied.

3.2 Aanvullende karakterisering natuurlijke afbraak

In hoofdstuk 3 van het proefschrift van Faber wordt het Deltares-onderzoek naar natuurlijke afbraak uitgebreid door integratie met de complexe geohydrologische situatie en teerverontreiniging in het Griftpark. Dit aanvullende onderzoek bevestigt dat in het Griftpark anaerobe afbraak optreedt van BTEXN, trimethylbenzeen, styreen, indaan, indeen, methylnaftaleen, acylnaftaleen, antraceen, fluoranteen, fenantreen en pyreen. Driewaardig ijzer en sulfaat zijn hierbij de belangrijkste elektronenacceptoren, en mangaan-reductie en methanogenese treden ook op. DNA-analyses bevestigen de aanwezigheid van sulfaat en ijzer-reducerende bacteriën en methanogene archaea. De aanwezigheid van meerdere en onbekende bronzones met teer, en het ontbreken een duidelijke stromingsrichting van het grondwater, maken het echter erg lastig om afbraaksnelheden in het veld vast te stellen door analyse van massabalansen van verontreinigingspluimen (Figuur 20). Om aan te tonen of natuurlijke afbraak een duurzame optie is voor het beheersen van de verontreiniging in het Griftpark, moet dit onderzoek daarom worden aangevuld met een geohydrologisch model van het reactief transport van opgeloste mobiele teercomponenten.



Figuur 20. Visualisatie van het mengen van grondwater op locaties met meerdere pure fase teer zones en elektronenacceptoren (EAs). De lijnen met pijlen representeren de grondwaterstroming.

Hoofdstuk 4 van het proefschrift van Faber gaat over de aerobe afbraak van mengsels van BTEXN, indeen en indaan. Dit onderzoek is samen met WUR uitgevoerd en elders in detail gepubliceerd ^{13,38}. De resultaten hiervan worden samengevat en besproken in hoofdstuk 4 van dit BestParc Fase 1 rapport, dat gaat over het deelonderzoek van WUR.

Conclusies aanvullende karakterisering NA:

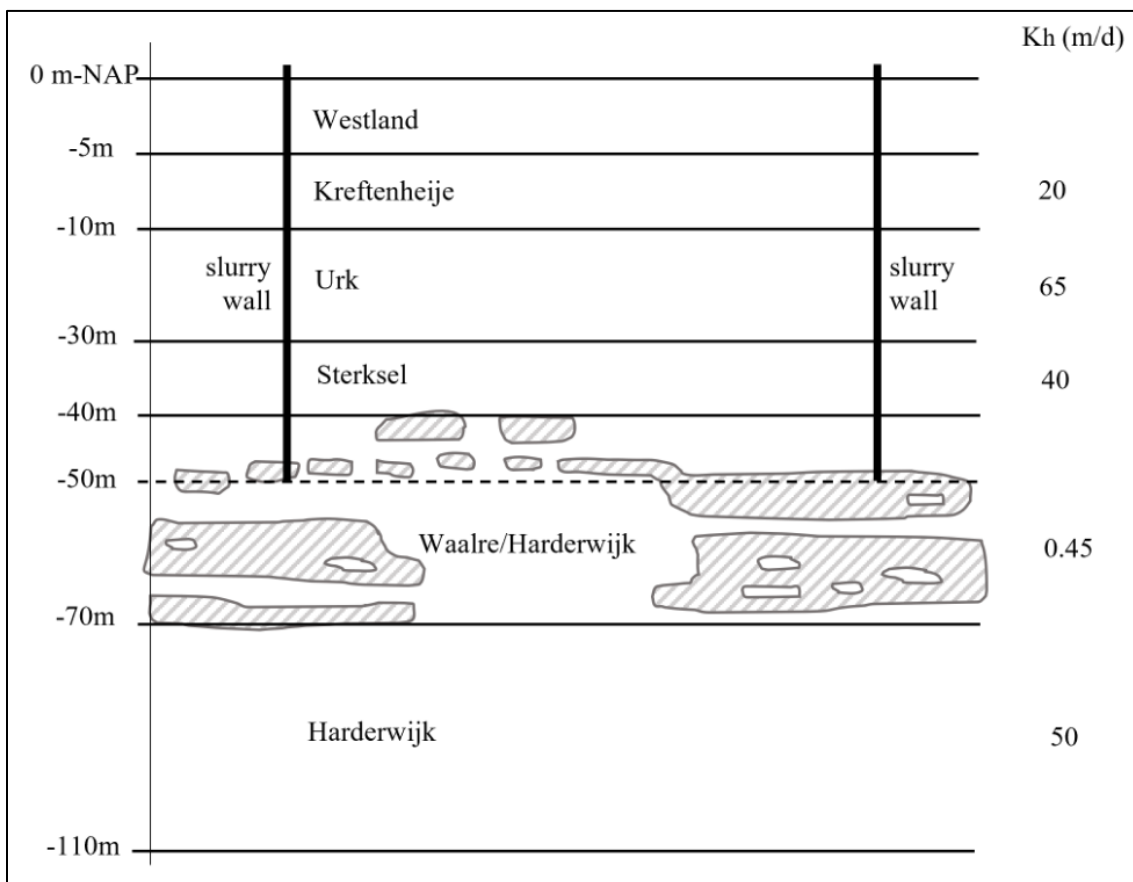
- Anaerobe afbraak van meerdere teeraromaten (BTEXN, MAK, PAK) is bevestigd.
- Sulfaat- en Fe(III) -reductie zijn dominante afbraakprocessen; mangaanreductie en methanogenese komen ook voor.
- DNA-analyse toont aanwezigheid van relevante aromaten afbrekende microbiële populaties.
- Door meerdere bronzones en variabele stromingsrichtingen is het bepalen van *in situ* afbraaksnelheden via stroombaananalyse niet gerealiseerd.

3.3 Geohydrologisch grondwater flow model van het Griftpark

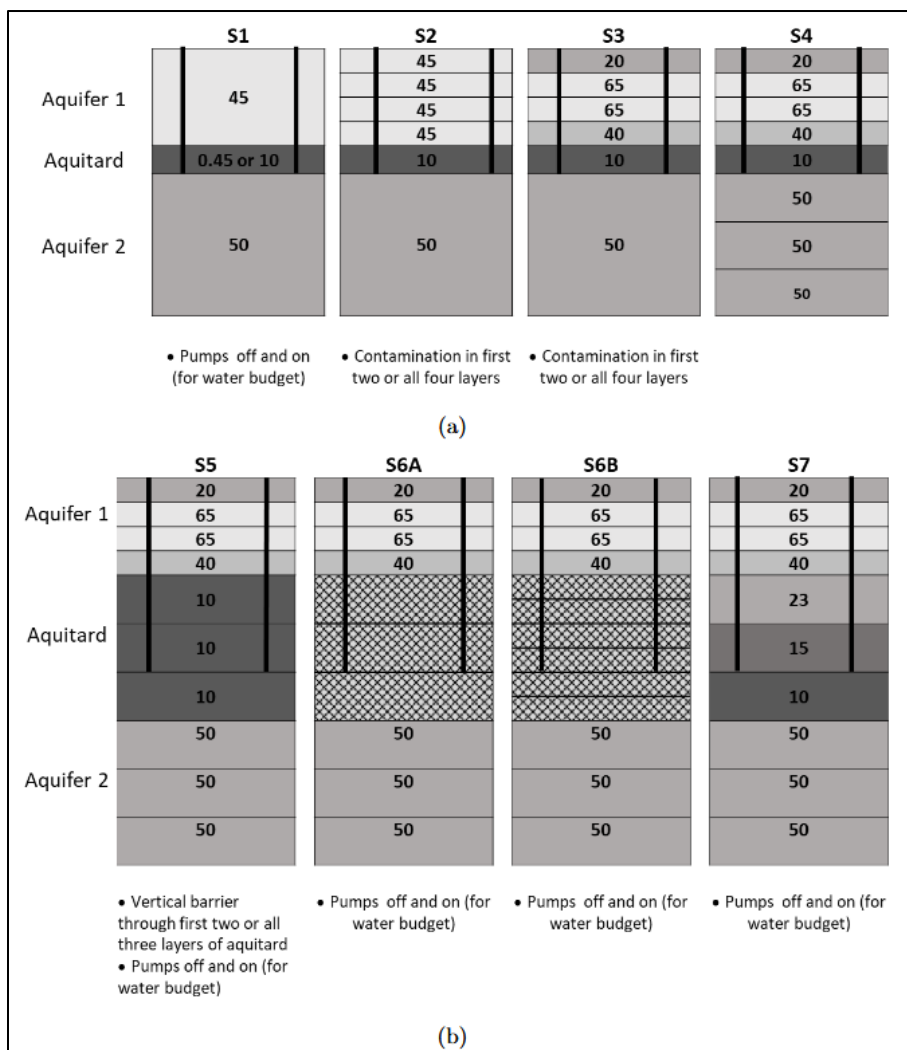
Op basis van de veldonderzoeken en boringen is in hoofdstuk 5 van het proefschrift van Faber een fysisch ondergrondmodel van het Griftpark opgesteld. Voor de constructie van het model zijn de boorbeschrijvingen, hieruit afgeleide porositeit en korrelgrootteanalyses gebruikt om de verticale opbouw van de geologische afzettingen met geschatte horizontale doorlatendheid (K_h) in meer detail te duiden (Figuur 21). De “3D Empirische Bayesiaanse Kriging” interpolatiemethode is toegepast om met de beschikbare data een driedimensionale beschrijving te maken van de ligging van de kleilagen in de aquitard (scheidende laag) tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket. De doorlatendheid van 0,45 m/d van de formatie van Waalre (Kedichem) is een gemiddelde schatting en zal lokaal hoger zijn, daar waar kleilagen ontbreken en preferente grondwaterstroming optreedt. De regionale grondwaterstroming is ca. 12 m/j, van het zuidoosten naar het noordwesten in het 1^e watervoerend pakket, en van het oosten naar het westen in het 2^e watervoerend pakket. Met schatting van stijghoogtes, neerslag en verdamping, doorlatendheid van de verticale schermwand en gemiddelde onttrekking is berekend dat 22% van het opgepompte grondwater afkomstig is van neerslag, 18% van het buitengebied door de schermwand en 60% langs de kleilagen uit het 2^e watervoerend pakket ³⁹. Dit grondwaterbudget is gebruikt als uitgangscenario voor het numerieke driedimensionale grondwater flow model van het Griftpark. Het model is opgesteld in het programma MODFLOW-2000 met de MT3DMS, waarmee het transport (advectie plus dispersie) van opgeloste stoffen berekend kan worden. Het basale model bestaat uit drie verticale lagen, het 1^e watervoerend pakket (2-45 m-NAP, K_h 45 m/d), de lekkende aquitard (45-65 m-NAP, K_h 0,15 en 3 m/d) en

het 2^e watervoerend pakket (65-110 m-NAP, K_h 50 m/d). Eerst is een regionaal model van 5x5 km gemaakt om de grondwaterstroming en stijghoogtes te berekenen die gebruikt zijn als input voor een 1x1 km model ingezoomd op het Griftpark, en de schermwanden. Bij de keuze van de invoer modelparameters is rekening gehouden met de sterke heterogeniteit van de bodem in het geïsoleerde gebied.

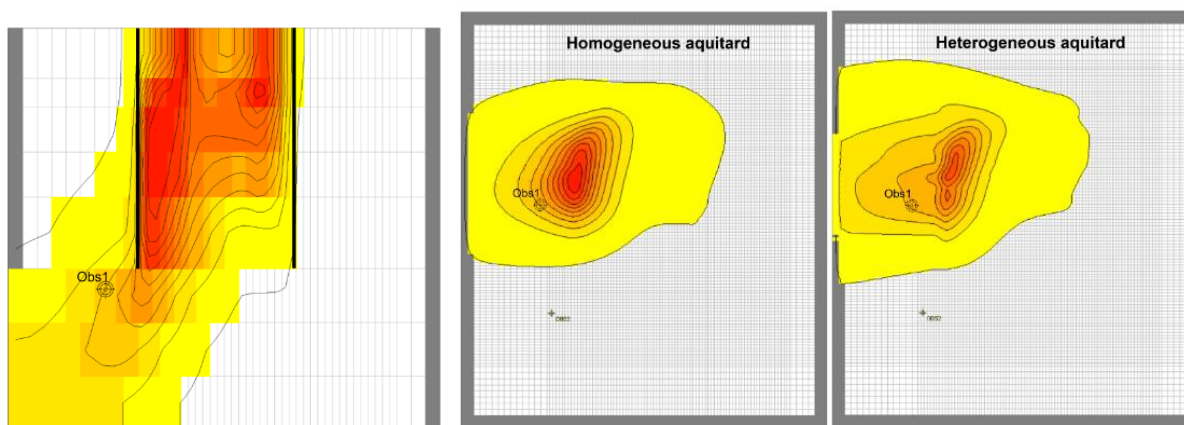
Met het model zijn verschillende scenario's (S1-S7) doorgerekend, waarbij gemodelleerd is met respectievelijk, de grondwaterpompen aan en uit, verschillende gelaagdheid en doorlatendheid van het 1^e watervoerend pakket, de kleilagen en het 2^e watervoerend pakket, en verschillende dieptes waar verontreiniging aanwezig is (Figuur 22). Bij de initiële modellering van stoftransport is een conservatieve tracer gebruikt, die continu oploste uit twee bronzones in het noordwesten en noordoosten van het park, waar de meeste verontreiniging is gevonden. Een conservatieve tracer is hier een in het model gedefinieerde stof die niet afbreekt of adsorbeert en zich uitsluitend met de grondwaterstroming verplaatst. Uit de modelleringen blijkt dat de verschillende scenario's m.n. invloed hebben op de verdeling van het waterbudget langs de kleilagen en door de schermwand. Dit resulteert in verschillende fluxen. Met de pompen aan wordt grondwater het geïsoleerde gebied ingezogen, en met de pompen uit is er een stroming richting m.n. het 2^e watervoerend pakket. Figuur 23 laat de in de bovenste figuur de uitkomst zien van de modellering van een tracerpluim na 500 jaar tussen de met zwart aangegeven schermwanden en daaronder in het 2^e watervoerend pakket. In de onderste figuren is te zien dat een heterogene aquitard een snellere verspreiding van tracer tot gevolg heeft dan een homogene. De aanname bij deze modellering is dat de tracer conservatief is, wat betekent dat er geen sorptie aan de bodem of afbraak optreedt. We weten dat voor opgeloste teercomponenten wel afbraak en retardatie optreedt, en daarom is het voor een risicoanalyse belangrijk om dit mee te nemen in een reactief transportmodel.



Figuur 21. Bodemopbouw van het Griftpark met geologische formaties (nieuwe benaming) en geschatte horizontale hydraulische doorlatendheid (K_h)



Figuur 22. Modelscenario's met verschillende gelaagdheid en doorlatendheid van het 1e en 2e watervoerend pakket (a), en de kleilagen in de aquitard (b). De cijfers in de lagen zijn de waarden van de horizontale hydraulische geleidbaarheid K_h (m/d).



Figuur 23. Voorbeeld modeluitkomst van stoftransport met (links) verticale dwarsdoorsnede van een conservatieve tracerpluim na 500 jaar, en bovenaanzicht pluimvorming met een homogene (midden) of heterogene (rechts) aquitard

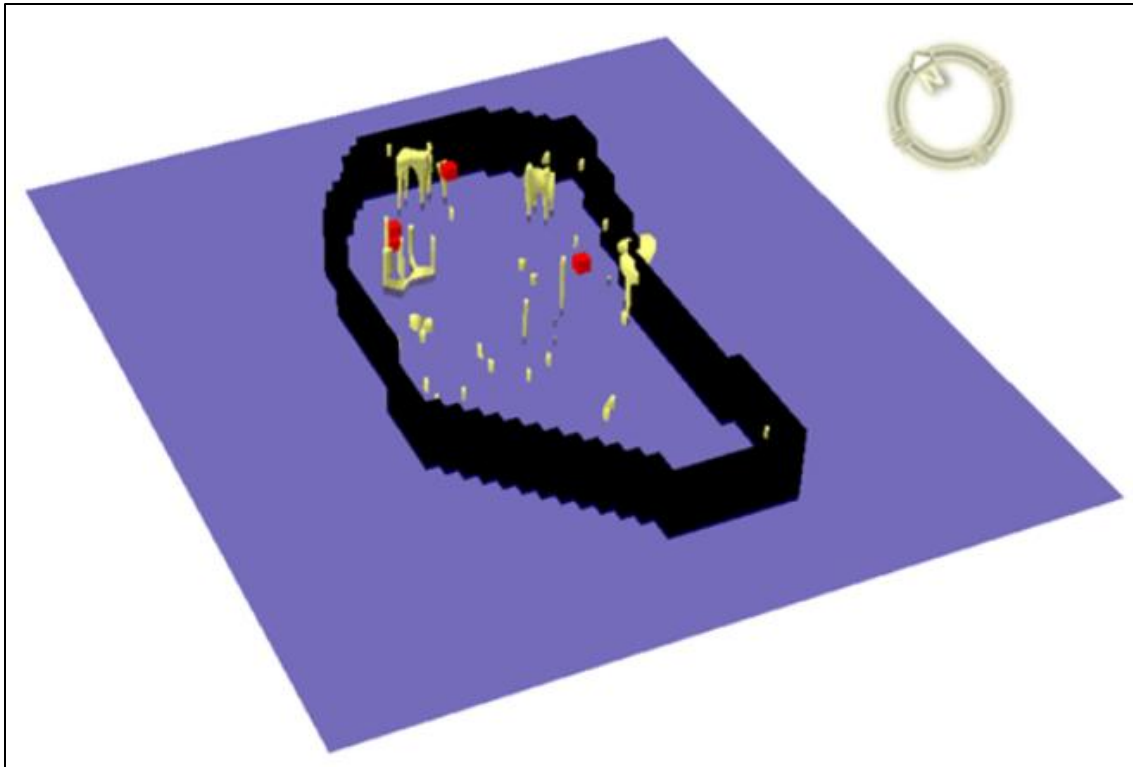
Conclusies grondwaterstromingsmodel:

- Er is een driedimensionaal grondwatermodel opgesteld op basis van een gelaagde bodemopbouw met een heterogene aquitard.
- Scenario's tonen dat grondwater stromingsrichting en -fluxen sterk worden beïnvloed door pompregime, gelaagdheid en doorlatendheid van kleilagen.
- Circa 60% van het opgepompte water wordt aangevoerd vanuit het 2^e watervoerend pakket.
- Heterogeniteit van de bodem leidt tot een snellere verspreiding van opgeloste componenten (tracer).
- Voor een realistische risicobeoordeling is een reactief transportmodel nodig waarin afbraak en retardatie worden meegenomen.

3.4 Reactief transportmodel met biodegradatie van teeraromaten

In hoofdstuk 6 van het proefschrift van Faber is een driedimensionaal reactief transportmodel ontwikkeld om de verspreiding en biologische afbraak van teeraromaten in het Griftpark beter te begrijpen. Het model bouwt voort op het grondwaterstroommodel en integreert zowel hydrologische als geochemische en microbiologische processen. Het doel was niet om alle biogeochemische processen volledig te simuleren, maar om de belangrijkste mechanismen kwalitatief inzichtelijk te maken en de risico's van verspreiding van verontreiniging naar het tweede watervoerende pakket in kaart te brengen.

Voor reactief transport is het driedimensionale MODFLOW/MT3DMS stromingsmodel uitgebreid met de PHT3D extensie. In PHT3D is MT3DMS gekoppeld aan de PHREEQC code, waarmee een breed spectrum aan geochemische en microbiologische reacties en processen zoals afbraak, precipitatie, ionenuitwisseling, oplossen van mineralen en pH-veranderingen kan worden beschreven. Op deze wijze is een specifiek voor de Griftpark-locatie ontworpen model gemaakt dat is gebruikt voor het simuleren van (1) het in grondwater oplossen van aromatische koolwaterstoffen uit pure fase teer, (2) het door advectie, dispersie en sorptie beïnvloede transport van opgeloste koolwaterstoffen door de bodem, en (3) de transformatie van opgeloste koolwaterstoffen en elektronenacceptoren door biodegradatie. Voor de modellering is een selectie gemaakt van de meest belangrijke mono-cyclische aromaten (BTEX) en di-cyclische aromaten (indaan, indeen, naftaleen, methylnaftaleen) die in het Griftpark-grondwater gedetecteerd zijn. Benzeen (meest oplosbaar en mobiel) en naftaleen (hoogste concentraties) zijn als doelcomponenten gekozen, en de overige mono-cyclische aromaten (TEX) en di-cyclische aromaten (indaan, indeen en methylnaftalenen) zijn in de modellering gecombineerd tot "één stof". Omdat *in situ* afbraaksnelheden van deze teercomponenten in het Griftpark nog niet bepaald zijn is uitgegaan van in de literatuur gepubliceerde ranges en Monod-kinetiek^{40,41}. Als uitgangssituatie is gekozen voor meerdere bekende bronzones, van waaruit teeraromaten continu oplossen in het grondwater (Figuur 24).



Figuur 24. Driedimensionale visualisatie van bekende bronzones (geel), grondwaterpompen (rood) en de bentoniet-cement schermwand (zwart) in het Griftparkmodel

In een simulering gedurende een periode van 35 jaar na verontreiniging zijn diepteprofielen van de concentraties van benzeen en naftaleen bij MLS locaties M^B, M^{B2} en M^C met het model berekend, respectievelijk zonder en met biodegradatie (Figuur 25). Zonder biodegradatie zijn de gesimuleerde concentraties relatief constant in de diepte, en hoger dan de in het veld gemeten concentraties. Met biodegradatie is er wel een relatief goede match tussen de gemeten en gesimuleerde concentraties. De modellering laat duidelijk de depletie van de elektronen acceptoren driewaardig ijzer (Fe³⁺) en sulfaat rondom bronzones zien en de toename van opgelost tweewaardig ijzer (Fe²⁺) en sulfide (S²⁻) in het grondwater zien (Figuur 26). Dit is eveneens in overeenstemming met de tijdens het NA-onderzoek waargenomen concentraties en patronen van verticale redox-zonering (Hoofdstuk 2).

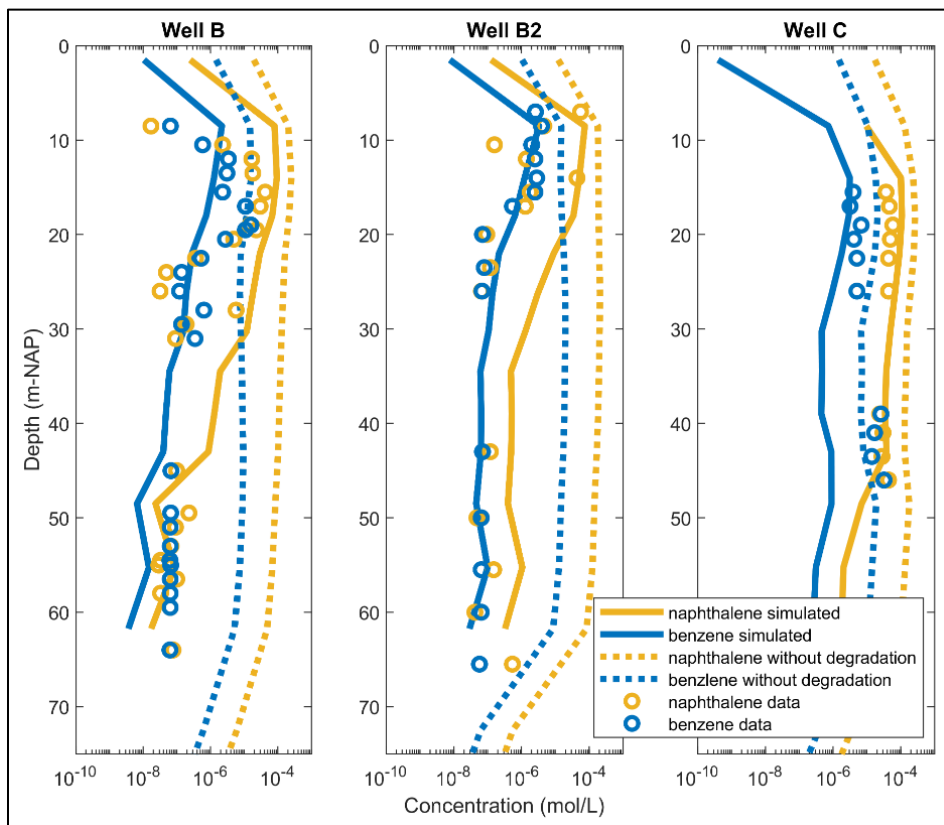
Om parameters te identificeren die bepalend zijn voor de potentiële verspreiding van verontreiniging uit het geïsoleerde gebied is een gevoeligheidsanalyse gedaan. Bij verschillende scenario's zijn aromatenconcentraties berekend in MLS M¹⁰¹, M¹⁰², en M¹⁰³, welke zijn gesitueerd in het 2^e watervoerend pakket stroomafwaarts van het Griftpark (Figuur 8). De modelsimulatie is uitgevoerd voor een periode van 35 jaar met grondwateronttrekking met een debiet van 10,5 m³/u (benaderde situatie tussen 1990 en 2023), gevolgd door een periode van 100 jaar met de pompen uit. Met gemiddelde afbraaksnelheden uit de literatuur (1^e orde afbraakconstanten BTEXN 0,001 tot 0,06 per dag) voorspelt het model dat er binnen 100 jaar na het stoppen van de pompen geen overschrijding van de interventiewaarden van verontreinigende stoffen zal optreden. Bij de laagste waarden van afbraakconstanten (1^e orde afbraakconstanten BTEXN 0 tot 0,002 per dag) was dit echter wel het geval. Uit de gevoeligheidsanalyse blijkt verder dat, naast biodegradatie, het volume en de plaats van bronzones, en in mindere mate de heterogeniteit van de bodem, factoren zijn die bepalend zijn voor de snelheid en mate van verspreiding van opgeloste teeraromaten.

De resultaten van het reactief transportmodel zijn veelbelovend, maar de vele onzekerheden en aannames (b.v. bronzones, biodegradatieconstanten, elektronenacceptoren) beperken nog de directe toepassing voor gemonitorde natuurlijke afbraak als methode voor de beheersing van verontreiniging. Door, na scenario-

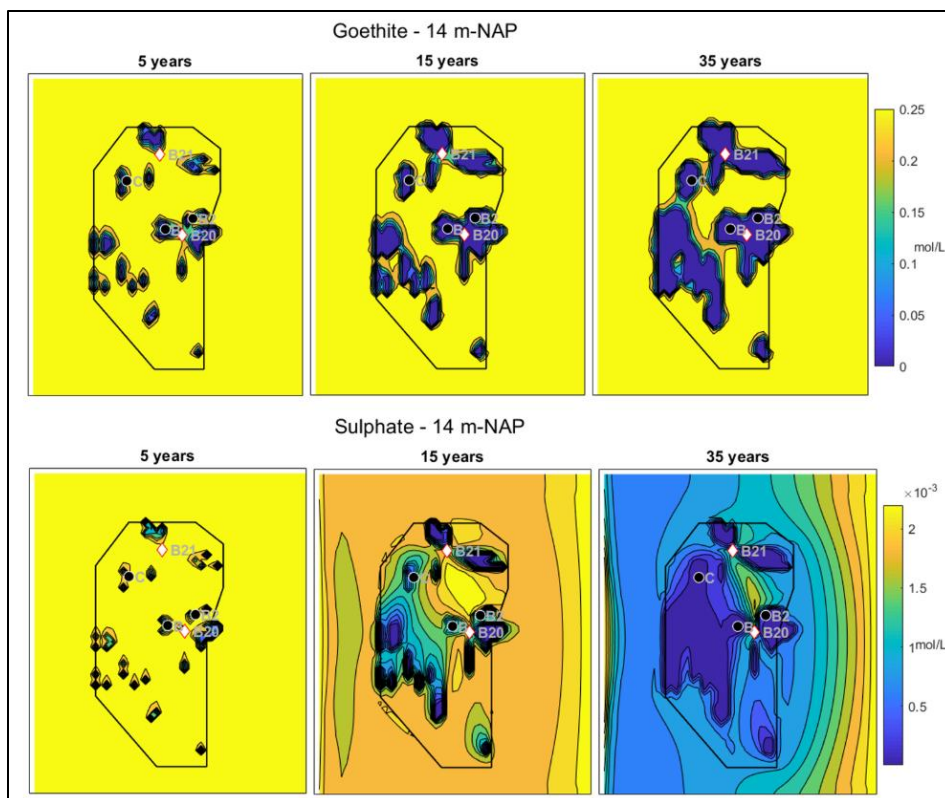
analyses, in het Griftpark gericht meer informatie te verzamelen over de locatie van bronzones, specifieke afbraakconstanten van teeraromaten, en de beschikbaarheid van ijzer en sulfaat en andere elektronenacceptoren kunnen de onzekerheden ten aanzien van onaantvaardbare verspreiding van verontreiniging worden verkleind.

Conclusies reactief transportmodel:

- Er is een driedimensionaal reactief transportmodel ontwikkeld dat hydrologische, geochemische en microbiologische afbraakprocessen combineert.
- Biodegradatie blijkt essentieel: alleen met afbraak komen gesimuleerde concentraties overeen met veldmetingen bij MLS-locaties (Figuur 25).
- Modellering toont uitputting van Fe(III) en sulfaat en vorming van Fe(II) en sulfide rondom bronzones, conform in het veld waargenomen redoxpatronen (Figuur 26).
- Modelscenario's met verschillende afbraakconstanten laten zien dat bij gemiddelde literatuurwaarden van afbraak geen overschrijding van interventiewaarden in het 2^e watervoerend pakket optreedt binnen 100 jaar na het stoppen van de pompen. Bij minimale afbraaksnelheden kan dit wel gebeuren.
- Verspreidingsrisico's worden vooral beïnvloed door afbraaksnelheid en de omvang en ligging van bronzones. De bodemheterogeniteit speelt een secundaire rol.
- Aanvullende veldgegevens (bronzonelocaties, *in situ* afbraaksnelheden en elektronenacceptoren) kunnen onzekerheden ten aanzien van verspreiding van verontreiniging verkleinen en de toepassing van NA als beheerstrategie onderbouwen.



Figuur 25. Diepteprofielen van concentraties van benzeen (geel) en naftaleen (blauw) bij MLS locaties B, B2 en C, gemeten in 2018 (open cirkels), gemodelleerd zonder biodegradatie (gestippelde lijnen), en met biodegradatie (doorgetrokken lijnen)



Figuur 26. Depletie van driewaardig ijzer (boven goethiet) en sulfaat (onder) op 14 m-NAP bij bronzones met teerverontreiniging, modelsimulering 5, 15 en 35 jaar na start verontreiniging

4. Gestimuleerde biologische afbraak (Deelonderzoek Wageningen Universiteit en Research)

Het laboratoriumonderzoek van WUR naar het stimuleren van de microbiologische afbraak van teeraromaten is in detail gepubliceerd in het proefschrift van Dilan Camille Aydin en de daarop gebaseerde wetenschappelijke artikelen ^{13,38,42-44}. In laboratoriumonderzoek is nagegaan of de biologische afbraak van BTEX, indeen, indaan en naftaleen (BTEXIelaN) optreedt in grondwatermonsters uit het Griftpark. In dit onderzoek is de afbraaksnelheid onder aerobe, sulfaat, en nitraat reducerende omstandigheden bepaald en er is nagegaan of deze afbraak gestimuleerd kan worden door de toediening van nutriënten, vitaminen en spoorelementen. Dit onderzoek is uitgevoerd met kweekmedium of schoon grondwater uit het Griftpark, waaraan BTEXIelaN zijn toegevoegd in het laboratorium, of met sterk verontreinigd grondwater uit de peilbuis nabij bronpomp B22.

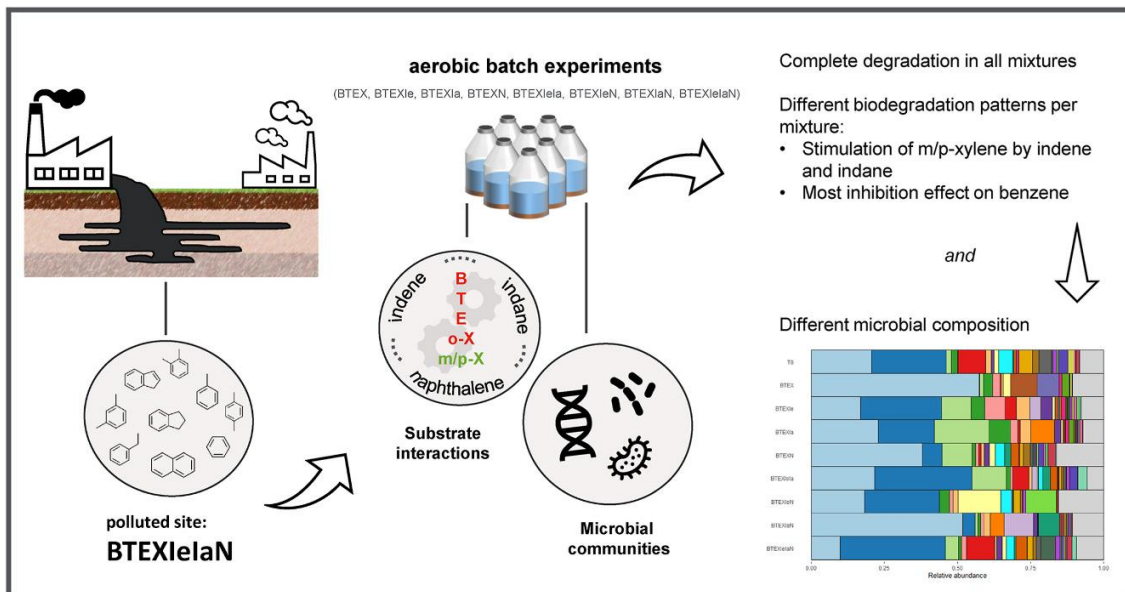
4.1 Nieuwe meetmethode voor opgeloste teeraromaten

Uit onderzoek naar de samenstelling van de opgeloste teercomponenten met GC-MS headspace analyse, blijkt dat deze in het Griftpark per plek verschilt (Figuur 14) ^{11,12}. Om de microbiologische afbraak van BTEXIelaN in batchexperimenten routinematig en snel in kleine monsters te kunnen monitoren is een nieuwe analysemethode met HPLC ontwikkeld ⁴². De ontwikkeling en validatie van deze analyse is beschreven in hoofdstuk 2 van de thesis van Aydin, en gepubliceerd in het wetenschappelijke tijdschrift “Analytical Methods” ^{13,42}.

4.2 Aerobe microbiologische afbraak van mengsels van teeraromaten

In het derde hoofdstuk van het proefschrift van Adyn, dat is gepubliceerd in “Chemosphere”, is onderzocht hoe de aerobe afbraak van indeen, indaan en naftaleen wordt beïnvloed door de aanwezigheid van BTEX ³⁸. Van individuele opgeloste aromatische koolwaterstoffen is bekend dat ze met zuurstof goed biologisch afbreekbaar zijn, maar over de afbraak van complexe mengsels van deze teerverbindingen is weinig bekend. Omdat in het Griftpark naast de veel onderzochte BTEX-verontreinigingen ook hoge concentraties indeen, indaan en naftaleen voorkomen, is het effect van deze drie componenten op de aerobe afbraak van BTEX onderzocht (Figuur 27). Uit de resultaten blijkt dat de afbraak van mengsels van opgeloste teercomponenten anders verloopt dan de afbraak van de afzonderlijke componenten. In mengsels blijkt de aerobe afbraak van benzeen, indeen en indaan geremd te worden en relatief langzaam te gaan. Afbraak van *meta/para*-xyleen was vaak juist sneller in mengsels. Voor het Griftpark is het van belang om naast naftaleen (hoogste concentraties) ook benzeen te monitoren, niet alleen tijdens het stimuleren van aerobe afbraak met zuurstof, maar ook omdat onder niet-gestimuleerde anaerobe omstandigheden benzeen vaak relatief langzaam afbreekt en snel transporteert ^{12,45-50}.

In de afbraakexperimenten van deze complexe mengsels is ook de samenstelling van de microbiologische populatie nader onderzocht. De resultaten laten zien dat het microbioom varieert met de samenstelling van het mengsel opgeloste teercomponenten. Tevens blijkt dat er overeenkomstige aerobe bacteriën (*Burkholderiales*) aanwezig zijn in de bodem en het grondwater van het Griftpark enerzijds, en het water uit de pijplijn naar de waterzuivering anderzijds, die bekend staan als “de Griftpark bacteriën” ⁶.



Figuur 27. Grafische samenvatting van het laboratoriumonderzoek naar de afbraak van mengsels van teeraromaten

4.3 Biostimulatie en bioaugmentatie van anaerobe afbraak van mengsels van teeraromaten in batches

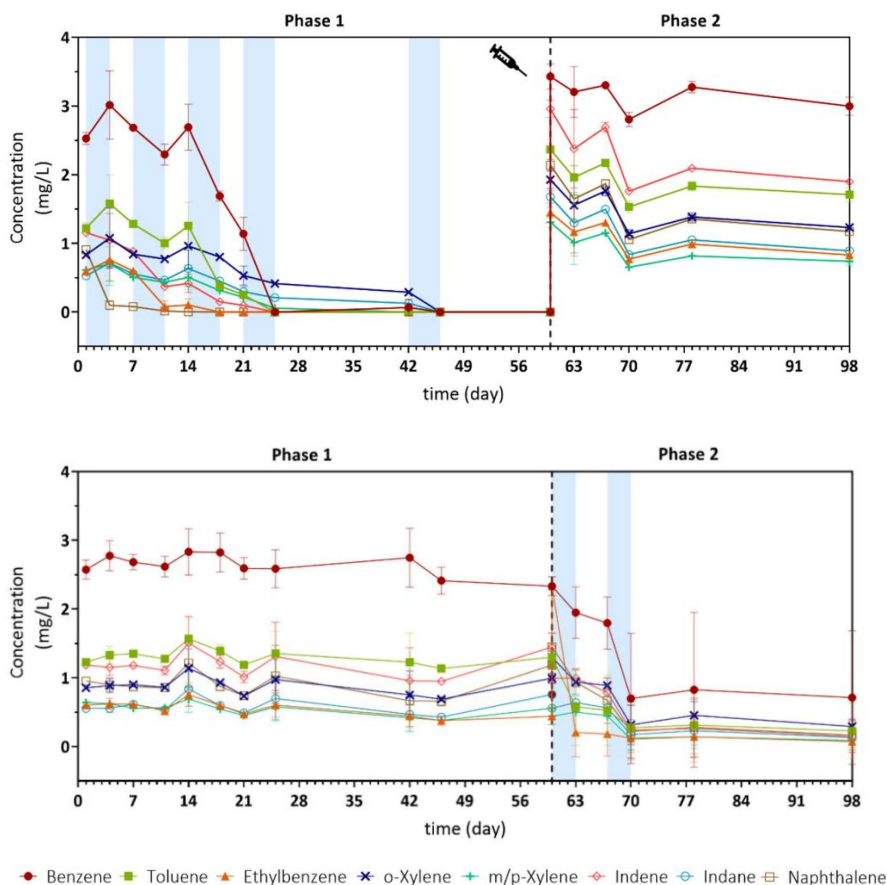
Microbiologische afbraak van een mengsel van opgeloste teerverbindingen verloopt volledig en snel in aanwezigheid van zuurstof als elektronacceptor, zoals in bovenstaande paragraaf is beschreven. In grondwater is zuurstof meestal echter opgebruikt door biologische reacties, zoals afbraak van bodemorganische stof. Er zijn dan vaak nog wel andere elektronenacceptoren aanwezig als nitraat en sulfaat, maar de afbraak van teerverbindingen verloopt hiermee langzamer. De energie die voor micro-organismen vrijkomt bij de afbraak van teerverbindingen, loopt van hoog naar laag in aanwezigheid van de elektronacceptoren zuurstof > nitraat > sulfaat. Eén van de gevolgen is dat de snelheid van aromatenafbraak met zuurstof hoger is, en lager als alleen sulfaat aanwezig is. Hoofdstuk 4 van het proefschrift van Aydin beschrijft de resultaten van biostimulatie- en bioaugmentatietesten in anaerobe batchflessen met schone grond en grondwater van de Griftparklocatie, waaraan een mengsel van BTEXIlelaN was gedoseerd.

Biostimulatie is getest door het doseren van nitraat of sulfaat aan de batches. In de batches met nitraat werd binnen 440 dagen alleen een gedeeltelijke afbraak van ethylbenzeen vastgesteld. Biostimulatie met sulfaat resulteerde in 300 dagen in nagenoeg de volledige afbraak van toluen, *ortho*-xyleen en *meta/para*-xyleen. Tijdens deze batchtesten was er geen meetbare afbraak van benzeen, indaan en naftaleen.

Voor het testen van bioaugmentatie is een anaerobe bacteriepopulatie van een waterzuiveringsinstallatie gebruikt, die was gekweekt in een medium met nutriënten, nitraat, sulfaat en BTEXIlelaN. Daarnaast zijn bioaugmentatietesten gedaan met een anaerobe bacteriepopulatie uit het Griftpark, die in grondwater was gekweekt op toluen met nitraat als elektronenacceptor. Het doseren van bacteriën uit de waterzuivering leidde niet tot een verbeterde afbraak van het aromatenmengsel. In batches waarin de op toluen en nitraat verrijkte Griftparkbacteriën waren geënt, werd een betere nitraat-gekoppelde afbraak van ethylbenzeen vastgesteld. Het feit dat de beste anaerobe afbraak werd gevonden met sulfaat als elektronenacceptor is in overeenstemming met het onderzoek van Deltares (Hoofdstuk 2)¹². Een mogelijke verklaring voor deze resultaten is dat de bacteriën in het 1^e watervoerend pakket van het Griftpark goed geadapteerd zijn aan aromatenafbraak met het hier aanwezige sulfaat. In het 1^e watervoerend pakket zit geen nitraat, en het is daarom goed mogelijk dat er in de batches onvoldoende micro-organismen aanwezig waren die gespecialiseerd zijn in de afbraak van BTEXIlelaN met deze elektronenacceptor.

4.4 Micro-aerobe afbraak van mengsels van aromatische koolwaterstoffen

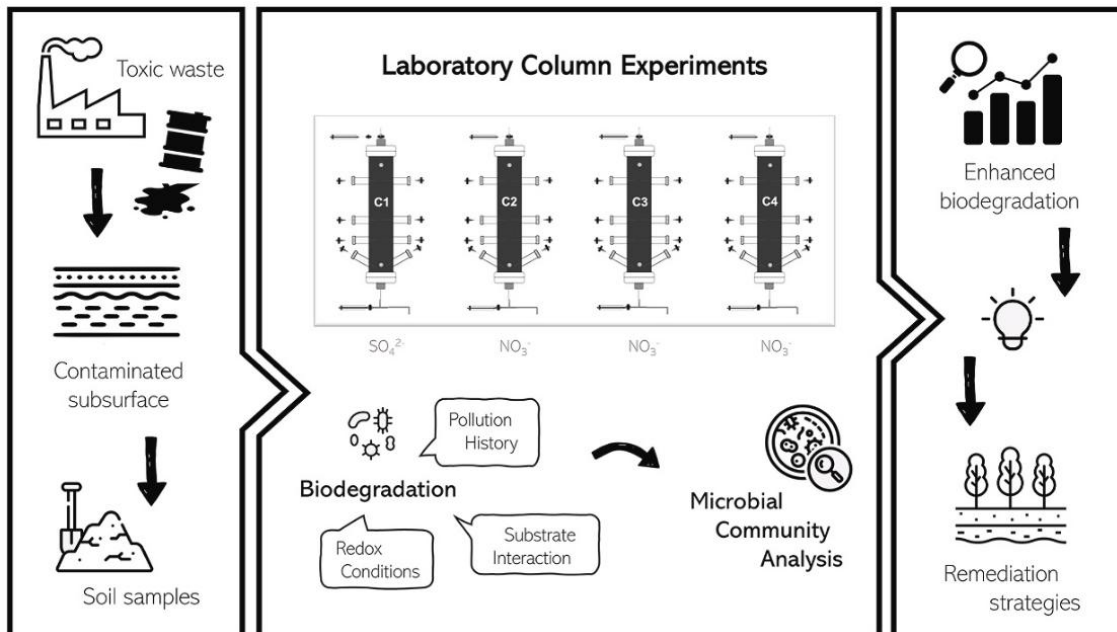
Om de langzame anaerobe afbraak van opgeloste teercomponenten met nitraat of sulfaat te versnellen, is in hoofdstuk vijf van het proefschrift van Aydin onderzocht wat het effect is van het toevoegen van lage concentraties zuurstof⁴³. In dit experiment is het effect van micro-aerobe condities (<0,5 mg/L O₂) op de afbraak van een BTEXIelaN mengsel in batches met Griftpark grondwater en grond onderzocht in twee verschillende situaties. In situatie één is in de eerste 60 dagen vijf keer 0,5 mg/L O₂ toegevoegd, gevolgd door 40 dagen met alleen de aanwezigheid van nitraat. In situatie twee was in de eerste 60 dagen alleen nitraat aanwezig, waarna micro-aerobe condities zijn aangebracht door het doseren van twee maal 0,5 mg/L O₂. In situatie één startte de afbraak van het BTEXIelaN mengsel snel, en na de vijfde zuurstofdosing waren binnen 50 dagen alle componenten volledig afgebroken (Figuur 28, boven). Nadat op dag 60 opnieuw BTEXIelaN is toegevoegd, trad er geen afbraak op bij alleen aanwezigheid van nitraat. In de tweede situatie was er geen meetbare aromatenafbraak in de eerste 60 dagen met nitraat. Opvallend is dat hierna slechts twee doseringen van 0,5 mg/L nodig waren om vrijwel alle BTEXIelaN af te breken (Figuur 28, onder). De verklaring voor het lagere zuurstofverbruik in situatie één is dat er in het begin van het experiment veel zuurstof verbruikt is voor het oxideren van organisch stof, sulfide en ijzer(II), dat aanwezig is in de grondwater- en de bodemmonsters die zijn gebruikt voor het prepareren van de batches. Een beperkt deel van het gedoseerde zuurstof was hierdoor nog beschikbaar voor aromatenafbraak. In situatie twee is in de eerste fase het organisch stof, sulfide en ijzer(II) vooral geoxideerd met nitraat. Hierdoor werd in fase twee zuurstof meer specifiek gebruikt voor de afbraak van BTEXIelaN. Voor de opschaling van maatregelen met gestimuleerde natuurlijke afbraak is bovenstaand experiment van belang, omdat na een eerste periode met nitraat er minder zuurstof gedoseerd hoeft te worden om een bepaalde hoeveelheid teeraromaten af te breken.



Figuur 28. Micro-aerobe afbraak van aromaten na dosering van lage zuurstofconcentraties (blauw aangegeven periode) direct (boven) of 60 dagen (onder) na het starten van de batches

4.5 Effect van milieumomstandigheden op afbraak van toluen en benzeen in sulfaat- of nitraat-reducerende grondkolommen

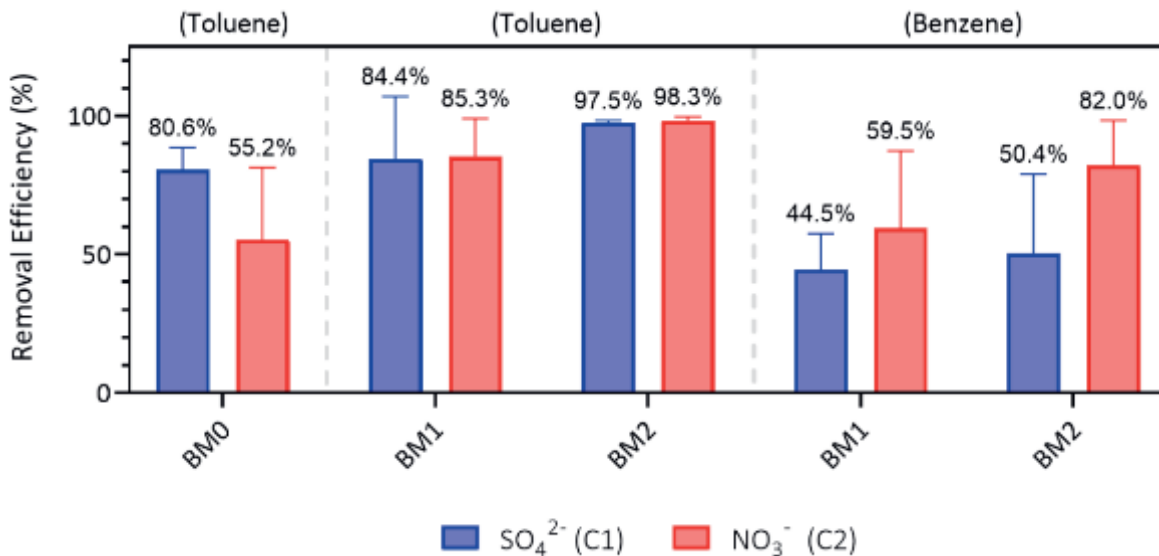
Uit de batchexperimenten bleek dat de samenstelling van mengsels van opgeloste teeraromaten, en de beschikbaarheid van elektronenacceptoren (zuurstof, nitraat of sulfaat) in het grondwater, een groot effect hebben op de microbiologische afbraaksnelheid. Hoofdstuk 6 van het proefschrift van Aydin beschrijft kolomexperimenten met Griftpark-grond, waarin de anaerobe afbraak van toluen en benzeen nader is bestudeerd (Figuur 29) ⁴⁴. Grondkolommen geven een nauwkeurigere simulering van de *in situ* omstandigheden in de bodem dan batches. Hierdoor kan in kolommen de invloed van milieuparameters zoals verschillende combinaties van teeraromaten, aanwezigheid van elektronenacceptoren (sulfaat en nitraat), en grondwaterflow, op de anaerobe afbraak beter bestudeerd worden.



Figuur 29. Grafische samenvatting van het laboratorium kolomonderzoek

Redox-omstandigheden en flow

De laboratoriumexperimenten zijn uitgevoerd met vier grondkolommen. In kolom 1 was sulfaat als elektronenacceptor aanwezig, terwijl aan kolom 2, 3 en 4 ook nitraat werd gedoseerd. De doorstroming van de kolommen met medium is afwisselend drie weken aangezet (flow mode) en drie weken uitgezet (batch mode). Met de pomp aan was de mediumflow >200 keer hoger dan de gemiddelde grondwaterstroming in het Griftpark, en kon er geen afbraak van toluen of benzeen worden vastgesteld (concentratie influent = effluent). Tijdens de opeenvolgende batch modes was er zowel in kolom 1 (sulfaat) als in kolom 2 (nitraat) een toenemende afbraak tot gemiddeld 98% van het hieraan gedoseerde toluen (Figuur 30).



Figuur 30. Anaerobe afbraak van toluen en benzeen (individuele componenten) in de sulfaat-reducerende kolom (blauw) en de nitraat-reducerende (rood) kolom aan het einde van opeenvolgende batch modes (BM)

Kolom 1 en 2 zijn vervolgens van toluen overgeschakeld op benzeen als enige substraat. Aan het einde van de tweede batch mode was in de nitraat-reducerende kolom 82% van het gedoseerde benzeen verwijderd, en 50% in de sulfaat-reducerende kolom (Figuur 30). Dit kolomexperiment laat zien dat na adaptatie de micro-organismen in de bodem van het 1^e watervoerend pakket van het Griftpark in staat zijn tot een snelle anaerobe afbraak van toluen en benzeen onder zowel sulfaat- als nitraat-reducerende omstandigheden. De anaerobe afbraaksnelheden van toluen en benzeen in de kolommen waren, met halfwaardetijden in de orde van enkele weken, hoger dan die waargenomen in de sulfaat- en nitraat-reducerende batches. Mogelijk was er door het afwisselend starten en stoppen van de flow een versnelde selectie van benzeen en toluen afbrekers, door het uitspoelen van afbraak remmende producten, zoals nitriet, of van concurrerende micro-organismen die niet bij aromatenafbraak betrokken zijn.

Mengsels van aromaten

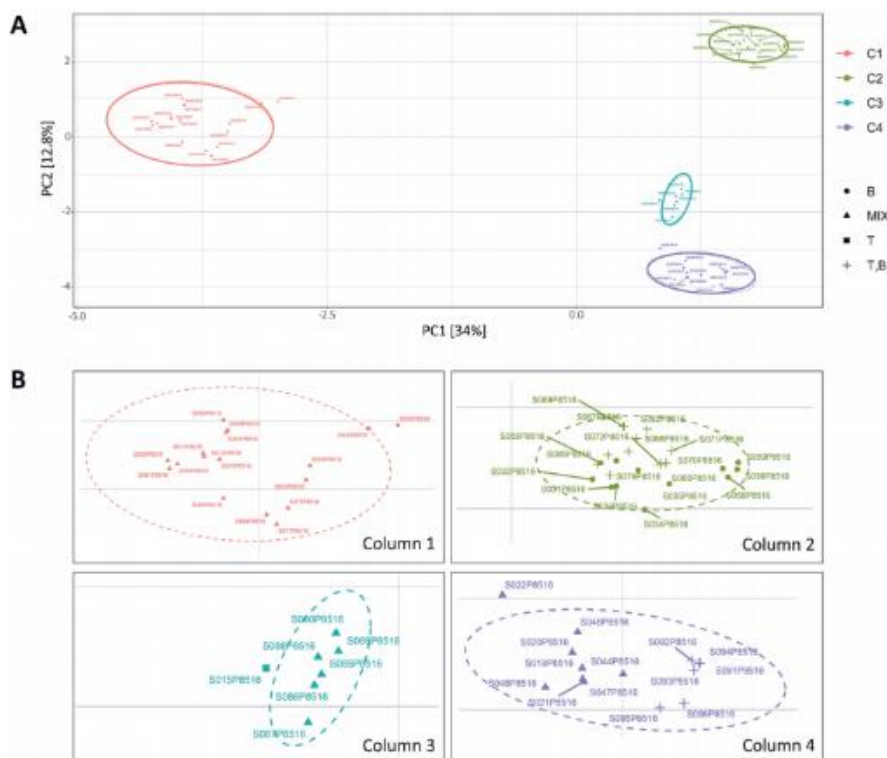
In de kolomexperimenten werd de anaerobe afbraak van toluen (met sulfaat of nitraat) niet geremd door het gelijktijdig aanwezig zijn van benzeen. Benzeenafbraak werd echter wel geremd in de aanwezigheid van toluen. In een meer complex mengsel van BTEXIeIaN daalde de toluenverwijdering van 98% (alleen toluen) tot 40%. Deze kolomexperimenten laten zien dat verschillende aromatische koolwaterstoffen elkaars anaerobe afbraak kunnen beïnvloeden, wat van belang kan zijn bij het stimuleren van afbraak in het veld met sulfaat of nitraat.

Microbiologische populaties in de kolommen

In de kolommen is ook de samenstelling van de microbiologische populaties onderzocht met DNA-analyses. Dit is gedaan na verschillende batch modes waarin variaties in redox en substraatsamenstelling optraden. Met beta-diversiteitsanalyses zijn de verschillen in de microbiologische populaties in beeld gebracht (Figuur 31). Hieruit bleek dat de variatie in redox-omstandigheden leidde tot de grootste verandering in de samenstelling van de microbiologische populaties. De micro-organismen in kolom 1 onder sulfaat reducerende omstandigheden, verschillen sterk van die in kolommen 2, 3 en 4 bij nitraat reducerende omstandigheden met verschillende substraatmengsels.

Conclusies gestimuleerde afbraak:

- De microbiologische populatie in Griftpark-grondwater is onder aerobe omstandigheden in staat om alle BTEXIelaN-componenten binnen één maand volledig af te breken.
- De start van de aerobe afbraak kan worden versneld door toevoeging van nutriënten in combinatie met vitamines en spoorelementen.
- Aerobe afbraak van teeraromaten in mengsels verloopt anders dan bij individuele componenten; afbraak van benzeen, indeen en indaan werd geremd, terwijl m/p-xyleen juist sneller afbrak.
- Onder anaerobe omstandigheden is afbraak afhankelijk van elektronenacceptoren: met nitraat werd ethylbenzeen-afbraak vastgesteld, en met sulfaat trad biodegradatie van toluen en xylenen op, terwijl benzeen, indeen, indaan en naftaleen niet afbraken.
- Bioaugmentatie met op toluen verrijkte Griftpark-populaties kan nitraat-gekoppelde afbraak van ethylbenzeen verbeteren; bacteriën uit een waterzuivering hadden geen meetbaar effect.
- Micro-aerobe condities (<0,5 mg/L O₂) zorgen voor snelle en volledige afbraak van BTEXIelaN, vooral na een voorafgaande fase met nitraat.
- Kolomexperimenten tonen aan dat anaerobe afbraak van toluen en benzeen na adaptatie snel kan verlopen (halfwaardetijden van enkele weken) onder zowel sulfaat- als nitraat-reducerende omstandigheden.
- In mengsels kan competitie tussen aromaten optreden; benzeenafbraak werd onder anaerobe omstandigheden geremd door toluen.
- Redoxomstandigheden sturen de microbiële populatieopbouw; sulfaat- en nitraat-reducerende condities leiden tot verschillende microbiële gemeenschappen.



Figuur 31. Beta-diversiteitsanalyse van de microbiële populaties in de kolommen. Elk meetpunt met label representeert een watermonster uit een kolom. De analyse toont (A boven) de sulfaat-reducerende kolom 1 op grote afstand van de nitraat-reducerende kolommen 2 (groen), 3 (zeegroen), en 4 (lila). Ingezoomd (B beneden) het effect van de substraatvariatie op de populatiesamenstelling in de kolommen.

5. Synthese van de deelonderzoeken en vooruitblik op pilottesten en een nieuwe nazorg

5.1 Verontreinigingssituatie

Het veldonderzoek in Fase 1 van het BestParc project bevestigt dat in het geïsoleerde gebied van het Griftpark meerdere bronnen met teerverontreiniging aanwezig zijn. Op locaties waar op basis van archiefonderzoek teerverontreiniging verwacht werd, is deze met de MIP sonderingen aangetoond. Het is aannemelijk dat teer ook voorkomt op de andere plaatsen met potentiële bronlocaties waar nog geen veldonderzoek is uitgevoerd¹⁵. Tijdens de sonische boring en het plaatsen van de multilevel sampler nabij de uitkijkheuvel (boring C), is pure fase teer (residuaire en mobiele NAPL) aangetroffen, op grotere diepte dan voorheen bekend. Deze pure fase teer bevond zich tot 50 meter diep op scheidende kleilaag tussen het 1^e en 2^e watervoerend pakket. Ter plekke van boring C is de kleilaag waarschijnlijk ten minste 3 meter dik, voldoende lijkt om verdere verticale verspreiding van mobiele pure fase teer te voorkomen¹⁸. In het grondwater van de drie multilevel samplers (MLS 101, 102 en 103) in het 2^e watervoerend pakket, stroomafwaarts ten westen van het Griftpark, is geen significante verontreiniging aangetroffen. Dit duidt er op dat geen omvangrijke verspreiding van teerverontreiniging vanuit het beheersgebied plaatsvindt, dankzij de isolatie door de van nature aanwezige kleilagen, de schermwanden, grondwateronttrekking en/of natuurlijke afbraak.

Tijdens de sonische boringen zijn nauwkeurige beschrijvingen van de bodemopbouw gemaakt. De bodem in het 1^e watervoerend pakket is heterogeen, met afwisselend fijne en grove zandlagen. Het zand in het 2^e watervoerend pakket is meer homogeen. De met sonderingen voorspelde overlappende kleilagen van de formatie van Kedichem (Waalre) van ca. 37 tot 55 m-mv, zijn met de sonische boringen aangetoond nabij de uitkijkheuvel en ten westen van het Griftpark. Ook in het midden van het Griftpark, ten oosten van de vijver, en op grotere diepte tot 71 m-mv, zijn echter ook onbekende dunnere laagjes klei gevonden. Deze zijn in het verleden niet met sonderingen gezien. Het veldonderzoek met pomptesten bevestigt dat er in dit gebied van het Griftpark geen aanwijzingen zijn voor een relatief goed doorlatend pakket, of “gat” tussen de kleilagen.

Het is van belang om deze nieuwe kennis mee te nemen bij het ontwerpen en implementeren van een nazorgstrategie waarin de grondwateronttrekking in het Griftpark wordt afgebouwd. Modelleringsstudie laat zien dat de omvang en de locaties van teerbronnen in belangrijke mate bepalend kan zijn voor de mate van verspreiding van verontreiniging. De grovere zandlagen in de bodem faciliteren een relatief snel transport van opgeloste stoffen in het 1^e watervoerend pakket, terwijl de dunne kleilagen juist een extra barrière kunnen vormen naar het 2^e watervoerend pakket, dan eerder aangenomen. Aanvullende scenario-modelleringsstudie is noodzakelijk om de onzekerheden en de kans op verspreiding na het stoppen van onttrekkingsbronnen beter te kwantificeren. Hierbij moet in ieder geval rekening worden gehouden met de mogelijke aanwezigheid van nog onbekende teerbronnen en variaties in de bodemopbouw. Dit kan aanleiding geven tot nader onderzoek naar potentiële teerbronnen op specifieke locaties in het Griftpark en naar mogelijkheden om deze te beheersen of te verwijderen.

In het BestParc-onderzoek werd vastgesteld dat aromatische koolwaterstoffen de belangrijkste teercomponenten zijn die in het grondwater oplossen en hierin een potentieel verspreidingsprobleem vormen. In het Griftpark gaat het hierbij niet alleen om BTEXN (benzeen, toluen, ethylbenzeen, en *ortho*-xyleen, *meta*-xyleen, *para*-xyleen, en naftaleen), maar ook om minder bekende aromaten zoals trimethylbenzenen, indaan en methylnaftalenen.

Deze bevindingen benadrukken dat een zorgvuldige afbouw van de onttrekkingsmaatregelen alleen mogelijk is wanneer in scenario-analyses onzekerheden in bronlocaties en bodemopbouw expliciet worden meegenomen.

5.2 Veilige nazorg met natuurlijke afbraak

Natuurlijke afbraak (biodegradatie) door bodembacteriën is het belangrijkste proces dat kan voorkomen dat opgeloste verontreiniging zich met het grondwater verspreidt. Eerder onderzoek toonde aan dat in het grondwater van het Griftpark, en de pijpleiding naar de waterzuivering, aerobe bacteriën aanwezig zijn die in staat zijn om teeraromaten snel en volledig af te breken ⁶. Dit is in het huidige onderzoek bevestigd. Aerobe bacteriën zijn voor dit afbraakproces echter afhankelijk van zuurstof, en dat is in de bodem van het Griftpark niet beschikbaar. Dat in de bodem van het Griftpark van nature ook anaerobe aromatenafbraak optreedt is een belangrijke ontdekking in het huidige onderzoek. Deze anaerobe afbraak is met drie bewijslijnen onderbouwd:

1. Veranderingen in de verontreiniging (concentratieafnames, detectie van metabolieten, stabiele isotopenverschuivingen).
2. Verbruik van elektronenacceptoren (m.n. sulfaat en ijzer(III)).
3. Aanwezigheid van aromaten-afbrekende micro-organismen (DNA-analyses en batchtesten).

De resultaten tonen aan dat anaerobe biodegradatie van verschillende aromaten optreedt op alle hiervoor onderzochte locaties in het Griftpark. Dit geeft een stevige basis voor de beslissing om actieve beheersmaatregelen af te bouwen en over te gaan op natuurlijke afbraak als nieuwe nazorgstrategie. Het was in dit onderzoek nog niet mogelijk om afbraaksnelheden van verschillende stoffen éénduidig vast te stellen. De afbraaksnelheid is een belangrijke inputparameter voor het modelleren van het reactief transport van een stof. Aanvullend (veld)onderzoek is nodig om het kwantitatief inzicht te vergroten in de *in situ* afbraaksnelheden van aromaten. Dit geldt voor verschillende redox-omstandigheden, en voor zowel het 1^e als 2^e watervoerend pakket. Het bepalen van de beschikbaarheid van de voornaamste elektronenacceptoren voor afbraak, sulfaat en ijzer(III), is hierbij tevens van belang. Met deze kennis kan de reactief-transportmodellering van opgeloste aromaten verder worden verfijnd en kunnen onzekerheden over potentiële verspreiding worden verkleind. Een geoptimaliseerd model vormt dan de basis voor het implementeren van gemonitorde natuurlijke afbraak als nazorgmaatregel, inclusief uitbreiding van het monitoringsnetwerk met hiervoor benodigde MLS filters.

5.3 Pilots gestimuleerde afbraak

Ook na de keuze voor natuurlijke afbraak als nazorgstrategie kan nieuwe kennis van verontreiniging en biodegradatie, of informatie uit de monitoring en modellering, aanleiding geven tot aandacht voor mogelijke verspreiding van verontreiniging. In dergelijke situaties is het essentieel dat er terugvalscenario's beschikbaar zijn zodat tijdig kan worden ingegrepen en natuurlijke afbraakprocessen waar nodig versterkt kunnen worden. Het natuurlijke afbraakonderzoek liet zien dat zuurstof, nitraat, ijzer(III) en sulfaat elektronenacceptoren zijn die de bacteriën in het Griftpark kunnen gebruiken voor de biodegradatie van opgeloste teeraromaten. In het laboratoriumonderzoek is vervolgens aangetoond dat het doseren van zuurstof, nitraat of sulfaat kan worden gebruikt om aromatenafbraak te stimuleren en versnellen. Aan het einde van Fase 1 heeft het BestParc onderzoeksteam twaalf ideeën voor aanvullend onderzoek en pilots gedefinieerd en deze beknopt uitgewerkt. Na beoordeling op onder andere haalbaarheid, effectiviteit, veiligheid, kosten en duurzaamheid, is door het team een voorstel gedaan voor vier pilootopties voor Fase 2, die de basis kunnen zijn voor het implementeren van aanvullende beheersmaatregelen.

Pilootoptie 1: Microbubbels (O₂-dosering)

In het laboratorium leidde het doseren van zuurstof tot de snelste en meest volledige afbraak van complexe mengsels van opgeloste teeraromaten. In het Griftpark is het doseren van zuurstof door een klassieke persluchtinjectie in principe een optie om aromatenafbraak te versnellen. Het doseren van perslucht diep

in de bodem vraagt echter veel energie, en mede door de complexe bodemopbouw in het Griftpark, is het niet mogelijk om hiermee alle verontreiniging te bereiken. Nieuwe ontwikkelingen laten zien dat het mogelijk is om zuurstof in de vorm van zeer kleine belletjes aan water te doseren. Dergelijke microbubbel hebben als voordeel dat ze, in tegenstelling tot grotere luchtbellen, niet opstijgen en lang in het grondwater aanwezig blijven. Bovendien is het aannemelijk dat door de kleine omvang en het grote specifieke oppervlak, er een verbeterde uitwisseling en grotere verspreiding van zuurstof met het grondwater is. Het BestParc onderzoeksteam adviseert is om in Fase 2 van het project een pilot uit te voeren waarmee *in situ* de met microbubbel gestimuleerde aerobe afbraak van aromaten wordt getest. Microbubbel zijn een kansrijke en innovatieve techniek om aerobe afbraak *in situ* te versnellen.

Pilootoptie 2: Nitraatdosering

Nitraat is van nature niet aanwezig in het beheersgebied van het Griftpark. In het 2^e watervoerend pakket zijn wel lage nitraatconcentraties (<1 mg/L) gevonden, en het is goed mogelijk dat nitraat hier een rol kan spelen bij de afbraak van verontreiniging³⁴. In het laboratoriumonderzoek met kolommen met grond uit het Griftpark is aangetoond dat na een adaptatieperiode, een snelle afbraak van dat benzeen en toluen mogelijk is onder nitraat-reducerende omstandigheden. Het BestParc onderzoeksteam adviseert om een pilottest uit te voeren waarin de effectiviteit van met nitraat gestimuleerde aromatenafbraak wordt onderzocht. In tegenstelling tot zuurstof is nitraat in hoge concentraties oplosbaar in grondwater. Nitraatdosering is technisch kansrijk en relatief eenvoudig toepasbaar *in situ*. Als terugvalscenario sluit nitraatdosering goed aan bij de omstandigheden in het 2^e watervoerend pakket.

Pilootoptie 3: Sulfaatstimulatie

Door de activiteiten van de gasfabrieken komt sulfaat in verhoogde concentraties (>100 mg/L) voor in het grondwater van het Griftpark. In de zones met veel verontreiniging wordt het sulfaat verbruikt voor anaerobe afbraak. In de batchtesten werden met sulfaat de meeste verschillende teeraromaten anaerob afgebroken. Deze afbraak kwam relatief snel op gang, vermoedelijk omdat er in de bodem van het 1^e watervoerend pakket van het Griftpark veel anaerobe sulfaat-reducerende bacteriën actief zijn die aromaten kunnen afbreken. Het *in situ* stimuleren van aromatenafbraak met sulfaat ligt daarom voor de hand in verontreinigde zones, waar dit door afbraak grotendeels is verbruikt. Bij gebreke effectiviteit kan sulfaat hier niet alleen als terugvalscenario, maar eventueel ook als voorzorgsmaatregel worden ingezet. Een pilotonderzoek naar de toepasbaarheid van het stimuleren van anaerobe afbraak met sulfaat is een logisch vervolg van het Fase 1 onderzoek van het BestParc project.

Pilootoptie 4: Helofytenfilter

Er kan nog niet met zekerheid gesteld worden dat er ondanks natuurlijke en gestimuleerde afbraak geen verspreiding van opgeloste verontreiniging op kan treden na het uitzetten van de grondwaterpompen. Daarom adviseert het BestParc team om een pilottest te doen waarin de haalbaarheid van een helofytenfilter als alternatieve *ex situ* grondwaterzuivering wordt onderzocht. In een helofytenfilter kunnen door een combinatie van planten, en aerobe en anaerobe micro-organismen de omstandigheden voor afbraak van opgeloste teerverontreiniging worden geoptimaliseerd. Het is potentieel een meer natuurlijk en duurzaam alternatief voor de huidige zuivering. Mogelijk kan een helofytenfilter ook in het Griftpark zelf worden aangelegd. Het is verstandig om zo schoon mogelijk grondwater uit het 1^e watervoerend pakket te onttrekken voor dosering aan een helofytenfilter. Vanwege de sterke verontreiniging in het binnengebied is het echter van belang dat het filter ook een (tijdelijk) hogere dosering van teerverontreiniging aan kan. Daarom is het advies om de effectiviteit van actief kool als teerbuffer in een helofytenfilter te testen. Het Fase 1 onderzoek laat zien dat stimuleren van aerobe afbraak het meest effectief is om snel hoge concentraties aromaten te verwijderen. Daarom adviseert het onderzoeksteam om de toepasbaarheid van microbubbel in een helofytenfilter te onderzoeken.

De pilots in Fase 2 van het BestParc project zijn essentieel om vast te stellen welke technieken het meest geschikt zijn voor een duurzame, robuuste en kostenefficiënte beheersing van de teerverontreiniging in het Griftpark. Beschikbare terugvalscenario's zijn een cruciaal onderdeel van op natuurlijke afbraak gebaseerde nazorg en van een toekomstbestendige beheerstrategie.

10. Referenties

1. Buiten, H., Jansen, M. & Volkers, K. *Het Griftpark - Proeftuin Voor Bodemsanering*. (Stichting Historie der Techniek, Meppel, 1998).
2. de Herder, H. & Kolkman, H. De Utrechtse Gasfabriek. *Op de Rails* 361–367 (2000).
3. Griftpark - Wikipedia. <https://nl.wikipedia.org/wiki/Griftpark>.
4. Manders, B. & van Lit, A. *Functioneren diepewandenscherm IBC maatregel Griftpark te Utrecht*. (2013).
5. Perris, I. Onderzoek Lust de bacterie in het Griftpark al die troep wel Utrecht - AD. 2 (2018).
6. Hauptfeld, E. *et al.* A metagenomic portrait of the microbial community responsible for two decades of bioremediation of poly-contaminated groundwater. *Water Res* **221**, (2022).
7. Team Wijkwijzer. Hoe het Griftpark hier kwam - Wijkwijzer Noordoost. <https://wijkwijzernoordoost.nl/message/80211/hoe-het-griftpark-hier-kwam> (2024).
8. Leurink, G., Utrecht, G., Van Lit, A., Moolenaar, S. & Manders, B. Anti Bulking Reactor reinigt grondwater biologisch tegen lage kosten. *H2O* **40**, 32–34 (2008).
9. Eskes, S. *et al.* *Natuurlijke Afbraak Grondwaterverontreiniging Griftpark Te Utrecht*. (1999).
10. Teuns, A. Afbouw nazorg Griftpark, extra budgetaanvraag. 1–8 Preprint at (2017).
11. Faber, S. C. Field investigations and reactive transport modelling of biodegrading coal tar compounds at a complex former manufactured gas plant. (Utrecht University, Utrecht, 2023).
12. Gerritse, J., Sommer, E., Meuwissen, D., Braaksma, S. & van Leeuwen, J. *Karakterisering En Natuurlijke Afbraak van Teer Aromaten in Het Griftpark*. (2021).
13. Aydin, D. C. Biostimulation strategies for in situ biodegradation of complex aromatic contaminant mixtures in groundwater. (Wageningen University, Wageningen, 2024).
14. Griftpark | gemeente Utrecht. <https://www.utrecht.nl/wonen-en-leven/parken-en-groen/parken-en-plantsoenen/griftpark>.
15. Diekerhof, J., van Leeuwen, J. & Booms, A. *Archiefonderzoek Griftpark Utrecht*. (2024).
16. Derks, D. *Griftpark scopeverandering. Historisch onderzoek ten behoeve van nader onderzoek grondwater*. (2014).
17. Heidemij. *Aanvullend verontreinigingsonderzoek Griftpark*. (1990).
18. Brink, K. A. & Kruizinga, J. *Resultaten van het grondonderzoek in maart 1988*. (1988).
19. TNO Geologische Dienst Nederland. Stratigrafische Nomenclator | DINOLOKET. <https://www.dinoloket.nl/stratigrafische-nomenclator>.
20. Brink, K. A. & Mak, C. E. *Resultaten van het grondonderzoek uitgevoerd in maart 1988*. (1988).
21. Rood, P. *Scope document sanering Griftpark 2015 - 2025*. (2014).

22. Grotenhuis, T., Aydin, D., Gerritse, J., Van Leeuwen, J. & Faber, S. Wat betekent water sturend in het Griftpark? *Bodem* 34–36 (2023).
23. Gemeente Utrecht. Wijkbericht - Bodemonderzoek in het Griftpark. *Wijkbericht omgeving Blauwkapelseweg* 1–2 (2018).
24. RTV Utrecht. Verontreiniging onder Griftpark sterk verminderd dankzij bacterie. (2023).
25. Houtens nieuws. Mysterieuze bacterie Griftpark. (2018).
26. Volkskrant. Van 'gifpark' tot kweekvijver. *De Volkskrant* (2018).
27. Wijkwijzer Noordoost. Hoe het Griftpark hier kwam. (2024).
28. Algemeen Dagblad. Onderzoek Lust de bacterie in het Griftpark al die troep wel? *AD* (2018).
29. Algemeen Dagblad. Grondwater onder Griftpark blijft 'hartstikke goor' dit piepkleine beestje kan daar iets aan doen Utrecht. *AD* (2023).
30. Algemeen Dagblad. Met een enorme boor op zoek naar hongerige bacterie onder het Griftpark Utrecht. *AD* (2018).
31. Emmi Sommer. Assessing the microbial potential for aromatic hydrocarbon degradation in groundwater from the Griftpark, Utrecht and in batch experiments. (Utrecht University, Utrecht, 2018).
32. Meuwissen, D. *Testing the Degradation Potential of the 'Griftpark - Bacteria'*. (2019).
33. Braaksma, S. *Biodegradation of Coal-Tar and Oil-Tar Creosote in Polluted Urban Areas*. vol. 1 (2020).
34. Gerritse, J. *Onderzoek naar het voorkomen en het biologische afbraakpotentieel van teerverontreiniging in het tweede watervoerende pakket van het Griftpark*. (2025).
35. Naert, M., Buffel, P. & Van Herreweghe, S. *EnISSA Meetcampagne Onderzoekslocatie Griftpark Utrecht*. (2018).
36. Goossen, R. & Booms, A. *Briefrapport ondersteuning veldonderzoek Griftpark te Utrecht*. (2018).
37. Solinst. CMT Multilevel System - The Standard for Monitoring Wells. 1–5 Preprint at (2023).
38. Aydin, D. C. *et al.* Indene, indane and naphthalene in a mixture with BTEX affect aerobic compound biodegradation kinetics and indigenous microbial community development. *Chemosphere* **340**, (2023).
39. Mulder, G., Burghardt, M. & Kabos, R. *Kwaliteitsbewaking schermwand sanering Griftpark Utrecht - Evaluatie monitoring schermwand*. (1995).
40. Alvarez, P. J. J. & Illman, W. A. *Bioremediation and Natural Attenuation - Process Fundamentals and Mathematical Models*. (Wiley & Sons, Hoboken, 2006).
41. Suarez, M. P. & Rifai, H. S. Biodegradation Rates for Fuel Hydrocarbons and Chlorinated Solvents in Groundwater. *Bioremediat J* **3**, 337–362 (1999).
42. Aydin, D. C., Zamudio Pineres, J., Al-Manji, F., Rijnaarts, H. & Grotenhuis, T. Direct analysis of aromatic pollutants using a HPLC-FLD/DAD method for monitoring biodegradation processes. *Analytical Methods* **13**, 1635–1642 (2021).
43. Aydin, D. C., Aldas-Vargas, A., Grotenhuis, T. & Rijnaarts, H. Microaerobic biodegradation of aromatic hydrocarbon mixtures: strategies for efficient nitrate and oxygen dosage. *Appl Microbiol Biotechnol* **109**, (2025).

44. Aydin, D. C. *et al.* A column study: Impact of redox, substrate composition and exposure order on toluene and benzene biodegradation and microbial communities. *Chemosphere* **364**, (2024).
45. Valstar, J., Gerritse, J. & Nipshagen, A. *Karakterisering Anaerobe Afbraak Benzeen in de Botlek.* (2018).
46. van Leeuwen, J. A. Biodegradation of mono- and poly aromatic hydrocarbons in a contaminated aquifer originating from a former Pintsch gas factory site. (Utrecht, 2020).
47. Gerritse, J., van Leeuwen, J. A., van der Waals, M. & Marsman, A. *Anaerobe Afbraak van Aromatische Koolwaterstoffen Door Biostimulatie En Bioaugmentatie - Een Veldtest Bij Een Voormalige Gasfabriek.* (2019).
48. van Leeuwen, J. A. *et al.* Anaerobic degradation of benzene and other aromatic hydrocarbons in a tar-derived plume: Nitrate versus iron reducing conditions. *J Contam Hydrol* 104006 (2022) doi:10.1016/J.JCONHYD.2022.104006.
49. Gerritse, J. *et al.* *Onderzoek Naar de Anaerobe Afbraak van Benzeen Op de Locatie van Een Voormalige Vetgasfabriek.* (2017).
50. van Leeuwen, J. A. *et al.* The dissolution and microbial degradation of mobile aromatic hydrocarbons from a Pintsch gas tar DNAPL source zone. *Science of The Total Environment* **722**, 1–14 (2020).