RESTVERONTREINIGING IN DE BODEM SANEREN MET DE HULP VAN DE NATUUR

Resultaten RESANAT

INHOUD

1 Algemene inleiding Resanat - Nature Based solutions 1

Executive Summary 1

Onderzoeksprogramma 4

Inleiding 4

Leeswijzer rapport 4

2 Opstellen CSM 5

2.1 Inleiding 5

2.1.1 Onzekerheid in het Conceptuele Site Model (CSM) 5

2.1.2 Waarde en kost van informatie 6

2.1.3 High Resolution Site Characterisation (HRSC) 7

2.1.4 Beheersing van risico's: van concentratie en massa naar FLUX en VRACHT verplaatsing 8

2.2 HRSC Tools 11

2.2.1 De EnISSA-MIP methode 11

2.2.2 EC- Electrical Conductivity: Bodemgelaagdheid op basis van geleidbaarheidsmetingen 13

2.2.3 Hydraulic Profiling Tool (HPT): bodemgelaagdheid op basis van doorlaatbaarheidsmetingen 13

2.2.4 Optical Image Profiler 15

2.3 iFLUX metingen 17

2.3.1 iFLUX passieve samplers 17

2.3.2 iFLUX digitale sensor 19

3 Werkpakket 3 21

Samenvatting 21

3.1 Inleiding 21

3.1.1 Veralgemeende probleemstelling & oplossing 21

3.1.2 Algemeen kader werkpakket 3 22

3.1.3 Onderzoekslocatie 23

3.2 Opzet 25

3.2.1 Conceptueel model van de pilot 25

3.2.2 Opvolging en procesevaluatie 33

3.3 Resultaten 39

3.3.1 Monitoringresultaten en interpretatie 39

3.3.2 Evaluatieresultaten 57

3.4 Evaluatie Pilot 59
3.4.1 Lessons learned 59
3.4.2 Aanbevelingen voor codes van goede praktijk 69
4 Werkpakket 4 71
Samenvatting 71
4.1 Inleiding 71
4.1.1 Veralgemeende probleemstelling & oplossing 71
4.1.2 Algemeen kader werkpakket 4 72
4.1.3 Onderzoekslocatie 73
4.2 Opzet 74
4.2.1 Conceptueel model van de pilot 74
4.2.2 Opvolging en procesevaluatie 97
4.3 Resultaten 100
4.3.1 Monitoringsresultaten 100
4.3.2 Evaluatie resultaten 100
4.4 Evaluatie Pilot 122
4.4.1 Lessons learned 122
4.4.2 Aanbevelingen voor codes van goede praktijk 128
5 Werkpakket 5 130
Samenvatting 130
5.1 Inleiding 131
5.1.1 Veralgemeende probleemstelling & oplossing 131
5.1.2 Algemeen kader werkpakket 5 131
5.1.3 Onderzoekslocatie 131
5.2 Opzet 133
5.2.1 Conceptueel model van de pilot 133
5.2.2 Opvolging en procesevaluatie 138
5.3 Resultaten 138
5.3.1 Monitoringsresultaten 138
5.3.2 Evaluatie resultaten 145
5.4 Evaluatie Pilot 147
5.4.1 Lessons learned 147
5.4.2 Aanbevelingen voor codes van goede praktijk 148
6 TOEPASSING Iflux en HRSC-metingen – Praktijkvoorbeelden 149
6.1 WP 3 - Pilootopstelling : de Lieve, een reactieve mat als barrière 149
6.2 WP4 – Pilootopstelling Carcoke Zeebrugge fytoremediatie 150

6.3 WP5 – ’s Gravenmoer 151
Referenties 153
Lijst van tabellen 153
Lijst van figuren 154
Lijst van bijlagen 157

1 ALGEMENE INLEIDING RESANAT - NATURE BASED SOLUTIONS

EXECUTIVE SUMMARY

In RESANAT (Interreg Flanders-Netherlands), Flanders and the Netherlands are working together to improve and promote nature-based soil remediation methods. The project focuses specifically on sites contaminated with organic PAHs and other oil derivatives for a nature-based remediation solution (RESANAT = Remaining pollution remediation with nature-based techniques).

In RESANAT, seven small and large companies from the Netherlands and Flanders work together with knowledge institution Deltares and OVAM to stimulate the redevelopment of contaminated sites in the Netherlands and Flanders: Phytoremediation (Bio2clean), Reactive Mats (TAUW), In-situ biostimulation (Deltares), construction (Jan De Nul - Envisan, Dura Vermeer), redevelopment (TTE), and measurements (iFLUX, Witteveen+Bos).

Conventional remediation and management techniques are costly and energy-intensive. RESANAT focused on innovation of sustainable remediation techniques, using plants, micro-organisms, natural materials, and wind and solar energy to control residual pollution. Thousands of sites in Flanders and the Netherlands still struggling with (residual) contamination could eventually become sustainable again thanks to these innovative techniques.

Improving these techniques was done through three pilot trials. Two of the three pilot tests took place on and in Flemish soil: in the Lieve in Ghent, reactive mats were used to tackle historical PAH contamination. On the Carcoke sites in Zeebrugge, plants were planted to see how they tackle tar, BTEX, etc.
The third pilot project in 's Gravenmoer in the Netherlands gathered knowledge on upscaling and the practical applications of site-specific biostimulation. Biostimulation is speeding up biodegradation of contaminants by administering micro-organisms to the soil. By further developing the method, it can be used to end the aftercare of contaminants in an environmentally responsible way.

Innovative measurement techniques were also used in the RESANAT project iFLUX and HRSC.
The iFlUX sampler measures onsite the groundwater and mass flux. Complementary to concentration measurements, the determination of mass FLUX (g/m²/day) and mass discharge (g/day) of a contaminant allows to understand the transport, fate and dynamics of the contaminant in the groundwater. Mass flux and mass discharge are critical design parameters for remediation concepts preventing spreading of the contamination and it allows to manage risks. A sound knowledge of the behaviour of the contaminant, including the strength of the source and plume helps to make correct choices regarding the approach and management of the contaminant in its (natural) environment.

A High resolution site characterisation (HRSC) mindset is increasingly a proven necessity in conducting the investigation of a soil contamination. HRSC involves the physical and chemical investigation of sites that are contaminated or suspected of being contaminated, and aims to provide a highly spatially detailed picture of the state of soil contamination. This method enables better assessment and management of contaminated sites, including more accurate mapping of contaminated areas, better risk assessment and more reliable plan of action. This means HRSC can not only reduce the risk of further environmental and health impacts, but also help reduce the financial costs associated with the investigation and remediation of contaminated sites.
A key element of HRSC is the use of tools and methods tailored to the heterogeneity of the subsurface, the size of the site and the contamination components to be studied.
Both measurement techniques were used in the different work packages.

Pilot 1: De Lieve in Ghent : Reactive mats

In the neighborhood of Ghent, at a distance of about 500 meters from the port area, a tar and carbon-black factory has been present in the past. As a result of the industrial processes and calamities, the soil became contaminated with various hydrocarbons. A large residual contamination has remained, with contaminated groundwater flowing into the Lieve canal. As a result, the surface water does not meet quality requirements and there is an ecological risk. The goal of work package 3 is to improve the surface water quality structurally with a sustainable and nature-based measure. This measure has taken form in a reactive mat filled with adsorbent materials of natural origin, the Natural Catch [TAUW]. This reactive mat has three nature-based pillars:

- The natural drainage capacity of the channel as the driving force;
- The use of natural materials as adsorbent and passive adsorption;
- A biologically active zone at the interface of mat and surface water for aerobic degradation.

After a preliminary study, design and construction on the bottom of the Lieve, the reactive mat based on green adsorbents was monitored for 2 years in the framework of RESANAT. It follows that a reactive mat in the form of a Natural Catch [TAUW] can significantly improve surface water quality. Moreover, it appears to be the most sustainable solution compared to the alternatives such as excavation and (limited) groundwater abstraction. In concluding, the study found that a number of critical factors must be met in order to make a reactive mat successful in the long term.

Pilot 2: Former Carcoke site in Zeebrugge: Phytoremediation

The former Carcoke site in the port of Zeebrugge used to be home to a munitions factory and later a coking plant. As a result of the industrial processes and calamities, the soil on the site in question and adjacent sites became contaminated with various hydrocarbons. After extensive remediation, residual contamination has remained whereby there remains a risk of further spread of the contamination.

The goal of work package 4 is to improve the quality of the soil and groundwater with a sustainable and nature-based measure. This measure has taken shape in phytoremediation. Phytoremediation is the use of plants and associated microorganisms such as bacteria and fungi. This technique was also applied to sediment released from De Lieve dredging works.

After a feasibility study, design and set-up, monitoring was carried out for 2 years as part of RESANAT.

The results showed that phytoremediation is a particularly sustainable solution to address hydrocarbon contamination. Several techniques were also tested within the framework of RESANAT to monitor the proper functioning of a phytoremediation.

Pilot 3 : ‘s Gravenmoer : In -situ biostimulation

At the site Cebeco in 's Gravenmoer, there is creosote contamination in the soil and groundwater. At the contaminated site, a woodworking company operated at the Havenkade in 's-Gravenmoer from 1962 until the mid-1990s.

In January 2010, demolition of the buildings began and soil remediation started. At the end of 2011, a geohydrological barrier was installed, consisting of a bentonite diaphragm wall with deep-well abstraction at both ends. The extracted groundwater is discharged to the sewerage system after treatment. Most of the site has been developed as a residential area. At the site of the residual contamination, a playground with a living layer has been installed.

The original Cebeco project is now in the monitoring phase and should actually move into an aftercare phase. In addition, there is a general policy of wanting to get rid of IBC sites (projects with perpetual aftercare) in the Netherlands. DVIM would like to cooperate with the Cebeco site to serve as an example project. Creosote, and naphthalene in particular, are common contaminants that are now often remediated or controlled using less sustainable techniques or with infinite aftercare. This project contributes to research into the possibilities for a sustainable, bio-based solution for these types of sites through in-situ biostimulation.

The aim of the research within the RESANAT project is to investigate whether it is possible to stop the active abstraction and purification of groundwater by means of biostimulation, thus making the site aftercare-free in a sustainable way. Should this not prove feasible, it will be investigated whether biostimulation can contribute to controlling the residual contamination present as efficiently as possible (with minimal cost and effort).

The effectiveness of the pilots was tested against the evidence lines for biodegradation:

1. Change in groundwater composition;
2. Changes in contamination;
3. The presence of microorganisms with degradation capacity.

During the period from 11 October 2021 to 10 October 2022, 3 pilot studies were conducted at the project site. To monitor the effect of the pilots, measurements were made on contamination parameters (BTEX, PAH, Mineral Oil), nutrients and electron acceptors (sulphate, nitrate, oxygen, ammonium, phosphate, TOC), bromide and biological parameters (total bacteria, 2 bacterial species, ncrC).

Based on the pilot studies, the goal of rendering the site anaerobic through biostimulation does not appear to be achievable. The anaerobic pilots did not make enough of a measurable difference to contribute to pollution control. The aerobic pilot does have the potential to contribute to control based on the decrease in electron acceptor and decrease in contaminant concentrations.

ONDERZOEKSPROGRAMMA

Inleiding

In RESANAT (Interreg Vlaanderen-Nederland) werken Vlaanderen en Nederland samen om natuurgebaseerde bodemsaneringsmethoden te verbeteren en te promoten. Het project richt zich specifiek op met organische PAK's en andere olie-derivaten verontreinigde sites voor een natuurgebaseerde oplossing van de sanering (RESANAT = Restverontreiniging saneren met nature-based technieken).

In RESANAT werken zeven kleine en grote bedrijven uit Nederland en Vlaanderen samen met kennisinstelling Deltares en de OVAM om de herontwikkeling van verontreinigde locaties in Nederland en Vlaanderen te stimuleren: Fytoremediatie (Bio2clean), Reactieve Matten (TAUW), In-situ biostimulatie (Deltares), aanleg (Jan De Nul - Envisan, Dura Vermeer), herontwikkeling (TTE), en metingen (iFLUX, Witteveen+Bos)
Conventionele sanerings- en beheerstechnieken zijn kostbaar en energie-intensief. RESANAT zette in op innovatie van duurzame saneringstechnieken, waarbij planten, micro-organismen, natuurlijke materialen, en wind- en zonne-energie worden ingezet om restverontreiniging te beheersen. Duizenden locaties in Vlaanderen en Nederland die nog met (rest)verontreiniging kampen, kunnen dankzij deze vernieuwende technieken op termijn opnieuw duurzaam inzetbaar kunnen worden.

Het verbeteren van deze technieken gebeurde via drie pilootproeven. Twee van de drie pilootproeven vonden plaats op en in Vlaamse bodem: in de Lieve in Gent werd met behulp van reactieve matten de historische PAK verontreiniging aangepakt. Op de Carcoke-terreinen in Zeebrugge werden planten aangeplant om te kijken hoe zij de teer, BTEX, … te lijf gaan.
Het derde pilootproject in het Nederlandse ’s Gravenmoer vergaarde kennis over opschaling en de praktische toepassingsmogelijkheden van plaatsgebonden biostimulatie. Biostimulatie is het versnellen van biologische afbraak van verontreinigingen door toediening van micro-organismen aan de bodem. Door de methode verder te ontwikkelen kan deze worden ingezet om de nazorg van verontreinigingen op een milieutechnisch verantwoorde wijze te beëindigen.

Leeswijzer rapport

In het rapport wordt een beschrijving gegeven van de ingezette innovatieve meettechnieken. Per pilootproef wordt een omschrijving gegeven van het opzet, het ontwerp, de opvolging en procesevaluatie, de lessons learned en de aanbevelingen voor de code van goede praktijk.

2 OPSTELLEN CSM

2.1 INLEIDING

Het doel van het RESANAT-project is om met behulp van enkele pilots de toepasbaarheid van natuur gebaseerde ('nature based') technieken te vergroten.

In kader van RESANAT zijn 3 piloten opgezet:

- Nature-based barrière (de Lieve): een barrière, nl. een mat op de bodem van een waterloop, die met behulp van de natuurlijk drainagecapaciteit van de waterloop met gebruik van natuurlijke materialen de verontreiniging adsorbeert en afbreekt.
- Fytoremediatie (Carcoke): dankzij de aanplant van voornamelijk bomen en stimulatie door de juiste bacteriën wordt een afname verwacht van de vuilvracht en van het verspreidingsrisico van een restverontreiniging.
- Bioremediatie ('s Gravenmoer): Het doel is een stabiele eindsituatie te bereiken met behulp van gestimuleerde biologische afbraak van een grondwaterverontreiniging.

Conventionele saneringstechnieken zijn vaak zeer ingrijpend en verbruiken veel energie. Natuur gebaseerde technieken maken gebruik van de natuurlijke omstandigheden en zijn vaker gericht op het beheersen van de verontreiniging. Hierdoor zal de sanering over een langere termijn lopen.

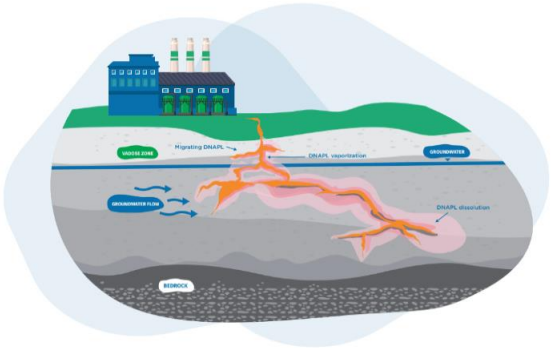
Het is een uitdaging om gedurende deze volledige periode een efficiënte en effectieve monitoring op te zetten. Het monitoringsplan moet toelaten om het rendement (= de effectiviteit) van de saneringsmaatregelen (=resultaat) op te volgen maar ook om tijdig en proactief bij te sturen wanneer wijzigingen optreden of blijkt dat de vooropgestelde saneringsdoelstellingen niet worden behaald.

Belangrijk is om van bij aanvang van de sanering de verontreinigingssituatie goed in beeld te hebben zodat de kritische ontwerpparameters kunnen worden gedefinieerd. Dit laat ook toe de randvoorwaarden en uitgangspunten van de saneringsmaateregelen duidelijk te omschrijven. Tijdens de duur van de sanering dient het monitoringsplan hierop afgestemd te zijn, alsook de frequentie.

Hieronder zijn voor de 3 pilootopstellingen de toepassing HRSC-onderzoek en daarop volgend het FLUX concept geëvalueerd. De gebruikte methodes om deze te monitoren zijn beschreven met daarbij de vastgestelde randvoorwaarden.

2.1.1 Onzekerheid in het Conceptuele Site Model (CSM)

Een juiste inschatting maken van de omvang van een verontreiniging in bodem en grondwater of van de nodige tijd en budget voor een sanering ervan is geen eenvoudige taak. Voorspellingen met betrekking tot saneringstijd en effectiviteit blijken regelmatig onbetrouwbaar en onnauwkeurig te zijn.



Figuur 1. Voorstelling Conceptueel Site Model

Verontreiniging met DNAPL's (dense non-aqueous phase liquids) zoals gechloreerde solventen, teer, creosote vormen de grootste uitdagingen. Omwille van hun hoge soortelijke gewicht verspreiden deze producten zich ook in grotere mate in verticale richting tot op grotere diepte. Maar ook LNAPL's (brandstoffen, olie, ...) kunnen in combinatie met complexe geohydrologische omstandigheden leiden tot uitdagende vraagstukken.

De bodem is een uitgesproken heterogeen medium. Onder invloed van de ervaring met saneringen van de laatste decennia is de benadering van de geohydrologie in evolutie. Waar aanvankelijk de bodemopbouw benaderd werd op basis van grove veralgemeende bulk eigenschappen, is ondertussen duidelijk dat de subtielere verschillen in geohydrologische eigenschappen de transportprocessen van verontreiniging op kleinere schaal beïnvloeden. Een benadering gebaseerd op een uniforme verspreiding is dus een te sterke vereenvoudiging en ligt mee aan de oorsprong van de onzekerheid van saneringsprojecten. Er is gedetailleerdere informatie nodig om deze onzekerheid te reduceren en goede saneringsoplossingen te kunnen uitwerken.
Ook op vlak van sanerings-technologieën en strategieën is er evolutie. De ontwikkeling van innovatieve saneringsmethodes biedt nieuwe mogelijkheden voor snellere, duurzamere en effectievere sanering van verontreinigde locaties. Met in-situ saneringsbenaderingen kan een veel gerichtere aanpak van de verontreiniging worden uitgevoerd. Bij deze methodes is het succes des te meer afhankelijk van een goed begrip van de kenmerken van de ondergrond, de verspreiding van verontreinig en een nauwkeurigere inschatting van het volume/massa, etc. Data gaps en onzekerheden in het CSM moeten worden weggewerkt om de sanering gericht en efficiënt kunnen uitvoeren.

2.1.2 Waarde en kost van informatie

Het verzamelen van gegevens over de bodem opbouw en de verontreiniging met behulp van traditionele boor- en bemonsteringsmethoden is tijd- en kostenintensief. Dit impliceert dat de kost per datapunt hoog is waardoor men doorgaans niet in staat is om een voldoende uitgebreide dataset te verzamelen.

Bovendien worden (deels ook vanwege deze hoge kosten) vaak metingen verricht op de verkeerde schaal. Wanneer metingen worden uitgevoerd op een schaal die niet overeenstemt met de variabiliteit van hetgeen men onderzoekt, dragen deze weinig bij tot een goed begrip van wat er gemeten is.

Zo worden peilbuizen voor de beoordeling van grondwaterverontreinigingen vaak over 1 of meerdere meters verfilterd, terwijl de variabiliteit van de formaties en verontreinigingen zich manifesteert op sub-meter schaal. De resultaten die worden bekomen uit deze bemonsteringen zijn over de diepte geintegreerde (én gewogen) gemiddelde gegevens die niet nuttig zijn om de ruimtelijke structuur van het probleem te begrijpen.

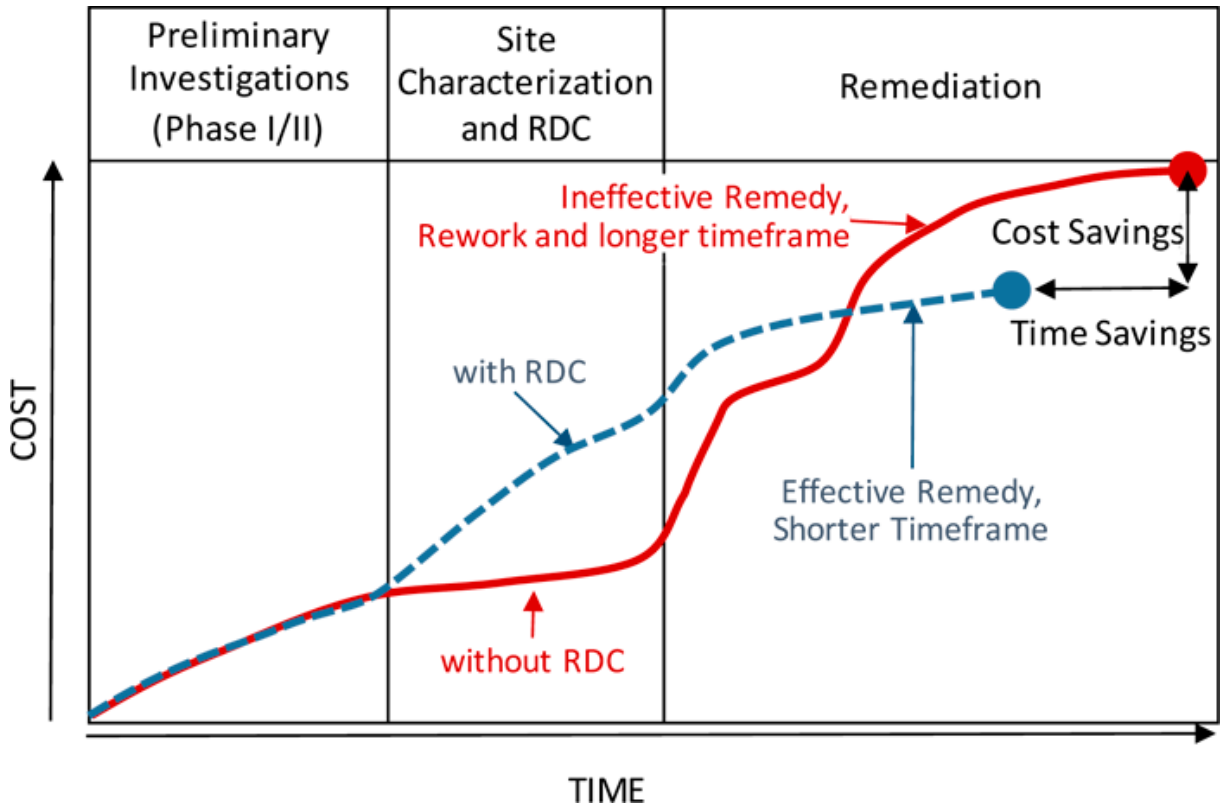
Het plaatsen en bemonsteren van peilbuizen is in vele site onderzoeken tot op heden een van de belangrijkste informatiebronnen voor het CSM. Gedetailleerde en ruime analysemogelijkheden in gecertificeerde labs leveren waardevolle informatie op. Dankzij deze verscheidene analyses wordt onder meer inzicht verzameld over (de veranderingen van) zowel de concentraties en samenstelling van de verontreiniging als van de geochemische of biochemische samenstelling van het grondwater of over de aanwezige bacteriepopulaties. Dit betreft zeer relevante data voor site monitoring. Echter voor onderzoek en screening naar de aanwezigheid van verontreiniging is vanwege de beperkte data dichtheid en toegepaste schaal deze aanpak niet geschikt.

Op verontreinigde locaties die met behulp van peilbuizen worden onderzocht, is het meestal zo dat veel peilbuizen zich op de verkeerde plaats bevinden en over de verkeerde intervallen zijn gescreend. Het boren en correct installeren van een peilbuis is tijdrovend en duur, zodat het des te belangrijker is deze op de juiste locatie en diepte te plaatsen.

2.1.3 High Resolution Site Characterisation (HRSC)

Een High resolution site characterisation (HRSC) mindset is steeds meer een bewezen noodzaak in het uitvoeren van het onderzoek naar een bodemverontreiniging. HRSC omvat het fysische en chemische onderzoek van locaties die verontreinigd zijn of verdacht worden van verontreiniging, en heeft als doel een zeer ruimtelijk gedetailleerd beeld te krijgen van de toestand van de bodemverontreiniging. Deze methode maakt een betere beoordeling en beheer van verontreinigde locaties mogelijk, waaronder het nauwkeuriger in kaart brengen van verontreinigde gebieden, een betere risicobeoordeling en betrouwbaarder plan van aanpak. Dit betekent dat HRSC niet alleen het risico op verdere milieu- en gezondheidseffecten kan verminderen, maar ook kan helpen om de financiële kosten in verband met het onderzoek en de sanering van verontreinigde locaties te beperken.
Een key-element van HRSC is het gebruik van instrumenten en methoden die zijn afgestemd op de heterogeniteit van de ondergrond, de omvang van het terrein en de te bestuderen verontreinigingscomponenten. Er kan gebruik worden gemaakt van real-time meettechnologieën die een efficiëntere gegevensverzameling en -analyse mogelijk maken. HRSC wordt vaak uitgevoerd volgens de Triade-aanpak, een systematisch proces met planning, gegevensverzameling, en het gebruik van een levend conceptueel site model (CSM) die gebruikt kan worden tijdens de hele levenscyclus van het project als communicatiemiddel. Het CSM is een beschrijving van wat er bekend is over de locatie en de aanwezige verontreiniging, en wordt gebruikt om hiaten in de gegevens en onzekerheden vast te stellen die door verder onderzoek moeten worden aangepakt. Het HRSC-proces is bedoeld om het uitmiddelen van de verzamelde gegevens in dit CSM tot een minimum te beperken en de heterogeniteit te behouden om de locatie nauwkeurig te karakteriseren. Het CSM wordt vervolgens gebruikt om hiaten in de gegevens en onzekerheden te identificeren die door verder onderzoek moeten worden aangepakt.
Een HRSC-aanpak worden door sommigen als "duur" ervaren. De vraag is natuurlijk waar mee wordt vergeleken. Hoe beschouw je de kost van ‘niet weten’ en onzekerheid? De kosten per datapunt van deze HRSC-technieken zijn vele malen lager dan die van traditionele methoden.

Toepassing van deze methoden voorafgaand aan het plaatsen van enkele goed gerichte boringen en peilbuizen verhoogt ook de informatiewaarde van latere metingen. Onderstaande Figuur 2 van ITRC (https://ois-isrp-1.itrcweb.org/2-remedial-design-characterization/) worden de kosten en baten van intensievere onderzoeksinspanning vergeleken. Aanvullend onderzoek ter ondersteuning van het ontwerp van de sanering (Remedial Design Characterisation - RDC) reduceert onzekerheden. Er kunnen vanaf het begin geschiktere en effectievere remedies worden gekozen en er kunnen typische snellere resultaten worden bereikt met minder totale kosten.



Figuur 2 Aanvullend onderzoek ter ondersteuning van het ontwerp van de sanering (Remedial Design Characterisation - RDC) reduceert onzekerheden

2.1.4 Beheersing van risico's: van concentratie en massa naar FLUX en VRACHT verplaatsing

Normen voor bodem en grondwater verontreinigingen in Vlaanderen zijn concentraties. De ernst van een verontreiniging wordt echter niet alleen bepaald door de concentratie. In welke mate een verontreiniging een bedreiging vormt, wordt bepaald door de aanwezigheid van receptoren in de omgeving en de "sterkte" van een bron of pluimzone, d.i. in welke mate de verontreiniging in contact kan komen met deze receptoren.

Naast de concentratie zijn het volume van de verontreiniging, de bodemeigenschappen, de hydrogeologische kenmerken en dynamische processen (bv. afbraak, sorptie, back diffusie…) bepalend voor de bedreiging die uitgaat van een verontreiniging naar een receptor.
Voor bedreiging van de receptoren via de lucht is er een code van goede praktijk evaluatie uitdampingsrisico's in het kader van bodem- en grondwaterverontreinigingen.

Hieronder wordt de verspreiding via het grondwater beschreven. Hiervoor introduceren we het principe massa FLUX en VRACHT verplaatsing.

Concentratiemetingen zijn momentopnames. Doordat piekconcentraties de peilbuis passeren en de monitoring niet continu plaatsvindt, is het niet uitgesloten dat bepaalde polluentpieken worden gemeten of net niet worden opgemerkt. Bovendien is er geen correctie voor grondwaterstandschommelingen en variaties in grondwaterstromingssnelheid en -richting.

Aanvullend op concentratiemetingen laat de bepaling van massa FLUX (g/m²/dag) en VRACHT verplaatsing (g/dag) van een verontreiniging toe om het gedrag en de dynamiek van de verontreiniging in het grondwater te begrijpen en de risico's beter in beeld te brengen. Een gedegen kennis van het gedrag van de verontreiniging, o.a. de sterkte van de bron en pluim helpt om juiste keuzes te maken omtrent de aanpak en beheer van de verontreiniging in zijn (natuurlijke) omgeving. Ondanks er in Vlaanderen of Nederland geen normen zijn voor massa FLUX en VRACHT verplaatsing in het grondwater, laat de bepaling van massa FLUX en VRACHT verplaatsing laat toe om meer onderbouwd een uitspraak te doen op o.a. onderstaande vragen:

- Is een verontreiniging stabiel, inkrimpend of breidt deze nog verder uit;
- Zijn de gemeten concentratie ook en goede maat voor blootstelling, dan wel een over- of onderschatting;
- In welke mate wordt een receptor bedreigt nu en in de toekomst;
- In welke mate beïnvloedt een (sanerings)maatregel het gedrag van de verontreiniging;
- In welke zone is sanering prioriteit om schade te voorkomen of om maximaal resultaat te behalen;
- Is een actieve sanering nodig of volstaat het opvolgen van natuurlijke attenuatie om risico's uitgaande van de verontreiniging te beheersen;
- Kunnen saneringsmaatregelen geoptimaliseerd worden, met ook kostenbesparing en tijdswinst.

2.1.5 FLUX en VRACHT verplaatsing als kritische parameters bij het ontwerpen van saneringen

In kader van het ontwerp van de saneringstechniek is het belangrijk om aanvullend inzicht te verwerven in de verdeling en verspreiding van de verontreiniging. Bij aanvang van een sanering dient de nulsituatie te worden vastgelegd. Hierbij is het belangrijk om te beseffen dat naast de verontreinigingssituatie ook de hydrogeologie geen statisch gegeven is.

De te verwachten invloeden en dynamiek dienen voldoende in beeld te zijn gebracht en de sanering hierop afgestemd. Uitgangspunten, beperkingen of randvoorwaarden kunnen daarom ook best duidelijk omschreven zijn in het bodemsaneringsproject (ontwerp).

Tijdens een sanering evalueert men of een (rest)verontreiniging verder af- dan wel toeneemt. De monitoring van de verontreiniging gebeurt conventioneel met behulp van concentratiebepalingen van grondwatermonsternames (low flow).

Een concentratiebepaling is een lokale meting en een snap shot in de tijd terwijl de verontreinigingssituatie dynamisch is. Het kennen van de processen die ingrijpen op de verontreiniging is belangrijk, zodat dit ook op correcte manier wordt meegenomen in ontwerp en monitoring van saneringen.

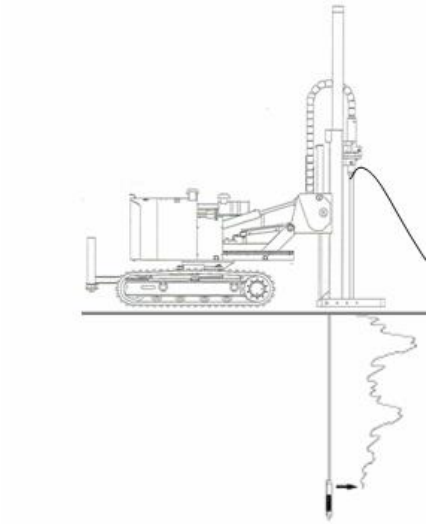
De bodemsaneringsnormen en milieukwaliteitsnormen zijn uitgedrukt in concentraties en dus vaak leidend voor de evaluatie van de verontreiniging. Een risico gebaseerde evaluatie in kader van onderzoek en sanering is site specifiek. Hierbij kijken we verder dan de gevestigde basisnormen. Bij deze evaluatie is het belangrijk om een evaluatie van de dynamische processen mee te nemen bij opmaak van het conceptueel site model.
Het FLUX concept waarbij de verplaatsing van grondwater en verontreiniging over een langere periode wordt gemeten, laat toe om de dynamiek in de ondergrond beter te evalueren.

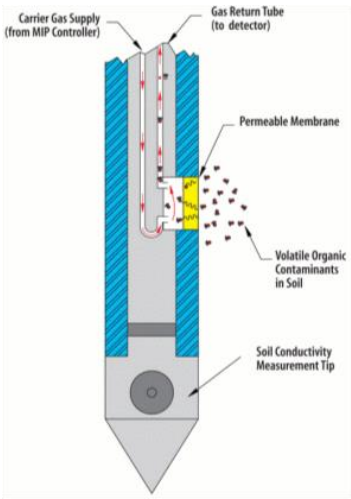
Het optreden van o.a. natuurlijke attenuatie, sorptie, biodegradatie, back diffusie, schommelende grondwaterstanden ten gevolge van neerslag en grondwaterstromingen (natuurlijke en artificiële) etc. is dynamisch.
Daarom dient tijdens het cyclisch proces van het conceptueel site model nagegaan worden of de dynamiek in de ondergrond of gekende externe dynamische processen een impact hebben op de verontreinigingssituatie. Met andere woorden verwachten we relevante wijzigingen of schommelingen in de tijd. Zijn de wijzigingen of schommelingen voldoende gekend om het beste saneringsconcept te selecteren of is er aanvullend onderzoek noodzakelijk om het conceptueel site model verder te verfijnen en de sanering correct te kunnen dimensioneren.

Gezien de dynamische processen relevant kunnen zijn in kader van de evaluatie van de verspreiding van de verontreiniging, alsook in kader van het ontwerp van saneringen, dienen deze tijdens de verschillende fasen van het onderzoek geëvalueerd te worden. Deze evaluatie dient cyclisch uitgevoerd te worden en start in principe reeds tijdens de situatieschets en bij opmaak van de onderzoeksstrategie in kader van de afperking van de verontreiniging. Met bovenstaande pilots voor natuur gebaseerde technieken tonen we ook aan dat de evaluatie van de dynamiek eveneens van belang is bij de dimensionering en monitoring van natuur gebaseerde saneringen.

2.2 HRSC TOOLS

2.2.1 De EnISSA-MIP methode



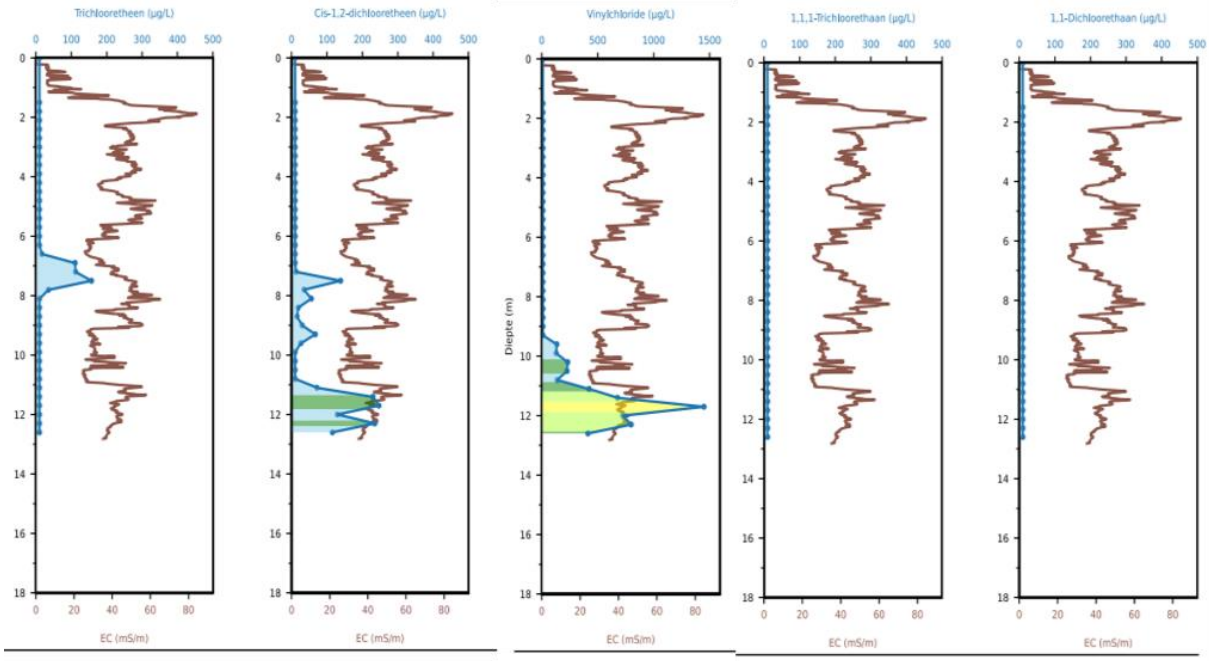


Figuur 3. EniSSA MIP-methode

- De “Membrane Interface Probe (MIP)” wordt met behulp van sondeerapparatuur in de bodem gebracht. De MIP-sonde bevat uit een hydrofoob, semi-permeabel membraan dat ingebouwd is in een verwarmingsblok. Tijdens het sonderen wordt de bodem lokaal verwarmd tot ± 100 °C door middel van het verwarmingsblok. Hierdoor vervluchtigen de aanwezige vluchtige organische componenten VOC’s in de omgeving van de sonde en diffunderen naar een inert draaggas. Het draaggas transporteert de VOC’s door de transferlijn naar de bovengrondse detector.
- Een traditioneel MIP-systeem maakt gebruik van een combinatie van drie detectoren: DELCD /ECD of XSD, PID en FID. Elk van de detectoren reageert op specifieke component groepen (organochloorverbindingen, aromaten of koolwaterstoffen) wat resulteert in een signaal (in Volt) in functie van de diepte. Het gebruik van deze detectoren heeft enkele nadelen:
- De detectielimieten liggen doorgaans hoger dan de bodemsaneringsnormen. Bijgevolg kan het traditionele MIP-systeem eerder beperkt tot het afperkingen in de bronzone van de verontreinigingen.
- Het zijn somdetectoren die geen resultaten voor individuele componenten geven. Interpretatie en vergelijking met normen kan moeilijk zijn. Zeker omdat de respons kan verschillen in functie van aanwezige componenten.
- In het geval van verontreiniging bestaande uit verschillende componenten wordt de interpretatie van de signalen verder bemoeilijkt door verschillende respons tijden. Minder vluchtige componenten hebben een afwijkende (langere) ‘reistijd’ tot aan de detector waardoor het detectorsignaal over een groter diepteinterval zal verhoogd blijven.
- 2 Directe koppeling van MIP met GC-MS De EnISSA MIP aanpak is gebaseerd op een innovatief gas sampling systeem waardoor de MIP probe naast een een klassieke PID-detector ook direct gekoppeld kan worden aan een GC-MS toestel. Door een doorgedreven verbetering van het GC-MS systeem en de analysemethode bedraagt de analysetijd minder dan 1 min. Tijdens de uitvoering van de MIP-sonderingen wordt op elk diepte interval (typisch 30 cm) een GC-MS analyse uitgevoerd.

Zo krijgt men meteen een gedetailleerder inzicht in de samenstelling van de verontreiniging. Op basis van een calibratie met gekende oplossing wordt vervolgens voor ieder van de geanalyseerde componenten een diepte profiel met berekende grondwaterconcentraties bekomen.

- De EnISSA MIP techniek laat toe individuele componenten op te meten met detectielimieten tot 10-20 ug/l. Deze lage detectielimieten maken het mogelijk om zowel bron als pluim karakterisatie uit te voeren waarbij per individuele component een bodemprofiel wordt opgesteld. Aangezien de analysetijd 1 min bedraagt, blijft de MIP-sondeersnelheid de tijdsbepalende factor en is de meting geen vertragende factor. Omdat individuele componenten worden gemeten is de respons minder beïnvloed door aanwezigheid van minder vluchtige componenten. Voor bepaalde componenten (e.g naftaleen, trimethylbenzenen) met langere reistijd in de MIP-kabel kan indien nodig ook een specifieke correctie worden toegepast.
- Naast de analyse binnen 1 min met een meting van max 12 componenten, kan desgewenst ook een volledige screening gebeuren van 54 meest voorkomende (semi-)vluchtige componenten binnen een tijdsbestek van 3-4 in. De detectiegrens bedraagt dan 200-500 µg/l.



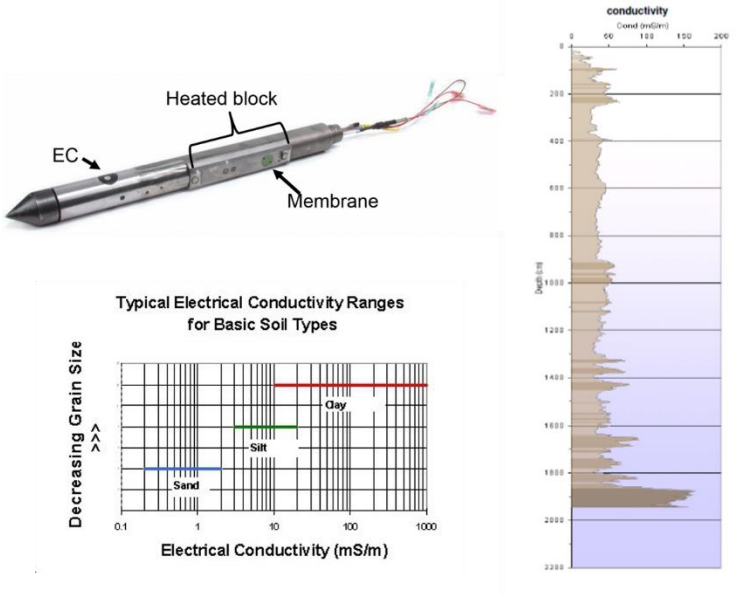
Figuur 4 . Enissa -profielen

- Indien gewenst kunnen ook andere componenten welke niet opgenomen zijn in de lijst van de 54 componenten, gemeten worden op voorwaarde dat deze vluchtig/semi-vluchtig zijn. Voor deze componenten dient dan wel een bijkomende calibratie te gebeuren.

2.2.2 EC- Electrical Conductivity: Bodemgelaagdheid op basis van geleidbaarheidsmetingen

- De opbouw van de bodem wordt opgemeten aan de hand van een conductiviteitsmeting met behulp van de Wenner-dipool. De meting steunt op een wisselstroom welke gaat van de centrale, geïsoleerde electrode van de Wenner-dipool naar het sondelichaam. De spanning welke optreedt als een gevolg van de aangelegde wisselstroom wordt gemeten. Deze spanning staat in relatie met de bodem-resistiviteit of de bodemconductiviteit.

- Over het algemeen kan gesteld worden dat klei een relatief hoge elektrische conductiviteit bezit terwijl zand een lage conductiviteit vertoont. De waarde voor silt en leem ligt hiertussen.

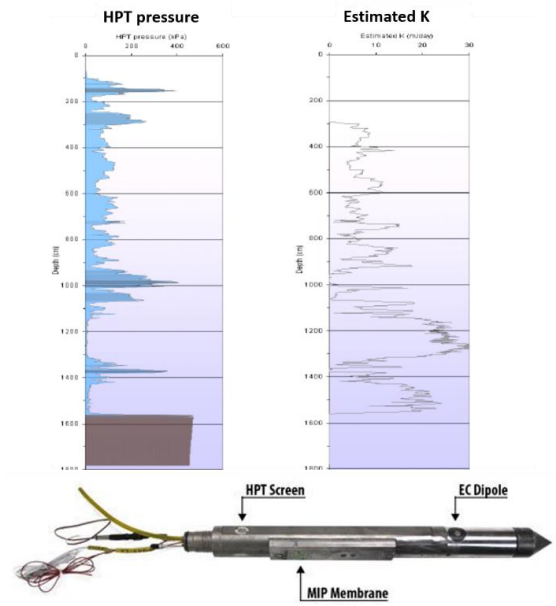


Figuur 5. Enissa – sonde + profiel geleidbaarheid

- Een verandering van de conductiviteit van de bodem betekent steeds een variatie in de bodemkarakteristieken. De conductiviteit wordt beïnvloed door 1) de korrelgrootte, 2) de mineralogie van de bodemdeeltjes, 3) de eigenschappen van de poriënvloeistof.

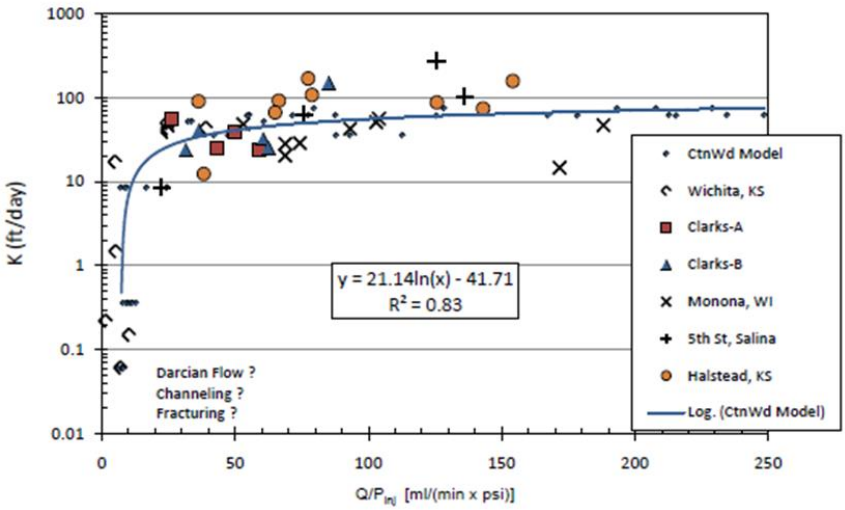
2.2.3 Hydraulic Profiling Tool (HPT): bodemgelaagdheid op basis van doorlaatbaarheidsmetingen

- MIP-sonderingen kunnen gecombineerd worden uitgevoerd met HPT door middel van een MiHPT combinatie sonde. Bij HPT wordt de doorlatendheid van de bodem gemeten aan de hand van continue waterinjectie door het HPT-screen. De druk die hiervoor nodig is, wordt geregistreerd. Een verhoging van de druk, nodig om dit constante debiet te halen, wijst op een lagere doorlaatbaarheid (K). Een verlaging van deze druk wijst op een hogere doorlaatbaarheid.



Figuur 6 – HPT-sonde + profiel

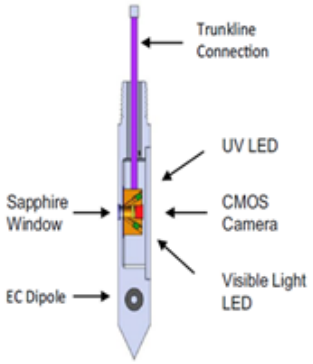
- Voor elke sondeerlocatie wordt een real-time gedetailleerd druk- en stroomlogboek gegenereerd dat meer inzicht geeft in de hydrogeologie. In combinatie met dissipatietests of grondwaterstandsgegevens kunnen de gecorrigeerde HPT-druk en een geschatte geleidbaarheid (K [m/dag]) worden berekend op basis van een empirisch model. Dit model is gebaseerd op gecorreleerde HPT - slug tests op meerdere locaties waaruit de onderstaande curve is afgeleid. Er moet rekening worden gehouden met limieten aan zowel de lage als de hoge kant van het model. Deze worden voornamelijk veroorzaakt door de lagere gevoeligheid van de druksensor bij lage druk en bij hoge druk suggereren waarnemingen dat waterinjectie eerder langs de staven of scheuren stroomt. Bij K-waarden lager dan 0,03 m/dag en hoger dan 23 m/dag moet men er conservatief van uitgaan dat de onzekerheid op de resultaten toeneemt (W. McCall en T.M. Christy, 2020).



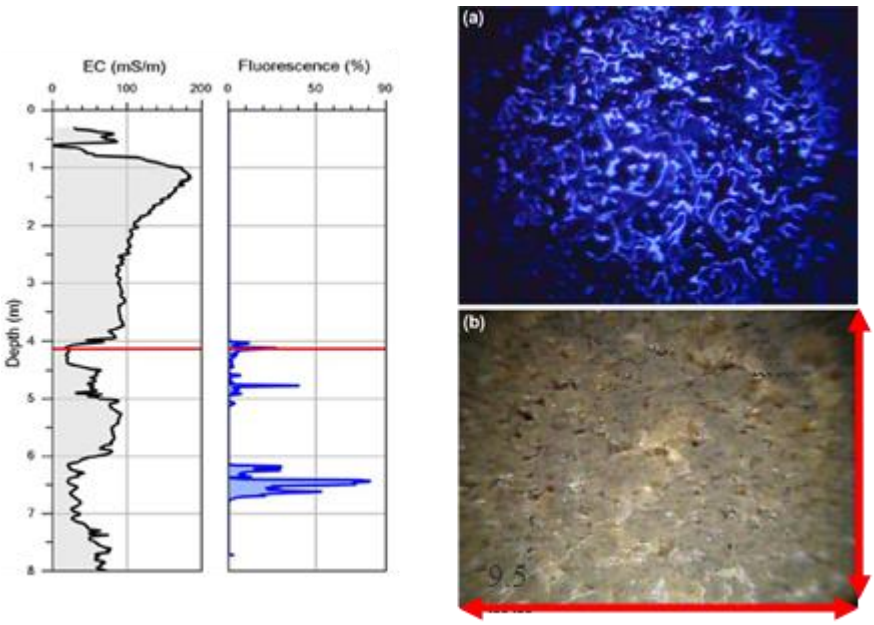
Figuur 7 Calibratiecurve doorlatenheid

2.2.4 Optical Image Profiler

- De Optical Image Profiler (OIP) sonde van Geoprobe bestaat uit een 275-nm UV LED en een wit licht LED (of 525 nm LED en infrarood licht) achter een saffieren venster samen met een CMOS-camera (Afbeelding 2.1). Tijdens het sonderen schijnt enkel de UV LED en wordt er elke 2 cm een foto genomen van de ondergrond. Indien er polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) aanwezig zijn, zullen deze oplichten in het zichtbare gedeelte van het elektromagnetisch (EM) spectrum en kan dus met de CMOS-camera gedetecteerd worden. Deze afbeeldingen worden dan geanalyseerd met een 2-staps digitale filter op basis van HSV (Hue, Saturation, Value) criteria om te zien of een pixel fluorescentie vertoont of niet. Vervolgens worden de resultaten uitgedrukt als een percentage van het aantal fluorescerende pixels.



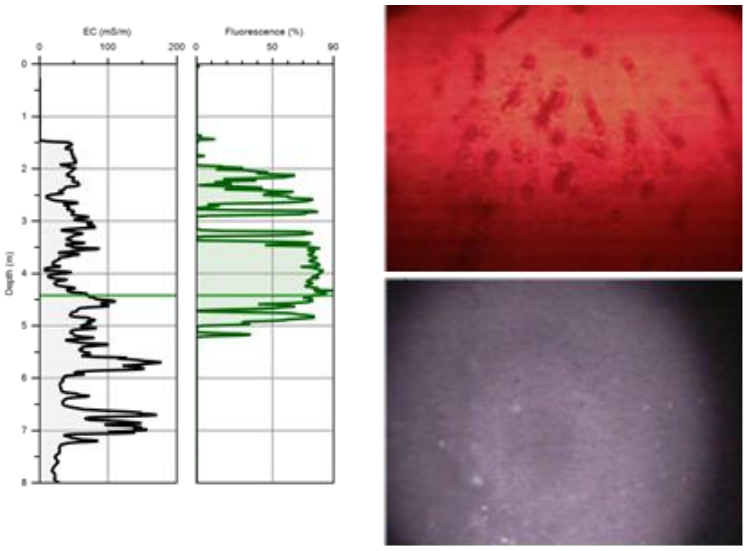
Figuur 8. Overzicht OIP Probe



Figuur 9. Voorbeeld OIP UV resultaten

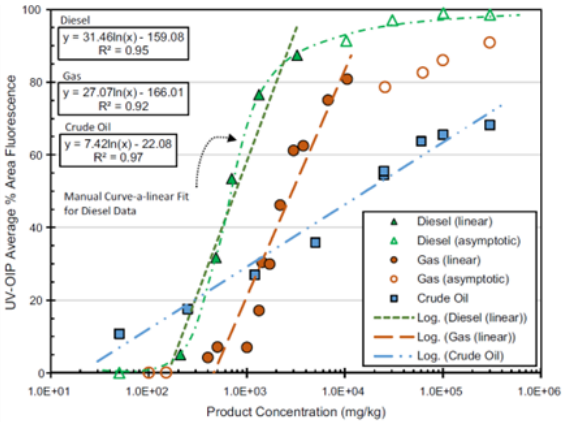
Naast de standaard UV LED waarmee opnames gemaakt worden, kunnen er ook opnames gemaakt worden met een wit LED licht. Deze gebeuren automatisch bij elke stangenwissel (om de 1,2 m) maar kunnen ook manueel gebeuren op elke gewenste diepte, om een beter beeld te vormen van de ondergrond.

- Er moet wel rekening mee gehouden worden dat mono-aromatische koolwaterstoffen (bv. BTEX) niet fluoresceren in het zichtbaar licht spectrum. Voor detectie van deze stoffen is EnISSA-MIP een beter aangewezen techniek. Producten als teer en creosoot bevatten een breed bereik aan kleine en grote PAK moleculen, waarbij OIP-UV wel voor fluorescentie kan zorgen van de lichte moleculen maar deze terug worden geabsorbeerd door de grote PAK moleculen met als gevolg, geen detecteerbaar zichtbaar licht. In deze gevallen zal eerder teruggevallen moeten worden op OIP-green, waarbij een groene laser diode van 525 nm gebruikt wordt en enkel de grote PAK moleculen tot fluorescentie gebracht zullen worden.



Figuur 10 Voorbeeld OIP Green resultaten

- Interpretatie
- Om enig kader te geven hoe het OIP-percentage in verhouding staat tot de concentratie verwijzen wij naar afbeelding 2.4. Hierbij werden er voor verschillende types PAK's curves opgesteld door gecontamineerd zand met wisselende concentraties tegen de sonde te houden.



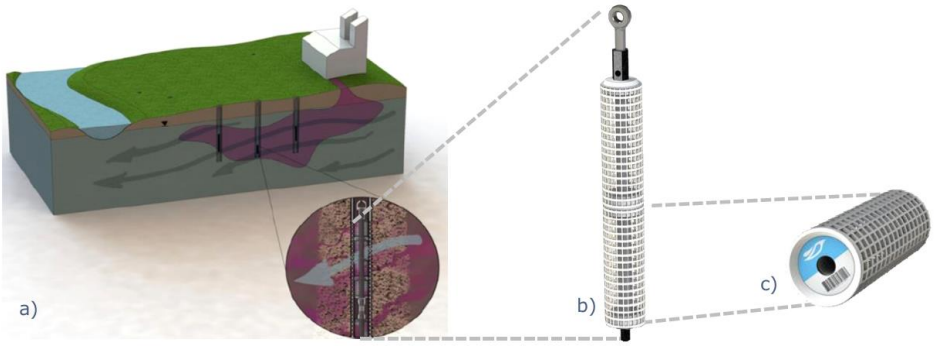
Figuur 11 OIP signaal respons (bron: Geoprobe ©)

- De ondergrens toont aan dat eerder de niet opgeloste fase gedetecteerd wordt met een lineair verloop totdat een maximaal signaal bereikt wordt. In een fysieke context betekent dit dat de korreloppervlaktes meer en meer bedekt worden totdat alle oppervlaktes fluoresceren. Op dit moment wordt er een maximaal signaal bereikt. De concentratie waarbij dit bereikt wordt verschilt van contaminant tot contaminant en is eveneens beïnvloed door de bodemmatrix. Het is aangewezen een site specifieke correlatie te maken door het verzamelen van weloverwogen grondstalen.

2.3 IFLUX METINGEN

2.3.1 iFLUX passieve samplers

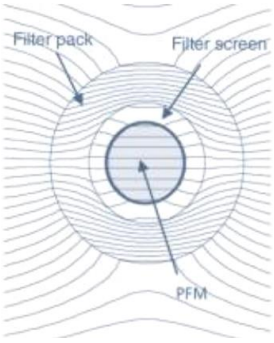
<u>Horizontale flux</u>
De iFLUX passieve sampler meet on-site grondwater en massa flux. De sampler wordt in een peilbuis geplaatst. Deze wordt aangepast aan de diameter van de peilbuis. De iFLUX sampler is een modulair systeem en wordt opgebouwd met verschillende cartridges. Er zijn verschillende types voor de verschillende te meten parameters. Er kunnen meerdere type cartridges gecombineerd worden en deze kunnen op verschillende - te verkiezen - dieptes geplaatst worden. Grondwater flux wordt gemeten met behulp van tracer alcoholen. Voor de contaminanten zijn er verschillende type resins die de parameter selectief adsorberen. In totaal zijn meer dan 135 analyses gevalideerd voor de iFLUX sampler.



Figuur 12 a) Veldopstelling met een iFLUX passieve sampler (b) in een peilbuis, opgebouwd uit 2 cartridges (c)

De iFLUX samplers meten over een langere periode (enkele weken tot enkele maanden) en worden na ophalen geanalyseerd. Voor het meten van de grondwaterflux worden de tracer alcoholen geanalyseerd. Voor de massaflux worden de gadsorbeerde contaminanten geanalyseerd op de resins. De hoeveelheid tracer alcoholen en contaminanten zijn een maat voor respectievelijk grondwater en massa flux, de hoeveelheid water of contaminant die zich verplaatst voorbij de sampler gedurende de blootstsellingstijd (eenheid voor waterflux is cm /dag en massa flux in mg/m²/dag).

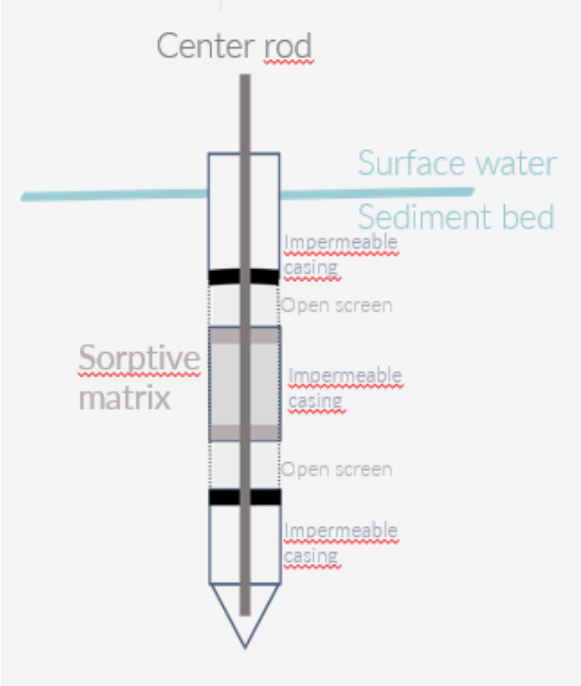
Gezien de stroombanen in de aquifer mogelijks afbuigen als ze door het boorgat, peilbuis en sampler gaan, worden de gemeten waarden gecorrigeerd voor de stroombaanafbuiging. Hiervoor wordt gebruikt gemaakt van de beschikbare informatie: diameter van het boorgat en peilbuis, doorlatendheid van aquifer en filtergrind, alsook de gebruikte materialen. (Verreydt G., Bronders J., Van Keer I., Diels L., Vanderauwera P. 2014. Groundwater Flow Field Distortion by Monitoring Wells and Passive Flux Meters, Groundwater, DOI: 10.1111/gwat.12290)



Figuur 13: stroombanen in de aquifer

Verticale flux

In veel aquifers is de horizontale flux vaak dominant. Bij uitwisseling met oppervlaktewater en grondwater kan ook een relevante verticale flux optreden. Hiervoor is een aparte sampler ontwikkeld. Deze sampler wordt rechtstreeks in de grond geplaatst en heeft twee filtergedeeltes met daartussen de matrix met traceralcoholen en adsorberend resin. De matrix is opgebouwd uit 5 compartimenten om zowel opwaartse als neerwaartse water- en massaflux te meten. Voor deze sampler gelden dezelfde principes als voor de horizontale flux sampler. (gevalideerde analyses, correctie voor stroombaanafbuiging,...). (Layton et al 2017 Development of a passive sensor for measuring vertical cumulative water and solute mass fluxes in lake sediments and streambeds)



Figuur 14: sampler verticale flux

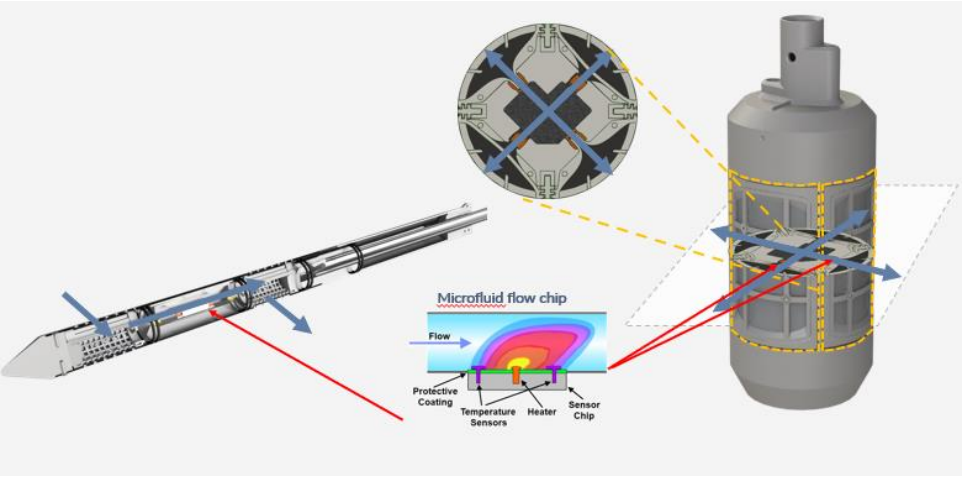
Er is ook een specifieke verticale flux sampler die in het rietje van een Treewell (fytoremediatie) geïnstalleerd kan worden. Deze is niet gebruikt in dit project.

De iFLUX passieve sampler is een gepatenteerd en commercieel beschikbaar product. De iFLUX sampler is eenvoudig in gebruik en inzetbaar in verschillende omstandigheden. De resultaten zijn betrouwbaar. De iFLUX passieve samplers zijn intussen in verschillende projecten (> 150) ingezet in Europa.

De mogelijkheden en beperkingen zijn goed onderzocht en getest in het veld. Er zijn verschillende publicaties en rapporten van validatiestudies beschikbaar. Vóór gebruik van de iFLUX passieve sampler is het belangrijk om ter voorbereiding van de iFLUX campagne de beschikbare informatie grondig te bestuderen en de doelstellingen van de metingen duidelijk te definiëren. Deze informatie is nuttig om het benodigde aantal, de locatie alsook de blootstellingstijd van de samplers te bepalen.

2.3.2 iFLUX digitale sensor

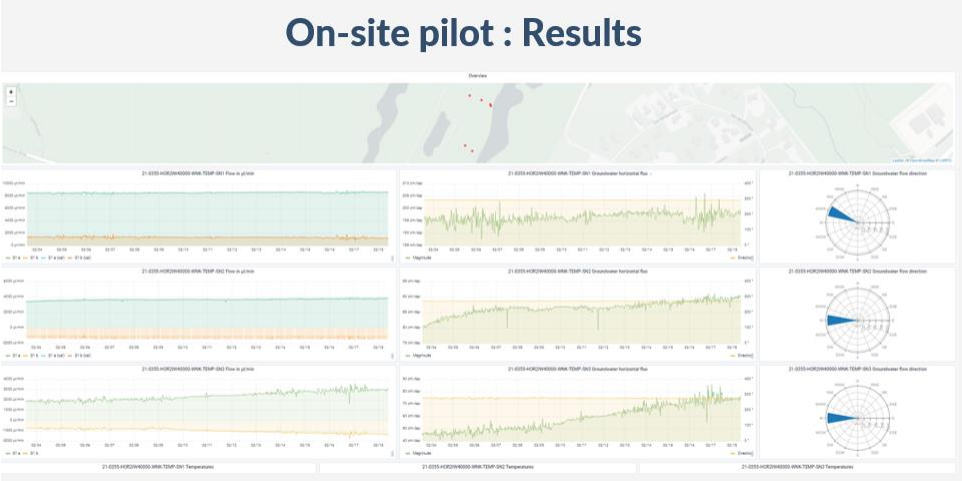
De iFLUX digitale sensor en zijn nieuwe sensoren die semi- continu grondwaterstromingssnelheid en –richting meet. Er is een probe die de verticale flux meet en een probe voor het meten van horizontale grondwater flux.



Figuur 15: iFLUX digitale sensor

De meting is een temperatuur gebaseerde meting in een gesloten systeem. Hiervoor zijn één of twee microfluid flow chips, respectievelijk in de probe voor verticale en horizontale flux probe, ingebouwd.

De horizontale sensor wordt geplaatst in een prepack filter en de verticale rechtstreeks in de bodem. De metingen worden doorgestuurd met IoT communicatie en beschikbaar gesteld in een dashboard, in real-time.



Figuur 16: voorbeeld van dashboard met de real-time data van de digitale iFLUX sensoren

De gemeten waarden in de chip worden ook hier gecorrigeerd voor de stroombaanafbuiging.

De metingen betreffen puntmetingen. Het is dus belangrijk om de doelstelling van de metingen voorafgaandelijk goed te kennen en aantal, locatie en duur van de metingen hierop af te stemmen.

3 WERKPAKKET 3

Samenvatting

In de wijk Wondelgem in Gent, op een afstand van circa 500 meter van het havengebied, is in het verleden een teer- en carbon-black fabriek aanwezig geweest. Als gevolg van de industriële processen en calamiteiten is de bodem verontreinigd geraakt met verschillende koolwaterstoffen. Er is een grote restverontreiniging achtergebleven, waarbij het verontreinigde grondwater in het kanaal de Lieve stroomt. Daardoor voldoet het oppervlaktewater niet aan de kwaliteitseisen en is er sprake van een ecologisch risico. Het doel van werkpakket 3 is, om met een duurzame en op de natuur gebaseerde maatregel de oppervlaktewaterkwaliteit structureel te verbeteren. Deze maatregel heeft vorm gekregen in een reactieve mat, gevuld met adsorberende materialen van natuurlijke oorsprong, de *Natural Catch*[TAUW]. Deze reactieve mat heeft drie nature-based pijlers:

1. De natuurlijke drainage capaciteit van het kanaal als drijvende kracht;
2. Het gebruik van natuurlijke materialen als adsorbent en passieve adsorptie;
3. Een biologisch actieve zone op het grensvlak van mat en oppervlaktewater voor aerobe afbraak.

Na een voorstudie, het ontwerp en de aanleg op de bodem van de Lieve is de reactieve mat op basis van groene adsorbens gedurende 2 jaar gemonitord in het kader van RESANAT. Hieruit volgt dat een reactieve mat in de vorm van een Natural Catch[TAUW] de kwaliteit van het oppervlaktewater aanzienlijk kan verbeteren. Bovendien blijkt het de meest duurzame oplossing vergeleken met de alternatieven zoals ontgraving en (beperkte) grondwateronttrekking. Tot slot is uit de studie gebleken dat er aan een aantal kritische factoren moet worden voldaan om een reactieve mat langdurig succesvol in te zetten.

3.1 INLEIDING

3.1.1 Veralgemeende probleemstelling & oplossing

Werkpakket 3, de ontwikkeling en toepassing van de reactieve mat, legt zich toe op de situatie waarbij er sprake is van een negatieve beïnvloeding van drainerende oppervlaktewaterkwaliteit door langdurige instroom van verontreinigd grondwater. Hierbij kan de situatie zelfs verder verslechteren door het verwijderen van bagger voor het verbeteren van de waterafvoer in het kader van klimaatadaptieve maatregelen. Consequentie hiervan is het mogelijk optreden van humane en ecologische risico’s en het niet voldoen aan de Kaderrichtlijn Water.

Voorbeelden van locaties waarbij dit zich kan voordoen zijn:

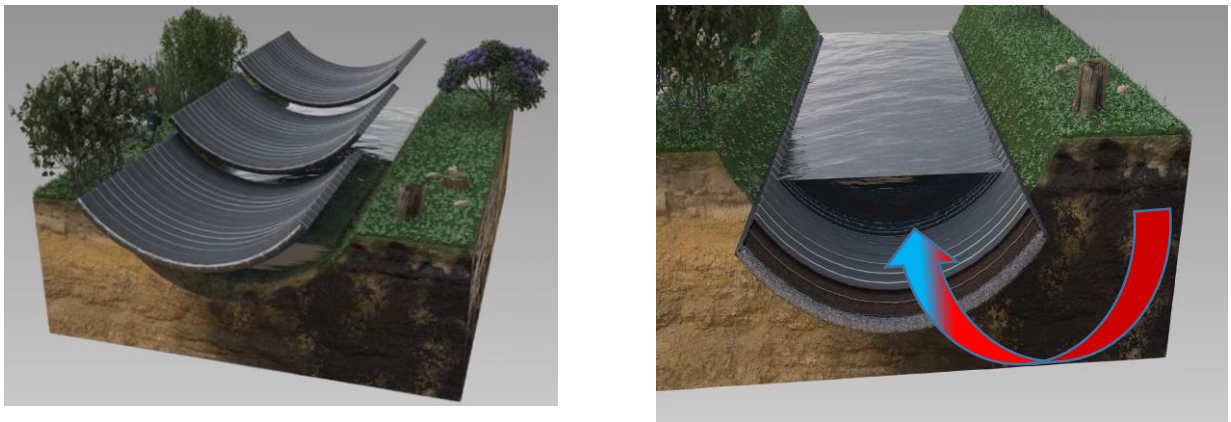
- Restverontreiniging op industrielocaties en brownfields;
- Chemische stortplaatsen;
- Landbouwarealen (pesticiden, fosfaat).

In het proefopzet werd uitgegaan van de piste om een sterke verbetering van de waterkwaliteit te kunnen realiseren door een waterdoorlatende geotextielconstructie gevuld met adsorptiemateriaal op de waterbodem aan te brengen; de reactieve mat (voor een impressie wordt verwezen naar Figuur 1Figuur 17). De reactieve mat kent daarbij drie nature-based principes:

- De natuurlijke instroom van verontreinigd grondwater : Er is geen pomp nodig;
- De adsorptie van verontreiniging aan een natuurlijk (groen) materiaal;
- De biologische afbraak op het aerobe/anaerobe grensvlak op de mat (micro-habitat).

De voordelen van deze aanpak zijn de relatief lage operationele kosten (kosteneffectiviteit) en de geringe milieu-voetafdruk (een passief, langdurig werkzaam systeem). Hiermee wordt de inzet vermeden van de klassieke actieve saneringstechnieken met intensiever gebruik van energie en grondstoffen.

De techniek wordt getest met een pilootproject op een locatie in Gent, Vlaanderen.



Figuur 17. Impressie van reactieve mat en werking

3.1.2 Algemeen kader werkpakket 3

Deze techniek past binnen een aantal kaders: wereldomvattend, Europees en nationaal.
Allereerst past het concept binnen de Sustainable Development Goals van de United Nations, in het bijzonder:

- SDG 3 - Good Health and Well-Being: het voorkomen van humane risico’s;
- SDG 6 - Clean Water and Sanitation: verbetering van waterkwaliteit door reductie van verontreiniging;
- SDG 12 - Responsible Production and Consumption: 1) minimalisatie van gebruik van fossiele brandstoffen, materialen (incl. productie) en chemicaliën en van afvalproductie; 2) (her)gebruik van natuurlijke bronnen;
- SDG 13 - Climate action: de reactieve mat maakt de herontwikkeling van beken, sloten en kanalen mogelijk waarmee de directe omgeving beter ontwaterd wordt;
- SDG 14 - Life below water: bescherming van aquatisch leven door eliminatie en/of beheersing van onacceptabele ecologische risico’s.

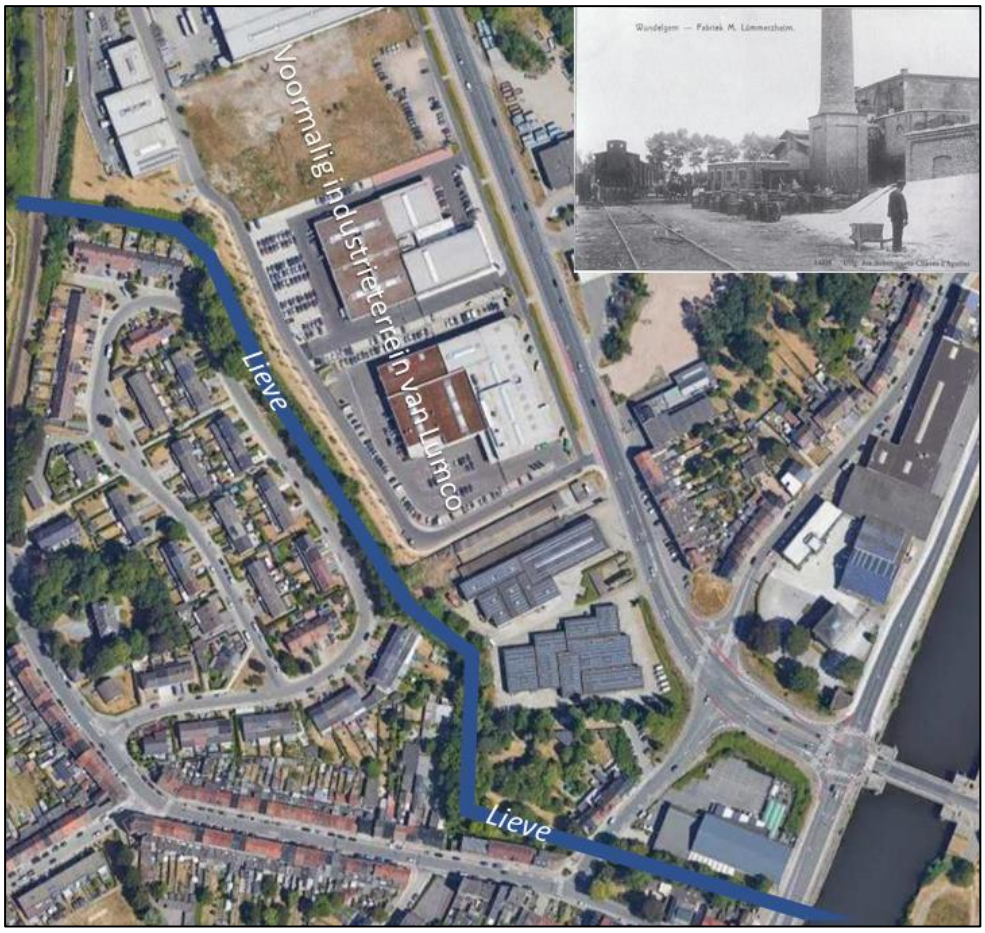
Verder bestaat tegenwoordig de internationale standaard ISO 18504 voor Duurzame Sanering, waarbij de definitie van duurzame sanering is:
"Elimination and/or control of unacceptable risks in a safe and timely manner whilst optimising the environmental, social and economic value of the work." Voor de reactieve mat geldt dat de milieuwaarde ('Planet') en de economische waarde ('Prosperity') van het werk zijn geoptimaliseerd ten opzichte van conventionele saneringstechnieken (aantoonbaar als onderdeel van WP6).

Binnen de EU geldt de Kaderrichtlijn Water die als doel heeft om de kwaliteit van oppervlakte- en grondwater in Europa te waarborgen. Voor de reactieve mat geldt dat de oppervlaktewaterkwaliteit sterk wordt verbeterd waardoor de overschrijding van normen wordt geëlimineerd of geminimaliseerd. Daarbij wordt getoetst aan milieukwaliteitsnorm 'maximaal aanvaardbaar' (MAC-MKN) en milieukwaliteitsnorm 'jaargemiddelde' (JG-MKN) die zijn vastgesteld in Vlarem II - Algemene milieukwaliteitsnormen voor meren en rivieren (Bijl. 2.3.1 art. 3) en in het rvs-zoeksysteem van het RIVM.

De toepassing van deze techniek past binnen de EU-regelgeving en het nationale en regionale milieubeleid van respectievelijk Nederland en Vlaanderen. De vraag is wel of deze techniek in elk EU-land inzetbaar is. De techniek betreft immers een 'end- of-pipe' maatregel en is risico-gebaseerd. Niet alle EU-landen kennen een bodembeleid dat risico-gebaseerd is voor historische verontreinigingen.

3.1.3 Onderzoekslocatie

De onderzoekslocatie is gelegen in Gent, in de wijk Wondelgem, op een afstand van circa 500 meter van het havengebied. Als gevolg van de industriële destillatie van teer en de productie van carbon-black en asfalt in het verleden door Lumco, inclusief een calamiteit met één van de opslagtanks, is de bodem op een terrein direct ten oosten van kanaal de Lieve verontreinigd geraakt met alifatische en mono- en polyaromatische koolwaterstoffen, met name benzeen, C6-C10 (lichte fractie van minerale olie) en meerdere PAK-componenten. Deze stoffen maakten als grondstof deel uit van het productieproces.



Figuur 18. Ligging van de onderzoekslocatie: de Lieve en de voormalige Lumco-site

Ondanks een sanering door ontgraving van een deel van de grondverontreiniging, die is uitgevoerd mede met het oog op de herontwikkeling van het voormalige industrieterrein, is er sprake van restverontreiniging in de bodem met puur productspots en verontreinigd grondwater. Door direct contact met puur product én door migratie van de ondiepe grondwaterverontreiniging naar het kanaal, raakte zowel de waterbodem (het sediment) als het oppervlaktewater verontreinigd. Het oppervlaktewater is beïnvloed over een lengte van bijna 600 meter. Bewoners werd gevraagd om zowel contact met het water als de oevers van de Lieve ter hoogte van een traject van 200 meter te vermijden. Uit onderzoek bleek bovendien dat er sprake was van een ecologisch risico.

Na verwijdering van het zwaar verontreinigde sediment uit de Lieve in 2019 in het kader van waterbeheer (klimaatadaptatie), is de afvoer- en drainagecapaciteit van het kanaal toegenomen. Het resultaat was een verdere toename van de concentraties verontreinigende stoffen in het kanaal door toename van de instroom van verontreinigd grondwater, waarbij voor PAK tot 300 maal de milieukwaliteitsnorm voor oppervlaktewater werd overschreden.

Aangezien deze situatie grotendeels voldoet aan de probleemstelling zoals geschetst in paragraaf 3.1.1, lijkt deze locatie geschikt voor het ontwerp en de inzet van een reactieve mat. Het maatschappelijk- en milieuprobleem is evident en de situatie in zowel ruimtelijke, hydrologische als organisatorische zin leent zich uitermate goed voor het testen van deze techniek. De enige ‘maar’ is de aanwezigheid van resterend puur product in de bedding en de oevers aangezien de reactieve mat zich primair richt op verontreinigingen in oplossing, met het oog op het adsorptiemechanisme, de adsorptiecapaciteit en de gewenste levensduur van de reactieve mat.

Die technische levensduur bepaalt uiteindelijk de duurzaamheid (incl. kosteneffectiviteit). Toch is er besloten om voor deze locatie te kiezen en dat heeft mede te maken met de mogelijkheid op deze plek om op korte termijn het werkingsprincipe van een reactieve mat aan te kunnen tonen. RESANAT heeft immers een beperkte looptijd.

3.2 OPZET

3.2.1 Conceptueel model van de pilot

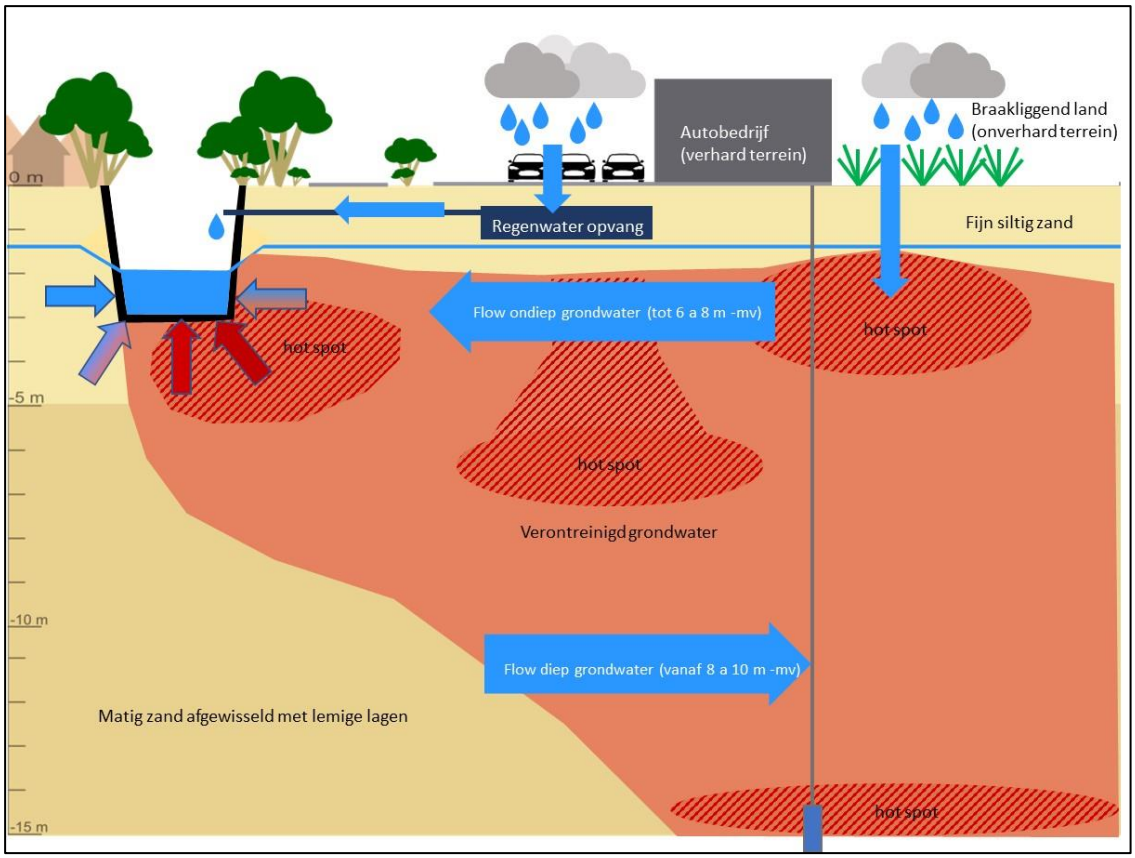
3.2.1.1 Terreinkarakteristieken

Op basis van meerdere locatiebezoeken en het veldonderzoek (zie paragraaf 3.2.1.2) kan het terrein als volgt worden beschreven. Zie hiervoor ook de door TTE opgestelde schematisatie in Figuur 19.

De bodem ten oosten van de Lieve bestaat uit een fijn siltig zand tot een diepte van ongeveer 5 à 6 m -mv, met daaronder matig zand afgewisseld met lemige lagen. De grondwaterstand is aanwezig op een diepte van 1,5 tot 2,5 m-mv, afhankelijk van seizoensgebonden fluctuaties.

In de loop der jaren raakte de Lieve verstopt door de vorming van een dikke verontreinigde sliblaag. Deze laag is in 2019 verwijderd in het kader van sanering en waterbeheer (klimaatadaptatie). Het verschil van de stijghoogte tussen het ondiepe grondwater en het huidige oppervlaktewater van de Lieve, na ruiming, bedraagt doorgaans 0,2 tot 0,3 m en wijst op een stromingsrichting van het grondwater naar het oppervlaktewater. Hieruit kan worden afgeleid dat de ondiepe grondwaterverontreiniging vanaf het voormalige industrieterrein (bronzone) naar de Lieve (receptor) stroomt. De diepte tot waar de Lieve grondwater draineert, wordt verondersteld ongeveer 6 m-mv te zijn. Het diepere grondwater stroomt in tegengestelde richting (en wordt via een separaat saneringsspoor aangepakt).

Op de verharde terreinen van de naastgelegen autobedrijven (lease/verkoop) wordt het hemelwater opgevangen in een ondiep systeem en direct geloosd op de Lieve, zonder in contact te komen met de bodem en de grondwaterverontreiniging. Bij hevige neerslag kan dit leiden tot een snelle verdunning van de verontreiniging in de Lieve.



Figuur 19. Schematische voorstelling van situatie bodemverontreiniging en de Lieve

3.2.1.2 Specifieke verontreinigingssituatie

Voor het vastleggen van de initiële verontreinigingssituatie heeft het consortium een veldstudie verricht naar de locatiespecifieke omstandigheden op de locatie van de Lieve, nabij het voormalige industrieterrein. Allereerst werden langs de oostelijke oevers van de Lieve over een lengte van ongeveer 150 meter metingen uitgevoerd door Witteveen+Bos met EnISSA-OIP en -MIP tot een diepte van 8 m-mv, waarbij niet alleen de verontreinigingssituatie, maar ook de bodemopbouw werd bepaald. Op basis van deze resultaten werden vaste peilbuizen geïnstalleerd door TAUW en werden monsters van grondwater en oppervlaktewater genomen en geanalyseerd, zowel vóór als na verwijdering van het sediment. Tenslotte werd door iFLUX met samplers en sensoren de waterflux en verontreinigingsflux bepaald van de instroom van verontreinigd grondwater in het oppervlaktewater.

Uit de EnISSA-OIP(UV) metingen bleek dat er zeer waarschijnlijk puur product aanwezig is in de bodem op de oostelijke oever in het traject OIP5 – OIP8 (zie foto onder Tabel 1). Aan de stroomopwaartse noordzijde bleken OIP-0 en aan de zuidzijde OIP-10 afperkend voor de bodemverontreiniging.

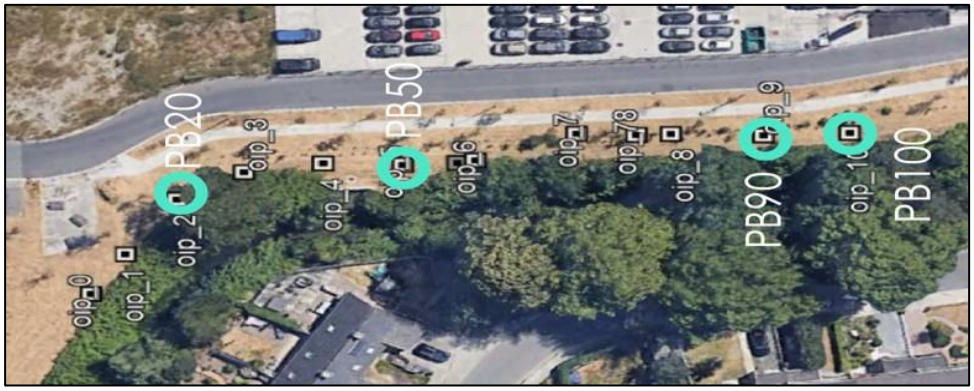
De peilbuizen PB20, PB50, PB90 en PB100 zijn in oktober 2019 door TAUW geplaatst ter hoogte van respectievelijk OIP-2, OIP-5, OIP-9 en OIP-10. In tabel 3.1 zijn de grondwaterconcentraties opgenomen zoals gemeten in maart 2020 (na ruiming en voorafgaand aan de aanleg van de reactieve mat) voor enkele relevante verontreinigingen in de oostoever van de Lieve.

Hieruit volgt dat ter hoogte van PB100 inderdaad geen grondwaterverontreiniging meer aanwezig is en dat de hoogste concentraties voorkomen ter hoogte van PB50. Het gaat daar onder andere om 38.000 µg/l benzeen, 60.000 µg/l C6-C10 en 280 µg/l acenafteen. De grondwaterconcentraties ter hoogte van PB50 zijn sterk toegenomen ten opzichte van de situatie voorafgaand aan de ruiming van het slib uit de Lieve als gevolg van de verhoogde drainerende werking.

Vóór en na baggeren is de horizontale grondwater flux én massaflux bepaald door iFLUX, in november 2019 en maart 2020. Hiervoor zijn in peilbuizen PB20, PB50, PB90 en PB100 telkens op 2 dieptes metingen uitgevoerd met iFLUX samplers.
Hieruit volgt dat de horizontale stroming van het grondwater voorafgaand aan de ruiming gemiddeld 5,75 cm/d is (range <1-13 m/d), en na de ruiming 10,5 cm/d (range 9-12 m/d). Hiermee is op een directe wijze aangetoond dat de Lieve beter draineert na ruiming en dat de waterflux sinds de ruiming ook homogener is verdeeld over de volledige lengte van het onderzoekstraject.
Ook de horizontale massaflux in het grondwater is toegenomen. Zo is deze ter plaatse van PB50 voor benzeen met een factor 15 toegenomen en voor acenafteen met een factor 8. Opvallend is ook dat er in tegenstelling tot voor het baggeren, na baggeren een relevante massa flux aan minerale olie (C6-C40) is gemeten. Horizontaal gezien wordt er beduidend meer verontreiniging verplaatst richting de Lieve in het grondwaterpakket op 3-5 m -mv ten opzichte van de situatie voorafgaand aan de ruiming.

De initiële oppervlaktewaterconcentraties in de Lieve zijn (na ruiming en voorafgaand aan aanleg reactieve mat) in februari, maart en juni 2020 vastgesteld. De analyseresultaten van maart 2020 zijn gepresenteerd in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**. Hieruit volgt dat de grootste toename van concentraties van stroomopwaarts naar stroomafwaarts in de Lieve worden gemeten ter hoogte van meetpunt 203 voor BTEX, naftaleen en C6-C10. Voor PAK lijkt dat al bij meetpunt 202 het geval en blijft er over het traject tot 207 sprake van een geleidelijke toename.

Maart 2020	PB 20 (3,2-5,2 m -mv)	PB 50 (3,15-5,15 m -mv)	PB 90 (3,2-5,2 m -mv)	PB 100 (2,4-4,4 m -mv)
Benzeen	15	38.000	100	< 0,2
Tolueen	15	11.000	1,2	< 0,5
Ethylbenzeen	5,5	1.100	8	< 0,5
Xylenen	9,9	4.600	3,9	< 0,5
Naftaleen	240 / 270	6.100 / 7.200	13 / 16	0,14 / 0,2
Acenafteen	1,1	280	41	0,1
C6-C10	99	60.000	130	< 10



Tabel 1:Grondwaterconcentraties in oostelijke oever van de Lieve na ruiming in maart 2020 (in µg/l)

	201	202	203	204	205	206	207	208
Benzeen	< 0,2	<0,2	180	140	100	83	75	3,5
Tolueen	< 0,5	<0,5	56	30	20	16	16	8,2
Ethylbenzeen	< 0,5	1	6,1	6,9	7	5,9	5,4	3,2
Xylenen	< 0,5	1,7	27	23	21	17	16	9,3
Naftaleen	0,2	12	46	57	60	54	53	26
PAK (16 EPA)	0,66	25	57	77	86	80	93	79
Acenafteen	0,12	3,9	3,2	6,3	7,5	9,4	10	15
C6-C10	< 10	<10	280	210	160	130	120	61

Tabel 2. Oppervlaktewaterconcentraties in de Lieve na ruiming in maart 2020 (in µg/l)

Als we vervolgens de in de periode februari – juni 2020 maximaal gemeten concentraties toetsen aan de kwaliteitsnormen uit de Europese Kaderrichtlijn Water voor oppervlaktewater (MKN-waarden), dan is duidelijk dat er sprake is van overschrijdingen voor meerdere stoffen, waarbij de PAK-verbindingen fenantreen, pyreen en acenafteen overschrijden met een factor hoger dan 100 (zie Tabel 3). Hieruit volgt de noodzaak tot maatregelen.

Stof	Concentratie max. (µg/l)	Kwaliteitsnorm (µg/l)	Overschrijdingsfactor
Anthraceen (3-ring)	4,1	0,1 *	41
Fenanthreen (3-ring)	25	0,1 **	250
Fluorantheen (4-ring)	8,5	0,12 *	71
Pyreen (4-ring)	4,4	0,04 **	110
Benzo(a)anthraceen (4-ring)	0,52	0,3 **	1,7
Benzo(k)fluorantheen (5-ring)	0,063	0,017 *	4
Benzo(g,h,i)peryleen (6-ring)	0,044	0,0082 *	5
Benzo(b)fluorantheen (5-ring)	0,14	0,017 *	8
Acenafteen (3-ring)	18	0,06 **	300
Fluoreen (3-ring)	14	2 **	7
C6 - C10 (vluchtige m. olie)	280	200 ***	1,4
Benzeen	180	50 *	3,6
Xylenen (som)	27	40 *	0,7
Naftaleen (2-ring)	91	130 *	0,7

* MAC-MKN; ** JG-MKN; *** Besluit KMO 1994

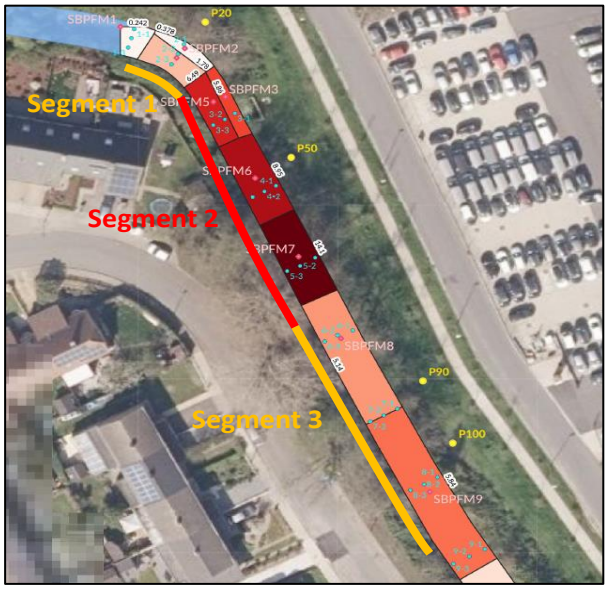
Tabel 3. Toetsing maximale oppervlaktewaterconcentraties 1e helft 2020 aan kwaliteitsnormen (MKN-waarden)

Tot slot is de gemeten influx, door gebruik te maken van verticale fluxsamplers in de waterbodem, opgenomen in Tabel 4. Dit heeft geleid tot een verhelderend inzicht in de verontreinigingsvrachten die het kanaal dagelijks ontvangt (tot maximaal 100 mg/m^2 waterbodem per dag) en de verdeling van de instromende vrachten over het kanaaltraject.

Uit het vooronderzoek blijkt dat over een kanaalvak van circa 110 meter en een oppervlakte van 660 m^2 maatregelen moeten worden genomen om de oppervlaktewaterkwaliteit te beschermen.
Uit zintuiglijke waarnemingen tijdens de veldwerkzaamheden na ruiming van de Lieve blijkt overigens dat plaatselijk in de waterbodem nog resterend vrij product aanwezig is: er zijn dunne oliefilmpjes aan het wateroppervlak waargenomen.

	Segment 1	Segment 2	Segment 3
Benzeen	0,00	11,8	0,00
Xylenen (som)	0,17	20,2	0,04
Naftaleen	2,36	28,4	0,35
Fenantreen	7,93	17,8	5,17
Pyreen	2,21	4,59	4,83
Acenafteen	4,98	7,24	2,24
C6-C10	0,00	3,02	0,00

Tabel 4. Gemeten influx van verontreiniging in oppervlaktewater na ruiming (in mg/m2 per dag)



Figuur 20: Aanduiding segmenten De Lieve

3.2.1.3 Externe factoren

Communicatieproces
Met betrekking tot toestemming voor de inzet van de reactieve mat en het groenonderhoud van de oever (voor de bereikbaarheid van de reactieve mat) hebben wij te maken met de Stad Gent en Farys als eigenaar en beheerder van de waterloop.

De bewoners op de westoever van de Lieve ter hoogte van het onderzoekstraject werden periodiek geïnformeerd over de werkzaamheden en de voortgang via bewonersbrieven.
Locatieontwikkelingen
Sinds het tweede kwartaal van 2021 is er een nieuw 3e autobedrijf (lease/verkoop) gevestigd op het tot dan toe braakliggende deel van het Lumco-terrein ten noorden van het onderzoekstraject. Mogelijk heeft de nieuwe verharding invloed op de geohydrologie door een verlaging van de waterflux en daarmee de verontreinigingsflux. Dit is een aandachtspunt.

3.2.1.4 (Technisch) ontwerp en inrichting van het systeem

Literatuuronderzoek naar groene adsorptiematerialen
Op basis van een literatuuronderzoek heeft TAUW gekeken naar de geschiktheid van natuurlijke en/of secundaire materialen om te gebruiken in de reactieve mat als adsorbent voor de instromende verontreiniging. Hierbij is gelet op de volgende materiaaleisen:

- Het moet **redelijk inert** zijn;
- Het moet een **behoorlijke adsorptiecapaciteit** hebben voor de betreffende verontreiniging;
- Het **soortelijk gewicht** (g/m3) moet **in balans** zijn **met de adsorptiecapaciteit**, zodanig dat de dikte van de reactieve mat beperkt kan blijven;
- De **doorlatendheid** moet **hoger** zijn **dan dat van de natuurlijke waterbodem;**
- Het moet **goedkoper** zijn dan hoogwaardige (commerciële) adsorptiematerialen;
- Het materiaal moet **minder milieubelastend** zijn dan hoogwaardige (commerciële) adsorptiematerialen (carbon footprint, hernieuwbaarheid, lokale verkrijgbaarheid).

Op basis van deze eisen zijn we tot een eerste selectie gekomen van materialen om te testen in het laboratorium:

- Geplette hazelnootdoppen;
- Biogranulaat uit thermische slibdroger (restproduct RWZI);
- Poederkoolslib (restproduct drinkwaterwinning);
- Biochar (gepyrolyseerd resthout);
- Dennenschors (fijne fractie);
- Gezeefd witveen/zodenturf.

Laboratoriumonderzoek groene adsorptiematerialen
In het testlaboratorium van TAUW is in eerste instantie onderzoek gedaan naar de adsorptiecapaciteit van de eerder genoemde materialen. Deze is bepaald aan de hand van schudproeven. Er zijn meerdere batches ingezet bestaande uit 1 liter flessen met steeds een vaste hoeveelheid verontreinigd grondwater afkomstig van de locatie in Gent en verschillende hoeveelheden adsorptiemateriaal (variabele L/S verhouding). De batches werden, in horizontale positie, 72 uur geschud op een schudmachine. De schudflessen hebben hierna enkele uren rechtop gestaan om het adsorbens te laten bezinken. Vervolgens is de bovenliggende vloeistof rustig over een metalen zeef afgeschonken om de drijvende delen tegen te houden.

Om de bewerking voor alle monsters gelijk te houden, is dit proces ook gevolgd voor de blanco's. De afgeschonken vloeistof, het eluaat, is verzonden naar het AL-West laboratorium voor analyse op BTEX, PAK en C6-C10.

Hieruit volgde:

- Hazelnootdoppen adsorberen de verontreinigende stoffen in beperkte en sterk wisselende mate.
- Biogranulaat blijkt verontreiniging in de vorm van C6-C10 toe te voegen en een behoorlijke stank af te geven. Bovendien was de adsorptiecapaciteit voor BTEX te beperkt.
- Poederkoolslib bleek maximaal te adsorberen. Aan de hand van een aanvullende doorlatendheidstest bleek echter een k-waarde van 0,015 m/d. Dit is te laag om toegepast te kunnen worden in de Lieve. De doorlatendheid van de waterbodem ligt immers tussen 0,5 en 5 m/d.
- Biochar is sterk adsorberend voor alle verontreinigende stoffen tot een hoge L/S verhouding. Bij L/S verhoudingen tot circa 230 worden alle stoffen voor 95 tot 100% geadsorbeerd. Bij een L/S verhouding van circa 570 worden de meeste stoffen voor 85 tot 97% geadsorbeerd en benzeen en C6-C10 voor 68 tot 73%.
- Dennenschors adsorbeert de verontreinigende stoffen in wisselende mate. Benzeen, xylenen en C6-C10 worden bij bijna alle L/S verhoudingen voor minder dan 50% geadsorbeerd. Alleen voor naftaleen en acenafteen (83-88%) worden goede resultaten behaald.
- Zodenturf (een veensoort) adsorbeert de verontreinigende stoffen gemiddeld ruim 6% beter dan dennenschors. Hoewel benzeen en C6-C10 voor minder dan 50% worden geadsorbeerd, is de score voor ethylbenzeen, naftaleen en acenafteen 86-95%. De resultaten zijn minder goed en wisselender dan voor biochar.

Figuur 21. De drie best geteste adsorptie materialen

Berekeningen voor ontwerp

Aan de hand van de resultaten van de adsorptieproeven in het laboratorium en van de verticale fluxmetingen zijn berekeningen uitgevoerd naar de verwachte levensduur van de reactieve mat bij een dikte van 30 cm. Een maximale dikte van 30 cm van de mat is een eis om de watervoerendheid van de Lieve niet te verstoren. De levensduur van de mat, enkel en alleen op basis van adsorptie, en dus zonder rekening te houden met biologische afbraak, wordt daarbij mede bepaald door de eisen (normen) die gelden voor de meest kritische verontreiniging in het oppervlaktewater.

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de fluxen die representatief zijn voor de 3 onderscheiden segmenten (zie Figuur 20).
Voor segment 1 zijn PAK bepalend. Met biochar wordt het hoogste rendement gehaald van 97% gedurende 9 jaar voor fenantreen en 90% gedurende 16,5 jaar voor acenafteen.
Voor segment 2 zijn benzeen, C6-C10 en PAK bepalend. Met biochar wordt het hoogste rendement gehaald van 75% voor benzeen gedurende 16,5 jaar, 73% voor C5-C10 gedurende 100 jaar, 96,5% voor fenantreen gedurende 17 jaar en 90% gedurende 11 jaar voor acenafteen.
Segment 3 kenmerkt zich door weinig tot geen instroom via het grondwater van BTEX en C6-C10. Hier wordt dus alleen gefocust op PAK. Daarvoor volstaat zodenturf als laagwaardiger en goedkoper alternatief voor biochar. Het rendement hiervan is 85% gedurende 12,5 jaar voor acenafteen; de levensduur voor fenantreen en pyreen was niet te berekenen gezien de hoge adsorptie bij alle L/S verhoudingen van 98-100% (verwachting > 15 jaar).

Ontwerp
Tenslotte is aan het ontwerp van de reactieve matconstructie gewerkt in nauw overleg tussen de producent van het benodigde geotextielweefsel, Envisan (Jan de Nul) als aannemer en TAUW als milieukundig adviseur, ondersteund door een student van de TU Twente. De ontwerpprocedure was complex vanwege de vele producteisen.

Aspecten die een rol spelen zijn het gewicht van de mat (zowel droog als nat), het hefvermogen van het materieel, de neiging van het adsorptiemateriaal om (initieel) te gaan opdrijven, soort en hoeveelheid ballast om (initiële) opwaartse druk te weerstaan, de wijze van vullen van de geotextielconstructie, het afdichten van de constructie na vullen, de recycleerbaarheid van de matten, de duurzaamheid van het geotextiel, de wijze van verankering, het waarborgen van een homogene verdeling van het adsorbent en het voorkomen van voorkeursstroming van grondwater via de naden. Na een eerste prototype is uiteindelijk besloten om met 4 verschillende afmetingen matelementen te werken, variërend van 3 tot 5 meter breed en 6 tot 7 lang, rekening houdend met wisselende breedte van de Lieve, bochten en ruimtelijke hinder door bomen. Naast de eenvoud van vullen, tillen en installeren, heeft het werken met elementen het voordeel dat ze gemakkelijk kunnen worden vervangen, zodra ze met verontreinigingen zijn geladen, of verwijderd kunnen worden wanneer ze niet meer nodig zijn. Elk element bestaat uit een dubbele laag stof (boven- en onderlaag), ingedeeld in meerdere compartimenten, vergelijkbaar met een met dons gevulde winterjas. De meeste compartimenten worden gevuld met adsorptiemateriaal, en enkele worden gevuld met ballastmateriaal om de opwaartse druk tegen te gaan. De overgang tussen de individuele matelementen is voorzien van ondoordringbare foliestroken om kortsluiting van verontreinigd grondwater tussen de elementen te voorkomen.

Bodemsaneringsproject
In april 2020 is door een onafhankelijke bodemsaneringsdeskundige in opdracht van de OVAM het bodemsaneringsproject geleverd voor de randvoorwaarden en uitgangspunten, de onderbouwing van de keuze van de saneringsvariant met reactieve matten, de uitwerking van de aanleg en vergunningsplichtige activiteiten (‘*Tweede gefaseerd bodemsaneringsproject De Lieve te Gent, Waterloop en linkeroever De Lieve stroomafwaarts spoorweg Gent, Deel pilootproef plaatsing reactieve matten*’). Op 30 april 2020 is dit saneringsproject goedgekeurd door de OVAM als vergunningverlenende overheid.

3.2.2 Opvolging en procesevaluatie

3.2.2.1 Specifieke saneringsdoelstellingen

De formele doelstelling is voldoen aan de milieukwaliteitsnormen voor oppervlaktewater (Europese KaderRichtlijn Water) of minimum de kwaliteit van het instromende oppervlaktewater niet negatief te beïnvloeden. De in het bodemsaneringsproject opgenomen te bereiken resultaten na uitvoering van de bodemsaneringswerken zijn in een overzicht in navolgende **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** weergegeven (tabel uit het bodemsaneringsproject van april 2020). De in deze tabel genoemde initiële maximale waarden betreffen overigens de concentraties zoals gemeten voorafgaand aan de ruiming van de het slib uit de Lieve. Deze zijn niet representatief voor de nulsituatie na ruiming en voorafgaand aan aanleg reactieve mat. Deze liggen fors hoger. Hiervoor wordt verwezen naar paragraaf 3.2.2.2 (inclusief het op basis daarvan te verwachten eindresultaat).

Referentie sanering: Pilootproef plaatsing reactieve matten						
Medium	**Parameter**	**Top (m-mv)**	**Basis (m-mv)**	**Eenheid**	**Initiële max. waarde**	**Te verwachten eindresultaat waarde***
Oppervlakte-water	naftaleen			µg/l	9,1	2
	Benzo(a)pyreen				0,1	0,00017
	fenantreen				4,3	0,1
	fluoranteen				2,1	0,0063
	benzo(a)antraceen				0,36	0,3
	benzo(b)fluoranteen				0,19	0,00017
	benzo(k)fluoranteen				0,08	0,00017
	Benzo(ghi)peryleen				0,05	0,00017
	Indeno(1,2,3-cd)pyreen				0,06	0,00017
	acenafteen				1,4	0,06
	pyreen				1,1	0,04
	benzeen				12	10

Tabel 5: Te bereiken resultaten van de bodemsaneringswerken (saneringsdoelstelling)

* Onder de te verwachten eindresultaatwaarde wordt hier verstaan de basis milieukwaliteitsnorm voor oppervlaktewater conform bijlage 2.3.1 van Vlarem II (milieukwaliteitsnorm gemiddelde voor rivieren en meren, JG-MKN)

1) De waarden genoemd onder de kolom 'Initiële max. waarde' is gebaseerd op analyses van het oppervlaktewater voorafgaand aan de ruiming van het slib uit de Lieve. Deze zijn niet representatief voor de nulsituatie na ruiming en voorafgaand aan aanleg reactieve mat (zie paragraaf 3.2.2.2).

Hierbij dient er tevens rekening gehouden te worden dat de Lieve stroomopwaarts tevens licht verhoogde concentraties kan vertonen ten opzichte van de milieukwaliteitsnorm. De kwaliteit van het instromend oppervlaktewater mag niet negatief beïnvloed worden. Als doelstelling wordt in dergelijke gevallen de gemiddelde instromende concentratie genomen + 10% (X + 10%).

3.2.2.2 Hypothese & meetstrategie

3.2.2.2.1 Hypothese

Zoals opgenomen onder paragraaf 3.2.1.4 wordt op basis van de labostudie een bepaald zuiveringsrendement verwacht van de reactieve mat. Voor de gidsparameters is dat:

- Acenafteen: 90%
- Fenantreen: 97%
- Benzeen: 75%
- C_6-C_{10}: 73%.

De maximale oppervlaktewaterconcentraties gemeten in één van de meetpunten 203, 205, 206 of 207 tijdens de nulsituatie na ruiming en voorafgaand aan de aanleg van de mat (een gemiddelde van de nulmetingen in februari, maart en juni 2020) zijn opgenomen in **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.**. In de tabel is tevens de milieukwaliteitsnorm opgenomen. Hieruit volgt dat een aantal PAK, ondanks het verwachte hoge zuiveringsrendement, waarschijnlijk niet zullen gaan voldoen aan de milieukwaliteitsnorm (benoemd als 'te bereiken resultaat' in het saneringsplan, conform tabel 3.5). Van BTEX wordt verwacht dat voldaan zal worden aan de milieukwaliteitsnorm MAC-MKN, maar de JG-MKN kan blijvend overschreden worden door benzeen. Voor C6-C10 zal de afgeleide milieukwaliteitsnorm behaald worden.

Parameter	Concentratie nulsituatie (µg/l, max)	Verwachte concentratie met mat (µg/l, max)	Milieukwaliteitsnorm (µg/l)
Acenafteen	11,2 (n=3)	1,12	0,06 (JG-MKN)
Fenantreen	7,3 (n=3)	0,22	0,1 (JG-MKN)
Benzeen	165 (n=3)	41	10 (JG-MKN) 50 (MAC-MKN)
C6-C10	267 (n=3)	72	200 (KMO, 1994)

Tabel 6: Te verwachten resultaten van de bodemsaneringswerken

3.2.2.2.2 Meetstrategie

Oppervlaktewaterkwaliteit

De nulsituatie van de oppervlaktewaterkwaliteit na ruiming van de Lieve en voorafgaand aan de aanleg van de reactieve mat is vastgelegd op basis van 3 metingen gedurende de eerste helft van 2020. Na de aanleg van de reactieve mat worden periodiek (3 a 4 keer per jaar en afhankelijk van tussentijdse resultaten) staalnames uitgevoerd van het oppervlaktewater. Stalen worden genomen ter plaatse van 4 meetpunten boven de matten (203, 205, 206 en 207), een meetpunt aan de stroomopwaartse zijde van de matconstructie (201) en een meetpunt aan de (verre) stroomafwaartse zijde van de matconstructie (208). De stalen van het oppervlaktewater worden geanalyseerd op:

- PAK
- C5-C10
- BTEX
- Fenolindex (indicator voor aerobe afbraak aromaten).

In het veld wordt het oppervlaktewater bemeten op:

- Temperatuur (T), geleidbaarheid (EC) en zuurgraad (pH)
- Redoxpotentiaal (Eh) en zuurstof (O_2).

Grondwaterkwaliteit
De nulsituatie van de grondwaterkwaliteit is op dezelfde momenten vastgelegd als voor het oppervlaktewater. Na de aanleg van de reactieve mat worden circa 2 keer per jaar staalnames uitgevoerd van het grondwater (de grondwaterkwaliteit wordt verwacht redelijk constant te zijn).

Stalen worden genomen uit 4 peilbuizen in de oever van de Lieve (PB20, PB50, PB90 en PB100). De grondwaterstalen worden geanalyseerd op:
- PAK
- C5-C10
- BTEX
- Fenolindex.

Bovendien wordt het grondwater in het veld bemeten op:
- Temperatuur (T), geleidbaarheid (EC) en zuurgraad (pH)
- Redoxpotentiaal (Eh) en zuurstof (O_2).

Micro-organismen
Om de activiteit van specifieke micro-organismen op het aerobe/anaerobe grensvlak op de mat te achterhalen, worden op 3 momenten tijdens de pilootproef oppervlaktewaterstalen genomen tegen het matoppervlak aan. Deze waterstalen worden geanalyseerd, via DNA-extracten, op de totale Eubacteriën en sulfaatreducerende bacteriën en worden via QuantArray®-Petro, een geavanceerde qPCR-methode, tevens 20 functionele genen gemeten die relevant zijn bij de biodegradatie van verschillende petroleum-gerelateerde componenten.

Flux-metingen
Zowel voorafgaand als direct na de ruiming van de Lieve zijn horizontale water- en massafluxmetingen uitgevoerd door iFLUX in de peilbuizen PB 20, 50, 90 en 100 om de stromingsrichting en snelheid van het grondwater en verontreiniging richting de Lieve op 3-5 m-mv aan te tonen (zie paragraaf 3.2.1.2).
Bovendien zijn na de ruiming, en voorafgaand aan de aanleg van de matconstructie, verticale water- en massafluxmetingen uitgevoerd doorheen de waterbodem, op basis waarvan een beeld ontstaat van de werkelijke instroom van verontreiniging, op basis waarvan de matdimensies en verwachte levensduur kunnen worden berekend en een nulsituatie voor de massaflux is vastgelegd.
Tijdens de pilootproef worden op het moment van toename van oppervlaktewaterconcentraties verticale fluxmetingen uitgevoerd op de matconstructie. De plaats van de fluxmetingen is gekozen op basis van de locatie van de concentratietoename in het oppervlaktewater en de uitgevoerde metingen met de digitale iFLUX flow sensor. Op basis van de massa fluxmetingen kan worden bepaald of en in welke mate er sprake is van doorslag door de betreffende mat en of er sprake is van verzadiging van de mat. Bij verzadiging dient de mat te worden vervangen.

Logboek
Voor de beoordeling van de meet- en analyseresultaten zijn tevens de volgende parameters gemeten, opgevraagd en genoteerd in een logboek:

- Weertype tijdens staalname;
- Hoeveelheid neerslag in de week voorafgaand aan staalname (weerarchief Gent - Meteoblue);
- Waterstand van zowel grondwater áls oppervlaktewater in m TAW;
- Stromingsrichting en -snelheid van het oppervlaktewater (eenvoudig bepaald door een halfgevuld flesje uit te zetten en afgelegde afstand en tijd op te nemen);
- Zintuiglijke waarneming van eventuele aanwezigheid oliefilmpjes op oppervlaktewater;

Deze parameters zijn van belang bij de interpretatie van meet- en analyseresultaten.

Periodieke inspectie van matconstructie en omgeving, en onderhoud
Door de partners Envisan en iFLUX, door de partijen die de milieukundige begeleiding en veldwerkzaamheden uitvoeren in opdracht van OVAM en door Farys / Stad Gent wordt periodiek de situatie ter hoogte van de matconstructie visueel beoordeeld. Het gaat daarbij om:

- Aanwezigheid van afgebroken boomtakken en illegale stort in de Lieve en belemmerende of schadelijke vegetatie op de oevers van de Lieve;
- Vernieling, opdrijving of verschuiving van het doek;
- Aanwezigheid van slib op het doek;
- Aanwezigheid drijflaag van olieachtige producten op oppervlaktewater.

Voor het onderhoud van het groen op de oevers (minimaal jaarlijks, bij voorkeur tweejaarlijks voor de bereikbaarheid), afgebroken boomtakken en illegale stort is Farys verantwoordelijk.
Voor het onderhoud aan en herstel van de matconstructie is Envisan verantwoordelijk.

3.2.2.3 Procesevaluatie

Implementatie reactieve mat in de Lieve
Uit de adsorptietesten en de gemeten influx werd duidelijk dat voor de segmenten 1 en 2 (zie de Figuur 20) biochar nodig is en dat voor segment 3, met een beperktere influx, zodenturf kan worden ingezet. De keuze voor zodenturf in plaats van biochar in segment 3 is gedaan om de werking van meerdere groene adsorptiematerialen in de praktijk te kunnen testen en met elkaar te kunnen vergelijken. Daarnaast zijn de kosten voor zodenturf lager dan biochar zodat ook de kostenefficiëntie van meerdere materialen kan worden vergeleken.

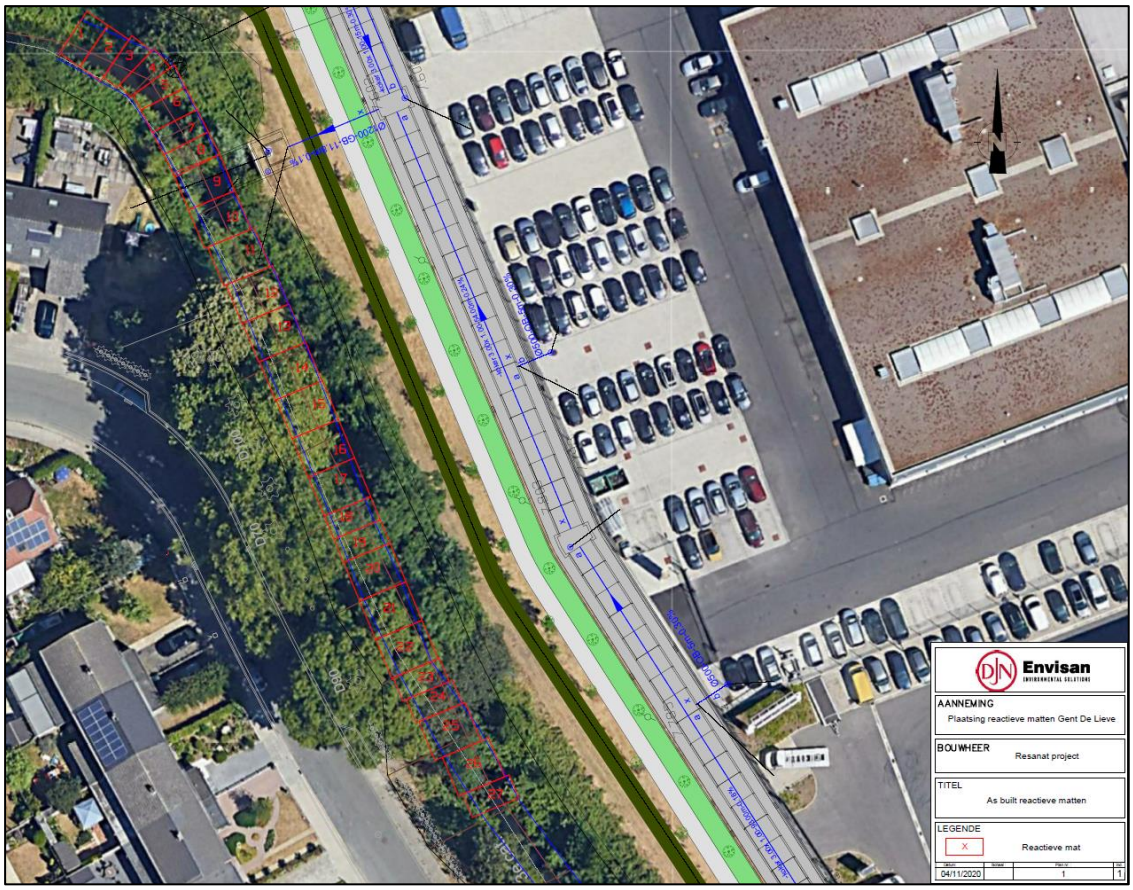
Om het adsorptiemateriaal op de gewenste plek te houden op de waterbodem van de Lieve, is een speciale geotextielconstructie ontworpen. Deze constructie moet voldoen aan een aantal eisen: veilig, vervangbaar, eenvoudig te vullen, afzinkbaar, goed te bevestigen, betaalbaar en betrouwbaar. Bovendien moet de constructie aan de vorm en maten van de Lieve voldoen. Om aan de eisen te kunnen voldoen is er, na intensief overleg over meerdere uitvoeringsvormen, voor gekozen om met losse matelementen te werken die in serie geplaatst, de totale constructie vormen.
De matelementen bestaan uit een dubbelgelaagd doek: een sterk geweven buitendeel voor de stevigheid en een fijn (non-woven) binnendeel dat de fijne adsorberende deeltjes binnenhoudt. Deze constructie is op maat gemaakt door een ervaren Nederlandse producent van geotextiel en is UV-bestendig. Elk matelement bestaat uit meerdere compartimenten (zie 1e afbeelding van Figuur 2222) om een homogene verdeling van het adsorptiemateriaal te garanderen.

Aan weerszijden is één compartiment vloeistofdicht afgewerkt om deze te kunnen vullen met ballastmateriaal, zodat de mat niet gaat opdrijven. Aan één zijde van een matelement is een ondoorlatende folieflap aangebracht die over het volgende matelement wordt heengetrokken om kortsluitstroming van grondwater tussen twee matelementen door te voorkomen. Tot slot zijn de matten voorzien van hijslussen.

In september 2020 zijn de lege matelementen naar de locatie vervoerd. Deze zijn door aannemer Jan de Nul/Envisan ter plaatse gevuld met het adsorptiemateriaal (biochar of zodenturf) en ballastmateriaal (fijn grind). Met een zogenaamde naai-els zijn de compartimenten vervolgens dichtgenaaid en zijn de matten in het kanaal gehesen en aan de oevers bevestigd (zie 2^{e} en 3^{e} afbeelding van Figuur 22). De matten gevuld met biochar zijn gebruikt over een kanaallengte van 65 meter (segment 1 en 2, noordelijke deel, mat 1-16) en de matten gevuld met zodenturf zijn gebruikt over een lengte van 45 meter (segment 3, zuidelijke deel, mat 17-27). De totale lengte van de constructie is daarmee circa 110 meter. De matten liggen voornamelijk op de kanaalbodem met een klein vouwgedeelte op de oevers. De matten zijn met lussen en pinnen verankerd in de oever.

In Figuur 23 is het totale traject opgenomen en zijn de 27 individuele matelementen te onderscheiden (rood gearceerd).

Figuur 22. Vullen en aanbrengen van de reactieve matten in de Lieve



Figuur 23. Traject en ligging van de matelementen in de Lieve

Uit het ontwerp-gerelateerd vooronderzoek, het ontwerpproces en de aanleg is het volgende naar voren gekomen:

- De fluxmetingen met de verticale fluxsamplers in combinatie met de adsorptiecapaciteitstesten in het laboratorium geven relevante input voor het uiteindelijk ontwerp (matdikte en levensduur);
- Nauw overleg tussen milieuadviseur, aannemer en producent is essentieel voor een haalbaar ontwerp op maat van een innovatieve constructie;
- Ontwerp en constructie van een reactieve mat kan bovendien niet zonder kennis van de specifieke locatiekenmerken (hellingshoek, afmetingen kanaal over gehele traject, waterdiepte, vegetatie/bomen, bereikbaarheid, oeverafwerking, etc.);
- Het vullen van de compartimenten in de matten onder zwaartekracht met behulp van een schans met platform (een ‘ramp’) verliep goed, maar was arbeidsintensiever en kostte meer tijd dan vooraf gedacht;
- Biochar kan makkelijk verstuiven. Vullen tijdens een periode met wind is daarom lastig. Bevochtigen kan helpen tegen verstuiving maar bemoeilijkt het opvullen van de compartimenten;
- De opwaartse kracht van het adsorbent zorgt voor drijfvermogen. Om dit te compenseren wordt ballastmateriaal aangebracht. In het geval van enkele matelementen bleek meer ballastmateriaal nodig dan op voorhand berekend om opdrijving te voorkomen. Dit is opgevangen door aanvullend één of twee van de compartimenten per mat te voorzien van een ondoorlatende buis met ballast. De adsorberende inhoud per mat varieert daarmee van 76 tot 87%.

3.3 RESULTATEN

3.3.1 Monitoringresultaten en interpretatie

3.3.1.1 Inleiding

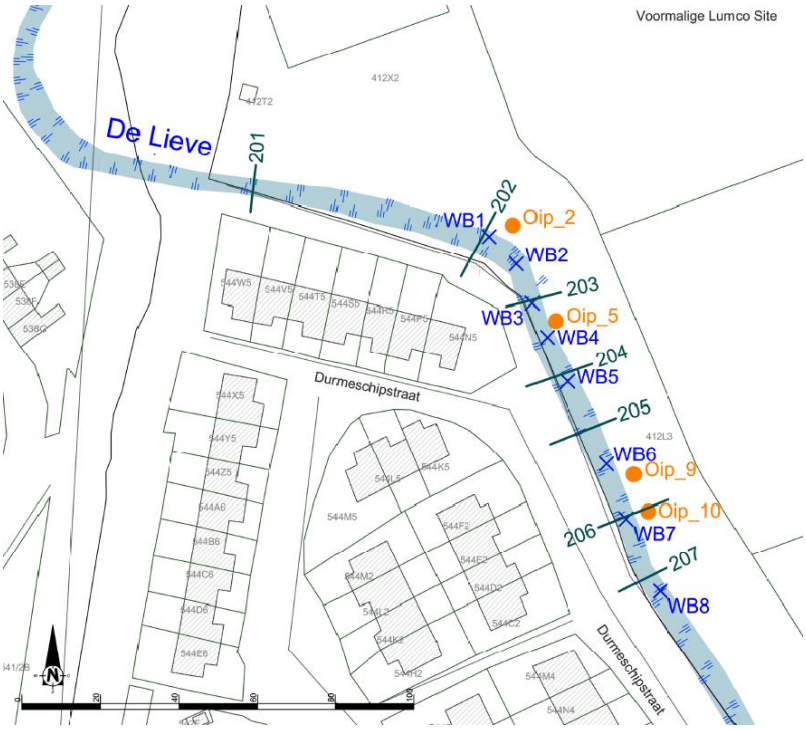
Aangesloten is bij de meetstrategie zoals uiteengezet in paragraaf 3.2.2.2.2. Na het vastleggen van de nulsituatie (februari – juni 2020) en de aanleg van de reactieve matconstructie (september – oktober 2020) zijn er 8 meetronden uitgevoerd met betrekking tot het oppervlaktewater, 4 meetronden met betrekking tot het grondwater, 3 meetronden met betrekking tot micro-organismen en 2 flux-meetronden op de matelementen.

Voor de ligging van de peilbuizen en oppervlaktewater meetpunten wordt verwezen naar Figuur 24.

De periodiek uitgevoerde veldmetingen, staalnames en chemische analyses zijn gerapporteerd in diverse rapporten van:

- RSK (oppervlaktewater en grondwater): bijlage 3.1;
- Avecom (qPCR-analyses): bijlage 3.2;
- iFLUX (fluxmetingen): bijlage 3.3.

Periodiek zijn ook voortgangsrapportages met tussentijdse evaluaties opgesteld door TAUW (niet bijgevoegd in dit rapport). De kwantitatieve resultaten van alle metingen en chemische analyses met betrekking tot grondwater en oppervlaktewater zijn in tabelvorm opgenomen in bijlage 3.4, evenals het logboek (situatiebeschrijving ten tijde van de meetronden).



Figuur 24. Ligging peilbuizen (OIP2/PB20; OIP5/PB50; OIP9/PB90; OIP10/PB100) en meetpunten oppervlaktewater (201-207; meetpunt 208 ligt 460 meter stroomafwaarts van 207)

In de volgende paragraaf 3.3.1.2 wordt eerst ingegaan op het algemene beeld: wat was het effect van de reactieve mat op de oppervlaktewaterkwaliteit? In de daaropvolgende paragraaf 3.3.1.3 is een grafische weergave opgenomen van het verloop van kritische parameters in het oppervlaktewater ten opzichte van tijd en ruimte en wordt nader ingezoomd op de oorzaken waarvan, door een verband te leggen met de grondwaterkwaliteit, het grondwatertype, stijghoogteverschillen, micro-organismen en afbraakparameters, locatiespecifieke omstandigheden en de fysieke toestand van de reactieve matconstructie.

3.3.1.2 Effect op oppervlaktewaterkwaliteit

In het algemeen is de kwaliteit van het oppervlaktewater aanzienlijk verbeterd na de aanleg van de reactieve matconstructie met het groene adsorbens (Natural Catch^{TAUW}).

Er is gedurende langere tijd (5 van de 8 metingen) een rendement bereikt van 80 tot 99% voor PAK (ondergrens bepaald door acenafteen), vluchtige minerale olie (C5-C10) en BTEX. Uitzondering daarop is benzeen met een rendement van 70 – 80%. Rendement in % is hierbij uitgedrukt als 100 * (1 - C_t/C_0), waarbij :

- C_t = de concentratie in het oppervlaktewater op tijdstip t, en
- C_0 = de concentratie in de nulsituatie (dus zonder matconstructie).

Voor PAK werd op basis van de laboproeven (zie paragraaf 3.2.1.4) een rendement van 85-97% verwacht (ondergrens bepaald door acenafteen). Voor benzeen en C5-C10 was dat circa 75%. Benzeen werd ook verwacht het minst sterk te adsorberen vanwege de laagste verdelingscoëfficiënt organisch stof – water (k_{om} of k_{oc}). De verwachte rendementen komen daarmee relatief goed overeen met de gemeten rendementen in de Lieve.

Verder kan worden gesteld dat de biochar matelementen in het algemeen een hoger rendement laten zien voor BTEX en C5-C10 dan veen (= zodenturf). Voor PAK is het rendement van biochar en veen vergelijkbaar.

In het 2^{e} jaar na de aanleg van de reactieve matconstructie is er duidelijk sprake van twee tussentijdse perioden (in totaal 3 metingen) met een duidelijke afname van het zuiveringsrendement ten opzichte van het rendement zoals hiervoor geschetst. Deze concentratietoenames in het oppervlaktewater worden nader besproken en verklaard in de volgende paragrafen.

3.3.1.3 Grafische verwerking en interpretatie

3.3.1.3.1 Oppervlaktewater

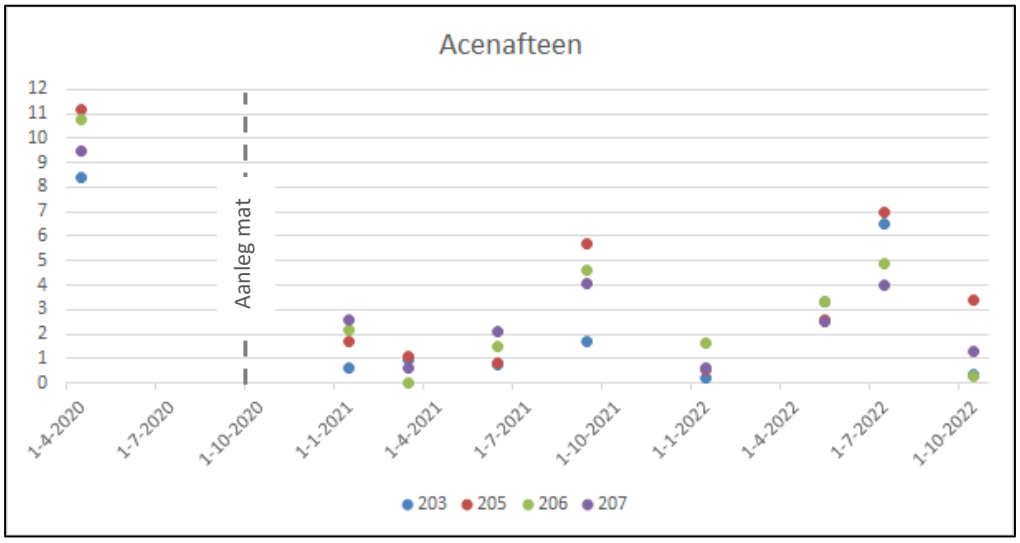
Algemeen
In Tabel 7 zijn de algemene omstandigheden bij de Lieve opgenomen tijdens de meetronden. Hieruit volgt onder andere dat de stromingsrichting van het oppervlaktewater altijd richting de haven (ringvaart) is, met een snelheid van 23-100 m/h. In de week voorafgaand aan de bemonstering is cumulatief nooit meer neerslag gevallen dan 12 mm, waardoor gesteld kan worden dat verdunning als gevolg van neerslag of als gevolg van hemelwater uit de overstort doorgaans beperkt is. Verder valt op dat af en toe oliefilmpjes op het wateroppervlak worden waargenomen (hier wordt verderop in de tekst nader op ingegaan).

Datum	Stromingsrichting	Weer tijdens bemonstering	Neerslag voorafgaande week (mm)*	Overig
3-2-2020	-	Bewolkt*	11,5 *	-
30-3-2020	-	Onbewolkt*	0 *	-
4-6-2020	-	Bewolkt en lichte regen*	0 *	-
5/11-1-2021	Richting haven; lichte stroming	Droog en bewolkt	12 *	Oliefilmpjes tussen mp 206 en 207
26-3-2021	-	Halfbewolkt en een bui*	2 *	-
2-6-2021	Geen stroming	Droog en onbewolkt (zonnig)	7 *	-
27-9-2021	Richting haven; lichte stroming ca 100 m/h	Bewolkt en deels regen	1,5 *	Geen oliefilm waargenomen
6-1-2022	Richting haven; ca 100 m/h	Zonnig, droog en windstil	3,5 *	Kleine olievlekken thv 205 en 208
17-5-2022	Richting haven; ca 23 m/h	Zonnig en droog	1	-
12-7-2022	-	Zonnig en droog	0	-
26-10-2022	Richting haven; ca 43 m/h	Halfbewolkt en droog	5,5 *	opbollende matten, olievlekken thv 203/205
* gebaseerd op				
Weerarchief Gent - meteoblue				

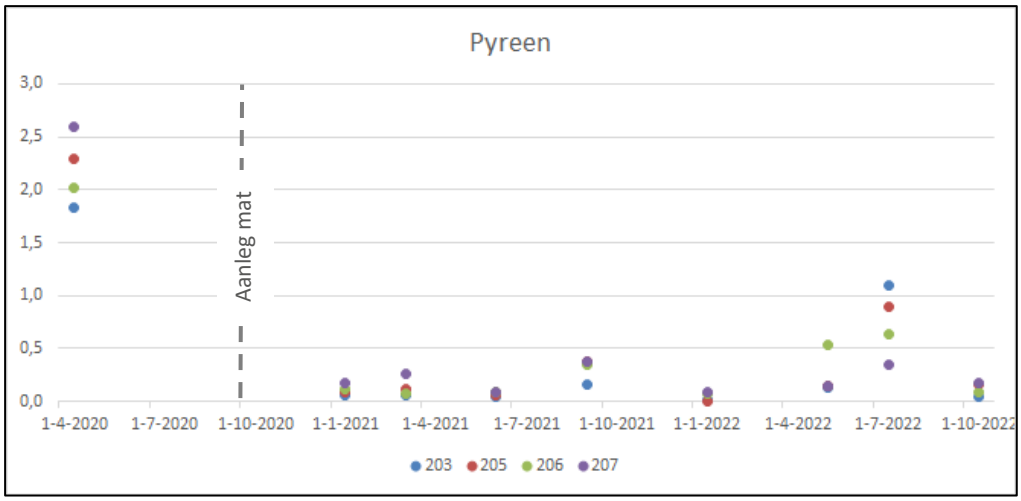
Tabel 7. Logboek m.b.t. situatie bij de Lieve tijdens meetronden

Verontreiniging

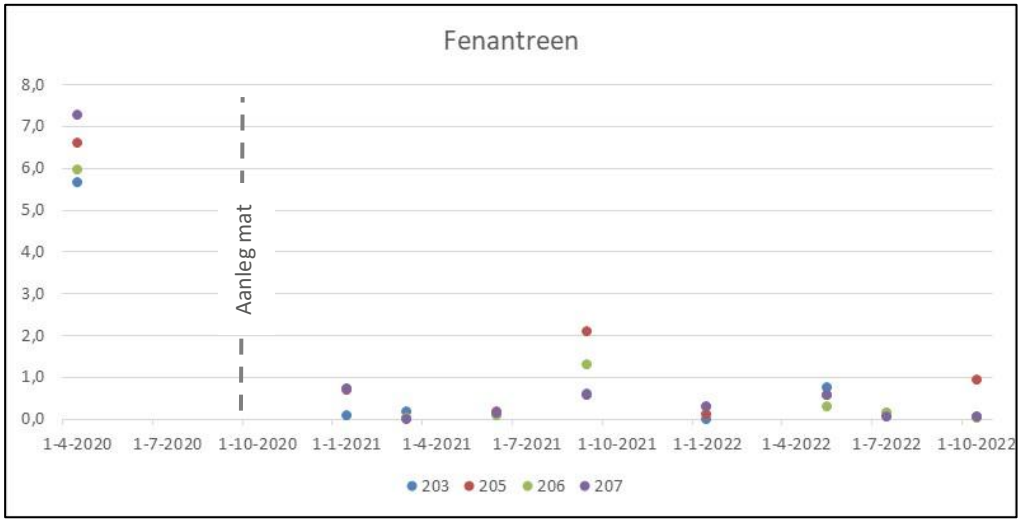
In Figuur 25 tot en met Figuur 32 is de concentratie (µg/l) van de maatgevende en kritische contaminanten in het oppervlaktewater boven de matconstructie weergegeven in functie van de tijd (onder kritische contaminanten worden verstaan de stoffen die in hoge concentraties in het grondwater voorkomen ten opzichte van de milieukwaliteitsnormen van het oppervlaktewater en/of hun hoge mobiliteit. De meetpunten 203 en 205 bevinden zich boven de matten gevuld met biochar. De meetpunten 206 en 207 bevinden zich boven de matten gevuld met veen. Geheel links in de figuren is steeds de nulsituatie afgebeeld: de gemiddelde concentratie van 3 metingen in de periode februari-juni 2020. Dit is de referentiesituatie zonder reactieve mat.



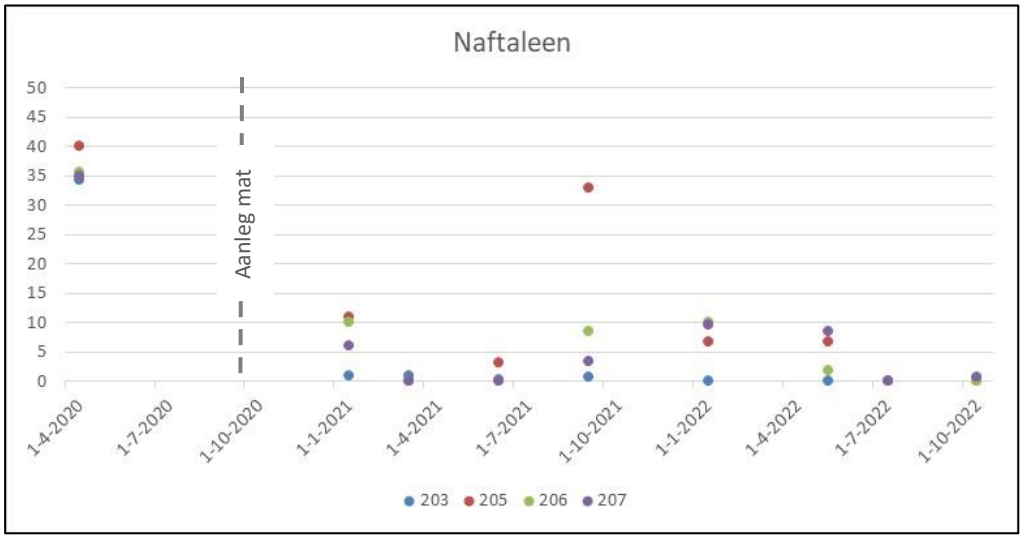
Figuur 25. Acenafteen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



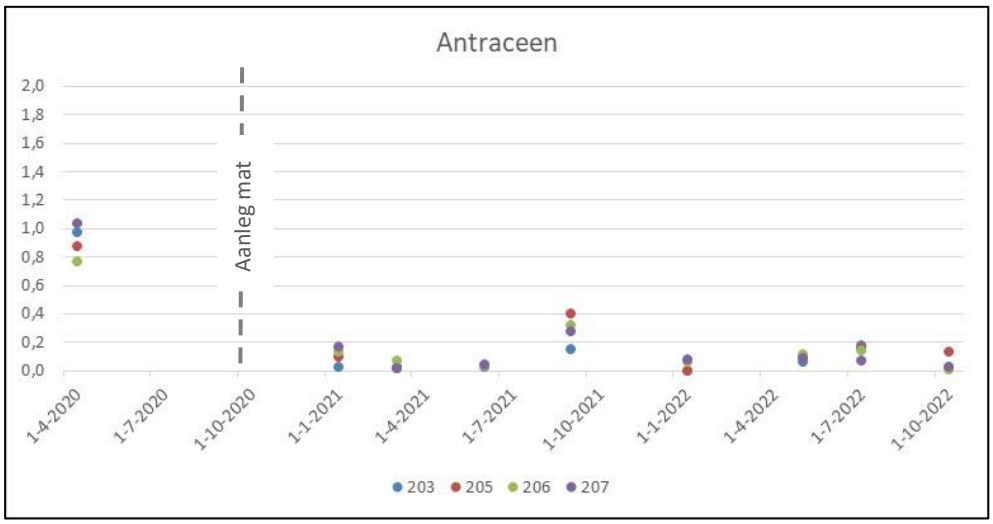
Figuur 26. Pyreen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



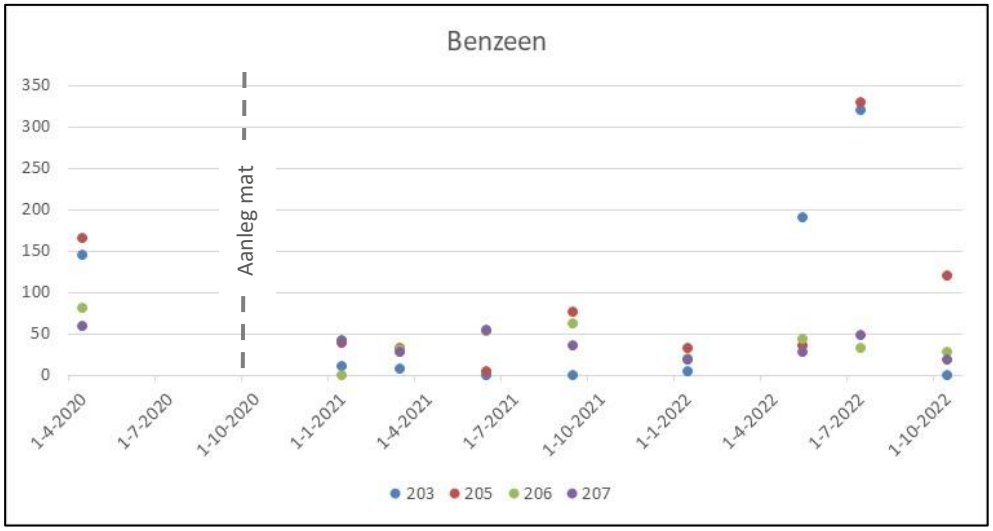
Figuur 27. Fenantreen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



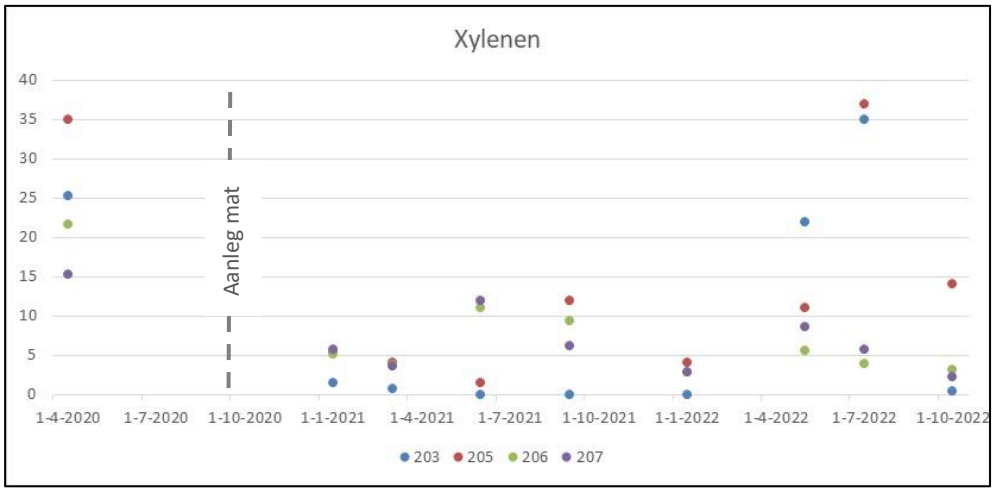
Figuur 28. Naftaleen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



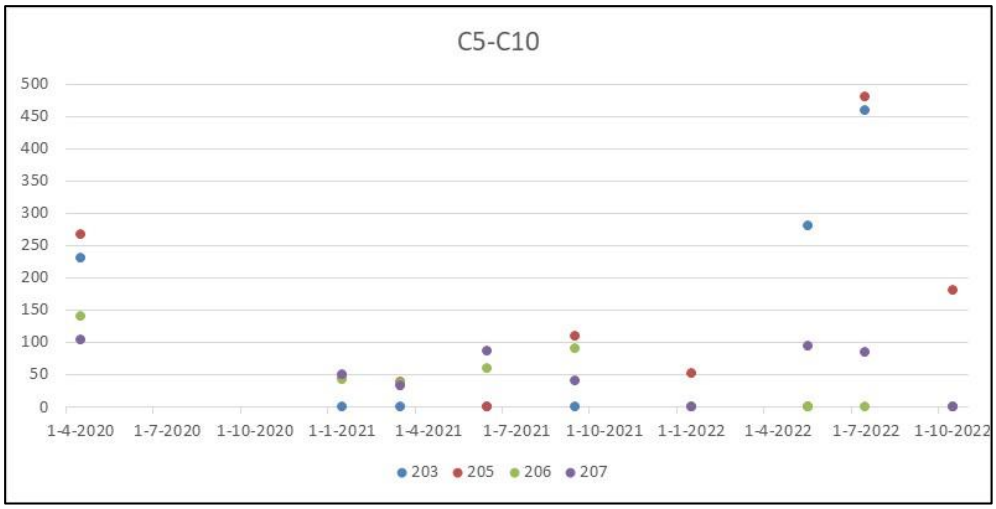
Figuur 29. Antraceen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



Figuur 30. Benzeen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



Figuur 31. Xylenen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd



Figuur 32. C5-C10 (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd

In **Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.** is het gemiddelde zuiveringsrendement van de 4 meetpunten (203, 205, 206 en 207) opgenomen per stof per meetronde.

	5-1-21	26-3-21	2-6-21	27-9-21	6-1-22	17-5-22	12-7-22	26-10-22
Acenafteen	82%	93%	87%	61% ↓	93%	70%	43%	87%
Pyreen	95%	94%	97%	86% ↓	97%	89%	64%	95%
Fenantreen	92%	99%	98%	82% ↓	97%	91%	98%	96%
Naftaleen	81%	99%	98%	70% ↓	82%	88%	100%	99%
Antraceen	88%	96%	96%	68% ↓	96%	90%	84%	95%
Benzeen	75%	73%	59%	54% ↓	80%	37%	-36%	66%
Xylenen	80%	86%	66%	70%	89%	50%	25%	82%
C5-C10	75%	81%	67%	63% ↓	90%	37%	-17%	78%

Tabel 8. Gemiddeld zuiveringsrendement (n=4) per stof per meetronde

Toelichting
Oranje: daling tot onder 50% rendement
Rood: daling tot een negatief rendement, concentratie > nulsituatie

Uit Figuur 25 tot en met Figuur 32 en Tabel 7 blijkt dat op twee momenten in de tijd een rendementsdaling is te zien. Het gaat om 27 september 2021 en om opeenvolgend 17 mei en 12 juli 2022. Op 27 september 2021 is sprake van een rendement van 54-70% voor benzeen, xylenen en C5-C10 en voor PAK van 61-86%. Het rendementsverlies in de tweede periode (mei-juli 2022) is ernstiger: voor benzeen, xylenen en C5-C10 blijft een rendement over van -25% tot -36% (concentraties deels hoger dan de nulsituatie) en voor acenafteen en pyreen van 43 en 64%.

Oorzaak van de rendementsdaling (concentratiestijging in oppervlaktewater) voor alle stoffen in september 2021, die zich mogelijk al in juni 2021 voorzichtig aankondigde voor de niet-PAK stoffen, bleek een kortsluitstroming van verontreiniging via de naad tussen 2 matelementen, ter hoogte van de wateruitlaat en de aansluiting van de constructie op het beton van de wateruitlaat. Op basis van visuele inspectie is geconstateerd dat de waterdichte flap over de naad van twee matelementen en de aansluiting op de uitlaat was verschoven, waarschijnlijk als gevolg van de stroming van overvloedig hemelwater uit de wateruitlaat. In december 2021 is het geotextiel eerst weer goed gelegd, is extra waterdichte folie aangebracht en vervolgens is in januari 2022 permanente ballast geplaatst op de aansluitingen zodat verschuiving werd voorkomen.

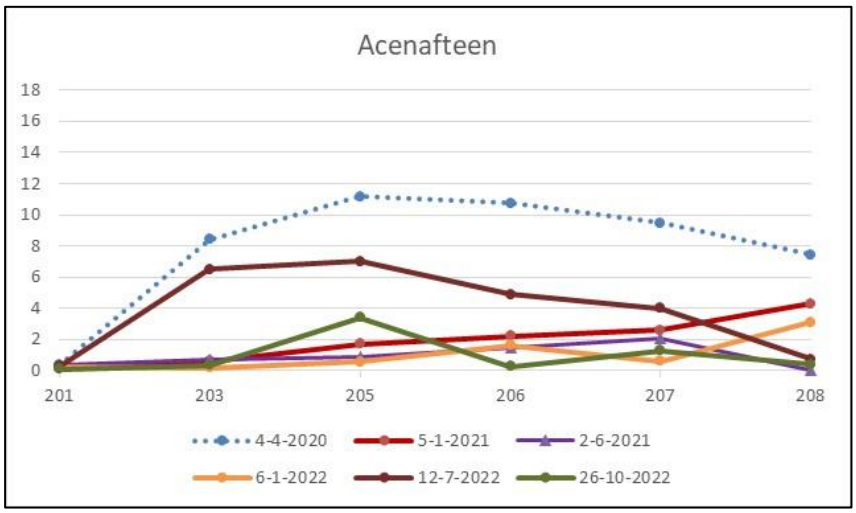
Uit fluxmetingen in november 2021 bleken de matten niet verzadigd te zijn en bleek doorslag van verontreiniging door het adsorptiemateriaal heen niet aan de orde (zie '**Fluxmetingen**' verderop in deze paragraaf). Als gevolg van de aanwezigheid van puur product in de waterbodem direct onder de matconstructie en het ontsnappen daarvan richting oppervlaktewater blijkt dat kortsluitstroming grote gevolgen heeft (zie ook Figuur 33).

Figuur 33. Ligging kortsluitstroming eind 2021 en constatering puur product

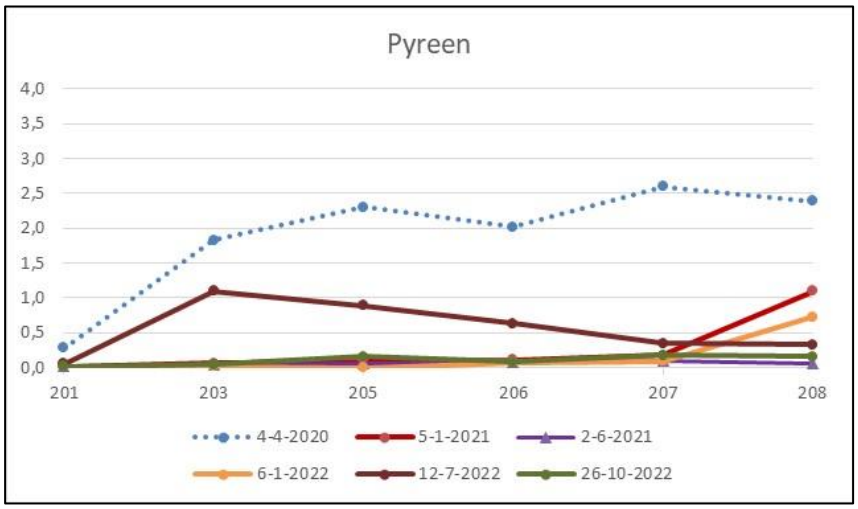
Dat de lokale aanpassing aan de matconstructie het gewenste effect heeft, blijkt vervolgens uit de meting op 6 januari 2022, waarbij weer een verwacht rendement wordt geconstateerd.

Het rendementsverlies tijdens de tweede periode blijkt complexer om te verklaren.
Er is een inspectie uitgevoerd in de Lieve door Envisan en hoewel de mat nog goed aansluit op de wateruitlaat blijkt dat tijdens het betreden van de mat puur product en gasbellen vrijkomen en dat er nog steeds beweging zit in de matelementen (met name de matten 8 en 9 nabij de overstort). Overigens wordt het gas (methaangas, koolstofdioxide en waterstofsulfide) gevormd door biologische activiteit in de waterbodem onder de matconstructie en door opwaartse druk tijdelijk ingevangen in het geotextiel. Geconstateerd is dat het vrijkomen van puur product hier over de volledige breedte plaatsvindt bij betreding, dus niet alleen bij de oevers.
Tegelijkertijd kan dit niet de enige verklaring zijn, aangezien deze keer van enkele stoffen zelfs concentraties worden gemeten in het oppervlaktewater die hoger liggen dan tijdens de nulsituatie zonder reactieve mat en we bovendien veranderingen zien in de samenstelling van zowel oppervlaktewater als grondwater (zie kopje 'Watertype' en paragraaf 3.3.1.3.2 'Grondwater'). Dit heeft met het extremere neerslagtekort te maken in deze periode, met als gevolg een tijdelijk hogere verticaal opwaartse flux (kwel) van sterker verontreinigd dieper grondwater en puur product, en een verminderde toestroom van ondiep grondwater (afkomstig van de diepte van de monitoringsfilters tot 5 m-mv). Hier wordt verderop in de tekst nader op ingegaan.

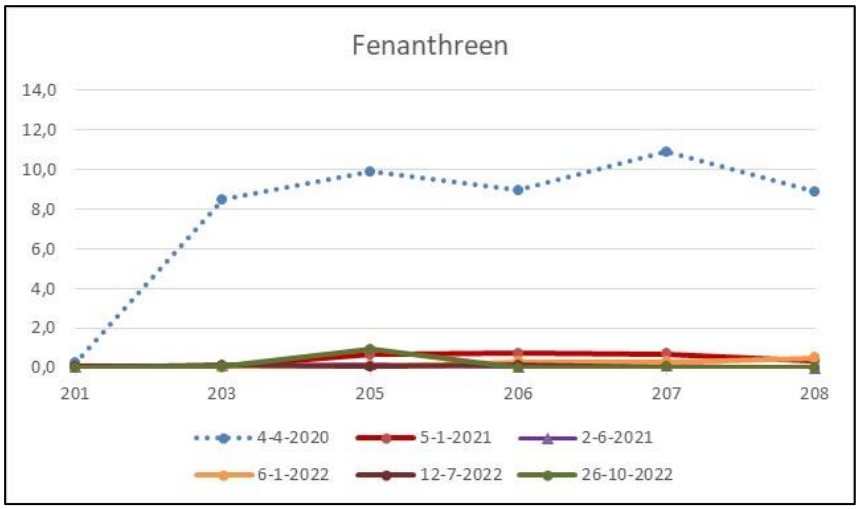
In de Figuur 34 tot en met Figuur 41 is het ruimtelijke concentratieverloop (µg/l) opgenomen over het gehele gemonitorde traject van de Lieve, oftewel bovenstrooms van de matconstructie (meetpunt 201), ter plaatse van (meetpunten 203, 205, 206 en 207) en stroomafwaarts van de matconstructie. Hierbij is voor de leesbaarheid in de grafiek de afstand tussen de meetpunten gelijk gekozen, gezien de grote afstand van de overige meetpunten tot meetpunt 208. Het gehele meettraject heeft een lengte van circa 610 meter, waarbij de meetpunten 201, 203, 205, 206 en 207 de eerste 150 meter bestrijken. De gemiddelde referentie- of nulsituatie is gelegd op 4 april 2020 (de onderbroken blauwe lijn).



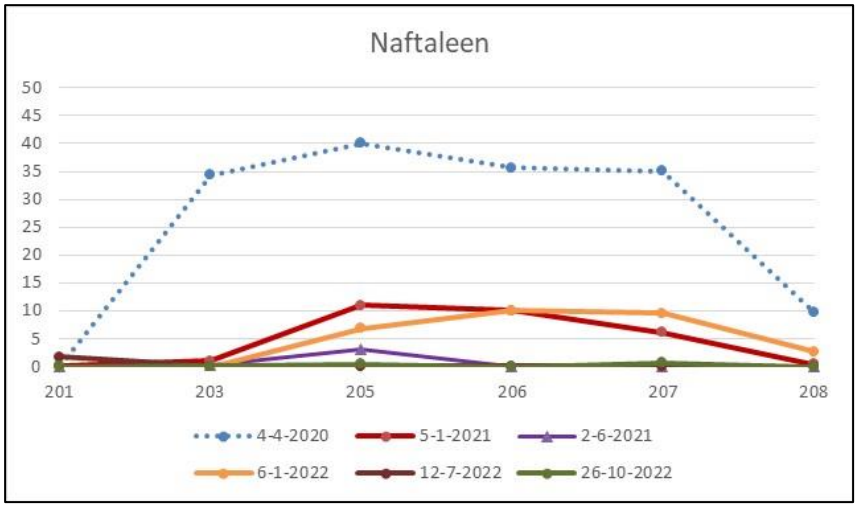
Figuur 34. Acenafteen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



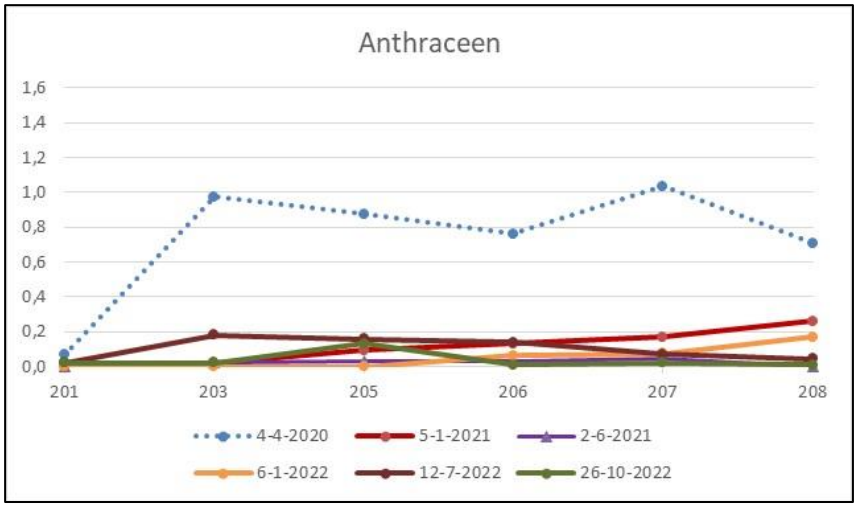
Figuur 35. Pyreen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



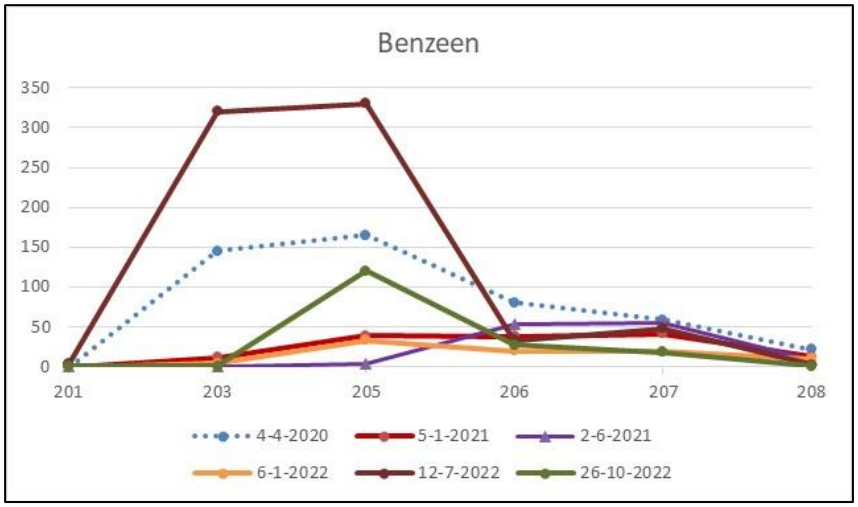
Figuur 36.Fenantreen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



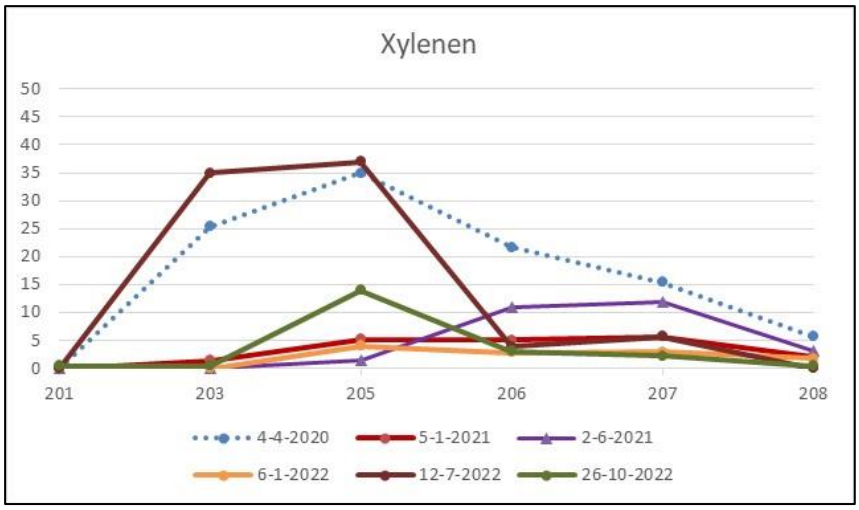
Figuur 37. Naftaleen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



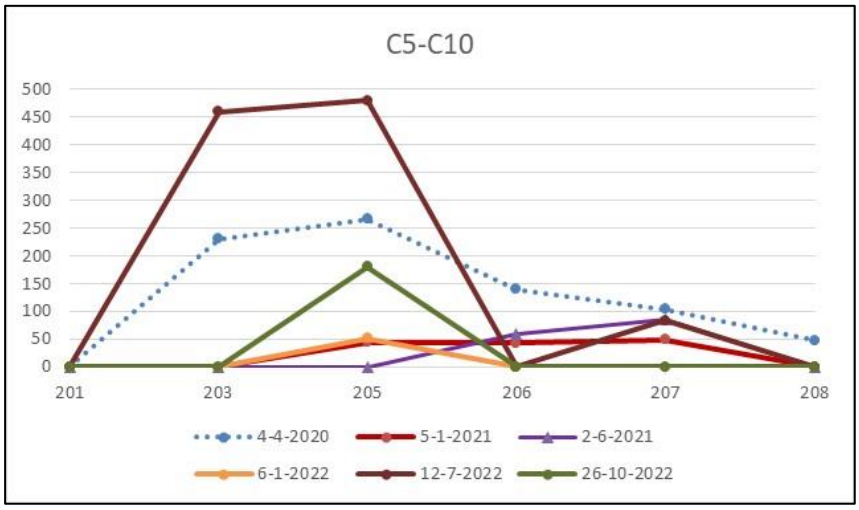
Figuur 38. Antraceen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



Figuur 39 . Benzeen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



Figuur 40 . Xylenen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject



Figuur 41. C5-C10 (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject

Uit het concentratieverloop over het gehele meettraject blijkt het volgende:

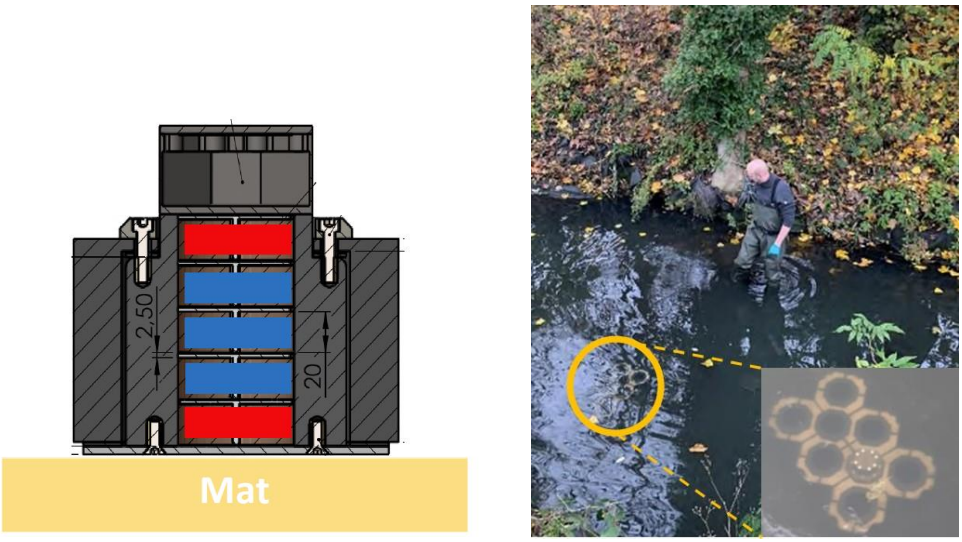
- Ter hoogte van meetpunt 201, stroomopwaarts van de reactieve matconstructie, worden alleen PAK in licht verhoogde concentraties aangetroffen gedurende de gehele meetperiode. Dat betekent dat een beperkt of verwaarloosbaar deel van de verontreiniging, voorafgaand aan de beïnvloeding door het voormalige Lumco-terrein, aanwezig is in het oppervlaktewater van de Lieve.
- De grafieken laten in 1 oogopslag zien dat er verbetering is van de waterkwaliteit ten opzichte van de situatie zonder mat, met uitzondering van de periode rond 12 juli 2022.
- Tevens valt op dat op 12 juli 2022 sprake is van een concentratie benzeen, xylenen en C5-C10 ter plaatse van de meetpunten 203 en 205 (biochar matten) die hoger ligt dan tijdens de nulsituatie.
- De oppervlaktewaterkwaliteit in het stroomafwaartse meetpunt 208, vlak voordat de Lieve in het havenwater (de ringvaart) terecht komt, is continu beter in de situatie mét de reactieve mat dan in de situatie zónder reactieve mat. Desondanks overschrijden fluoranteen (0,47 µg/l), pyreen (0,16 µg/l) en acenafteen (0,38 µg/l) hier in oktober 2022 nog de MKN-norm (respectievelijk 0,12; 0,04 en 0,06 µg/l) met een factor 4 tot 6.

Fluxmetingen

Door iFlux zijn na de ruiming van de Lieve op 3 momenten verticale fluxmetingen door de waterbodem en door de matconstructie uitgevoerd:

- Initiële meting in februari 2020 zonder matconstructie (nulmeting);
- In november 2021 en juli 2022: 2 'mat-flux' samplers t.h.v. meetpunten 203 en 205.

Met betrekking tot de constructie en de ligging van de mat-flux sampler wordt verwezen naar Figuur 42. Met behulp van een verzwaarde constructie zijn de samplers op de biochar-matten geplaatst. Een week na plaatsing zijn deze weer opgehaald en zijn de sorptiematerialen uit de fluxsamplers geanalyseerd op tracers en verontreinigingen en zijn de fluxrichting en -grootte bepaald.



Figuur 42. Mat-flux sampler (rood: sorptie massaflux; blauw: sorptie en tracers waterflux) en situering in de Lieve

Voor de betreffende rapporten van iFLUX wordt verwezen naar bijlage 3.3.

Uit de waterflux metingen blijkt steeds een opwaartse flux, ofwel een instroom van grondwater via de waterbodem naar het oppervlaktewater:

- Nulmeting (zonder mat): maximaal **0,73 cm/d**
- November 2021: **0,7-1,0 cm/d**
- Juli 2022: **1,56 cm/d** (alleen meetpunt 203; 205 is boven het wateroppervlak gekomen)

In Tabel 9 is de massaflux opgenomen van stoffen die zijn aangetoond in gehalten boven de rapportagegrens.

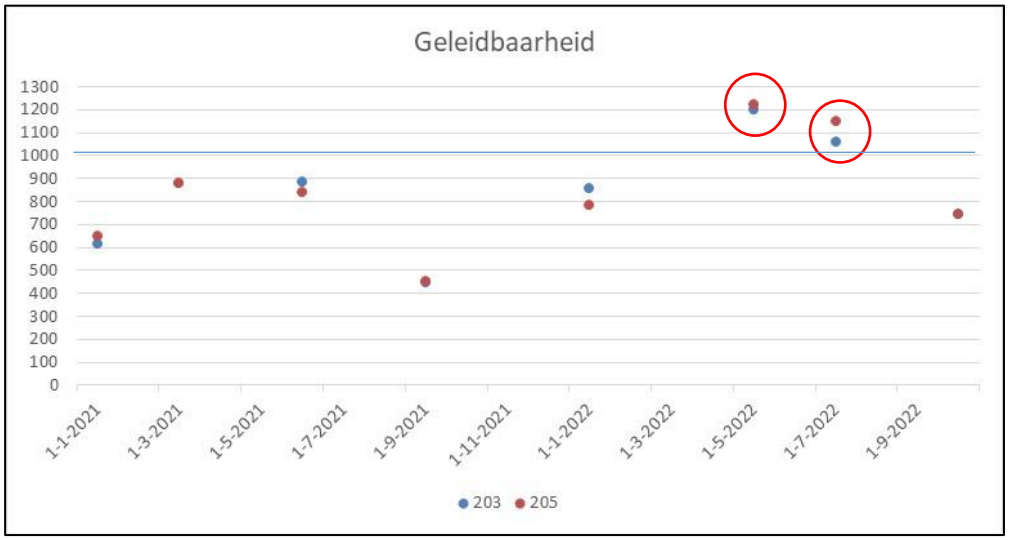
	Benzeen (mg/m²/d)	Naftaleen (mg/m²/d)	Acenafteen (mg/m²/d)
Nulmeting 2020	11,8	28,4	7,24
November 2021	0,25	<0,06	<0,06
Juli 2022	0,63	0,20	0,13

Tabel 9. Resultaten verticale massaflux voor stoffen boven de rapportagegrens

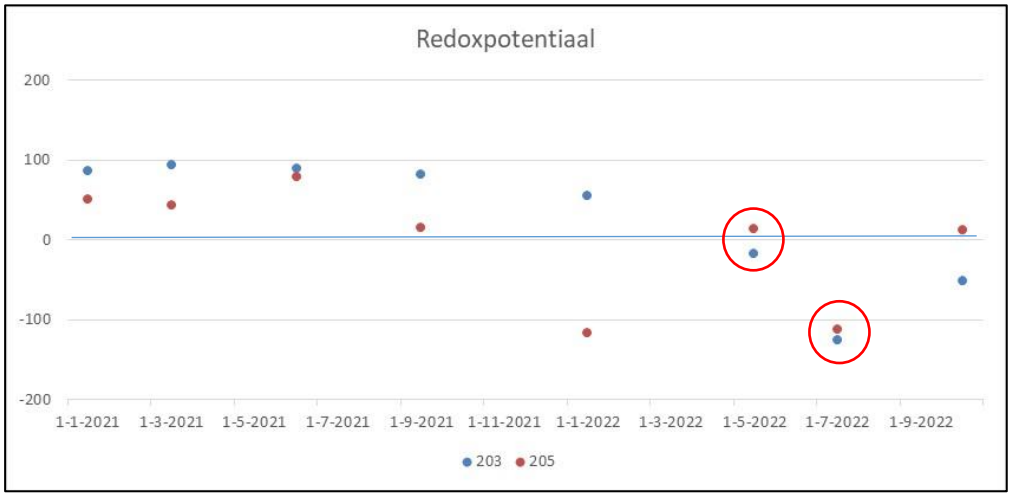
Uit de resultaten in tabel 9 kan afgeleid worden dat de initiële massaflux zoals die is bepaald tijdens de nulmeting voorafgaand aan de matconstructie, niet wordt benaderd in november 2021 en juli 2022 in de situatie met de matconstructie. Met andere woorden: de reactieve matelementen zijn nog niet verzadigd. Wel neemt in juli 2022 de massaflux wat toe ten opzichte van november 2021 voor respectievelijk benzeen, naftaleen en acenafteen. Weliswaar gaat het hier om slechts 2 metingen in de tijd na aanleg van de reactieve mat, maar wel ter plaatse van de hoogste instroom van verontreiniging. Hiermee wordt de hypothese ondersteund dat de fluctuaties in oppervlaktewaterconcentraties worden veroorzaakt door lokale kortsluitstromingen (zie paragraaf '**verontreiniging**'); immers, uit de gemeten fluxen doorheen de mat blijkt dat er geen sprake is van verzadiging van de matelementen en de daarmee gepaard gaande doorslag tot hoge concentraties in het oppervlaktewater.

Watertype

Van het oppervlaktewater is tijdens staalname onder andere de geleidbaarheid en redoxpotentiaal gemeten. De resultaten zijn opgenomen in Figuur 43 en Figuur 44.



Figuur 43. Geleidbaarheid (µS/cm) in het oppervlaktewater boven de biochar matten (meetpunt 203 en 205)



Figuur 44. Redoxpotentiaal (mV) in het oppervlaktewater boven de biochar matten (meetpunt 203 en 205)

Hieruit volgt dat de geleidbaarheid van het oppervlaktewater hoger en de redoxpotentiaal lager wordt (ijzer- tot sulfaatreducerend) tijdens de periode mei-juli 2022 waarin de concentratie aan verontreinigingen in het oppervlaktewater sterk toenemen. Tegelijkertijd wordt het ondiepe grondwater juist minder anaeroob, met als hoogtepunt 17 mei 2022. Dit is weergegeven in Tabel 10.

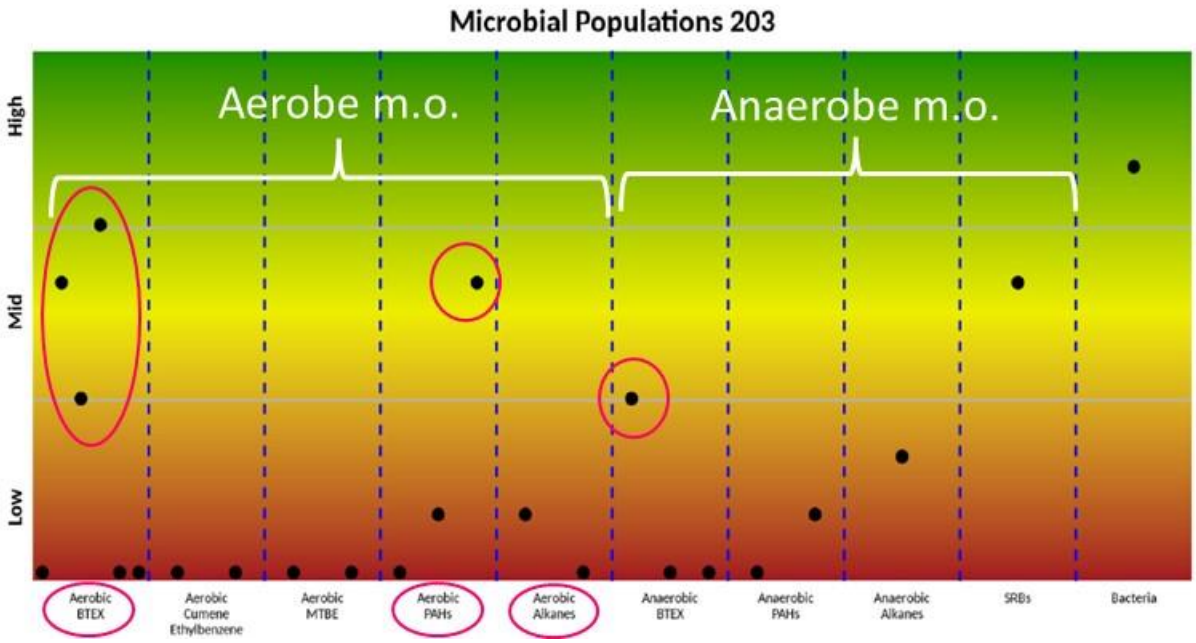
	11-1-2021	2-6-2021	6-1-2022	17-5-2022	26-10-2022
Redox (mV)	-188	-104	-57	-11	-125

Tabel 10. Gemiddelde redoxpotentiaal grondwater (pb 20, 50, 90 en 100)

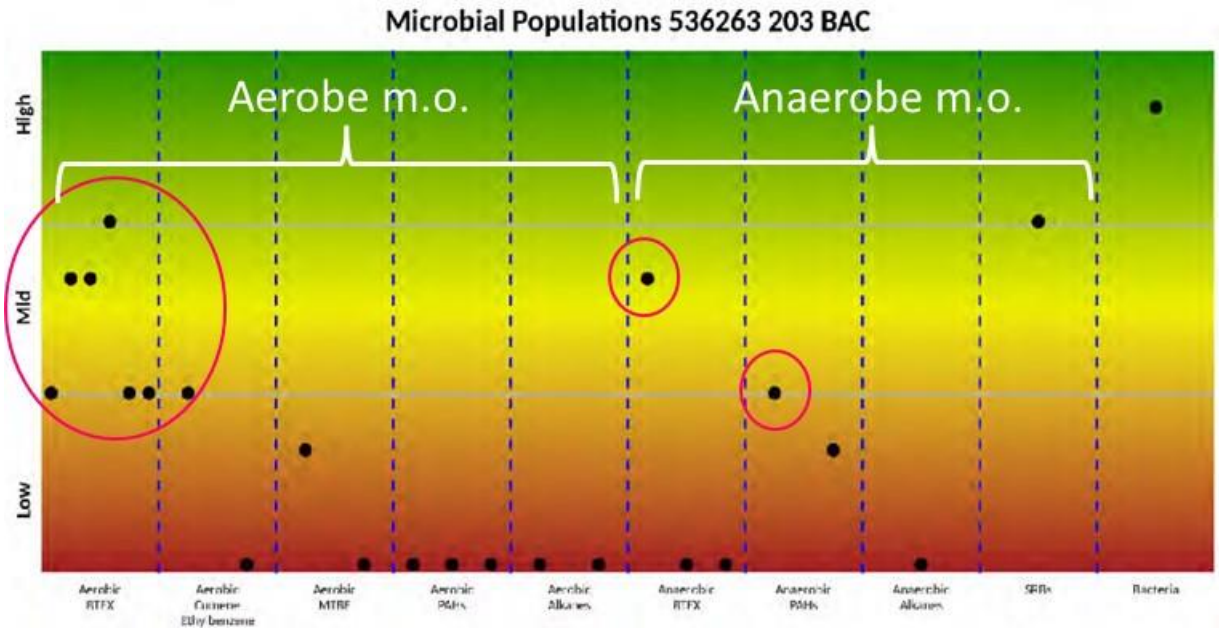
Hieruit volgt dat er in die periode sprake is van instroom in de Lieve van een ander type (grond)water. Het gaat daarbij waarschijnlijk om grondwater dat verticaal opkwelt uit de sterk verontreinigde bodem onder de Lieve in plaats van (ondieper) grondwater dat wordt aangevoerd vanuit de richting van de oever (die we monitoren). Uit het verhang tussen het grondwater in de oever en het oppervlaktewaterniveau in de Lieve blijkt dat de Lieve tijdelijk niet of nauwelijks gevoed wordt door dit grondwater (zie paragraaf 3.3.1.3.2). Instroming vanuit meer verticale richting met hogere concentraties of zelfs puur product verklaart de eerdergenoemde waarneming dat voor enkele stoffen een oppervlaktewaterconcentratie is geconstateerd in de periode mei-juli 2022 die hoger ligt dan tijdens de nulsituatie zonder mat (vanzelfsprekend in combinatie met kortsluitstroming).

Biologische afbraak

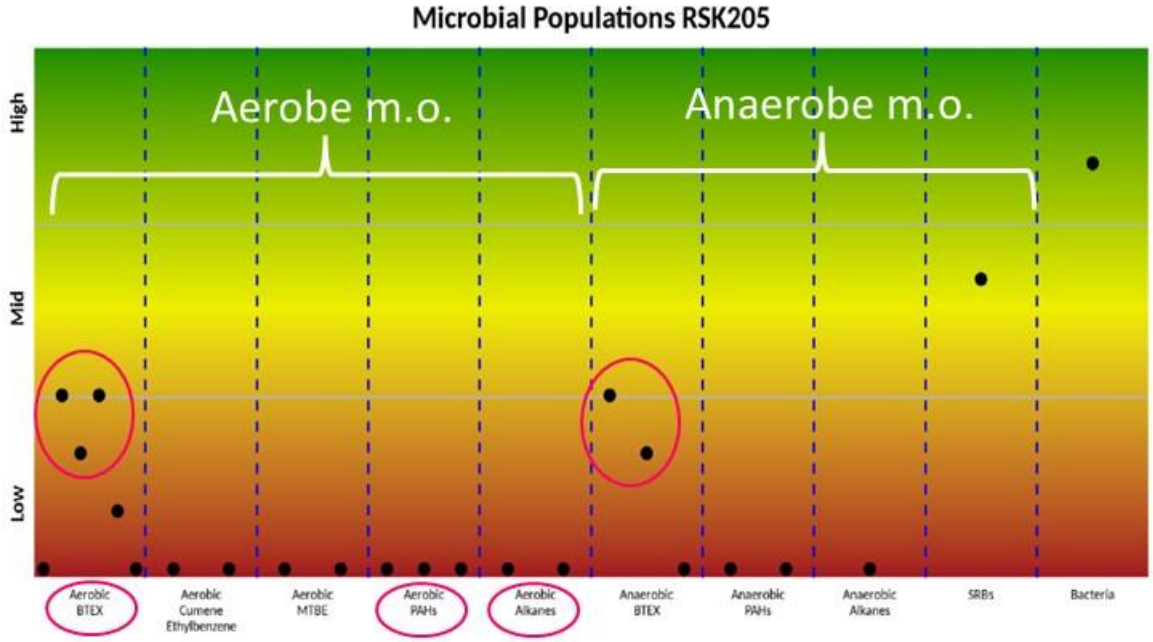
Watermonsters die genomen zijn vanaf het matoppervlak ter hoogte van meetpunt 203 en 205 zijn geanalyseerd op een aantal functionele genen die coderen voor specifieke enzymen voor de afbraak van BTEX, PAK en alifaten. Dit is uitgevoerd voor de meetronden in januari 2021, januari 2022 en mei 2022. De resultaten van januari 2021 en mei 2022 zijn opgenomen in de Figuur 45.1 en 45.2 (meetpunt 203) en Figuur 47.1 en 46.2 (meetpunt 205).



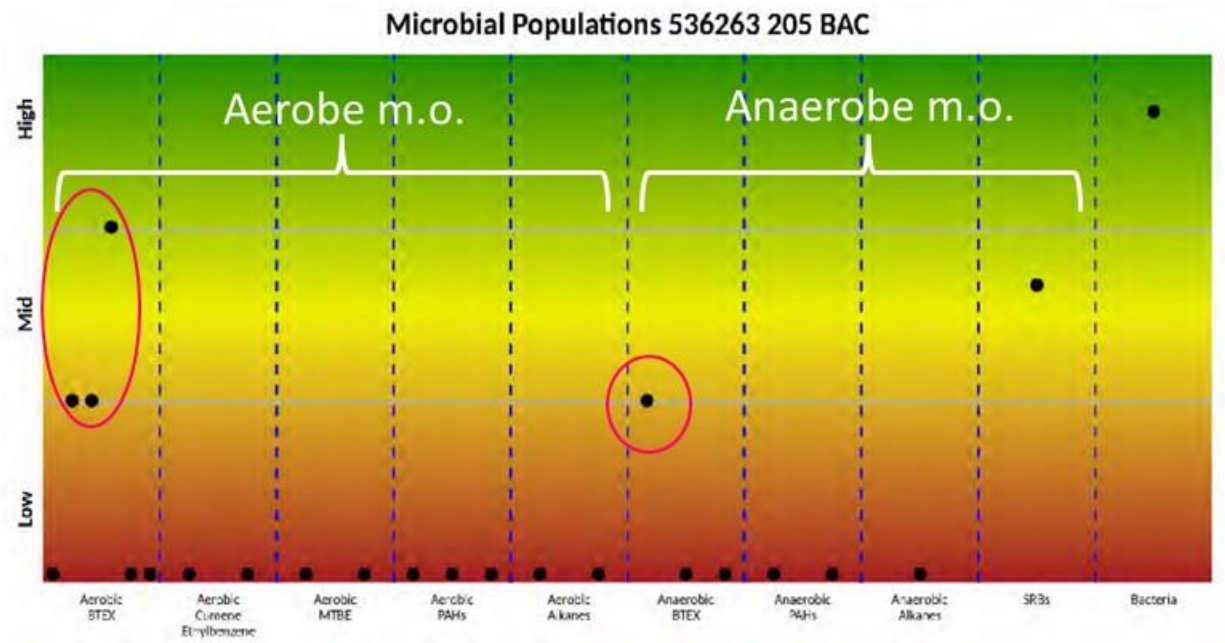
Figuur 45.1 Resultaten 5 januari 2021 meetpunt 203 DNA-analyse / qPCR



Figuur 46.2 Resultaten 17 mei 2022 meetpunt 203 DNA-analyse / qPCR



Figuur 47.1 Resultaten 5 januari 2021 meetpunt 205 DNA-analyse / qPCR



Figuur 48.2 Resultaten 17 mei 2022 meetpunt 205 DNA-analyse / qPCR

In de figuren staat op de y-as de mate waarin specifieke micro-organismen voorkomen:

- Laag: $<1*10^3$ cellen/ml;
- Middel: $1*10^3 – 1*10^5$ cellen/ml;
- Hoog: $>1*10^6$ cellen/ml.

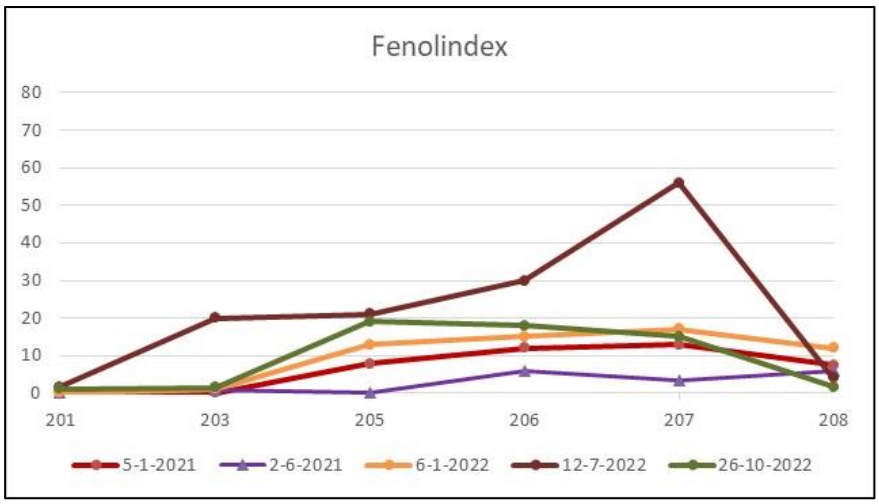
Op de x-as zijn de specifieke micro-organismen weergegeven, gegroepeerd naar specifieke afbraak, respectievelijk:

- Aerobe BTEX, ethylbenzeen, MtBE, PAK en alkanen afbrekers;
- Anaerobe BTEX, PAK en alkanen afbrekers;
- Sulfaatreducerende bacteriën;
- Totale aantal bacteriën.

Uit de resultaten blijkt het volgende:

- In zowel meetpunt 203 als 205 zijn aerobe BTEX-afbrekers aangetroffen in een doorgaans middelmatig aantal.
- Aerobe PAK-afbrekers zijn alleen in januari 2021 aangetoond in een middelmatig aantal in meetpunt 203. Dit zou verklaard kunnen worden doordat er in zeer beperkte mate PAK worden doorgelaten door de mat.
- Aerobe alkaanafbrekers worden alleen in januari 2021 aangetoond in een laag aantal in meetpunt 203.
- Er zijn in beide meetpunten anaerobe BTEX-afbrekers aanwezig in een laag tot middelmatig aantal.
- Alleen in meetpunt 203 worden in mei 2022 anaerobe PAK-afbrekers aangetroffen. Dit kan te maken hebben met toename van PAK in het oppervlaktewater in mei 2022.
- Er zijn sulfaatreducerende bacteriën aanwezig in middelmatige aantallen.
- Het totaal aantal bacteriën is ongeveer met een factor 18 toegenomen: in 203 van $3,5*10^6$ naar $5,8*10^7$ en in 205 van $8,3*10^5$ naar $1,6*10^7$ cellen/ml.

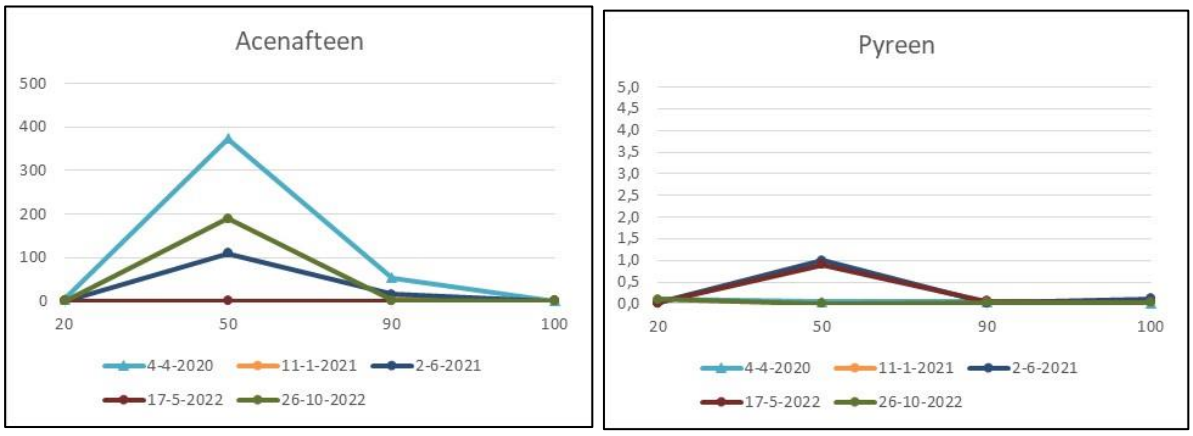
Geconcludeerd kan worden gesteld dat in het algemeen zowel de aerobe en anaerobe BTEX-afbrekers actief zijn op en nabij het matoppervlak. Hieruit wordt duidelijk dat zowel aerobe als anaerobe omstandigheden voorkomen op het scheidingsvlak grondwater/oppervlaktewater en dat afbraak van BTEX plaatsvindt. De aantallen aangetroffen PAK afbrekers en alkaan afbrekers zijn nihil of laag.
Hierbij dient nog wel het volgende opgemerkt te worden. Uit het totale aantal bacteriën blijkt dat er een behoorlijke toename is van activiteit in mei 2022. Dit kan in verband worden gebracht met toename van concentraties verontreiniging in het oppervlaktewater. Welke bacteriën het precies zijn is onduidelijk, aangezien het labo niet alle afbrekers kan specificeren (niet alle genen/enzymen zijn bekend). Met andere woorden: er kan sprake zijn van een hogere afbraakactiviteit/-capaciteit in mei 2022 dan nu uit de DNA-resultaten blijkt.
Een andere indicator voor de microbiële afbraak van BTEX is de fenolindex. Het verloop hiervan is opgenomen in Figuur 49, waaruit blijkt dat tijdens de hoge concentraties in het oppervlaktewater op 12 juli 2022 de fenolindex inderdaad ook een stuk hoger ligt.



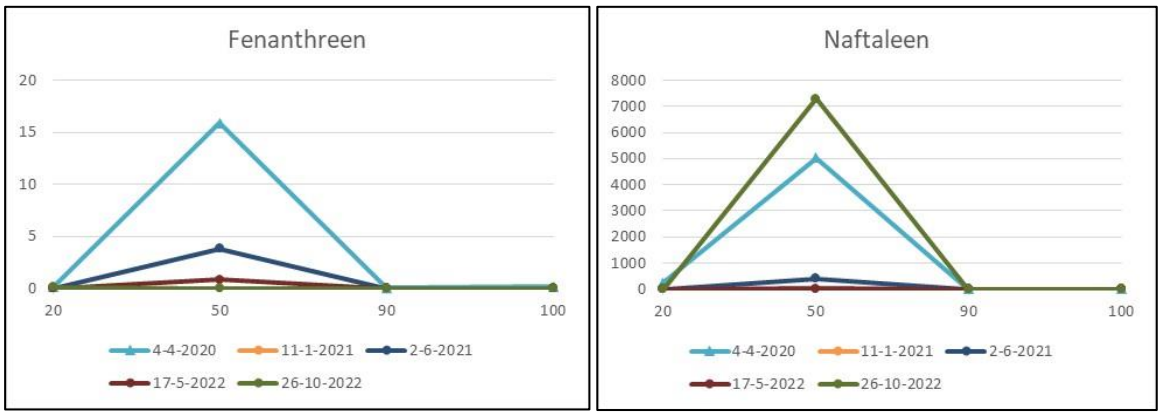
Figuur 49.Fenolindex (µg/l) over het meettraject op verschillende tijdstippen

3.3.1.3.2 Grondwater

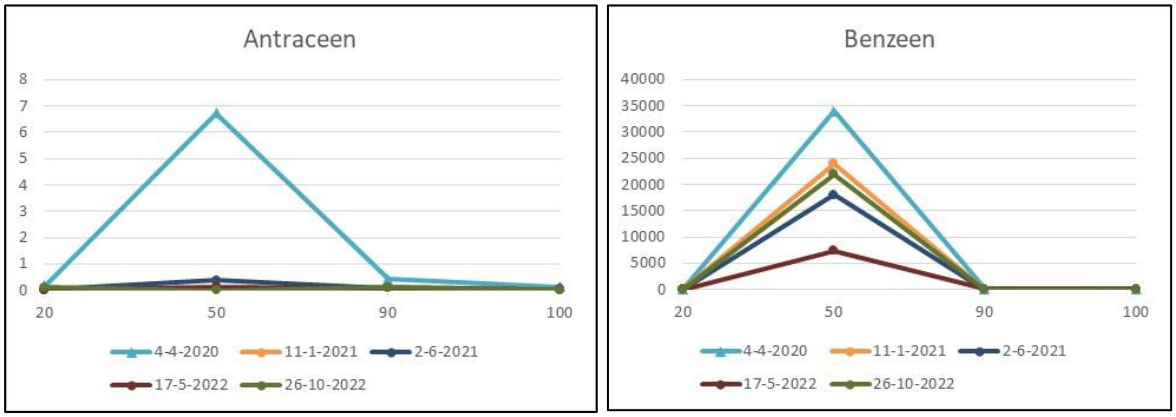
Verontreiniging
In Figuur 50 tot en met 51 is de concentratie (µg/l) van de maatgevende en kritische contaminanten in het grondwater in de peilbuizen 20, 50, 90 en 100 opgenomen op verschillende tijdstippen. (Overzichtsplan: zie Figuur 24)



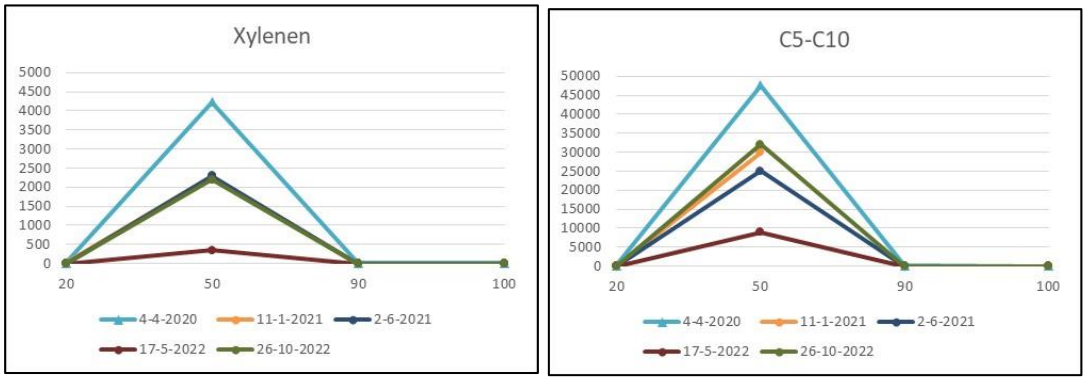
Figuur 50. Acenafteen en pyreen (µg/l) in grondwater ter hoogte van pb 20, 50, 90 en 100



Figuur 51. Fenantreen en naftaleen (µg/l) in grondwater ter plaatse van pb 20, 50, 90 en 100



Figuur 52. Antraceen en benzeen (µg/l) in grondwater ter plaatse van pb 20, 50, 90 en 100



Figuur 53. Antraceen en benzeen (µg/l) in grondwater ter plaatse van pb 20, 50, 90 en 100

Frappant is dat in de nulsituatie (4-4-2020), voorafgaand aan de aanleg van de reactieve mat, voor de meeste stoffen de hoogste concentraties zijn aangetroffen in het grondwater. Eveneens opvallend is dat in mei 2022 veruit de laagste concentraties zijn aangetroffen in het grondwater in de peilbuizen. Dat terwijl in mei 2022 de hoogste concentraties in het oppervlaktewater zijn geconstateerd. Dit komt overeen met de veronderstelling dat het oppervlaktewater op dat moment, als gevolg van de droogte, voornamelijk wordt gevoed door het diepe grondwater recht onder de Lieve (kwel) en niet door het grondwater vanuit de richting van de oever waarin de peilbuizen zijn gesitueerd (zie paragraaf 3.3.1.3.1, '**Verontreiniging**').

Na het lage grondwaterconcentratieniveau in mei 2022 hersteld deze zich naar een gemiddeld tot hoog niveau, waarbij moet worden opgemerkt dat alleen het grondwater in peilbuis 50 een sterke verontreiniging bevat (bv 200 µg/l acenafteen, 7.000 µg/l naftaleen, 20.000 µg/l benzeen en 30.000 µg/l C5-C10 in oktober 2022) en het grondwater in de overige peilbuizen niet of nauwelijks verontreiniging bevatten.

Stijghoogteverschil

Relevant is ook het stijghoogteverschil tussen het grondwater in de peilbuizen in de oever (3-5 m - mv) en het oppervlaktewater van de Lieve, om na te kunnen gaan of er grondwaterstroming richting de Lieve plaatsvindt. De resultaten zijn opgenomen in Tabel 11.

Datum	Waterstand Lieve tov m TAW	Grondwaterniveau OIP 5 (m TAW)	Verhang (m) Grondwater - Lieve
3-2-2020	-	4,521	-
30-3-2020	-	4,531	-
4-6-2020	-	4,331	-
5/11-1-2021	4,66	4,961	0,301
26-3-2021	4,68	5,011	0,331
2-6-2021	4,70	4,961	0,261
27-9-2021	4,63	4,831	0,201
6-1-2022	4,72	4,681	-0,04
17-5-2022	4,81	4,791	-0,02
12-7-2022	4,70	5,031	0,331
26-10-2022	4,63	4,781	0,151

Tabel 11. Waterstanden grondwater en oppervlaktewater en stijghoogteverschil (verhang)

Uit de tabel kan worden opgemaakt dat gedurende 6 van de 8 metingen er een verhang was van het grondwater op de oever richting de Lieve, variërend van 15 tot 33 cm. Op 2 momenten is er geen tot een licht negatief verhang (geen stroming van dit grondwater richting de Lieve), variërend van -2 tot -4 cm op respectievelijk 6 januari 2022 en 17 mei 2022. Verwacht zou worden dat dit tevens het geval is op 12 juli 2022, maar blijkbaar is het grondwaterniveau op dat moment (net?) hersteld.

3.3.1.4 Samenvatting

Aangetoond is dat een reactieve matconstructie met groene adsorbens (Natural Catch[TAUW]) goed kan functioneren en de verwachte zuiveringsrendementen kan behalen. Voor PAK liggen deze rendementen doorgaans hoger dan voor benzeen, xylenen en C5-C10. Dat ligt ook in de lijn der verwachting op basis van de verdelingscoëfficiënten van betreffende stoffen. Na een operationele periode van 2 jaar lijkt biochar nog niet verzadigd en/of door te slaan in hoge concentraties op basis van de uitgevoerde fluxmetingen.

Figuur 54. Impressie van traject de Lieve met reactieve matconstructie in januari 2022

Wel is geconstateerd dat het rendement van de huidige constructie afhankelijk is van de combinatie van:

- De onderlinge aansluiting van matelementen;
- Gasvorming in de waterbodem en (tijdelijke) ophoping hiervan in de matconstructie;
- De aanwezigheid van puur product in de waterbodem direct onder de matconstructie;
- Sterke stroming van oppervlaktewater of hemelwater uit een overstort op de mat.

Als gevolg hiervan kan kortsluitstroming van grondwater met hoge concentraties of zelfs puur product optreden, met als gevolg een snelle daling van het zuiveringsrendement en terugval van de oppervlaktewaterkwaliteit.

3.3.2 Evaluatieresultaten

3.3.2.1 Evaluatie m.b.t. bereiken saneringsdoelstelling

- Aangetoond is dat het gebruik van een reactieve mat gevuld met groene adsorptiematerialen (Natural Catch[TAUW]) zoals biochar en veen (zodenturf) de kwaliteit van een oppervlaktewater, dat verontreinigd grondwater met PAK, BTEX en minerale olie ontvangt, aanzienlijk kan verbeteren. Hierbij is bij optimale werking een rendement van 80-99% behaald, met uitzondering van benzeen met een rendement van 73-80%.
- Voor een 8-tal stoffen die in de nulsituatie de milieukwaliteitsnorm voor oppervlaktewater (MKN-waarde) overschreden wordt bij de optimale werking van de reactieve mat de concentratie gereduceerd tot onder de MKN-waarde: minerale olie (C5-C10), anthraceen, fenanthreen, benzo(a)anthraceen, benzo(k)fluorantheen, benzo(ghi)peryleen, benzo(b)fluorantheen en fluoreen. Maar zelfs bij het hoge rendement van de reactieve mat bij optimale werking wordt niet voor álle stoffen deze MKN-waarde behaald. De 4 stoffen waarvoor dit geldt zijn acenafteen, pyreen en fluorantheen (PAK) en benzeen. Voor de betreffende PAK heeft dit te maken met de relatief lage MKN-waarden (respectievelijk 0,06; 0,04 en 0,12 µg/l) ten opzichte van de relatief hoge initiële concentraties in het oppervlaktewater (respectievelijk 10; 2,2 en 3,4 µg/l) en daarmee de hoge influx. Voor benzeen heeft dit voor een belangrijk deel te maken met de mobiliteit van de stof (adsorbeert het minste) in combinatie met de relatief hoge influx; de MKN-waarde is in dit geval 10 µg/l ten opzichte van een initiële concentratie in het oppervlaktewater van 112 µg/l (een rendement van ca 91% zou nodig zijn).

3.3.2.2 Criteria voor succes

De volgende factoren met betrekking tot matconstructie en omgeving kunnen het succesvol inzetten van een permeabele reactieve mat zoals toegepast in Gent negatief beïnvloeden:

- **Gasvorming in de waterbodem onder de matconstructie**. Door biologische activiteit in de waterbodem ontstaat onder anaerobe omstandigheden methaangas en mogelijk ook koolstofdioxide en waterstofsulfide. Vervolgens wordt dit gas (tijdelijk) door opwaartse druk ingevangen door de reactieve mat:
  - Door insluiting van gas ('gasclogging') wordt de adsorptiecapaciteit beperkt. Een deel van de mat, en daarmee van de adsorptiecapaciteit, is daardoor onbereikbaar voor het verontreinigde grondwater en er is een hogere flux door de natte delen.
  - Via de vervolgens uit de mat ontsnappende gasbellen kan versneld verontreinigd grondwater meekomen, met als gevolg een beperktere contacttijd met het adsorbent en dus minder adsorptie. Dit zullen echter relatief kleine hoeveelheden zijn.

  Het wegnemen van extra slib reduceert deze gasproductie. Hier dient in de haalbaarheidsstudie en tijdens de voorbereidende ruiming van het oppervlaktewater rekening mee gehouden te worden.
- **Onderlinge aansluiting of verbinding van de matelementen**. Bij onvoldoende aansluiting of verbinding tussen matelementen kan kortsluitstroming plaatsvinden van verontreinigd grondwater via de naad richting het oppervlaktewater, zonder contact met adsorbent en dus zonder adsorptie. In het geval er puur product aanwezig is in de waterbodem, zoals lokaal het geval is in de Lieve, kan kortsluitstroming funest zijn voor de oppervlaktewaterkwaliteit.
  Een vloeistofdichte folieflap over de naad, zowel aan de onderkant (op de waterbodem) als aan de bovenkant, reduceert dit risico (N.B. In het ontwerp voor de Lieve was alleen een folieflap aan de bovenkant aanwezig). Door de folieflap aan de bovenkant te verzwaren met bijvoorbeeld een scheepsketting, wordt de kans op verschuiving door stroming van het oppervlaktewater voorkomen. Een alternatief voor verzwaring is het gebruik van klittenband.
- **Aanwezigheid van puur product in de waterbodem direct onder de mat**. Behalve de eerdergenoemde combinatie met kortsluitstroming, zal de technische levensduur van de reactieve mat bij de aanwezigheid van puur product beperkter zijn dan nu berekend (10 jaar op basis van opgelost product) als gevolg van een snellere verzadiging met verontreiniging. Het wegnemen van enkele extra decimeters waterbodem daar waar puur product voorkomt en het opvullen met eenzelfde hoeveelheid schoon zand beperkt dit risico. Hier dient in de haalbaarheidsstudie en bij de voorbereidende ruiming van het oppervlaktewater rekening mee gehouden te worden. Feitelijk is de reactieve mat bedoeld voor het afvangen van opgeloste verontreiniging en niet van puur product
  - **Verandering van de geohydrologie (stroombanen) als gevolg van ontwikkelingen in de omgeving of als gevolg van klimaatverandering**. Hierbij kan gedacht worden aan:
    - Het aanbrengen of wegnemen van verhardingen op maaiveld met als gevolg minder of meer infiltratie van neerslag;
    - Het aanbrengen of trekken van verticale damwanden met als gevolg verstoring van horizontaal grondwatertransport;
    - Het aanbrengen of beëindigen van een grondwateronttrekking;
    - Langdurige droogtes.

Indien deze veranderingen voorzienbaar zijn, dient hier rekening mee gehouden te worden in de haalbaarheidsstudie en tijdens het ontwerp. In het ergste geval dient afgezien te worden van de inzet van een reactieve mat op de voorziene plek.

Voor de organisatorische en financiële aspecten en aspecten met betrekking tot noodzakelijke voorinformatie, meetstrategie, tussentijdse evaluatie en bijsturing wordt verwezen naar paragraaf 3.4.

3.4 EVALUATIE PILOT

3.4.1 Lessons learned

3.4.1.1 Organisatorische aspecten

Regelmatig en nauw overleg tussen milieuadviseur, aannemer en producent zijn essentieel voor een haalbaar ontwerp van een reactieve mat constructie. De locatiespecifieke omstandigheden, de productietechnische mogelijkheden, de faciliteiten van de aannemer, de zuiveringseisen, de eisen van de waterbeheerder, veiligheid en kostenconsequenties dienen in gezamenlijkheid te worden doorgesproken en op elkaar afgestemd. Zie hiervoor ook paragraaf 3.2.2.3.

Een realistische planning van het gehele proces en met alle processtappen, van vooronderzoek tot en met aanleg van de matten en daaropvolgende monitoring, dient voorafgaand aan een toepassing uitgewerkt te worden. Tijdens een dergelijk traject zijn aanpassingen in de planning tot op zekere hoogte nog steeds mogelijk, maar ontstaat door een vooraf vastgesteld tijdschema met activiteiten en doorlooptijden direct inzicht in de consequentie van een aanpassing voor het moment van oplevering en de daaropvolgende monitoring. Logistiek is van het grootste belang voor producent, leveranciers van materialen en de aannemer met het oog op voorbereidingstijd, productietijd, leveringstijd en regelen van transporten, personeel en materieel.

Een centraal aanspreekpunt voor oppervlaktewater- en oeverbeheer is wenselijk. In dit geval waren de verantwoordelijkheden en onderlinge taakverdeling van eigenaar en beheerder onduidelijk. Hierdoor mist er snelheid in besluitvorming (in dit geval over een slibvang en eisen aan matdikte) en is tijdig onderhoud van de vegetatie op de oever, essentieel voor de bereikbaarheid en zichtbaarheid van de reactieve mat, niet gegarandeerd.

3.4.1.2 Voorinformatie en verkennend onderzoek

Ontwerp en constructie van een reactieve mat in de vorm van de Natural Catch[TAUW] kan niet zonder eerst kennis te hebben vergaard over:

- De locatiespecifieke omstandigheden:
  - Historische informatie: hoe, waar en wanneer is bodemverontreiniging ontstaan;
  - Geohydrologie;
  - Bodemopbouw;
  - Aard en dimensies van de aanwezige bodemverontreiniging;
  - Dimensies van het oppervlaktewater: lengte, breedte, diepte, stromingssnelheid en -richting;
  - Concentraties in het oppervlaktewater ten opzichte van normen/risicowaarden.
- De water- en massaflux van de instromende grondwaterverontreiniging;
- De adsorptiekarakteristieken van de verontreiniging;
- De adsorptiecapaciteit van het te gebruiken groene adsorbent.

Voor een uitgebreide bespreking van de technische randvoorwaarden voor de mat en haar omgeving wordt verwezen naar paragraaf 3.3.2.2. Als niet wordt voldaan aan deze randvoorwaarden, wordt tussentijdse bijsturing erg lastig, het zuiverend effect kleiner en komt het behalen van de saneringsdoelstelling in gevaar.

3.4.1.3 Monitoringstrategie, evaluatie en bijsturing

Vooraf dient een uitgeschreven monitoringsstrategie opgesteld te worden, inclusief locatie en aantal metingen en stalen, frequentie en meet- en analysepakket. Deze monitoringsstrategie dient vervolgens wel flexibel te zijn: bij de evaluatie van de resultaten van elke meetronde dient de monitoringsstrategie weer tegen het licht te worden gehouden. Een voorbeeld bij de pilootproef in de Lieve is de plotselinge stijging van oppervlaktewaterconcentraties: hierop dient geanticipeerd te worden door een herstaalname (op relatief korte termijn), een extra veldinspectie, eventuele aanpassingen aan het saneringssysteem (mede afhankelijk van visuele afwijkingen bij veldinspectie) en/of aanvullende metingen (bv met fluxsamplers). Afhankelijk van die uitkomsten is het wellicht nodig om de initiële monitoringsstrategie structureler aan te passen, bijvoorbeeld door de frequentie van meetronden te verhogen.
Indien de oppervlaktewaterkwaliteit structureel verslechtert ondanks maatregelen die op korte termijn zijn te treffen aan het bestaande systeem, zoals het rechttrekken en verzwaren van matten en afdichtende flappen, zijn er de volgende opties in volgorde van ingrijpendheid:

- Het **vervangen** van één of meerdere (verzadigde) matelementen **door matelementen met verse biochar of veen**, en/of;
- Het alsnog **verwijderen** van lokaal voorkomend **puur product uit de waterbodem** en aanvulling met schoon zand, waarna weer een reactieve mat gelegd kan worden, en/of;
- Het hanteren van **andere verbindingen** tussen de kritische matten, of;
- Het verruilen van één of enkele reactieve matelementen door een **klei-/bentonietmat** om belasting van reactieve mat en oppervlaktewater met puur product of extreme concentraties te voorkomen;
- De **inzet** van een **andere saneringstechniek**, zoals (smart) P&T.

3.4.1.4 Financiële aspecten

Er zijn meerdere financiële aspecten relevant voor de toepassing. Die zijn globaal in vier categorieën in te delen:
- Ontwerpkosten;
- Aanlegkosten;
- Operationele kosten;
- Herinvesteringskosten (vervanging).

In onderstaande wordt nader ingegaan op de voor de reactieve mat specifieke aanlegkosten, operationele kosten en herinvesteringskosten.

3.4.1.4.1 Aanlegkosten

De aanlegkosten worden gevormd door:
- Materiaalkosten 1: geotextielconstructie (inclusief ontwerp, gezien de noodzaak van maatwerk);
- Materiaalkosten 2: adsorbent (bv biochar) en ballast (bv riviergrind);
- Uitvoeringskosten: vullen en plaatsen van de matten.

De aanlegkosten van de constructie in Gent liggen in de ordegrootte van EUR 300.000 voor een oppervlak van circa 660 m^2 (≈ EUR 450/m^2) met een evenredige verdeling tussen de drie genoemde kostenposten. De aanlegkosten zijn gekwantificeerd op basis van informatie van OVAM en Envisan. De kosten voor de aanleg van het monitoringssysteem bestaande uit monitoringsfilters voor staalname van het grondwater maken slechts een niet-significant deel uit van de totaalkost.

3.4.1.4.2 Operationele kosten

De operationele kosten worden gevormd door:

- Monitoringskosten: staalname grondwater en oppervlaktewater (2 a 3x per jaar), chemische analyses, fluxmetingen (1 a 2x per jaar), interpretatie en rapportage. Optioneel aangevuld met periodieke qPCR-analyses en staalname en analyse van adsorptiemateriaal;
- Inspectie van de locatie: visuele controle van matconstructie, oppervlaktewater, etc.;
- Eventueel herstel van matconstructie bij beschadiging of verschuiving;
- Onderhoud van de oevervegetatie: één tot tweemaal per jaar;
- Verwijderen slib van matelementen: eens per 3 jaar.

3.4.1.4.3 Herinvesteringskosten

Indien matelementen verzadigd zijn, dient minimaal het daarin aanwezige adsorptiemateriaal vervangen te worden. Geotextiel en ballast kunnen in principe worden hergebruikt.

Doorgaans zal het adsorptiemateriaal minimaal 10 jaar mee moeten kunnen gaan (NB: Uitgangspunt daarbij is de aanwezigheid van opgelost product en niet van puur product). Bovendien is de vuilbelasting van niet alle matelementen even groot: dit is afhankelijk van de massaflux die over het traject genomen doorgaans heterogeen verdeeld is. Vandaar dat bij vervanging veelal niet het gehele traject hoeft te worden vervangen: een deel van de matelementen zal sneller verzadigen, een ander deel wordt minder belast. Wel kunnen uit voorzorg extra, nog niet volledig verzadigde matelementen worden vervangen om de kans te verkleinen dat binnen 10 jaar opnieuw dient te worden ingegrepen; vervanging vergt immers een behoorlijke voorbereiding en kost relatief veel materieel, tijd en daarmee geld (vrijmaken werkterrein; aan- en afvoer hijskranen, vulconstructie en keet; bestellen en levering adsorbent; uitvoeringsdocument; V&G-plan; verslag van de werken).

In paragraaf 2.4.1.5.2 is een inschatting gegeven van de totale kosten van de reactieve matconstructie over een tijdspanne van 30 jaar, inclusief operationele kosten en herinvesteringskosten.

3.4.1.5 Duurzaamheid

In retrospectieve (post-hoc) is een duurzaamheidsbeoordeling van de reactieve mat uitgevoerd. Hierbij gaat het voornamelijk om de relatieve score op duurzaamheidsaspecten ten opzichte van alternatieve (conventionele) saneringstechnieken die hadden kunnen worden ingezet. TAUW heeft haar eigen tool ingezet om een duurzaamheidsbeoordeling uit te voeren waarbij gewichten en scores worden toegekend aan ruim 22 duurzaamheidsindicatoren. Deze indicatoren zijn ingedeeld in de 3 dimensies People, Planet en Prosperity (sociaal, milieugerelateerd en economisch). De duurzaamheidsindicatoren zijn gebaseerd op ISO 18504 (Soil Quality – Sustainable Remediation), relevante UN Sustainable Development Goals, SuRF-UK documenten en enkele andere relevante literatuurbronnen en eigen saneringservaring.

Binnen de duurzaamheidsindicatoren zijn de carbonfootprint (een indicator voor Planet) en de saneringskosten (een indicator voor Prosperity) nader gekwantificeerd.

3.4.1.5.1 Beoordeelde saneringsalternatieven

Als alternatieve saneringstechnieken voor de situatie bij de Lieve zijn beoordeeld:

1. Ontgraving van de bronzone;
2. Pump & treat (P&T);
3. Reactieve mat.

P&T is technisch, organisatorisch en financieel gezien het meest voor de hand liggende saneringsalternatief als we de locatiespecifieke omstandigheden in ogenschouw nemen. Een belangrijke factor hierbij is onder meer de aanwezigheid van bedrijven boven de bronzone, waardoor het bijkomend ontgraven van verontreinigde grond een moeilijk haalbare optie is. Aangezien het afgraven en verwijderen van verontreinigde grond onder andere omstandigheden (bv. bij een braakliggende locatie) een effectieve optie kan zijn, is dit als basisreferentie in de duurzaamheidsbeoordeling opgenomen.

Voor de alternatieve saneringstechnieken zijn de volgende grondslagen voor het ontwerp gehanteerd:

1. De ontgraving beslaat een oppervlakte van ongeveer 7.500 m^2 en bereikt een gemiddelde diepte van ongeveer 5 m-mv; deze bronzone wordt verondersteld aanwezig te zijn binnen de drainerende invloedssfeer van de Lieve. Er moet grondwater worden onttrokken om grondontgraving in de verzadigde zone mogelijk te maken. Hiervoor is de plaatsing van damwanden noodzakelijk en is een waterzuiveringsinstallatie nodig met dezelfde componenten als voor het P&T-alternatief. Het sterk verontreinigde deel van de ontgraven grond, naar verwachting ongeveer 22.500 m^3 (circa 60% van de ontgraven grond) wordt getransporteerd naar een externe verwerker voor thermische reiniging. Thermische reiniging is noodzakelijk met het oog op de aanwezigheid van hoge gehalten geadsorbeerd PAK en puur product (PAK, minerale olie en BTEX). Voor de opvulling is schone grond nodig.

2. Het P&T-alternatief bestaat uit 3 onttrekkingsputten tot 5 m-mv, waarmee het grondwater tot een diepte van tenminste 6 m-mv door onttrekking wordt bereikt. Met behulp van een onttrekkingspomp wordt een debiet van 40 m^3/d gehanteerd, rekening houdend met het natuurlijke debiet. Er wordt een zuiveringsinstallatie ingezet met een olie-waterafscheider en waterzijdige actieve koolfilters.
   Vervolgens wordt het gezuiverde water rechtstreeks in de Lieve geloosd. De onderdelen van het systeem worden na 12 tot 15 jaar vervangen en het duurt tenminste 30 jaar voordat de concentraties verontreinigende stoffen zijn gedaald tot een niveau waarbij de kwaliteitsnormen van het oppervlaktewater worden bereikt bij natuurlijke instroming van het verontreinigde grondwater.

3. De reactieve matconstructie, zoals aangelegd in de Lieve, heeft een totale lengte van 110 m en is 5 m breed. Over een lengte van 65 m zijn de matelementen gevuld met 104 m^3 biochar. Het overige deel van 45 m is gevuld met 88 m^3 gezeefd zodenturf (veen). Bovendien is in totaal 38 m^3 riviergrind toegepast als ballastmateriaal. Er wordt vanuit gegaan dat 50% van de matelementen elke 10 jaar dient te worden vervangen (traject met hoge influx) en de overige 50% pas na 20 jaar wordt vervangen (traject met lage influx). Het verontreinigde adsorbens wordt voor thermische behandeling (volledige verbranding) afgevoerd. Het geotextiel en het ballastmateriaal worden daarbij hergebruikt.

Analoog aan de P&T variant duurt het tenminste 30 jaar voordat de verontreinigingsconcentraties zijn afgenomen tot een voor de bescherming van de oppervlaktewaterkwaliteit aanvaardbaar niveau.

Een samenvatting van de calculaties is opgenomen in bijlage 3.5.

3.4.1.5.2 Vergelijking kosten

Kosten ontgraving
De kosten van de ontgraving worden geraamd op ongeveer EUR 4.200.000 (excl. btw). Hierbij is, aanvullend op de eerdergenoemde ontwerpgrondslagen onder paragraaf 3.4.1.5.1 ('Beoordeelde saneringstechnieken'), uitgegaan van:

- een ontgravingsduur van 2 maanden;
- 350 meter damwand tot 15 meter diep;
- aanvulling met 22.500 m^3 schone grond;
- een bemaling met een debiet van 20 m^3/h;
- inclusief milieukundige begeleiding en monitoring (grond, influent en -effluent zuivering, grondwaterpeil);
- 8% algemene kosten; 7% winst en risico;
- rentepercentage 0%.

Kosten pump & treat
De kosten van de P&T variant worden geraamd op ongeveer EUR 1.400.000 (excl. btw). Hierbij is, aanvullend op de eerdergenoemde ontwerpgrondslagen onder paragraaf 3.4.1.5.1 ('Beoordeelde saneringstechnieken'), uitgegaan van:

- een saneringsduur van 30 jaar;
- inclusief onderhoud;
- inclusief milieukundige begeleiding en monitoring (grondwater, influent en -effluent zuivering, oppervlaktewater, grondwaterpeil);
- 8% algemene kosten; 7% winst en risico;
- rentepercentage 0%.

Kosten reactieve mat
De kosten van de reactieve mat worden geraamd op ongeveer EUR 1.100.000 (excl. btw). Hierbij is, aanvullend op de eerdergenoemde ontwerpgrondslagen onder paragraaf 3.4.1.5.1 ('Beoordeelde saneringstechnieken'), uitgegaan van:

- een saneringsduur van 30 jaar;
- inclusief onderhoud;
- inclusief milieukundige begeleiding en monitoring (grondwater, oppervlaktewater);
- 8% algemene kosten; 7% winst en risico;
- rentepercentage 0%.

Conclusie
De kosten van de reactieve mat zijn het laagst. Daarbij de volgende opmerkingen:

- Alle kosten van de ontgravingsvariant worden in jaar 1 genomen, terwijl een groot deel van de kosten van P&T en de reactieve mat worden verspreid over 30 jaar. Er is nu gerekend met een rentepercentage van 0. Houden we echter rekening met rente, dan zal een dergelijke kostenspreiding nog veel gunstiger zijn.

- Ook als P&T en de reactieve mat 50 jaar nodig zijn in plaats van 30 jaar, zijn de kosten van beide varianten nog steeds ruim 50% lager dan van de ontgravingsvariant (nog zonder rekening te houden met rente).

3.4.1.5.3 Vergelijking CO_2-footprint

Uitgangspunten algemeen
De carbonfootprint van de saneringsalternatieven is bepaald met behulp van de CO_2-calculator voor bodemsaneringen van TAUW (versie 1.4 en 1.5). Aanvullend op de eerdergenoemde ontwerpgrondslagen onder paragraaf 'Beoordeelde saneringstechnieken' en 'Vergelijking kosten' aangegeven ontwerpgrondslagen per alternatief, is voor de CO_2-footprint rekening gehouden met:
- Het gebruik van fossiele brandstof voor voertuigen (transport en handling on- en off site);
- Het gebruik van fossiele brandstof voor thermische behandeling van sterk verontreinigde grond en adsorbens;
- Het gebruik van grijze elektriciteit voor elektrische apparatuur (vnl. zuiveringsunit);
- Oxidatie van organisch stof bij thermische behandeling van grond en adsorbens;
- Productie van gebruikte materialen en hulpstoffen;
- Regeneratie van actief kool.

De modelinvoer en -uitvoer is opgenomen in bijlage 3.6.

CO_2-footprint ontgraving
De CO_2-footprint van de ontgraving wordt geraamd op ongeveer 7.100 ton CO_2. Hierbij ligt het zwaartepunt bij de thermische reiniging van de ontgraven en afgevoerde grond.

CO_2-footprint P&T
De CO_2-footprint van de pump&treat variant wordt geraamd op ongeveer 430 ton CO_2. Hierbij ligt het zwaartepunt bij het actief koolverbruik; een goede tweede is het energieverbruik van de onttrekkingspompen.

CO_2-footprint reactieve mat
De CO_2-footprint van de reactieve mat variant wordt geraamd op ongeveer 360 ton CO_2. Hierbij is als uitgangspunt genomen dat alle adsorbens biochar betreft. Dus ook het nu gebruikte veen wordt beschouwd als biochar (= worst case). Een nog bepalender uitgangspunt is dat het opgeladen biochar extern wordt gereinigd door thermische behandeling/verbranding. Wordt gekozen voor een alternatieve externe reiniging, zoals biologische behandeling door landfarming (bv. met gebruik van witrotschimmels), dan wordt slechts een uitstoot van circa 100 ton CO_2 geraamd.

Volledige scan op duurzaamheidsindicatoren

Inleiding
TAUW heeft een tool ontwikkeld om de duurzaamheid van saneringsopties te beoordelen door gewichten en scores toe te kennen aan duurzaamheidsindicatoren. De 22 voor deze casus geselecteerde duurzaamheidsindicatoren zijn ingedeeld in de drie dimensies People, Planet en Prosperity (mens, milieu & welvaart). De duurzaamheidsindicatoren zijn gebaseerd op ISO 18504, de VN-doelstellingen voor duurzame ontwikkeling, SuRF-UK-documenten en enkele andere relevante literatuurbronnen.

Alle duurzaamheidsindicatoren hebben een standaardgewicht (vastgesteld vóór de eigenlijke beoordeling), variërend van 1 tot 3. Het maximale gewicht van 3 is toegekend aan de volgende van het grootste belang geachte indicatoren:

- 'Veiligheids- en gezondheidsrisico's' en 'Hinder' (dimensie People);
- 'Kwaliteitsverhoging bodem en grondwater', 'Kwaliteitsverhoging oppervlaktewater' en 'CO_2-footprint' (dimensie Planet);
- 'Kosten van sanering' en 'Waardestijging van perceel' (dimensie Prosperity).

De overige duurzaamheidsindicatoren hebben een gewicht van 1 of 2.

De score per saneringsalternatief voor elke duurzaamheidsindicator kan een waarde aannemen van 0 tot 5. De laagste individuele score is 0, de beste individuele score is 5. Een score van 0 betekent ofwel helemaal geen toegevoegde waarde ofwel een negatieve last. Hoe hoger de score, hoe lager de last of hoe hoger het voordeel in termen van duurzaamheid.

Het product van individuele score en gewicht levert een eindwaarde op voor elke afzonderlijke duurzaamheidsindicator, per saneringsalternatief. Deze waarden worden bij elkaar opgeteld om een totaal te krijgen voor elk van de drie dimensies, per saneringsalternatief. De uiteindelijke beoordeling van saneringsalternatieven vindt plaats op basis van de vergelijking van de totaalscore per dimensie.

Resultaat

De beoordeling is uitgevoerd door TAUW. Tabel 12 toont de scores van de duurzaamheidsbeoordeling voor de drie saneringsalternatieven voor zowel de individuele duurzaamheidsindicatoren als voor een volledige dimensie.

N.B. Indien de beoordeling zou worden uitgevoerd als onderdeel van een voorafgaand besluitvormingsproces op een locatie, zou ook de inbreng van andere belanghebbenden, zoals de probleemeigenaar en omwonenden, bij de beoordeling moeten worden betrokken. Verschillende belanghebbenden kunnen criteria die niet volledig meetbaar/kwantificeerbaar zijn, zoals 'Overlast', 'Betrokkenheid van de gemeenschap' en 'Esthetische gevolgen", verschillend beoordelen (wegen en scoren).

Een korte toelichting na Tabel 12 geeft per duurzaamheidsindicator een ondersteunende motivering voor de behaalde scores.

De uitkomst van de duurzaamheidsbeoordeling is als volgt:

- Op de dimensie 'People' scoren 'P&T' en 'Reactieve Mat' vergelijkbaar en ruim beter dan 'Ontgraving', vanwege de indicatoren 'Veiligheids- en gezondheidsrisico's' en 'Overlast'.
- Op de dimensie 'Planet' scoort 'Reactieve mat' het best en 'Ontgraving' het slechtst. Dit komt vooral door de indicatoren 'Effect op luchtkwaliteit', 'Gebruik van energie', 'CO_2-footprint' en 'Gebruik van primair zand'.
- Op de dimensie 'Prosperity' scoort 'Reactieve mat' het best en 'Ontgraving' het slechtst. Dit komt vooral door de indicatoren 'Kosten van sanering', 'Bedrijfsonderbreking' en 'Financiële projectrisico's'.

Als we de totaalscore per dimensie beoordelen is de reactieve mat een overtuigend duurzamere keuze dan ontgraving als saneringsvariant. Het verschil met de P&T variant is veel kleiner, maar nog wel overtuigend op de dimensies 'Planet' en 'Prosperity'. Geconcludeerd wordt dat in Gent de inzet van de reactieve mat de meest duurzame keuze is.

© TAUW	Health & safety risks (regarding execution remediation)							
Dimension	Sustainability Indicator	Assessment score Excavation	Assessment score Pump&Treat	Assessent score Reactive Mat	Weight	Final score Excavation	Final score Pump&Treat	Final score Reactive Mat
People	Health & safety risks (regarding execution remediation)	2	5	4	3	6	15	12
	Nuisance (odor, noise, dust, movements, vibrations, light, road closure)	1	4	4	3	3	12	12
	Community involvement	2	2	3	1	2	2	3
	Aesthetic impact of works (permanent)	3	2	2	1	3	2	2
	Uplift in public value of site (leisure, cultural historic, etc)	0	0	0	1	0	0	0
	Subscore dimension People					**14**	**31**	**29**
Planet	Uplift in soil & groundwater quality	5	0	0	3	15	0	0
	Uplift in surface water quality	5	5	5	3	15	15	15
	Impact on air quality (fine particles (PM10) and NOx)	0	4	4	1	0	4	4
	Physical landscape disturbance (permanent)	5	4	4	1	5	4	4
	Biodiversity impact (macro and micro)	1	3	4	2	2	6	8
	Climate adaptation impact (incl extraction of groundwater resources)	1	3	5	2	2	6	10
	Use of energy (fossil or green fuel and electricity)	0	4	5	1	0	4	5
	CO2 footprint (energy, materials, chemicals, redox)	0	4	4	3	0	12	12
	Use of virgin soil (sand mining)	0	5	5	1	0	5	5
	Production of waste	2	3	4	2	4	6	8
	Subscore dimension Planet					**43**	**62**	**71**
Prosperity	Cost of remediation	0	4	5	3	0	12	15
	Land use restrictions (with respect to excavation and extraction)	5	2	2	1	5	2	2
	Business interruption	0	5	5	2	0	10	10
	Financial project risks	0	5	4	2	0	10	8
	Impact on brand value	1	1	4	2	2	2	8
	Time span (from start to end of remediation work)	5	0	0	2	10	0	0
	Uplift in land values (reclaim of land, marketability, etc)	4	3	3	3	12	9	9
	Subscore dimension Prosperity					**29**	**45**	**52**

Tabel 12. Afweging saneringsalternatieven op duurzaamheidsindicatoren (ontgraving, P&T en reactieve mat)

Health and safety / veiligheid en gezondheid
Vanwege de aanzienlijke graaf- en aanvulactiviteiten, de transportbewegingen (verkeersrisico's) en de verdamping van vluchtige stoffen (blootstellingsrisico's) heeft 'Ontgraving' de laagste score.

Nuisance / hinder voor omgeving
Als gevolg alle transportbewegingen op en buiten het terrein en de daarmee gepaard gaand lawaai, stof, bewegingen, trillingen, licht en wegafsluitingen heeft het ontgravingsalternatief de laagste score.

Community involvement / betrokkenheid van gemeenschap
De buurt is niet actief betrokken geweest bij de realisatie van de sanering. De buurt is periodiek geïnformeerd over de voortgang door middel van periodieke nieuwsbrieven. Wat de reactieve mat onderscheidt, is dat vanwege het innovatieve karakter een informatiebord voor het publiek naast de Lieve is geplaatst om informatie te geven over de geschiedenis van de site en de innovatieve aanpak (inclusief een link naar een online animatie).

Aesthetic impact of works / esthetische gevolgen van werk, permanent
Het ontgravingsalternatief zal het uiterlijk van de site niet permanent negatief beïnvloeden. De andere twee alternatieven zullen op langere termijn enkele zichtbare delen hebben.

Uplift in public value of site / verhoging publieke waarde van gebied: recreatie, cultuurhistorisch, enz.
De publieke waarde van het gebied neemt niet toe als gevolg van het werk.

Uplift in soil & groundwater quality / verbetering van bodem- en grondwaterkwaliteit
Op korte en middellange termijn neemt de bodem- & grondwaterkwaliteit niet (of nauwelijks) toe door P&T en de reactieve mat: geen van beide zijn gericht op de bron, alleen op traject en receptor. De ontgraving is het enige alternatief dat op deze indicator scoort.

Uplift in surface water quality / verbetering van oppervlaktewaterkwaliteit
Alle alternatieven scoren even goed op deze indicator. De verbetering is immers het doel van de sanering.

Impact on air quality / effect op luchtkwaliteit: fijnstof (PM10) en NOx
Alle voertuigen die nodig zijn voor ontgraving, transport en aanvulling gebruiken fossiele brandstoffen. Dit veroorzaakt uitstoot van fijnstof en NOx. Voor de twee andere alternatieven is dit verwaarloosbaar ten opzichte van het ontgravingsalternatief.

Physical landscape disturbance / permanent verstoring van het fysieke landschap
Het landschap wordt door P&T en de reactieve mat enigszins beïnvloed in permanente zin. Zandwinning voor de aanvulling van de ontgraving verstoort het landschap, maar hier wordt impliciet rekening mee gehouden onder een andere indicator: '*Gebruik van primair zand*'.

Biodiversity impact / gevolgen voor biodiversiteit, macro- en microflora en -fauna
De ontgraving zal leiden tot verlies van de huidige vegetatie en biodiversiteit in de huidige bodem. De P&T variant heeft geen effect op de biodiversiteit. De reactieve mat heeft een licht positief effect op de biodiversiteit in het waterlichaam omdat deze een habitat vormt voor micro-organismen en enkele waterplanten (N.B. periodiek moeten waterplanten worden verwijderd).

Climate adaptation impact / klimaatadaptatie impact, incl. onttrekking grondwatervoorraden
In alle alternatieven is verwijdering van (verontreinigd) slib en daarmee betere ontwatering door de Lieve van de omgeving opgenomen bij zware regenval. Niettemin is voor de graafoptie een tijdelijke maar grote actieve onttrekking van grondwater noodzakelijk.
Dit leidt tot een tijdelijke maar grote impact op de grondwatervoorraad en het grondwaterniveau, en kan lokale verdroging tot gevolg hebben. In mindere mate geldt dat ook voor de P&T variant: er wordt meer grondwater onttrokken dan op basis van alleen natuurlijk toestroom naar de Lieve. In dit laatste geval is er echter nauwelijks sprake van een effect op het grondwaterniveau (het onttrokken volume per tijdseenheid is laag) waardoor verdroging niet of nauwelijks optreedt.

Direct use of energy / direct gebruik van energie
De ontgraving gebruikt veel energie (hetzij groen, hetzij fossiel/grijs) vanwege het gebruik van graafmachines, vrachtwagens voor transport van grond en machines voor verdichting en nivellering na opvulling. Voor het P&T-alternatief zijn gedurende een lange periode onttrekkings- en zuiveringspompen nodig. Het energieverbruik bij de reactieve mat is relatief verwaarloosbaar.

CO_2 footprint (energie, materialen, chemicaliën, redox)
Alle voertuigen nodig voor afgraving, transport en aanvulling gebruiken fossiele brandstoffen. Dit veroorzaakt een netto CO_2-uitstoot. De thermische behandeling van de afgevoerde grond vergt niet alleen veel energie, maar veroorzaakt ook oxidatie van organisch materiaal in de bodem, wat leidt tot CO_2-emissie.

Ook de productie van damwandplanken (ondanks hergebruik) veroorzaakt een groot deel van de CO_2-emissie. De laatste belangrijke emissie in geval van ontgraven is als gevolg van productie van actief kool en regeneratie van gebruikt actief kool afkomstig van de waterbehandeling.

De grootste CO_2-uitstoot voor P&T wordt bepaald door het energieverbruik door de pompen, de productie van actief kool en de regeneratie van beladen/gebruikt actief kool afkomstig van de waterbehandeling.

Voor de reactieve mat wordt biochar gebruikt. Voor biochar is productie-energie nodig, maar minder dan voor actief kool. De grootste CO_2-emissie in het geval van de reactieve mat vindt plaats via thermische behandeling van gebruikt biochar na 10 of 20 jaar (N.B. in de praktijk zijn er mogelijk twee alternatieve behandelingen beschikbaar met een veel lagere tot verwaarloosbare CO_2-emissie: storten of biologische behandeling met witrotschimmels). De CO_2-uitstoot als gevolg van de productie van geotextiel is verwaarloosbaar en geotextiel wordt zoveel mogelijk hergebruikt.

De CO_2-footprint van de ontgraving, P&T en de reactieve mat wordt geraamd op respectievelijk 7.100, 430 en 360 ton CO_2. In de eerdere paragraaf 3.4.1.5.3 ('Vergelijking van de CO_2 footprint') zijn nadere details opgenomen.

Use of virgin soil / Gebruik van primair zand (zandwinning)
Voor aanvulling is bij het ontgravingsalternatief een grote hoeveelheid schone grond nodig. Verondersteld wordt dat deze afkomstig is uit een zandwinning.

Production of waste/Productie van afval
In geval van ontgraving en P&T wordt afval geproduceerd in de vorm van leidingmateriaal voor grondwateronttrekking en vrij product van de olie-waterafscheider. In het geval van ontgraving komt bovendien folie vrij van de tijdelijke opslag van grondpartijen. In het geval van de reactieve matten wordt het geotextieldoek uiteindelijk afval (na hergebruik).

Cost of remediation / Kosten van sanering
De kosten van de ontgraving zullen ongeveer 4,2 miljoen euro bedragen (binnen een tijdsbestek van enkele maanden). De kosten van het P&T-alternatief en het reactieve mattenalternatief voor 30 jaar zullen respectievelijk ongeveer EUR 1,4 miljoen en EUR 1,1 miljoen bedragen.
In de eerdere paragraaf 3.4.1.5.2 ('Vergelijking kosten') zijn nadere details opgenomen.

Land use restrictions / Beperkingen van landgebruik
Afgraven scoort het best op deze indicator, simpelweg omdat bijna alle bodem- en grondwaterverontreiniging is verwijderd, ten minste boven een diepte van 5 tot 6 m-mv. Tot die diepte gelden geen restricties voor het landgebruik. In het geval van zowel P&T als de reactieve mat zijn er aanzienlijke beperkingen van het landgebruik, waarbij de vestiging van op- en overslaghallen overigens gewoon mogelijk is met een gasdichte vloer als isolatie.

Business interruption / Bedrijfsonderbreking
In het geval van ontgraving moeten de activiteiten op het terrein enkele maanden worden stilgelegd. De bedrijfsactiviteiten kunnen doorgaan wanneer P&T en de reactieve mat geïnstalleerd worden en operationeel zijn.

Financial project risks / Financiële projectrisico's
De financiële gevolgen bij afwijkingen in de dimensionering van de ontgraving zijn veel groter dan bij de P&T en de reactieve mat.

Impact on brand value / Impact op merkwaarde

Elke bodem- en grondwatersanering die succesvol wordt uitgevoerd draagt bij aan de merkwaarde van de probleemeigenaar. Meer impact kan worden gegenereerd wanneer projecten op een innovatieve en zichtbare manier worden uitgevoerd, in combinatie met de link naar het natuur-gebaseerde karakter. Dit laatste is het geval voor de reactieve mat.

Time span/Tijdsduur (van begin tot einde van sanering)
Het ontgravingsalternatief scoort veruit het best op de tijdsduur van de werkzaamheden: maanden versus decennia.

Uplift in land values / Stijging van perceelwaarde (herbruikbare perceeldelen, verkoopbaarheid, enz.)
Voor alle alternatieven is er een stijging van de economische grondwaarde, omdat de aansprakelijkheid voor de verontreiniging afneemt. Bovendien is de verhandelbaarheid groter wanneer alle bodem- en grondwaterverontreiniging tot een diepte van 5 m-mv is verwijderd, waarmee ontgraven het best scoort.

3.4.2 Aanbevelingen voor codes van goede praktijk

3.4.2.1 Algemene conclusies

Een reactieve mat met groene adsorptiematerialen (Natural Catch^{TAUW}) kan de kwaliteit van oppervlaktewater aanzienlijk verbeteren. Aangetoond is dat een rendement van 80-99% kan worden behaald voor PAK, vluchtige olie en (B)TEX en van 70-80% voor het mobielere benzeen.

Essentieel voor het ontwerp en de werking van een Natural Catch^{TAUW} zijn inzicht in locatie specifieke omstandigheden (hydrologie, verontreinigingssituatie, dimensies oppervlaktewater) en het uitvoeren van fluxmetingen (waterflux en massaflux) en adsorptietesten (schudtesten van verontreinigd water met adsorbent).

Uit de uitgevoerde fluxmetingen volgt dat na een operationele periode van 2 jaar biochar nog niet verzadigd is en nog niet doorslaat in hoge concentraties.

De werking van de reactieve mat zoals toegepast in Gent is gevoelig voor de volgende punten:
- De onderlinge aansluiting van de matelementen;
- De insluiting van gas door gasvorming in de waterbodem (methaan) en bij droogvallen als gevolg van ondiepte;
- De aanwezigheid van puur product in de waterbodem direct onder de mat;
- De verandering van de geohydrologie (stroombanen) als gevolg van ontwikkelingen in de omgeving (bv verandering van hemelwater infiltratie).

In Gent is de inzet van een reactieve mat de meest duurzame keuze bij een afweging op duurzaamheidsindicatoren conform ISO 18504, met name op de dimensies ‘Planet’ en ‘Prosperity’. De kosten van de inzet van de reactieve mat in Gent gedurende 30 jaar, inclusief aanleg, onderhoud en vervanging, zijn geraamd op EUR 1.100.000 (excl. BTW).

De carbonfootprint van de reactieve mat over 30 jaar is geraamd op 360 ton CO_2, met biochar als adsorbent en verwerking van het opgeladen biochar door verbranding. Bij biologische behandeling van het opgeladen biochar zou de carbonfootprint kunnen worden gereduceerd tot ca. 100 ton CO_2.

3.4.2.2 Aanbevelingen

De voordelen van een reactieve mat op basis van een geschikte groene adsorbent zijn evident:

- Het is een passief en duurzaam systeem met een lage carbon footprint en lage kosten.
- Het kan worden geplaatst in drainerende sloten, beken en (kleinere) kanalen.
- De verwijderde verontreiniging uit kwellend grondwater, waaronder C6-C40, PAK, BTEX, chloorkoolwaterstoffen, pesticiden en zware metalen (in een ander type adsorbent is tevens fosfaat te verwijderen).
- Afgaande op het type verontreiniging is het toepasbaar voor verontreiniging afkomstig van brownfields, operationele industrielocaties, chemische stortplaatsen, mijnbouwlocaties en intensieve akkerbouw.

Op basis van bovenstaande wordt aanbevolen de optie van een Natural Catch[TAUW] altijd mee te nemen bij de afweging van saneringsvarianten in het geval van kwellend verontreinigd grondwater in natuurlijke of speciaal daartoe aangelegde kleinere drainerende.

Bij het ontwerp, de voorbereiding en de toepassing van een Natural Catch[TAUW] wordt aanbevolen:

- Extra slib/grond uit de waterbodem weg te nemen en aan te vullen met enkele decimeters zand of gravel, bij:
  - Aanwezigheid van puur product in de waterbodem. Hiermee wordt de levensduur van de reactieve mat verlengd en de invloed van eventuele kortsluitstroming geminimaliseerd.
  - Een hoog organisch stofgehalte in de waterbodem en als gevolg daarvan gasvorming door biologische activiteit. Hiermee wordt de ophoping van gas in de mat geminimaliseerd, waardoor de volledige adsorptiecapaciteit van de mat kan worden benut.

- Extra aandacht te besteden aan de aansluiting of verbinding van matelementen om kortsluitstroming tussen twee elementen te voorkomen of te minimaliseren door:
  - Zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde een brede vloeistofdichte folieflap over de naad te leggen;
  - De folieflap aan de bovenzijde te verzwaren met een scheepsketting of te fixeren met een klitteband constructie.

- Rekening te houden met voorzienbare veranderingen in geohydrologie (richting en flux van stroombanen) als gevolg van ontwikkelingen in de omgeving, zoals verharding of ontharding op maaiveld, onttrekking van grondwater, ruiming van slib, hemelwaterafvoer, et cetera.

- Aanvullend onderzoek uit te voeren naar de mogelijkheden om de carbonfootprint van de Natural Catch[TAUW] verder te verlagen. Laaghangend fruit is wat dat betreft onderzoek naar de biologische behandeling van opgeladen adsorbent in een landfarm met witrotschimmels of specifieke microbiomen

4 WERKPAKKET 4

Samenvatting

Op de vroegere Carcoke site in de haven van Zeebrugge was vroeger een munitiefabriek en later een cokesfabriek gevestigd. Als gevolg van de industriële processen en calamiteiten is de bodem op het betreffende terrein en aanpalende terreinen verontreinigd geraakt met onder andere verschillende koolwaterstoffen. Na een omvangrijke sanering is alsnog een restverontreiniging achtergebleven waarbij een risico blijft bestaan op de verdere verspreiding van de verontreiniging.

Het doel van werkpakket 4 is, om met een duurzame en op de natuur gebaseerde maatregel de kwaliteit van de bodem en het grondwater te verbeteren. Deze maatregel heeft vorm gekregen in fytoremediatie. Fytoremediatie is het inzetten van planten en de daarbij horende micro-organismen zoals bacteriën en schimmels. Deze techniek werd ook toegepast op sediment dat bij ruimingswerken van De Lieve is vrijgekomen.

Na een haalbaarheidsonderzoek, het ontwerp en de inrichting werd er gedurende 2 jaar gemonitord in het kader van RESANAT.
Uit de resultaten blijkt dat fytoremediatie een bijzonder duurzame oplossing is om een verontreiniging met koolwaterstoffen aan te pakken. In het kader van RESANAT werden ook verschillende technieken getest om de goede werking van een fytoremediatie op te volgen.

4.1 INLEIDING

4.1.1 Veralgemeende probleemstelling & oplossing

Verschillende gesaneerde sites worden gekenmerkt door de aanwezigheid van een restverontreiniging die omwille van de omvang of andere specifieke omstandigheden niet kon verwijderd worden.
Natuurgebaseerde oplossingen zoals fytoremediatie kunnen een belangrijke oplossing bieden in het beheersen of verder verwijderen van deze restverontreinigingen.

Fytoremediatie is een duurzame groene saneringstechniek die gebruik maakt van planten en hun geassocieerde micro-organismen om verontreinigende stoffen uit bodem, water of sediment te verwijderen via afbraak, extractie, transformatie of vervluchtiging. Een plantendek kan ook worden aangewend om een verontreiniging te stabiliseren (immobilisatie).
Fytoremediatie is een innovatieve, milieuvriendelijke, duurzame en lage-kosten saneringsmethode. Er worden bijkomende voordelen verwacht op vlak van kwaliteit van de leefomgeving, natuurlijk kapitaal, biodiversiteit en ecosysteemdiensten. (OVAM, 2019)

In werkpakket 4 wordt gefocust op op de fytoremediatie van minerale olie, BTEX en PAK's. Vooral met betrekking tot de haalbaarheid van fytoremediatie voor de verwijdering van langere minerale olie ketens en PAK's zijn er nog onduidelijkheden waarop de resultaten van het RESANAT-project een antwoord kunnen bieden.

4.1.2 Algemeen kader werkpakket 4

Het concept past binnen de Sustainable Development Goals van de United Nations, in het bijzonder:

- SDG 3 - Good Health and Well-Being: het voorkomen van humane risico's;
- SDG 6 - Clean Water and Sanitation: verbetering van waterkwaliteit door reductie van verontreiniging;
- SDG 11 – Sustainable cities and communities: Fytoremediatie biedt door de vergroening een meerwaarde voor mens en ecosysteem ook op bedrijfsterreinen en in de woonomgeving. Op die manier draagt fytoremediatie bij aan het veerkrachtig en duurzaam maken van steden en leefgemeenschappen;
- SDG 12 - Responsible Production and Consumption: 1) minimalisatie van gebruik van fossiele brandstoffen, materialen (incl. productie) en chemicaliën en van afvalproductie; 2) (her)gebruik van natuurlijke bronnen;
- SDG 13 - Climate action: Fytoremediatie draagt bij aan de CO_2 sequestratie en aan het verminderen van het hitte-eiland effect wanneer het in de bebouwde omgeving wordt toegepast;
- SDG 14 - Life below water: bescherming van aquatisch leven door eliminatie en/of beheersing van onacceptabele ecologische risico's;
- SDG 15 - Life on land: Fytoremediatie draagt bij aan het beschermen, herstellen en bevorderen van het duurzaam gebruik van ecosystemen, het duurzaam beheer van bossen, het bestrijden van woestijnvorming en landdegradatie. Fytoremediatie draagt ook bij aan de biodiversiteit.

We verwijzen naar de internationale standaard ISO 18504 voor Duurzame Sanering, waarbij de definitie van duurzame sanering is:
"Elimination and/or control of unacceptable risks in a safe and timely manner whilst optimising the environmental, social and economic value of the work." Voor fytoremediatie geldt dat de milieuwaarde ('Planet') en de economische waarde ('Prosperity') van het werk zijn geoptimaliseerd ten opzichte van conventionele saneringstechnieken (aantoonbaar als onderdeel van WP6).

Binnen de EU geldt de Kaderrichtlijn Water dat als doel heeft om de kwaliteit van oppervlakte- en grondwater in Europa te waarborgen. Fytoremediatie draagt bij aan het verbeteren van de kwaliteit van oppervlaktewater en grondwater waardoor de overschrijding van normen wordt geëlimineerd of geminimaliseerd.

De toepassing van deze techniek past binnen de EU-regelgeving en het nationale milieubeleid van Nederland en Vlaanderen (België).

Fytoremediatie biedt een meerwaarde op verschillende vlakken:

- Duurzaamheid
  - Verbruik materialen en energie;
  - CO_2-sequestratie;
  - Bio-energie;
  - Opslag van broeikasgassen.
- Biodiversiteit
  - Bodemherstel;
  - Bodemstructuur, bodemvruchtbaarheid en erosie;
  - Bodemleven en microbiële diversiteit;
  - Bodemkwaliteit;
  - Wilde dieren en planten.
- Leefomgevingskwaliteit
  - Stedelijke groene infrastructuur;
  - Reduceren geluidshinder;
  - Luchtkwaliteit;
  - (lokale) klimaatregulatie;
  - Aantrekkelijke natuurrijke landschappen.

4.1.3 Onderzoekslocatie

De onderzoekslocatie voor WP4 is enerzijds gelegen in Zeebrugge (zie plan in bijlage 4.1) en anderzijds bij Envisan in Gent.

De uitvoering van twee pilootproeven gingen door op een terrein gelegen aan de Lisseweegsesteenweg 12 in Zeebrugge (vroegere Carcoke site) en een aanpalende site. Op het voormalige terrein van de cokesfabriek werd in het verleden een grootschalige bodem- en grondwatersanering uitgevoerd. Om stabiliteitsredenen was het niet mogelijk om alle verontreiniging aan de rand van het terrein en in de diepte weg te nemen. Deze restverontreiniging op de vroegere Carcoke site en de verontreiniging langsheen de oever van het Zijdelings Vaartje stroomafwaarts van de ex-Carcoke site vormen het onderwerp van twee pilootproeven.
Aan de noordelijke rand van de vroegere Carcoke site is zowel in het vaste deel van de bodem als het grondwater een verontreiniging aanwezig met minerale olie, BTEX en PAK's en in mindere mate met zware metalen en cyaniden. Ook ter hoogte van de oever van het Zijdelings Vaartje wordt in het vaste deel van de bodem een gelijkaardige verontreiniging vastgesteld.

Bijkomend wordt ook een pilootproef opgezet voor het ex-situ uitvoeren van fytoremediatie op het met minerale olie en PAK's verontreinigd sediment dat afkomstig is van de Lieve in Gent (WP3). Het sediment werd afgevoerd naar het erkende grondreinigingscentrum en tijdelijke opslagplaats van nv Envisan in Desteldonk, waar het werd gelaguneerd, op rijen gelegd en verder ontwaterd.
Er kon bij de ruiming en bij de afvoer van het sediment geen onderscheid worden gemaakt tussen licht verontreinigd en sterker verontreinigd sediment. In die zin kunnen er ook geen afzonderlijke phytopiles worden opgezet in functie van de verontreinigingsgraad, zoals oorspronkelijk opgenomen in het RESANAT-project.

De locatie van de vroegere Carcoke site, de aanwezige restverontreiniging met vooral minerale olie, BTEX en PAK's, de aanwezigheid van drijflaag, alsook de al aanwezige beplanting en vegetatie lenen zich voor het testen van fytoremediatie op deze locatie. Een hindernis is wel de aanwezigheid van enerzijds de nutsleidingen en anderzijds een meer dan één meter dikke puinlaag aan de noordelijke rand van het terrein.

Aangezien deze situatie grotendeels voldoet aan de probleemstelling zoals geschetst in paragraaf 4.1.1, lijkt deze locatie geschikt voor het ontwerp en de inzet van fytoremediatie.
Ondanks enerzijds de beperkte ruimte voor een nieuwe aanplant aan de rand van de vroegere Carcoke site en de aanwezigheid van de dikke puinlaag en anderzijds het zwaar verontreinigde sediment uit de Lieve is er toch besloten om voor deze locatie te kiezen. Gezien de beperkte looptijd van RESANAT, wordt het mogelijk geacht om met deze pilootproeven op korte termijn toch het werkingsprincipe en de voordelen van fytoremediatie te kunnen aantonen.

4.2 OPZET

4.2.1 Conceptueel model van de pilot

4.2.1.1 Terreinkarakteristieken

In het betreffende gebied bestaat de bovenste 4 meter van de bodem uit oppervlakteveen, afzetting van Duinkerke, opvullingen van veenputten en aanvullingen en ophogingen van het terrein. Hierin komen zowel zand, leem, klei en veen voor. Daaronder, vanaf 4 meter diepte is er kleihoudend zeer fijn zand, humus houdende leem alsook laagjes bestaande uit leemhoudend zeer fijn zand en leem van de afzetting van Eeklo.
Tijdens de ontgraving van het Carcoke terrein werd een veenlaag aangetroffen op ca. 4 m diepte. Ook ondiep is er soms melding van veen.

In het kader van de bodemsaneringswerken werd het overgrote deel van het terrein uitgegraven, plaatselijk tot 4 meter diepte. Op deze diepte komt een veenlaag voor. Ook ondieper is er soms melding van veen. De graafwerken werden op deze diepte gestopt omdat een verdere grondwatertafelverlaging door de aanwezigheid van het veen te grote zettingen kon veroorzaken en omdat deze veenlaag ook tot in zekere mate een afsluitende laag vormt die verdere verspreiding van de verontreiniging tegen houdt. Na de heraanvulling van het terrein werd er plaatselijk ook tot één meter opgehoogd.

Rekening houdend met de gewijzigde bodemsamenstelling als gevolg van de uitgevoerde bodemsaneringswerken en om een meer gedetailleerd beeld te bekomen ter hoogte van de pilootzones werd er bijkomend onderzoek uitgevoerd naar de geologische opbouw.

Tijdens de vroegere bodemonderzoeken en tijdens de uitvoering van de bodemsaneringswerken varieerde de grondwaterstand tussen ca. 0,3 m en 2,5 meter diepte onder het (toenmalige) maaiveld.

De grondwaterstroming is globaal zuidwestelijk gericht. In het ondiepe pakket is er verder een beïnvloeding van de grondwaterstromingsrichting door waterlopen (Boudewijnkanaal, Oud Ferrydok, Zijdelings Vaartje en Lisseweegsevaart) vastgesteld. Uit de vroegere onderzoeken bleek dat de grondwaterstroming vooral door de drainerende werking van het Zijdelings Vaartje werd bepaald. Belangrijk hierbij is om op te merken dat de loop van het Zijdelings Vaartje in functie van de vroegere bodemsaneringswerken werd verlegd naar de zuidelijke rand van het terrein.

Volgens de kwetsbaarheidskaart van het grondwater wordt het grondwater ter plaatse van het betreffende terrein gekenmerkt als zeer kwetsbaar (categorie Ca.1). Verder is op de kwetsbaarheidskaart de freatisch watervoerende laag ter plaatse van het terrein als natuurlijk verzilt aangeduid (grondwater met een zoutgehalte van meer dan 1.500 mg/l)

Dit blijkt ook uit de verziltingskaarten (bron: DOV). Volgens de gegevens van 1974 kan de grens van de verzilting worden verwacht op een diepte van 2 tot 5 meter onder het vroegere maaiveld. Deze grens komt overeen met 1500 mg/l TDS (Total dissolved solids = anorganische zouten, voornamelijk calcium, magnesium, kalium, natrium, bicarbonaten, chloriden en sulfaten en enkele kleine hoeveelheden organische stoffen die in water zijn opgelost.).

Rekening houdend met de gewijzigde bodemsamenstelling als gevolg van de uitgevoerde bodemsaneringswerken, de gewijzigde loop van het Zijdelings Vaartje en om een meer gedetailleerd beeld te bekomen ter hoogte van de pilootzones werd er bijkomend onderzoek uitgevoerd naar hydrogeologie.

4.2.1.2 Specifieke verontreinigingssituatie

De aanwezige restverontreiniging na uitvoering van de vroegere bodemsaneringswerken is weergegeven op de plannen in bijlage 4.2 tot bijlage 4.7.

Voor pilootzone 1 (hoek terrein) en zone 10 (centrale deel van het terrein) werden in december 2018 door Witteveen+Bos OIP-metingen (Optical Image Profiler) uitgevoerd om een gedetailleerder beeld te krijgen van de verontreiniging met PAK's.

De locaties van de EnISSA OIP-metingen (En+nr) zijn aangeduid op het plan in bijlage 4.8.
Het verslag van de OIP-metingen is opgenomen in bijlage 4.9.

4.2.1.2.1 Zone 1

Resultaten van de OIP-metingen (bron: verslag van Witteveen+Bos):

- **Geologie:** Voor de eerste 2 m-mv zijn er zeer hoge EC pieken waar te nemen. Dit soort hoge pieken zijn meestal toe te wijzen aan de aanwezigheid van metalen of assen. Tussen 2 en 6,5 m-mv zien we EC-waarden rond de 100 mS/m, wat wijst op een fijnere korrelgrootte. Opvallend is hier soms de heel geleidelijke toename van EC-waarden tussen 2 en 4 meter. Dit wijst op een geleidelijke afname in korrelgrootte. Onder 6,5 m-mv is er een afname in EC-waarden tot 50 mS/m, wat wijst op een toename in de korrelgrootte. Voor punt 7033 is er ook HPT-data voorhanden dat over het volledige profiel een eerder goede doorlaatbaarheid vertoond, afgezien van een laag rond 6 m-mv dat zeer slecht doorlatend is.

- **Verontreiniging**: In de bovenste meters van de sonderingen wordt verontreiniging aangetroffen, maar de respons en de diepte vertonen geen regelmaat. De verontreiniging komt in alle sonderingen voor tussen 5 en 7 m-mv. Uitzondering hierop is 7023G waar er ook tussen 3 en 4,5 m-mv een sterke aanwezigheid is van verontreiniging. Punt 7032G vertoont een zware verontreiniging tussen 1,5 en 7,2 m-mv. Er werd opgemerkt dat bij het bovenhalen, de stangen en sonde besmeurd waren met teer voor punt 7032G. Dit heeft als gevolg dat het daaropvolgende punt (7031G) een hoger respons vertoont gedurende de eerste 3 meter dan misschien normaal aanwezig is.
- **Opmerking:** Wegens de aanwezigheid van gasleidingen werden deze eerst door de beheerders uitgezet met paaltjes. Omwille van de aanwezigheid van kunststof gasleidingen kon er niet geboord worden tussen de metalen gasleiding en de Lanceloot Blondeellaan. Aangezien punt 7033G te dicht bij punt 7033 werd geplaatst, kon er geen goede registratie van de EC gebeuren, deze zal wel gelijklopend zijn aan de EC-waardes van punt 7033.

De aanwezige restverontreiniging in het grondwater na uitvoering van de vroegere bodemsanerings-werken is weergegeven op de plannen in bijlage 4.11 tot bijlage 4.17.

Een overzicht van de analyseresultaten van het grondwater is opgenomen in bijlage 4.18 en bijlage 4.19.

Een overzicht van de nog bestaande peilbuizen is opgenomen in bijlage 4.20.

In zone 1 (hoekzone) werden op 19 en 20 augustus en op 25 september 2019 boringen uitgevoerd en peilbuizen geplaatst (in de hoekzone alsook in een referentiezone).

De boorbeschrijvingen zijn opgenomen in bijlage 4.21.

De bodemstalen werden onderzocht op pH, kleigehalte en de concentraties aan zware metalen, PAK's, minerale olie, BTEX en cyaniden.

Op 8, 9 en 14 oktober grondwaterstalen genomen en onderzocht op een ruime set metalen, vluchtige aromatische koolwaterstoffen, VOCl, PAK's, waterdampvluchtige fenolen alsook op een uitgebreide reeks agroparameters.
Een overzicht van de analyseresultaten in deze zone samen met resultaten uit andere zones en referentiezones is opgenomen in bijlage 4.22.

Op basis van de analyseresultaten blijkt dat er in de hoekzone **nagenoeg geen verontreiniging** met PAK's, minerale olie of BTEX in de bodem aanwezig is. Dit in tegenstelling tot wat de resultaten van de uitgevoerde OIP-metingen aangaven.

In de referentiezone werd wel een duidelijke verontreiniging aangetroffen in het vaste deel van de bodem. Dit blijkt ook uit de resultaten van de massafluxen die met de iFLUX technologie werden bepaald. Het rapport van de uitgevoerde fluxmetingen is opgenomen in bijlage 4.31.

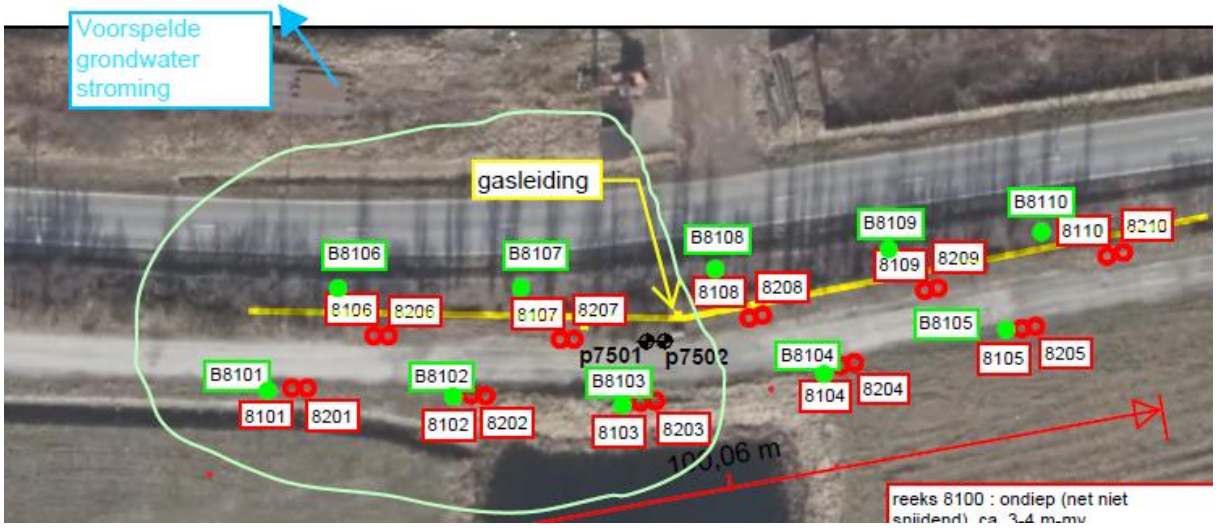
Op basis van de analyseresultaten werd er op 14/11/2019 dan ook beslist om de hoekzone te wisselen met de referentiezone als pilootzone voor het project.

De **nieuwe pilootzone 1** bevindt zich aan de noordelijke rand van het terrein ter hoogte van de vijver.

Uit de resultaten van vroegere bodemonderzoeken is bekend dat hier nog een aanzienlijke restverontreiniging aanwezig is.

Om de nog aanwezige restverontreiniging beter in kaart te brengen werden in januari 2020 door Witteveen+Bos 10 koppels peilbuizen geplaatst (8101/8201 tot 8110/8210). Dit gebeurde aan de hand van avegaarboringen. Daarom was het nodig om in een verdere fase nog machinale boringen met staalname van de bodem uit te voeren. Vlak naast de koppels 8101/8201, 8102/8202, 8103/8203, 8104/8204 en 8105/8205 werden boringen (B8301, B8302, B8303, B8304 en B8305) met bodemstaalname uitgevoerd.

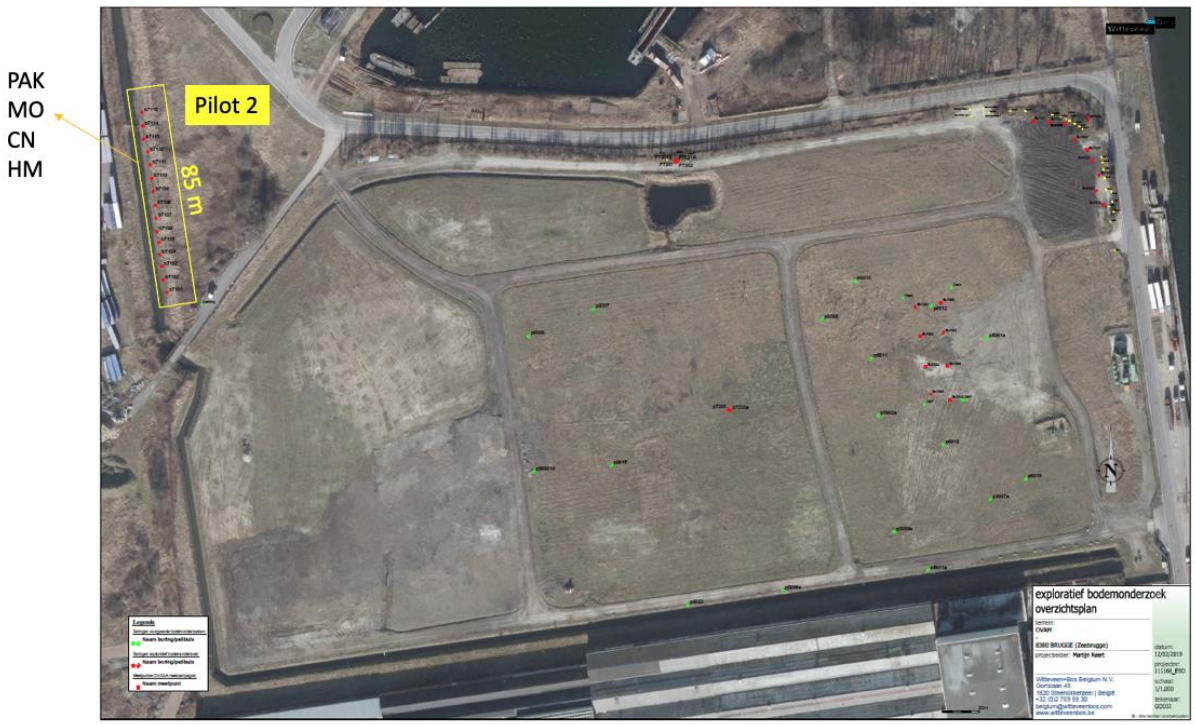
De analyseresultaten van het grondwater in de nieuwe zone 1 zijn opgenomen in bijlage 4.25.



Figuur 55. Pilootzone 1, noordelijke rand van het terrein

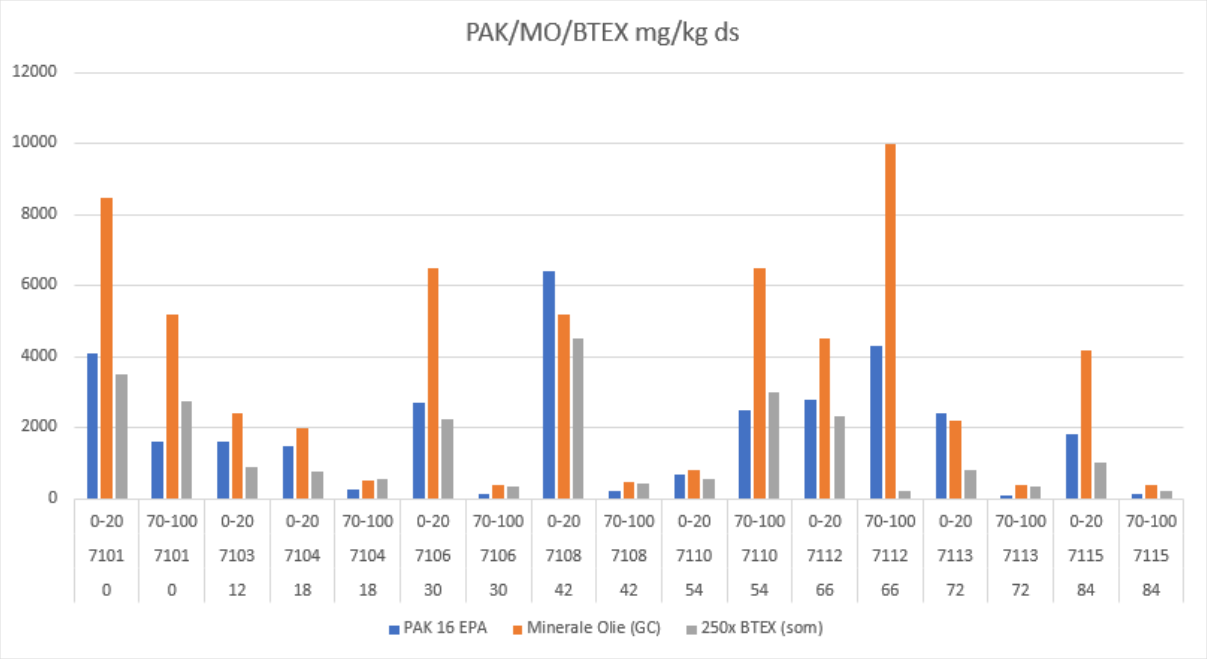
4.2.1.2.2 Zone 2

Ter plaatse van pilootzone 2 (oeverzone) werden door Witteveen+Bos op 22 januari 2019 bodemstalen genomen en onderzocht op het gehalte aan PAK's, MO en BTEX.



Figuur 56 . Pilootzone 2, Oever van Zijdelings Vaartje

De staalnamepunten zijn weergegeven op het overzichtsplan in bijlage 4.8.
De resultaten zijn weergegeven in de tabel in bijlage 4.10 alsook in Figuur 57.



Figuur 57. Pilootzone 2, overzicht analyseresultaten bodem (bron: Witteveen+Bos)

4.2.1.2.3 Phytopile (zone 3)

De phytopile wordt zoals voorzien opgezet met sediment dat vrijkwam bij het ruimen van de Lieve.

Het sediment werd afgevoerd naar het erkende reinigingscentrum en tijdelijke opslagplaats van nv Envisan in Desteldonk waar het werd gelaguneerd, op rijen gelegd en verder ontwaterd.

Analyseresultaten van dit slib zijn opgenomen in bijlage 4.23.

Er kon bij de ruiming en bij de afvoer van het sediment geen onderscheid worden gemaakt tussen licht verontreinigd en sterker verontreinigd sediment. In die zin kunnen er ook geen afzonderlijke phytopiles worden opgezet in functie van de verontreinigingsgraad, zoals oorspronkelijk opgenomen in het RESANAT-projectvoorstel.

4.2.1.3 Externe factoren

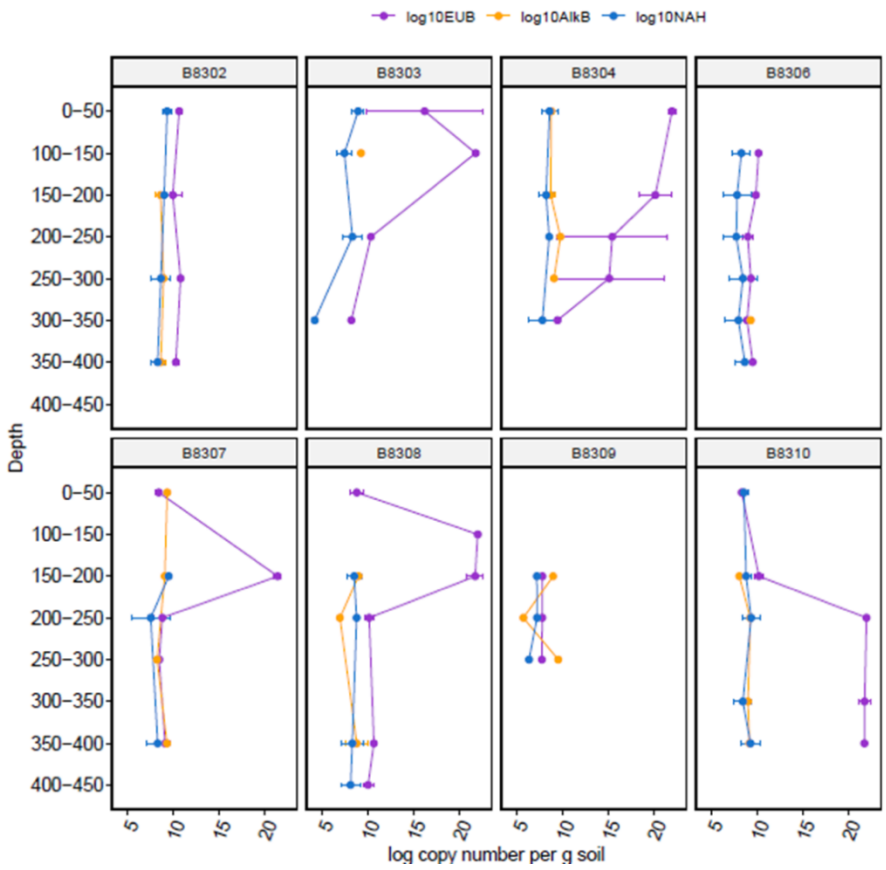
Een belangrijke externe factor bij de keuze van de planten is de ligging van de ex-Carcoke site nabij de zee. In combinatie met de weinige bebouwing vlakbij het terrein en de aanwezigheid van grote open vlaktes dienen we naast periodes met sterke wind rekening te houden met mogelijk nadelige effecten van de zoute zeewind.

4.2.1.4 Haalbaarheidsonderzoek

Het haalbaarheidsonderzoek, zoals voorzien in de code van goede praktijk voor fytoremediatie, uitgevoerd door de Uhasselt, behandelde volgende onderzoeksvragen:

1) Welk is het natuurlijk fytoremediatiepotentieel in zone 1, zone 2 en zone 3? Hiervoor werd gebruik gemaakt van een “multi-line of evidence” aanpak bestaande uit qPCR, NGS-seq en metaboliet analysen.

Op basis van DNA-extractie gevolgd door qPCR werd duidelijk vastgesteld dat er naftaleen en olie afbrekende micro-organismen aanwezig zijn in de bodem ter plaatse van zone 1.



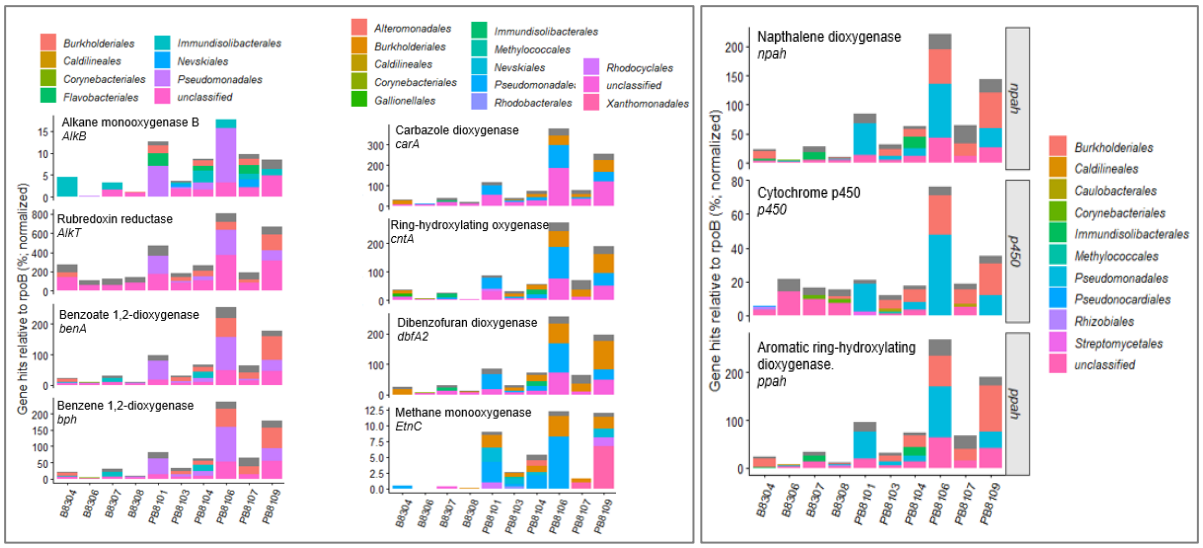
Figuur 58: Olie en naftaleen afbrekende genen in de bodem ter plaatse van zone 1 (bron: haalbaarheidsonderzoek Uhasselt)

Metabolietanalysen uitgevoerd op het grondwater in zone 1 wijzen op biodegradatie van naftaleen, zoals aëroob als anaëroob onder invloed van de verschillende oxische en anoxische lagen (aanwezige kleilagen).

Diagnostic ratio (DR)	8101	8103	8104	8106	8107	8109
n-C_{17}-alkane/pristane ↓	7.6	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*	13.7
n-C_{18}-alkane/phytane ↓	3.8	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*	13.0
acenaphthene/fluorene ↑	2.2	3.8	1.2	1.8	3.0	0.8
naphthalene/(C_2-naphthalenes+C_3-naphthalenes) ↓	29.1	4.7	15.0	11.6	261.1	5.0
dibenzofurane/fluorene ↑	0.8	1.3	0.5	1.0	1.2	0.8
phenanthrene/anthracene ↓	14.5	0.2	6.7	14.5	3.6	9.7

Tabel 13: Diagnostic ratios biodegradatie (bron: haalbaarheidsonderzoek Uhasselt)

Verder onderzoek met NGS toont aan de aanwezige naftaleen en minerale olie afrekende micro-organismen behoren tot de geslachten *Immundisolibacter* en *Pseudomonas*.



Figuur 59: Functionele genen van olie en PAK afbrekende micro-organismen in zone 1 (bron: haalbaarheidsonderzoek UHasselt)

In functie van de voorbereiding van een inoculum werd tevergeefs in het haalbaarheidsonderzoek ook getracht om *Immundisolibacter* in cultuur te brengen. Dit was wel succesvol voor *Pseudomonas sp*.

2) Welke populier cultivars zijn het meest geschikt rekening houdend met de hoge concentraties aan minerale olie?

Aan de hand van potproeven werden vier variëteiten getest (Dender, Marke, Skado en Bakan). Hierbij werd ook het effect van toevoeging van magnesium en turf en toevoeging van magnesium en inoculum nagegaan.

Dender	chlorophyl	# of leaves	shoot biomass (g)		pH	
			FW	DW	H2O	KCl
Control						
1	10	14	10.4	4.1	/	/
2	/	/	/	/	/	/
3	14.3	27	38	18.9	/	/
Mg + peat						
13	14.3	14	15.9	4.9	/	/
14	15	10	9.6	4.4	/	/
15	15.9	10	7.4	3.7	/	/
Mg + inoculated						
25	7.2	10	8	3.6	/	/
26	6.6	10	9.5	4.2	/	/
27	7.4	7	7.8	3.4	/	/

Marke	chlorophyl	# of leaves	shoot biomass (g)		pH	
			FW	DW	H2O	KCl
Control						
4	17.5	8	9.1	4.2		
5	11.7	21	16.4	5.9	7.71	7.86
6	10.1	23	18.2	6.4		
Mg + peat						
16	9.1	16	16.1	6.8		
17	21.9	30	29.4	11.5	7.49	7.79
18	17.2	14	17.9	7.8		
Mg + inoculated						
28	10.4	4	7.2	3.7		
29	9	7	18	8.9	7.76	7.73
30	6.4	17	18.1	7.6		

Bakan						
	chlorophyl	# of leaves	shoot biomass (g)		pH	
			FW	DW	H2O	KCl
Control						
10	21.8	5	11.7	5.6		
11	15.1	24	36.9	17.2		
12	20.4	16	22.8	8.3		
Mg + peat						
22	22.3	4	12.9	6.1		
23	18.5	26	37.2	12.8		
24	20.5	19	25.8	7.9		
Mg + inoculated						
34	28.1	15	21.9	8.1		
35	32.7	28	29.2	11.2		
36	32.5	26	27.9	10.0		

Tabel 14: Resultaten van de eerste potproef (bron: haalbaarheidsonderzoek UHasselt)

Bakan bleek de beste variëteit te zijn. Skado ontwikkelde in het begin van de potproef al roestziekte. Marke en Dender werden eveneens tegen het einde van de potproef aangetast door roestziekte. Toevoeging van magnesium en inoculum zorgde voor een sterke toename van chlorofyl bij Bakan.

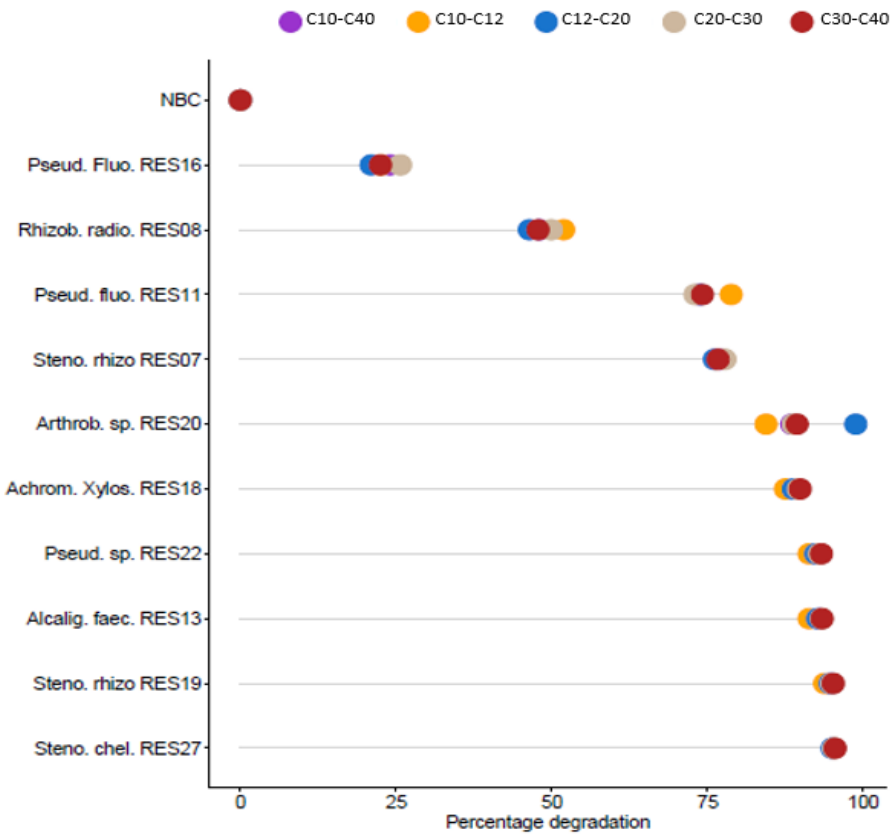
3) Welke grassoorten vertonen de meeste wortelontwikkeling in de verontreinigde sedimenten van de phytopiles? Wat zijn de voordelen van het aanbrengen van een toplaag bestaande uit potgrond op de phytopiles?

Er werd een potproef uitgevoerd met verschillende grassoorten en verontreinigde grond van de phytopiles als substraat. Er was een duidelijk verschil in wortellengte tussen de slechtst presterende grassoort en de best presterende soort. Bij gebruik van een toplaag was er een snellere kieming maar beperkte dit de groei van de wortels. Daarom resulteerde het ontbreken van een laag potgrond in de langste wortels.

4) Kan Gewoon riet (*Phragmites australis*) de afbraak van minerale olie stimuleren?

Uit de potexperimenten blijkt dat er een grote variabiliteit was aan concentraties van verontreinigende stoffen. Mogelijks zou het vrijkomen van wortelexudaten de biologische beschikbaarheid van verontreinigende stoffen kunnen bevorderen en dus een betere extractie van deze stoffen teweegbrengen. Een andere verklaring zou de zeer heterogene verdeling van de verontreinigende stoffen kunnen zijn.

Een andere belangrijke bevinding uit dit haalbaarheidsonderzoek is dat verschillende micro-organismen bij de afbraak van minerale olie weinig of geen onderscheid maken in koolstof-ketenlengte. Dit is ook weergegeven in Figuur 60.



Figuur 60: Percentage afbraak van verschillende oliefracties bij geïsoleerde bacteriën.

De specifieke onderzoeksopzet en resultaten zijn opgenomen in het rapport van het haalbaarheidsonderzoek in bijlage 4.26.

4.2.1.5 (Technisch) ontwerp en inrichting van het systeem

4.2.1.5.1 Pilootzone 1 (noordelijke rand van het ex-Carcoke terrein)

Opzet
Gezien de diepte van de verontreiniging werd gekozen voor het uitvoeren van fytoremediatie aan de hand van bomen.

Er wordt geopteerd om in de randzone van het Carcoke-terrein een fytoremediatiescherm en hydraulische barrière op te bouwen met snelgroeiende soorten zoals populieren en/of wilgen. Om een sneller effect te bekomen, maar ook de saneringsduur te beperken, werd vooropgesteld het plantverband dichter uit te voeren dan normaal. Ook tussen de verharde weg aan de rand van het terrein en de bestaande vijver zal een rij met populieren voorzien worden om de hydraulische barrière te vervolledigen.

In bepaalde zones van de aanwezige vegetatie werd een aanplant met Duindoorn (*Hippophae rhamnoides*) voorzien.
Duindoorn heeft een groot wortelstelsel met 1 meter diepgaande wortels en horizontale uitlopers. Duindoorn heeft ook een sterke ecologische meerwaarde. In dat opzicht moeten, vooraleer dit verder op grotere schaal toe te passen, de bessen gecontroleerd worden op de aanwezigheid van verontreinigende stoffen, aangezien deze vooral door vogels worden gegeten. Het gebruik van Duindoorn is verder een mooi voorbeeld van het gebruik van typische streekgebonden planten.

Uitvoering
Op 28 februari 2020 werden tijdens het terreinbezoek door Mario Clemmens en Dirk Dubin de grote lijnen voor de aanplant uitgezet aan de hand van piketten. Dit zowel voor pilootzone 1 als 2. Diezelfde dag werd dit ook in detail overlopen met Hendrik Senaeve van Weerwerk die instond voor de uitvoering van de plantwerken.
Een planaanvraag in KLIP werd ook door bio2clean uitgevoerd met betrekking tot de noodzakelijke graafwerken onder andere in de buurt van de gasleiding aanwezig in de randzone van het Carcoke-terrein.

De aanplant van pilootzone 1 (randzone van het Carcoke-terrein) werd uitgevoerd door Weerwerk op 5 en 6 maart 2020.

Tijdens de uitvoering werden volgende problemen vastgesteld:
- Door de afstand die gerespecteerd diende te worden ten opzichte van de gasleiding, konden er in de noordelijke rand van het Carcoke-terrein geen hoogstammige bomen worden toegepast, ondanks de aanwezigheid van al verschillende hoogstammige populieren.
- De ondergrond van deze zone was moeilijk doordringbaar, zelfs met een kleine graafmachine met bak (zonder tanden), zodat het graven van plantputten van 0,75x0,75x0,75 m of een sleuf van 0,3 m diepte heel moeilijk of onmogelijk was.

Figuur 61: dikke puinlaag bij uitgraving

De problemen van de ondergrond waren ook al aan het licht gekomen bij het uitvoeren van boorwerken door Witteveen+Bos (Figuur 62) en het plaatsen van de peilbuizen.

Figuur 62. boorwerken Witteveen+Bos

Op 5 maart 2020 werd tijdens de graafwerken dan ook contact opgenomen met de OVAM betreffende problemen om enerzijds vlot de plantgaten te kunnen graven voor de populieren alsook het feit dat aan de noordelijke rand van het terrein in de directe omgeving van de gasleiding geen plantgaten gegraven konden worden voor hoogstammige bomen.

In Figuur 63 wordt de uitgevoerde aanplant schematisch weergegeven. Als referentiepunt worden steeds de geplaatste peilbuizen voor iFLUX gebruikt (8101 … 8110 en 8201 … 8210).
De aanplant, uitgevoerd door Weerwerk, bestaat uit:

- Hoogstammige populieren aangeplant als 2-jarige poten in een plantgat van 0,75x0,75x0,75 m en voorzien van een drainagedarm in de wortelzone in de omgeving van PB8101 tot voorbij PB8205 (Figuur 63 en Tabel 15.
    - Populus Skado
    - Populus Bakan
    - Populus Dender
    - Populus Marke
- 60 wilgenstekken van de variëteit Salix Tora in een klein plantgat (oranje punten in Figuur 63). Gezien de aard van de ondergrond was het niet mogelijk om een sleuf van 0,3 m diep hiervoor te voorzien. Hierdoor was het niet mogelijk om in deze sleuf een drainagedarm voor inoculatie te voorzien. Enkel op de plaatsen met de oranje punten was het mogelijk om wilgenstekken in de bodem te krijgen.
- De Duindoorn, die voorkomt als ondergroei tussen de bestaande populieren in de noordelijke rand van het Carcoke-terrein, werd waar mogelijk verder aangevuld. Deze zones werden voorafgaandelijk aangeduid door bio2clean op het terrein. Op die manier werd er getracht deze onderbeplanting met Duindoorn zo volledig mogelijk te voorzien in de omgeving van PB8106 tot PB8210. Er werden hier 100 planten toegevoegd.

Figuur 63. aanplant pilootzone 1

	Soort Populus			Soort Populus
1	Skado		11	Marke
2	Skado		12	Marke
3	Bakan		13	Marke
4	Skado		14	Skado
5	Bakan		15	Skado
6	Bakan		16	Skado
7	Dender		17	Marke
8	Dender		18	Marke
9	Dender			
10	Dender			

Tabel 15: aanplant pilootzone 1

De hieronder toegevoegde foto's geven een algemeen beeld van pilootzone 1.
De Figuur 64 tot en met Figuur 65 geven een overzichtsbeeld genomen ter hoogte van populier 18 richting Oosten.

Figuur 64. Pilootzone 1a - 5/03/2020 (links) en 20/03/2020 (rechts)

Figuur 65. Pilootzone 1a - 15/04/2020

Figuur 66 (links) geeft een beeld genomen ter hoogte van PB8210 richting Oosten, terwijl Figuur 66 (rechts) een beeld geeft van PB8206 richting Westen. In deze laatste foto is ook duidelijk de aanplant van de wilgenstekken en de Duindoorn zichtbaar.

Figuur 66 . Pilootzone 1b - 15/04/2020

4.2.1.5.2 Pilootzone 2 (Oever Zijdelings Vaartje)

Plantkeuze
Tijdens het terreinbezoek van 17/05/2019 werd er volgende vegetatie vastgesteld aan de oeverzone van het Zijdelings Vaartje:

- **Riet** *(Phragmites australis);*
- **Dauwbraam** (*Rubus caesius*).

Aangezien de huidige vegetatie weinig of geen hinder ondervindt van de aanwezige verontreiniging, zowel in het vaste deel van de bodem als in het grondwater, met minerale olie, BTEX en PAK's en in mindere mate met zware metalen en cyaniden, kan in de pilootzone zeker al verder gewerkt worden met dezelfde soorten. Het is wel belangrijk bij het kiezen van de variëteiten rekening te houden met de specifieke omstandigheden aanwezig op deze locatie, meer bepaald met de zandige bodem, de verzilting, de zeewind, …

De huidige vegetatie van Riet en Dauwbraam werd in een deel van de pilootzone 2 voorzien om te behouden. In een tweede deel van de pilootzone zal de bestaande vegetatie deels verwijderd worden en vervangen door soorten voor wisselnatte gronden zoals:

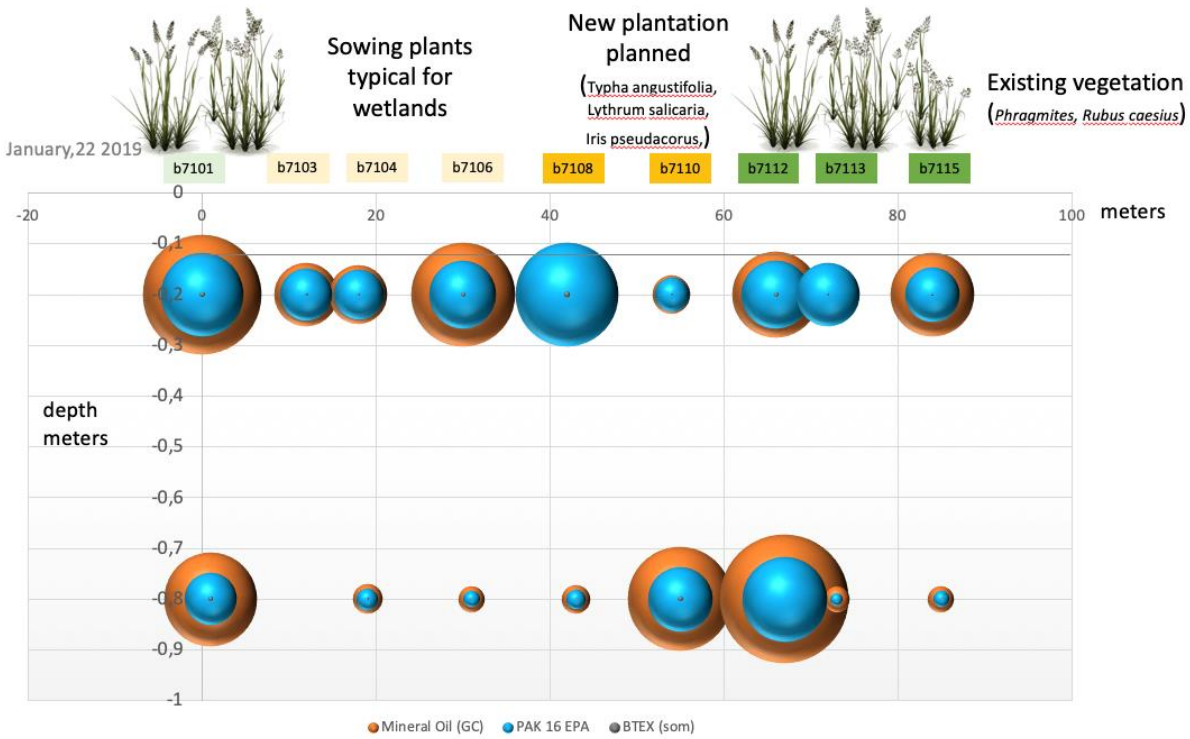
- **Grote lisdodde** (*Typha latifolia*);
- **Kleine lisdodde** (*Typha angustifolia)*;
- **Gewone kattestaart** (*Lythrum salicaria*);
- **Gele lis** (*Iris pseudacorus*).

Ook in deze pilootzone werd een inoculatie voorzien.

Als test werd aanvankelijk ook overwogen om een klein deel van het tweede deel waarin minder verontreiniging voorkomt een strook in te zaaien met specifieke soorten voor natte of moerassige bodems. De zaaidichtheid zou 1 tot 2 gram/m² bedragen. Uiteindelijk werd hiervan afgezien omdat het de kosten voor monitoring te veel zou verhogen.

Inrichting/opzet
Gezien de diepte van de verontreiniging kiezen we voor het uitvoeren van fytoremediatie aan de hand van de bestaande en nieuwe vegetatie bestaande uit Grote Lisdodde.

De huidige vegetatie van Riet en Dauwbraam werd in een deel van de pilootzone 2 behouden Tabel 17. Dit deel werd voor de pilootproef verder opgesplitst in twee zones, waar met de eerste zone verder niets gebeurt en in de tweede zone een inoculatie zal uitgevoerd worden met geschikte micro-organismen om het fytoremediatieproces te verbeteren en te versnellen.



Figuur 67. Voorstel opdeling pilootzone 2

De huidige vegetatie van Riet en Dauwbraam werd in een deel van de pilootzone 2 behouden. In een tweede deel van de pilootzone zal de bestaande vegetatie deels verwijderd worden en vervangen door soorten voor wisselnatte gronden zoals

- **Grote lisdodde** (*Typha latifolia*)
- **Kleine lisdodde** (*Typha angustifolia)*
- **Gewone kattestaart** (*Lythrum salicaria*)
- **Gele lis** (*Iris pseudacorus*)

Ook in de zone met soorten voor wisselnatte gronden werd een inoculatie voorzien.

Er wordt verwacht dat bij het aanplanten van de lisdodde het nodig zou zijn een beperkte oppervlakte te plaggen (dominantie rietvegetatie). De vrijgekomen (verontreinigde) grond kon mogelijk op het ex-Carcoke-terrein worden aangebracht om eventueel verder met fytoremediatie te worden behandeld. Dit werd besproken met de OVAM.
Door het plaggen zou echter ook een belangrijk deel van de verontreinigde bodem worden verwijderd. Daarom werd er niet geplagd maar werd de bestaande rietvegetatie teruggedrongen door meermaals, verspreid over verschillende weken, de opkomende rietvegetatie te branden.

Als test werd aanvankelijk ook overwogen om een klein deel van het tweede deel waarin minder verontreiniging voorkomt een strook in te zaaien met specifieke soorten voor natte of moerassige bodems. De zaaidichtheid zou 1 tot 2 gram/m² bedragen. Uiteindelijk werd hiervan afgezien omdat het de kosten voor monitoring te veel zou verhogen.

Uitvoering
Op 28 februari 2020 werden tijdens het terreinbezoek door Mario Clemmens en Dirk Dubin de grote lijnen voor de aanplant uitgezet aan de hand van piketten. Dit zowel voor pilootzone 1 als 2. Diezelfde dag werd dit ook in detail overlopen met Hendrik Senaeve van Weerwerk die instond voor de uitvoering van de plantwerken.

Voorafgaandelijk aan de plantwerken werd door Weerwerk de zone van b7108 tot en met b7110 meermaals gebrand om de bestaande rietvegetatie in deze zone zo goed als mogelijk terug te dringen zodat een nieuwe aanplant met grote Lisdodde meer kans tot slagen zou hebben.

Op 15 april 2020 werden volgende werken uitgevoerd door Weerwerk:
- Het graven van een sleuf en het plaatsen van een drainagedarm voor inoculatie boven op de oever over deze zone;
- Het voorzien van een V-vormige groef in de helling van het Zijdelings Vaartje, +/- 0,5-1 m boven het huidige waterpeil;
- Het voorzien van plantgaten en het aanplanten van 500 planten van de Grote Lisdodde in deze zone.

Volgende foto's geven een beeld van de uitgevoerde werken.

Figuur 68 . Pilootzone 2 - sleuf drainagedarm

Figuur 69. Pilootzone 2 - V-vormige sleuf

Figuur 70. Grote Lisdodde

Figuur 71. Pilootzone 2 - aanplant

4.2.1.5.3 Pilootzone 3 (phytopiles op terrein Envisan)

Concept
Voor pilootzone 3 werd voorzien in de opzet van phytopiles met verontreinigd ruimingsslib uit de Lieve.

Phytopiling is een vorm van fytoremediatie, in dit geval **micro-organisme geassisteerde fytodegradatie en rhizodegradatie**, waarbij de bodem of de waterbodem (indien nodig na voldoende ontwateren) op een heuvel, verder pile genoemd, wordt gestapeld.

Onder de pile wordt een HDPE folie, of gelijkaardig, aangebracht om contact van de verontreinigde grond met de bodem te vermijden. Onderaan en om de 0,5 meter ophoging worden bij de aanleg horizontale drains geplaatst om een passieve beluchting te creëren. De piles worden afgewerkt met een dunne laag (ca. 5 cm) niet-verontreinigde grond of teelaarde en worden vervolgens ingezaaid met passende grassoorten en kruidachtigen. Er kunnen ook wilgenstekken of andere planten worden gebruikt, afhankelijk van de gebruikte toepassing en verontreiniging. De hoogte van de piles wordt in dit geval beperkt tot 1 m of max 1,5 m om een goede doorworteling te garanderen.

Plantkeuze
Voor het uitvoeren van fytoremediatie op de phytopiles opteren wij om te werken met volgende planten: grassen en eventueel graangewassen om helling snel te stabiliseren.

- **Engels raaigras** (*Lolium perenne*)
- **Italiaans raaigras** (*Lolium multiflorum*)
- **Frans raaigras – Gewone glanshaver** (*Arrhenatherum elatius subsp. Elatius*)

Deze plantkeuze werd verder geoptimaliseerd met behulp van de resultaten van de potproeven uit het haalbaarheidsonderzoek van de UHasselt.

Inrichting/opzet
Pilootzone 3 werd in aanvang als volgt voorzien:

1) 1 grote phytopile: afmetingen (laag 1: 4 m x 10 m) x 1,5 m hoog (3 lagen) met 2 zones:
    a) Met inoculatie;
    b) Zonder inoculatie.
2) 4 kleinere phytopiles: afmetingen (3 m x 5 m) x 0,5 m hoog (1 laag)
    a) Met inoculatie;
    b) Zonder inoculatie;
    c) Met geïnoculeerde zaden;
    d) Zonder verluchting.

Onder de pile diende geen extra bodembescherming te worden aangebracht gezien de piles werden gelegd op een beschermende betonverharding van het grondrecyclagecentrum van Envisan.

In het opzet werd gepland om alle phytopiles te voorzien van drainagebuizen in kokos Ø 80 mm. Deze worden dwars op de phytopiles geplaatst en herhaald per 1 meter over de volledige lengte van de phytopiles. Bij de uitvoering wordt er indien mogelijk mee rekening gehouden dat het midden van de drainagebuizen 10 à 20 cm lager ligt dan de twee uiteinden, die +/- 20 cm uitsteken voorbij de helling van de phytopiles.

Uitvoering
Op 1 oktober 2020 werden de phytopiles op de locatie van Envisan en met de medewerking van Envisan aangelegd.

De phytopiles werden aangelegd naar analogie met het opzet. Hierbij werd er getracht de afmetingen in de mate van het mogelijke aan te houden aangezien er gewerkt werd met een graafmachine en de continue regen het werk bemoeilijkte. Aangezien er op het einde van de werken nog sediment over was, werd er besloten nog een zesde phytopile aan te leggen. Deze heeft alleszins gelijkaardige afmetingen als de grote phytopile.

De drainagebuizen werden voorzien in de phytopiles zoals in het opzet vermeld uitgezonderd 1 kleine en 1 grote phytopile. Tevens werd er op de phytopiles een toplaag van grond met compost (De Witte) van +/- 2 cm voorzien. Deze grond met compost is een gemengd, organisch bodemverbeterend middel samengesteld uit zandleem, groencompost en schorscompost. Enkel de extra phytopile heeft deze toplaag niet bekomen en kan bijgevolg aanzien worden als een phytopile met de minst goede condities.

Volgende foto’s geven een beeld van de uitgevoerde werken.

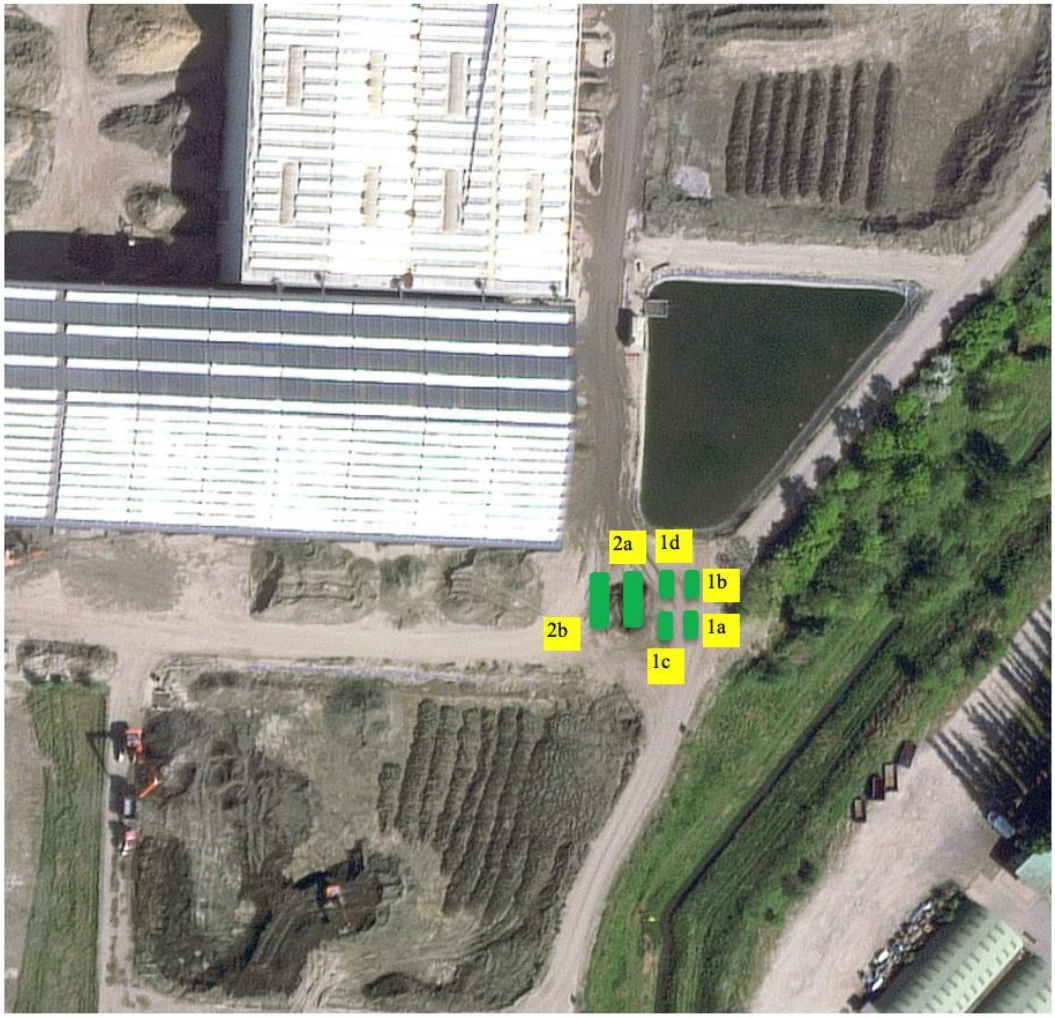
Figuur 72. Aanleg phytopiles

Figuur 73. Overzicht phytopiles

Samengevat werden volgende phytopiles ter plaatse aangelegd:

1) Kleine phytopiles (afmetingen +/- 3 m x 5 m x 0,5 m)
    a) Met drainagebuizen en toplaag;
    b) Met drainagebuizen en toplaag;
    c) Met drainagebuizen en toplaag;
    d) Zonder drainagebuizen en toplaag.
2) Grote phytopiles (afmetingen +/- 4 m x 8 m x 1,5 m)
    a) Met drainagebuizen en toplaag;
    b) Zonder drainagebuizen en zonder toplaag.

Onderstaande luchtfoto geeft deze phytopiles ook schematisch weer:



Figuur 74. Locatie phytopiles op terrein Envisan

De juiste opzet van iedere phytopile wordt hieronder weergegeven en is tevens gebaseerd op het haalbaarheidsonderzoek van UHasselt:

2B (geen beluchting)		
2B-1	1	AE
2B-2	2	Mistral coat
2B-3	3	Mistral coat
2B-4	4	Mistral
2B-5	5	Mistral
2B-6	6	FA

2A (beluchting + inoculatie)		
2A-1	7	LP
2A-2	8	Grandslam
2A-3	9	Mistral/FB
2A-4	10	Mistral coat
2A-5	11	Mistral coat/agr. Coat
2A-6	12	FA

1D (geen beluchting)		
1D-1	13	FA
1D-2	14	Agr
1D-3	15	Mistral
1D-4	16	LP

1B (beluchting + inoculatie)		
1B-1	17	Agr -i
1B-2	18	Agr coat -i
1B-3	19	Mistral coat -i
1B-4	20	Mistral -i

1C (beluchting)		
1C-1	21	Agr
1C-2	22	Agr coat
1C-3	23	Mistral coat
1C-4	24	Mistral

1A (beluchting + Melilotus + inoc)		
1A-1	25	LP -i
1A-2	26	Mistral -i
1A-3	27	Agr -i
1A-4	28	FA -i

Figuur 75: Opzet phytopiles

De drainagedarmen werden ingekort. De verschillende grassen werden op 23/10/2020 ingezaaid volgens het schema weergegeven in Figuur 75.

4.2.2 Opvolging en procesevaluatie

4.2.2.1 Specifieke saneringsdoelstellingen

Het ultieme streefdoel van een sanering voor historische verontreiniging is het wegnemen van de risico's. Van dit saneringsobjectief kan evenwel afgeweken worden indien de voorgenomen saneringsmaatregelen onredelijk hoge kosten met zich meebrengen ten opzichte van het bekomen resultaat (het zogenaamde BATNEEC-principe).
Rekening houdend met dit principe is het streefdoel van een sanering voor historische verontreiniging in dalende volgorde:

- het realiseren van de richtwaarden (geldt ook voor nieuwe verontreiniging);
- het realiseren van een bodemkwaliteit beter dan de toepasselijke bodemsaneringsnormen (geldt ook voor nieuwe verontreniging);
- het wegnemen van het risico van de verontreiniging door normaal gebruik van de grond binnen de betrokken bestemming of voor een toekomstige bestemming zoals bepaald in artikel 21§1 tweede lid van het bodemdecreet;
- het opleggen van gebruiks- of bestemmingsbeperkingen.

De hier besproken monitoring staat los van de monitoring die door de erkend bodemsanerings-deskundige wordt uitgevoerd om de kwaliteit van de bodem en het grondwater na te gaan.

De door bio2clean voorziene monitoring heeft onder andere betrekking op het uitvoeren van metingen om aan te tonen dat het fytoremediatieproject kwaliteitsvol verloopt en om na te gaan wat het effect is van de inoculatie.

Deze monitoring kan onder andere omvatten:

- Staalname en isolatie van micro-organismen;
- Fluxmetingen en/of massafluxmetingen in het grondwater;
- Screening voor het bepalen van het afbraakpotentieel;
- Bevestiging met GC;
- Staalname en analyse plantdelen, sapstroom, …;
- …

Het is duidelijk dat, gezien het korte tijdsbestek van het RESANAT-project en de bijhorende pilootproeven en de heterogeniteit van de bodemverontreiniging in zone 1 (noordelijke terreinrand) en zone 2 (oeverzone Zijdelings Vaartje), het niet mogelijk is om de bodemkwaliteit in zone 1 en zone 2 aantoonbaar te verbeteren. Verder blijkt uit voorgaande bodemonderzoeken en onderzoekssverrichtingen die in het kader van RESANAT werden uitgevoerd, dat er in zone 1 ook nog verontreinigd grondwater blijft toestromen.
Bijgevolg wordt in zone 1 en zone 2 gefocust op het evalueren van het fytoremediatieproces als dusdanig.

Enkel voor zone 3 (phytopiles), met een minder sterke verontreiniging en afwezigheid van de toestroom van bijkomende verontreiniging, wordt in het tijdsbestek van de pilootproef gestreefd naar het bereiken van een bodemkwaliteit beter dan de betreffende bodemsaneringsnormen.

4.2.2.2 Hypothese & meetstrategie

Op basis van de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek wordt besloten dat er een afbraakpotentieel voor PAK's en minerale olie aanwezig is in de bodem. Er wordt verwacht dat de beplanting en vegetatie (reeds aanwezig of bijkomend) een invloed zal hebben op het afbraakpotentieel, wat gemonitord wordt via qPCR voor specifieke afbraakgenen (AlkB en PAH gene).

Het is mogelijk dat de aanwezige verontreiniging zorgt voor een zekere fytotoxiciteit. Dit wordt nagegaan via visuele inspectie in alle zones en bijkomend ook door het meten van de wortellengte van de ingezaaide grassen op de phytopiles.

Er wordt verwacht dat bijkomende inoculatie met geschikte micro-organismen de efficiëntie en effectiviteit van het fytoremediatieproces zal verhogen. Hiervoor gebeurt een pre-screening van de meest geschikte micro-organismen in functie van de betreffende verontreinigingsparameters per zone en worden er in het laboratorium ook een aantal microcosm testen opgezet.

Om na te gaan of het aanwezige afbraakpotentieel ook effectief zorgt voor een voldoende opname en afbraak, worden metaboliet analyses uitgevoerd in zone 1 evenals GC-screening (zones 1, 2 en 3)

Onderstaande tabellen tonen een overzicht van de verschillende meetmethodes, het aantal stalen en het aantal tijdstippen waarop de stalen worden genomen en onderzocht.

	MONITORING	Stalen	Tijd-stippen	Totaal
Monitoring afbraak potentieel	qPCR AlkB/PAH gene	40	2	80
Fytotoxiciteit	Visuele inspectie van planten			
Efficiëntie van het inoculum	Pre-screening 50 to 12 best for oil	50	1	50
	Pre-screening 50 to 12 best for PAK	50	1	50
	Lab microcosm tests: test different E-donors, receptors, consortia construction	12	1	12
Voldoende opname en afbraak potentieel	Rapport BACTRAPS	1	1	1
	BACTRAPS	2	1	2
	Metabolites on the cartridge of Iflux+Isodetect	6	1	6
	GC-screening (time series: jun (t0), jul, aug, oct, jan, jun)	2	6	12
	GC + metabolites report	1	1	1
Phytovolatilisatie	Tree cores Uantwerpen or SGS	20	2	40
Geïntegreerd rapport	Geïntegreerde data-analyse	1	1	1

Tabel 16: Meetstrategie pilootzone 1 (noordelijke terreinrand) (bron: rapport monitoring UHasselt)

	MONITORING	Stalen	Tijd-stippen	Totaal
Monitoring afbraak potentieel	qPCR AlkB/PAH gene	20	2	40
Fytotoxiciteit	Visual inspection of plants			
Efficiëntie inoculum	Pre-screening 50 to 12 best for BTEX	25	1	25
	Lab microcosm tests: test different E-donors, receptors, consortia construction	6	1	6
Voldoende opname, afbraak potentieel	W&B			

Tabel 17. Meetstrategie pilootzone 2 (Zijdelings Vaartje) (bron: Rapport monitoring UHasselt)

	MONITORING	Stalen	Tijd-stippen	Totaal
Monitoring afbraak potentieel	qPCR AlkB/PAH gene	30	2	60
Fytotoxiciteit en wortellengte	root cores			
Efficiëntie inoculum	Pre-screening 50 to 12 best for oil	25	1	25
	Lab microcosm tests: test different E-donors, receptors, consortia construction	6	1	6
Voldoende in situ afbraakpotentieel	W&B			

Tabel 18. Meetstrategie pilootzone 3 (phytopiles) (bron: rapport monitoring UHasselt)

4.2.2.3 Procesevaluatie

Zoals reeds in voorgaande punten is beschreven, bestaat de monitoring grotendeels uit een proces-evaluatie waarbij we de efficiëntie en de effectiviteit van het fytoremediatieproces nagaan en de verschillende deelprocessen in kaart brengen en onderzoeken.

Een sterke meerwaarde van het RESANAT-project is dat de verschillende methodes voor het uitvoeren van procesevaluatie verder werden verkend en gedocumenteerd. De opgedane kennis en ervaring laat toe om kwaliteitsvolle procesevaluatie te voorzien ook bij toekomstige bodem-saneringen met behulp van fytoremediatie. Procesevaluatie is noodzakelijk om tijdig te kunnen bijsturen en het rendement van fytoremediatie te verhogen.

Deze procesevaluatie staat tegenover de onderzoeken van de evolutie van de bodem- en grond-waterkwaliteit. De resultaten van deze metingen, meestal uitgevoerd door een erkend bodem-saneringsdeskundige, worden meestal belangrijker naarmate de sanering vordert, om na te gaan of de saneringsdoelstellingen worden behaald.

4.3 RESULTATEN

4.3.1 Monitoringsresultaten

Gezien de grote verscheidenheid aan resultaten en de daaraan gelinkte redeneringen worden voor de duidelijkheid zowel de resultaten als de evaluatie behandeld onder punt 4.3.2.

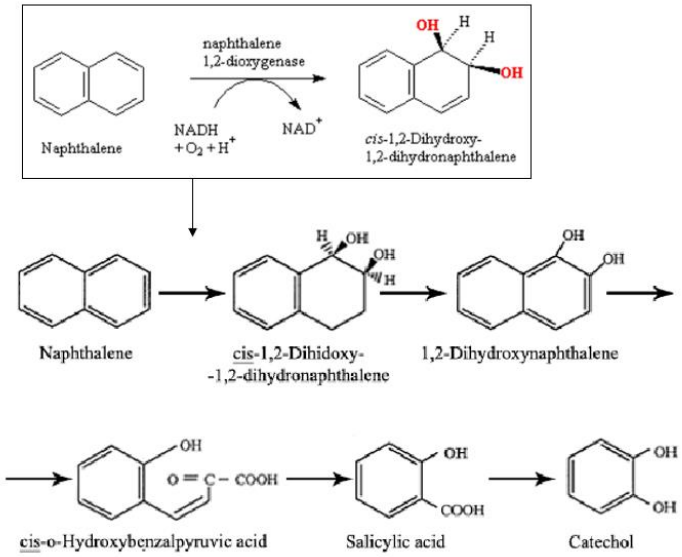
De resultaten en evaluaties zijn afkomstig uit het rapport van de monitoring dat door de Uhasselt werd voorbereid, tenzij anders vermeld.
Het integrale rapport van de monitoring van de Uhasselt is opgenomen als bijlage 4.27.

4.3.2 Evaluatie resultaten

4.3.2.1 Kwantitatieve en kwalitatieve evaluatie van de monitoringsresultaten

4.3.2.1.1 qPCR voor het naftaleen dioxygenase gen (NAH) in zone 1

Grondwaterstalen in zone 1 bevatten heel hoge concentraties naftaleen, tot 13.000 µg/l (puur product), naast andere polycyclische aromatische koolwaterstofverbindingen (PAK's) (gebaseerd op resultaten van Witteveen+bos en iFLUX). Bij de aërobe biologische afbraak van naftaleen en andere PAK's zijn microbiële dioxygenase-enzymen betrokken die twee atomen moleculaire zuurstof in naftaleen opnemen en het aërobe metabolisme op gang te brengen. De brede substraatspecificiteit van naftaleendioxygenase maakt echter ook de oxidatie mogelijk van andere PAK's zoals antraceen, fenantreen, acenaftyleen, fluoreen, … die ook in het grondwater op deze locatie aanwezig zijn.



Figuur 76. Aëroob metabolisme voor naftaleen (bron: https://www.researchgate.net/figure/Aerobic-naphthalene-biodegradation-25_fig2_230793131

Daarom wordt bij deze monitoring gefocust op het NAH-gen voor de beoordeling van de aanwezigheid van naftaleen en andere PAK-afbrekende bacteriën, met een kwantitatieve polymerasekettingreactie (qPCR). Om de resultaten te vergelijken met het totale aantal op de locatie aanwezige bacteriën, werd ook het 16s rRNA-gen gemeten dat aanwezig is in alle bacteriën van de groep Eubacteria, in onderstaande tabel aangeduid als EUB.

Uit de resultaten blijkt dat het mogelijk is DNA te extraheren uit een grondwatermonster van 100 ml, wat betekent dat er zich levende organismen bevinden in dit zwaar verontreinigde grondwater. De DNA-concentraties variëren met de diepte. Er is minder microbieel DNA aangetroffen in diepere putten (82-serie; 6-7 m diepte filterstelling) vergeleken met de ondiepere putten (3-4 m filterstelling) wat de verwachting is, aangezien het grootste aantal micro-organismen juist in de bovenste 5 cm van de bodem of het water leeft. Verschillen in DNA-concentraties in de tijd (30/7/2021 vs. 13/07/2022) of tussen monsters onderling houden mogelijk verband met natuurlijke variaties in populatieniveaus, de efficiëntie van de DNA-extractie als er veel remmers zijn (puur product), of met het feit dat er soms meer sediment in de bemonsteringsflessen zat, wat het aantal microbiële cellen kan beïnvloeden.

Ten tweede zien we dat er bacteriën aanwezig zijn (qPCR EUBacteria) en dat in sommige putten ook naftaleendioxygenase werd gevonden, echter niet in alle putten, mogelijk omdat er bijvoorbeeld een lagere naftaleenconcentratie in die put aanwezig was op het specifieke bemonsteringstijdstip, waardoor een lager aantal afbrekers wordt ondersteund. Al met al is de aanwezigheid van naftaleen-afbrekers zeer geruststellend, aangezien dit één op één bewijst dat er in het veld microbieel afbraakpotentieel voor naftaleen en mogelijk andere PAK's bestaat. Dit moet worden geverifieerd met isolatenstammen uit het veld en afbraakproeven, of aan de hand van een mesocosm proef met grond en grondwater uit het veld.

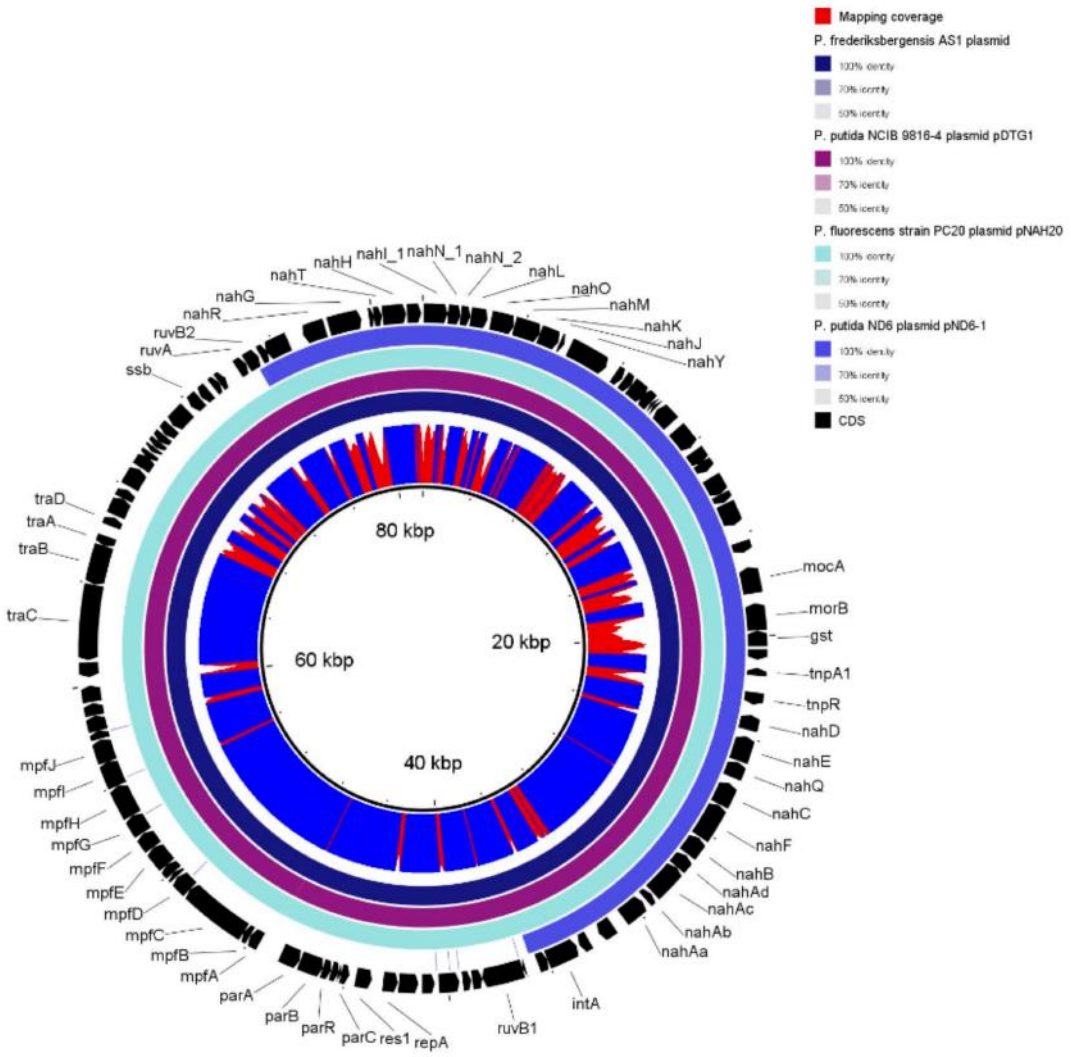
Sample	Date	DNA conc. (ng/µl)	qPCR EUB copies/ml	qPCR NAH copies/ml
P7302	30/07/2021	21,40	3,29E+14	
P7303	30/07/2021	12,10	2,87E+14	1,48E+10
P7304	30/07/2021	2,05	2,57E+12	
P7401	30/07/2021	7,20	1,20E+14	
P7402	30/07/2021	10,40	5,50E+14	1,75E+09
P7510	30/07/2021	1,53	1,65E+13	
P7511	30/07/2021	20,00	4,34E+14	1,24E+08
P7801	30/07/2021	9,64	1,99E+14	
P8108	30/07/2021	28,80	5,49E+14	
P8101	30/07/2021	50,00	1,07E+16	
P8102	30/07/2021	19,90	8,39E+14	2,20E+11
P8103	30/07/2021	34,70	4,24E+14	1,99E+07
P8104	30/07/2021	22,80	8,98E+14	
P8107	30/07/2021	42,50	1,64E+15	2,04E+11
P8106	30/07/2021	41,20	1,33E+15	3,30E+11
P8105	30/07/2021	40,70	5,14E+14	
P8201	30/07/2021	5,63	1,89E+14	4,57E+10
P8202	30/07/2021	11,90	5,19E+14	
P8203	30/07/2021	0,30	1,76E+11	
P8204	30/07/2021	8,64		
P8205	30/07/2021	29,10	7,45E+14	
P8206	30/07/2021	2,25	6,57E+13	1,30E+10
P8207	30/07/2021	0,18	1,83E+10	
P8208	30/07/2021	11,20	1,27E+14	
P8209	30/07/2021	26,90	7,69E+14	
P8101	29/10/2021	0,94	4,94E+12	
P8104	29/10/2021	0,96	1,32E+13	
P8106	29/10/2021	0,78	2,45E+12	
P8109	29/10/2021	1,50	7,84E+12	
P8101	13/07/2022	1,46	4,92E+12	
P8102	13/07/2022	1,05	1,83E+12	1,80E+11
P8103	13/07/2022	0,61	1,38E+12	1,73E+07
P8105	13/07/2022	0,82	2,50E+12	
P8106	13/07/2022	1,21	3,94E+12	1,14E+11
P8107	13/07/2022	2,27	7,92E+12	9,30E+10
P8108	13/07/2022	1,01	1,46E+12	
P8109	13/07/2022	1,98	9,35E+12	
P8201	13/07/2022	0,78	2,35E+12	
P8202	13/07/2022	0,66	1,17E+12	3,17E+10
P8203	13/07/2022	2,63	2,18E+12	
P8204	13/07/2022	3,82	5,11E+13	
P8205	13/07/2022	1,02	1,38E+12	
P8206	13/07/2022	0,45	8,97E+11	
P8207	13/07/2022	0,70	1,23E+13	2,60E+10
P8208	13/07/2022	1,22	2,90E+12	

Tabel 19. DNA-concentratie en qPCR-hits (uitgedrukt in kopieën van genen per ml grondwater) voor de Eubacteria (EBU) en voor naftaleendioxygenase (NAH)

4.3.2.1.2 Efficiëntie van het inoculum

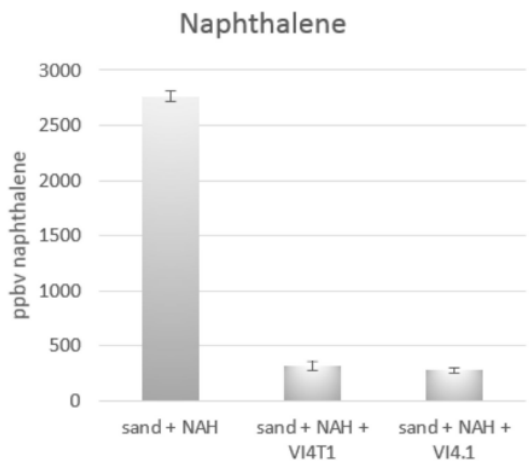
Voor de inoculatie van bacteriën werd gebruik gemaakt van een stam uit de UHasselt-cultuurcollectie omdat deze een operon voor de afbraak van naftaleen bevat, namelijk Pseudomonas sp. VI4.1 (ref: https://www.mdpi.com/2073-4425/10/6/443). Een operon bestaat onder andere uit genen die coderen voor proteïnen met verwante functies. Deze werd aangevuld met Pseudomonas RES11, geïsoleerd uit de RESANAT-site. Deze stam kon op pure olie groeien.

De VI4.1 heeft een operon voor de afbraak van naftaleen, de RES10 breekt minerale olie af (n-alkanen).



Figuur 77. pVI4.1, 80 kb plasmide dat codeert voor een volledig naftaleen operon, nahAaAbAcAdBFCED om naftaleen om te zetten in salicylaat en het lagere nahGTHINLOMKJY operon om salicylaat via catechol om te zetten in tussenproducten van de tricarbonzuurcyclus (TCA).

De inoculatie vond plaats op 25/6/2021 bij vier nieuwe populieren, in de zone rond peilbuis 8105 en bij twee bestaande populieren en duindoornstruiken in de zone rond peilbuizen 8106 en 8107.
De stam VI4.I is getest op afbraak van naftaleen en er is vastgesteld dat deze inderdaad naftaleen kon gebruiken als enige koolstofbron en dat de concentratie bijna volledig uit het groeimedium verdween na 7 dagen incubatie met 15 µg/L naftaleen als startconcentratie. Dit bevestigt dat deze stam een kandidaat is voor de afbraak van naftaleen in het veld.



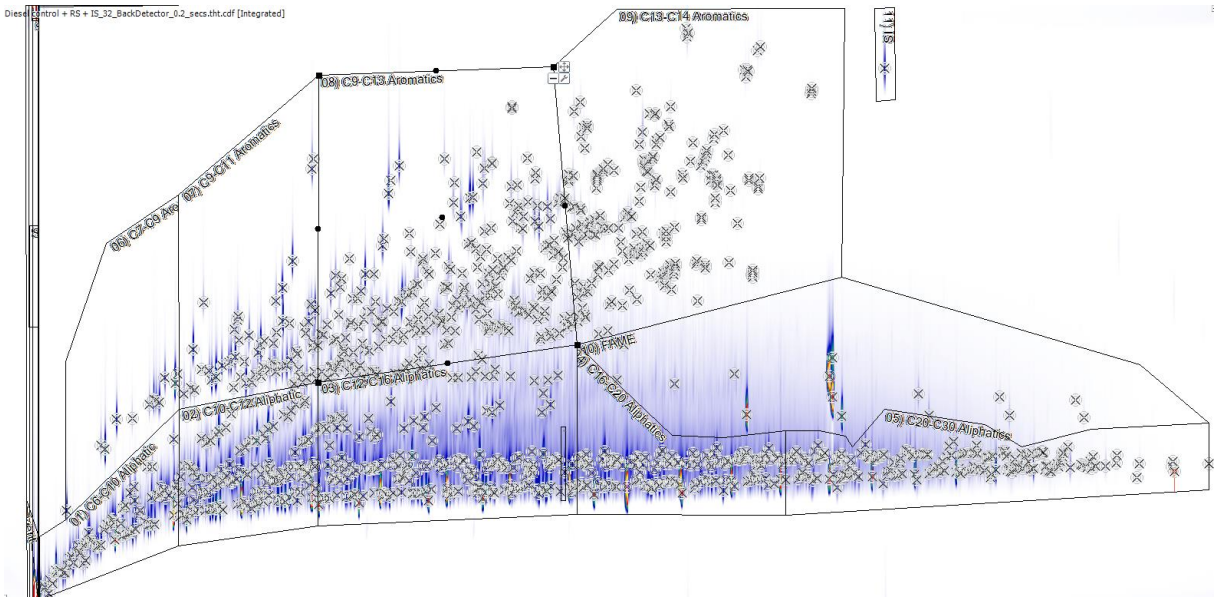
Figuur 78. Naftaleenafbraak door stam VI4.1 en VI4T1 vergeleken met een onbehandeld controlestaal (zand met naftaleen)

Om de afbraakcapaciteit van geïsoleerde bacteriën met 2 % minerale olie te testen, werd nog een olieafbraak analysetest uitgevoerd. Afbraak werd aangetoond voor meerdere stammen in vergelijking met de No Bacteria Controls (NBC).

Species name	C10C40 (mg/kg)	C10C12 (mg/kg)	C12C20 (mg/kg)	C20C30 (mg/kg)	C30C40 (mg/kg)	%DEGRAD C10C40	%DEGRAD C10C12	%DEGRAD C12C20	%DEGRAD C20C30	%DEGRAD C30C40
Stenotrophomonas chelatiphaga RES27	120000	77	59700	56200	3950	95,2	95,2	95,0	95,3	95,5
Stenotrophomonas rhizophila RES19	128000	100	63400	59700	4270	94,88	93,8	94,7	95,0	95,2
Alcaligenes faecalis RES13	175000	140	87900	80700	5790	93	91,3	92,7	93,3	93,4
Pseudomonas sp. RES22	182000	140	91300	84300	5920	92,72	91,3	92,4	93,0	93,3
Achromobacter xylosoxidans RES18	269000	200	135000	125000	8960	89,24	87,5	88,8	89,6	89,9
Arthrobacter sp. RES20	287000	250	14000	134000	9340	88,52	84,4	98,8	88,8	89,4
Stenotrophomonas rhizophila RES07	574000	380	287000	267000	20600	77,04	76,3	76,1	77,8	76,7
Pseudomonas fluorescens RES11	660000	340	313000	324000	22800	73,6	78,8	73,9	73,0	74,2
Rhizobium radiobacter RES08	1300000	770	643000	601000	46100	48	51,9	46,4	49,9	47,8
Pseudomonas fluorescens RES16	1900000	1240	948000	892000	68400	24	22,5	21,0	25,7	22,5
NBC	2000000	1555	950000	950000	79500	20	2,8	20,8	20,8	10,0
NBC	2500000	1600	1200000	1200000	88300	0	0	0	0	0

Tabel 20. Olieafbraak in % voor RES11 en andere stammen die werden geïsoleerd op de Resanat site

Ten slotte werden, in plaats van de 12 microcosm testen, nieuwe afbraakanalyses opgezet op het nieuwe en zeer gevoelige 2D-GC instrument van de afdeling scheikunde aan de Uhasselt om een dieper inzicht te krijgen in welke C-lengte de stammen meestal gebruikten. Dit werd getest voor 4 stammen in drievoud (12 in totaal).



Figuur 79. Overzicht van het piekspectrum en scheiding van de afzonderlijke pieken na een run van 2 uur per monster. 1D-kolom (Rxi-5Sil MS) - 2D-kolom (Rxi-17Sil MS), Modulatie: 4,8 sec, Injectie 2 µl - Split 1/50.

De stammen werden blootgesteld aan 7000 mg/kg diesel en de afbraak werd beoordeeld na 10 dagen incubatie en extractie met dichloormethaan. Bij Pseudomonas fluorescens RES11 neemt de totale hoeveelheid alifaten af van 5,06x106 oppervlak tot 1,23x105, en bij Arthrobacter sp. RES20 tot 4,21x105. Ook de totale aromatenconcentraties namen af. Door de piekoppervlakken te vergelijken, kan men ook zien welke C-verbindingen meer werden afgebroken in vergelijking met de onbehandelde diesel.

Group untreated Diesel	Area	Area %
C6-C10 Aliphatic	5.08E+05	8.03%
C10-C12 Aliphatic	9.98E+05	15.78%
C12-C16 Aliphatics	1.67E+06	26.34%
C16-C20 Aliphatics	1.29E+06	20.40%
C20-C30 Aliphatics	5.93E+05	9.37%
C7-C9 Aromatics	8.26E+04	1.31%
C9-C11 Aromatics	2.43E+05	3.84%
C11-C13 Aromatics	3.19E+05	5.05%
C13-C14 Aromatics	3.12E+04	0.49%
FAME	5.95E+05	9.40%
Total Aliphatics	5.06E+06	79.92%
Total Aromatics	6.76E+05	10.68%
Total	6.33E+06	100.00%

RES11	Area	Area %
C6-C10 Aliphatic	3.64E+04	26.59%
C10-C12 Aliphatic	2.20E+04	16.10%
C12-C16 Aliphatics	3.65E+04	26.69%
C16-C20 Aliphatics	2.29E+04	16.75%
C20-C30 Aliphatics	5.37E+03	3.92%
C7-C9 Aromatics	7.21E+02	0.53%
C9-C11 Aromatics	1.67E+03	1.22%
C11-C13 Aromatics	8.50E+02	0.62%
C13-C14 Aromatics	0.00	0.00%
FAME	1.04E+04	7.58%
Total Aliphatics	1.23E+05	90.05%
Total Aromatics	3.24E+03	2.37%
Total	1.37E+05	100.00%

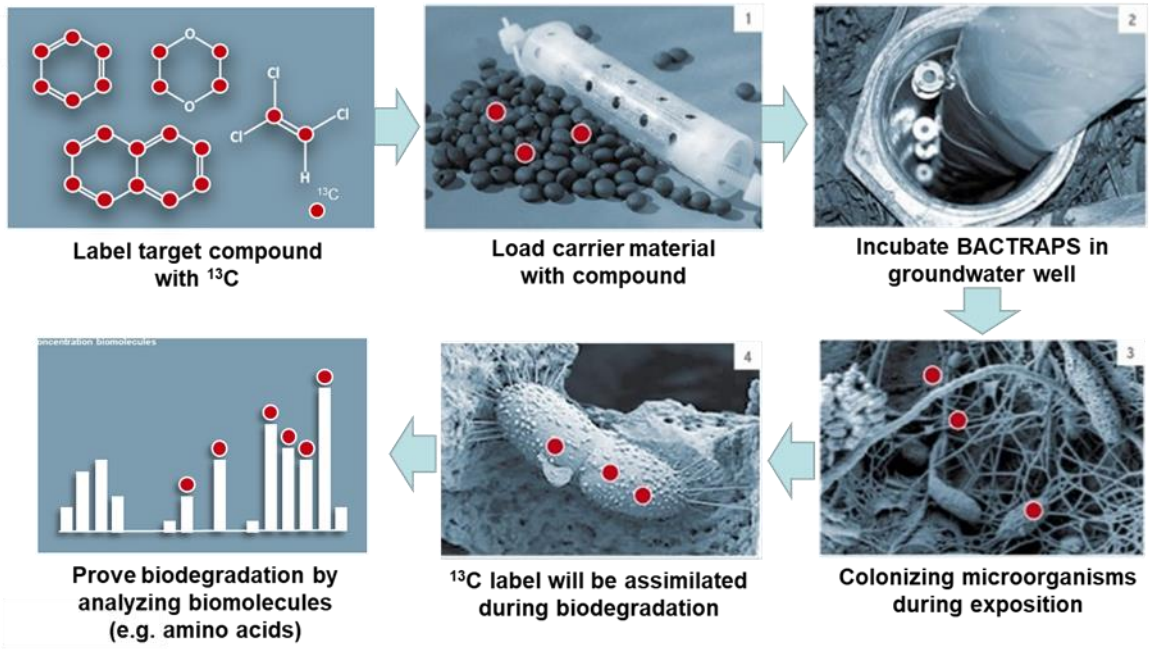
RES20	Area	Area %
C6-C10 Aliphatic	9.35E+04	13.81%
C10-C12 Aliphatic	1.33E+05	19.58%
C12-C16 Aliphatics	2.00E+05	29.54%
C16-C20 Aliphatics	1.12E+05	16.59%
C20-C30 Aliphatics	3.09E+04	4.56%
C7-C9 Aromatics	8.09E+03	1.19%
C9-C11 Aromatics	2.45E+04	3.62%
C11-C13 Aromatics	2.12E+04	3.13%
C13-C14 Aromatics	2.54E+02	0.04%
FAME	5.37E+04	7.92%
Total Aliphatics	5.70E+05	84.09%
Total Aromatics	5.41E+04	7.99%
Total	6.77E+05	100.00%

Figuur 80. Resultaten van de 2DGC analyses en dieseldegradatietest voor stam RES11 en RES20

4.3.2.1.3 Bepaling van opname- en degradatiepotentieel met behulp van BACTRAPS

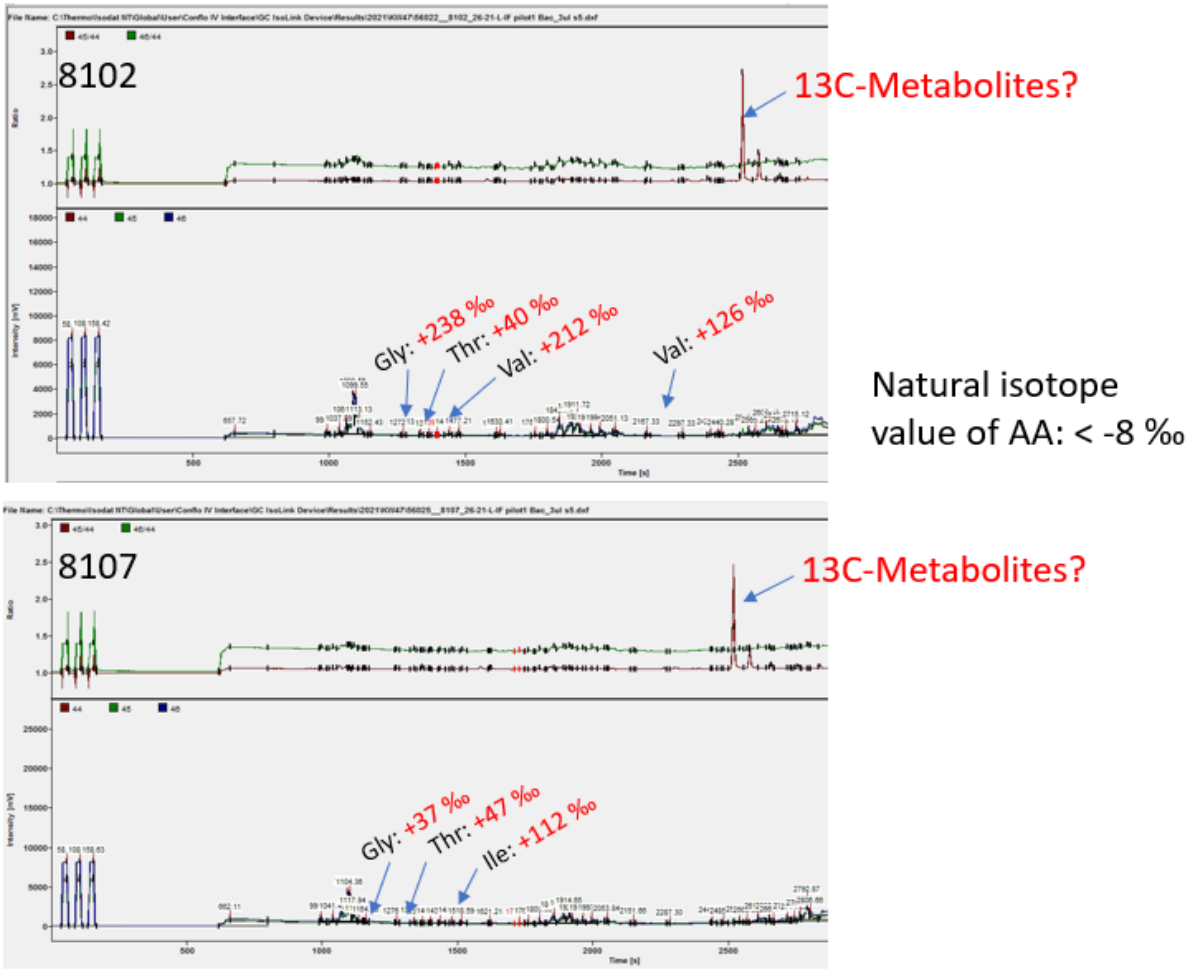
Het principe van het systeem:
De BACTRAPS bevatten een gelabelde doelverbinding, in dit geval 13C-naftaleen, die op drager-materiaal in de buis is aangebracht. Vervolgens worden de BACTRAPS geïnstalleerd in de peilbuis, en worden ze gekoloniseerd door micro-organismen. Als alles goed gaat, wordt het 13C tijdens de biologische afbraak geassimileerd. Deze test kan meer absoluut bewijs leveren van biologische afbraak (multi-line-of-evidence) door in dit geval het 13C te analyseren in biomoleculen (aminozuren, de bouwstenen van de eiwitten van het organisme).

Figuur 81. Installatie van de BACTRAP in een peilbuis op het terrein



Figuur 82. Werkingsprincipe van de BACTRAPS

Op 28 juli 2021 installeerde dr. Sofie Thijs van de UHasselt twee BACTRAPS (foto boven) in respectievelijk put PB8107 en PB8102. Er was geen puur product aanwezig in beide putten die de resultaten zou kunnen belemmeren. Het grondwater bevond zich op een diepte van 194 cm (PB8107) en 179 cm (PB8102). De TRAPS werden na 12 weken op 20 oktober 2021 opgehaald voor analyse.



Figuur 83. Resultaten BACTRAP met 13C-naftaleen en de incorporatie in aminozuren

In beide putten is er kwalitatief bewijs van volledige mineralisatie van 13C naftaleen in aminozuren, maar er werd slechts een zeer lage biomassa gemeten.
Hieruit besluiten we dat er naftaleen- en olie-afbrekende bacteriën aanwezig zijn op de locatie, maar dat hun activiteit zeer laag is. Mogelijk worden ze geremd door de zeer hoge concentraties naftaleen en/of door de redoxcondities van de locatie die sterk variëren in de diepte.

4.3.2.1.4 Bepaling van opname- en afbraakpotentieel met diagnostic ratios en metabolietanalyses

Om het potentieel voor microbiële afbraak te beoordelen werden metabolietanalyses uitgevoerd. Deze analyses laten zien welke tussenproducten ontstaan tijdens een chemische reactie en hoe de verhouding tussen twee verbindingen verandert. Een afname of toename van bepaalde stoffen wijst op afbraak of omzetting in mineralen.

Metabolietanalyses werden uitgevoerd in de putten PB8109 en PB8101, die referentieputten waren vanwege hun zeer hoge naftaleenconcentraties, gelegen aan de oostkant van zone 1 (PB8109) en aan de westkant (PB8101). In vergelijking met deze referentieputten werden ook stalen verzameld in de peilbuizen PB8103 en PB8104 in de nieuwe aanplant en PB8106 en PB8107 bij de bestaande bomen. We zien dat de diagnostische ratio's n-C17-alkaan/pristaan en n-C18-alkaan/fytaan in de aangeplante zone lager zijn dan in de referentieputten, zodat een zekere mate van afbraak wordt bevestigd.

Diagnostic ratio (DR)	8101	8103	8104	8106	8107	8109
n-C_{17}-alkane/pristane ↓	7.6	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*	13.7
n-C_{18}-alkane/phytane ↓	3.8	n.d.*	n.d.*	n.d.*	n.d.*	13.0
acenaphthene/fluorene ↑	2.2	3.8	1.2	1.8	3.0	0.8
naphthalene/(C_2-naphthalenes+C_3-naphthalenes) ↓	29.1	4.7	15.0	11.6	261.1	5.0
dibenzofurane/fluorene ↑	0.8	1.3	0.5	1.0	1.2	0.8
phenanthrene/anthracene ↓	14.5	0.2	6.7	14.5	3.6	9.7

Tabel 21:Resultaten diagnostic ratio's

Monitoring well	P8101	P8106
Metabolite	**Ref**	**Adult tree + inoculated**
Metabolites of aerobic BTEX biodegradation		
Catechol (1,2-dihydroxybenzene)	12,8	+
Methylcatechol (Dihydroxytoluene)	+ / -	4.0
Ethylcatechol	+ / -	nd
Benzyl alcohol	nd	nd
Metabolites of aerobic Naphthalene biodegradation		
1-Naphthol (1-Hydroxynaphthalene)	+	+
2-Naphthol (2-Hydroxynaphthalene)	9.1	11.7
1,2 or 2,3-Dihydroxynaphthalene	nd	nd
Metabolites of anaerobic BTEX biodegradation		
Benzylsuccinic acid	nd	nd
(1-phenylethyl)benzylsuccinic acid	nd	nd
(2 and/or 3 and/or 4)-Methylbenzylsuccinic acid	+ / -	+
Metabolites of anaerobic Naphthalene biodegradation		
(1 and/or 2)-Naphthoic acid	57.1	89.0
5,6,7,8-tetrahydro-2-Naphthoic Acid	+ / -	+ / -
Metabolites of anaerobic PAH biodegradation		
Naphthylmethylsuccinic acid	11.6	29.5
Phenanthrene-4-carboxylic acid or 9-Anthracencaboxylic acid	nd	nd
Flouren-9-carboxylic carboxylic acid	+ / -	nd
Acenaphthene- 5 and/or 3 -carboxylic acid	+ / -	+ / -
Metabolites of aerobic and anaerobic mono- and polycyclic aromatic hydrocarbon biodegradation		
Benzoic acid	17.1	1.4
(2 and/or 3 and/or 4)-Hydroxybenzoic acid	5.9	6.5
2,5-Dihydroxybenzoic acid (Gentisic acid)	nd	nd
3,4-Dihydroxybenzoic acid (Protocatechuic acid)	+ / -	+ / -
o/m/p-Toluic acid (methylbenzoic acid)	11.9	+
Carboxybenzaldehyde	nd	nd
Phenol (probably co-contamination)	0.9	0.3
o/m/p-Cresol (probably co-contamination)	9.5	6.3
Metabolites of anaerobic alkane biodegradation		
Alkylsuccinic acids	nd	+ / -

Tabel 22 . Metabolieten van verschillende verontreinigende stoffen waaronder naftaleen via aërobe en anaërobe afbraakwegen

Voor metabolieten kan put PB8106 worden vergeleken met PB8101. In groen zijn de kolommen gemarkeerd met een hoger niveau van metabolieten, vergeleken met de referentie, om te zien of er meer accumulatie van tussenproducten is, wat duidt op afbraak. Niet voor alle verbindingen en trajecten nemen de waarden toe in de peilbuis nabij de volwassen en geïnoculeerde boom ten opzichte van de controle, maar dit wijst er wel op dat er een bepaalde natuurlijke afbraak plaatsvindt.

4.3.2.1.5 qPCR voor EUB en naftaleendioxygenase in zone 2 (Oeverzone Zijdelings Vaartje)

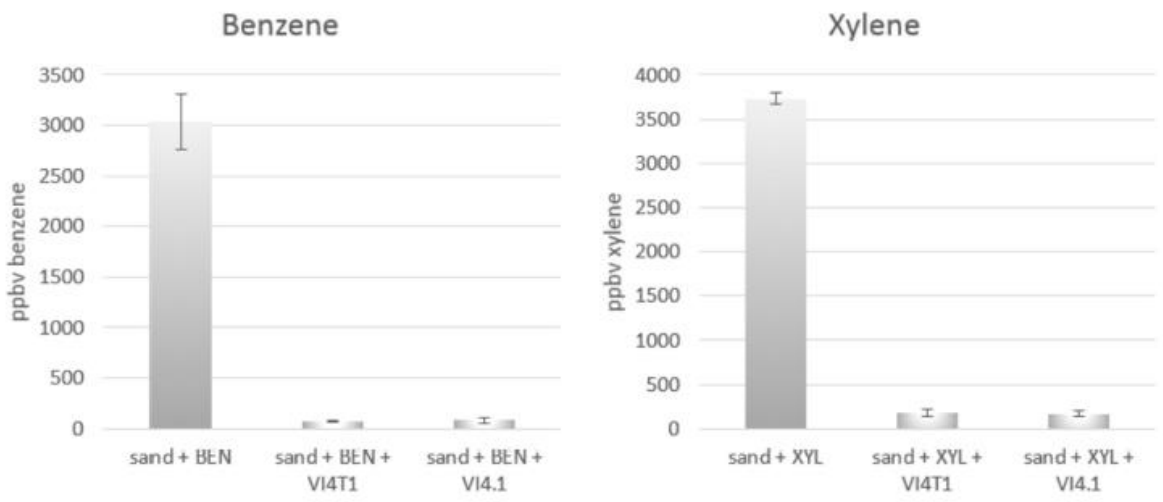
Op 16/6/2022 werden bodemstalen genomen in de oever van het Zijdelings Vaartje. Hierop werden DNA-extracties en qPCR analyses uitgevoerd door de Uhasselt.
Er werden geen overeenkomsten met het naftaleendioxygenase gen gevonden, hoewel er wel bacteriën aanwezig zijn, want de EUB-primer registreerde $7x10^9$ tot 1×10^{11} kopieën/g bodem. Het hoogste aantal micro-organismen werd aangetroffen ter plaatse van 7103.

Sample	Date	Qubit DNA conc. (ng/µl)	qPCR EUB copies/g
7112	16/06/2022	TOO LOW <50	7,92E+09
7112	16/06/2022	2,08	2,25E+10
7113	16/06/2022	1,20	6,75E+10
7113	16/06/2022	1,28	7,92E+09
7106	16/06/2022	1,89	1,25E+10
7106	16/06/2022	1,88	4,21E+09
7103	16/06/2022	1,59	1,13E+11
7103	16/06/2022	1,98	1,58E+11

Tabel 23. DNA-concentraties en qPCR resultaten voor EUB

4.3.2.1.6 Effienciëntie van de geïnoculeerde stammen ter plaatse van het Zijdelings Vaartje

De stammen VI4.1 en RES11, dezelfde als voor zone 1, werden geïnoculeerd ter hoogte van staalnamepunt b7108 tot en met b7115. De zone van b7101 tot b7107 werd niet geïnoculeerd. Om de doeltreffendheid van de micro-organismen te testen voordat ze in het milieu worden gebracht, werd hun afbraak beoordeeld. Naast naftaleen werd ook de afbraak van benzeen, xyleen en tolueen getest. Hieruit bleek dat de betreffende stammen ook geschikt zijn voor de afbraak van BTEX.



Figuur 84. Afbraak van BTEX verbindingen door VI4.1

4.3.2.1.7 Evaluatie van het afbraakpotentieel via diagnostic ratio's en metabolietanalyses

Net zoals voor zone 1 werd uitgevoerd, kan het afbraakpotentieel voor de zwaardere PAK verbindingen best worden geëvalueerd via de diagnostic ratio's en de aanwezigheid van metabolieten. Biodegradatie leidt tot karakteristieke veranderingen in de samenstelling van koolwaterstoffen. Zo worden homologe n-alkanen bij voorkeur biologisch afgebroken eerder dan vertakte alkanen (isoprenoïden). Niet-gesubstitueerde polyaromatische koolwaterstoffen (PAK) worden eerder afgebroken dan gealkyleerde PAK (C1-; C2-; C3-PAK).

Fuel Type	Level of Biodegra-dation	Chemical Composition
Gasoline, Diesel, Bunker C fuel	1	Abundant n-alkanes
	2	Light-end n-alkanes removed
	3	Middle range n-alkanes, olefins, benzene & toluene removed
	4	More than 90% of n-alkanes removed
	5	Alkylcyclohexanes & alkylbenzenes removed Isoprenoids & C_0-naphthalene reduced
	6	Isoprenoids, C_1-naphthalenes, benzothiophene & alkylbenzothiophenes removed C_2-naphthalenes selectively reduced
	7	Phenanthrenes, dibenzothiophenes and other polynuclear aromatic hydrocarbons reduced
	8	Tricyclic terpanes enriched Regular steranes selectively removed C_{31} to C_{35}-homohopanes reduced
	9	Tricyclic terpanes, diasteranes & aromatic steranes abundant

Increasing level of biodegradation

Figuur 85. Wijziging in de samenstelling van de verschillende koolwaterstoffen in functie van de biodegradatie

Uit de analyses van de diagnostic ratio's en de metabolieten bleek dat alle stalen een vergelijkbaar koolwaterstofpatroon vertoonden, hetgeen bevestigt dat het één en dezelfde verontreinigingsbron betreft. Dit patroon wordt sterk gekenmerkt door de aanwezige PAK's. Vanwege de hoge fractie niet-gesubstitueerde PAK's in vergelijking met gealkyleerde PAK's was de evaluatie van fytoremediatie met behulp van micro-organismen beperkt. Er werden echter aanwijzingen voor de afbraak van naftaleen gevonden in GC/MS-onderzoeken ter plaatse van b7106 (zonder inoculatie) en b7113 (met inoculatie). Omdat dit over de inoculatie heen werd waargenomen, kon geen direct effect van de geïnoculeerde micro-organismen worden aangetoond.

4.3.2.1.8 qPCR voor EUB en alkB in zone 3 (fytopiles)

2B (no aeration, no toplayer, and tall phytopile: control of 2A)		
2B-1	1	AE
2B-2	2	Mistral coat
2B-3	3	Mistral coat
2B-4	4	Mistral
2B-5	5	Mistral
2B-6	6	FA

2A (aeration + inoculation, tall phytopile)		
2A-1	7	LP+i
2A-2	8	Grandslam+i
2A-3	9	Mistral/FB+i
2A-4	10	Mistral coat+i
2A-5	11	Mistral coat/agr. Coat+i
2A-6	12	FA+i

1D (no aeration, low phytopile: control of 1B)		
1D-1	13	FA
1D-2	14	Agr
1D-3	15	Mistral
1D-4	16	LP

1B (aeration + inoculation + biosurfactant, low phytopile)		
1B-1	17	LP+i
1B-2	18	Mistral+i
1B-3	19	Agr+i
1B-4	20	FA+i

1C (aeration, low phytopile: control of 1A)		
1C-1	21	Agr
1C-2	22	Agr coat
1C-3	23	Mistral coat
1C-4	24	Mistral

1A (aeration + inoculation + Melilotus, low phytopile)		
1A-1	25	Agr+i+M
1A-2	26	Agr coat+i+M
1A-3	27	Mistral coat+i+M
1A-4	28	Mistral+i+M

Figuur 86. Foto en schema van de fytopiles (09/2020). Arrhenatherum elatius (AE): Frans raaigras. Lolium Perenne (LP): Engels raaigras. Festuca arundinacea (FA): Rietzwenkgras. Mistral, Agreement (Agr). Grandslam: varieties of Lolium perenne. I=geïnoculeerd. Coat=gecoate zaden.

Uit de analyseresultaten van de eerste stalen die in het kader van de monitoring werden verzameld op 16/6/2022 bleek een voldoende hoge concentratie aan DNA, maar bij de qPCR-analyses werden niet veel microben (EUBacteriën) en Alkaanmonooxygenase B (gen voor de afbraak van n-alkaan) aangetroffen. Dit wordt veroorzaakt door PCR-remmers gelinkt aan het hoge humusgehalte van de piles, in combinatie met de hoge verontreinigingsniveaus en lage DNA-concentraties. De resultaten werden herhaald met meer DNA-verdunningen.
Voor de grote pile 2A en de twee kleine piles 1B en 1A vond inoculatie plaats met hetzelfde consortium als voor zone 1 en zone 2. De inoculatie gebeurde op 25 juni 2021.
Vanwege het vermelde probleem met de PCR-remmer is het niet mogelijk om de efficiëntie van de inoculatie met deze methode te beoordelen.

Sample	Date	Qubit DNA conc. (ng/µl)	qPCR EUB copies/g soil	qPCR AlkB copies/g soil
7A7B_1	16/06/2022	7,10	7,66E+11	1,23E+12
7A7B_2	16/06/2022	5,72		
8A8B_2	16/06/2022	8,78	7,08E+11	7,21E+11
8A8B_3	16/06/2022	6,08		
9A9B_1	16/06/2022	7,30		
9A9B_2	16/06/2022	6,39		
10A10B_1	16/06/2022	8,04		
10A10B_2	16/06/2022	7,29		
11ABC_1	16/06/2022	13,00	8,76E+11	
11ABC_2	16/06/2022	8,53	1,09E+12	
12_1	16/06/2022	5,80		
12_2	16/06/2022	7,53		
5A_1	16/06/2022	6,82		
5A_2	16/06/2022	12,60		
6ABC_1	16/06/2022	8,79		
6ABC_2	16/06/2022	9,84		
4AB_1	16/06/2022	4,47	2,07E+07	
4AB_2	16/06/2022	8,47		
3AB_1	16/06/2022	6,79		
3AB_2	16/06/2022	1,03		
1AB_1	16/06/2022	9,78		
1AB_2	16/06/2022	5,26		
2AC_1	16/06/2022	7,84		
2AC_2	16/06/2022	8,49		

Tabel 24. DNA-concentraties en qPCR resultaten voor EUB en AlkB in zone 3 (phytopiles)

4.3.2.1.9 Ontwikkeling van de grassen en afbraak van PAK's en minerale olie

Figuur 87. Evolutie van de groei van de grassen. De beelden tonen het kiemen (11/2020), de bedekking door de gegroeide grassen (30/04/2021), vaststelling van de wortellengte (> 18 cm) en een detailbeeld met de aanwezigheid van de plaatselijk mee ingezaaide Honingklaver (*Melilotus alba*).

Phytopile 2B die niet voorzien is van een beluchtingsbuis en waarop geen toplaag met teelaarde is aangebracht, bevat het meeste olie (06/21). Dit wijst er op dat de aanwezigheid van beluchtings-buizen (2A) de daling van de concentraties aan minerale olie (als gevolg van biodegradatie en/of vervluchtiging) bevoordeelt. Ook de kleinere afmetingen blijken een gunstig effect te hebben zoals blijkt uit het feit dat de kleine piles (1-serie) lagere concentraties aan olie vertonen.

Uit de interpretatie van de diagnostic ratio's blijkt dat er aanwijzingen zijn voor afbraak van pyreen en fluorantheen. Er was een afname van pyreen en fluorantheen in vergelijking met fenantreen en antraceen. Een dergelijk mogelijk afbraakeffect werd bevestigd door de diagnostic ratio van (pyreen+fluorantheen)/(C2-pyreen+C2-fluorantheen), hetgeen wijst op een onverwachte, meer uitgesproken afbraak van pyreen en fluorantheen. Er is een algemene trend waarbij de microbiële persistentie van PAK's toeneemt naarmate het aantal aromatische ringen en de alkylering toenemen.

Een meer uitgesproken afbraak van pyreen en fluorantheen in vergelijking met anthraceen en fenantreen zou dit tegenspreken, maar speciaal aangepaste omstandigheden voor de afbraak van pyreen en fluorantheen zouden mogelijk zijn. Met de qPCR-test werden geen specifiek aangepaste bacteriestammen opgepikt, wellicht wegens de zware belasting met PCR-remmers (verontreinigende stoffen, toplaag uit compost en hoog organisch materiaal in het sediment).

Inoculation															
Date	phytopillar	2A air + inoculation						1B: air + inoculation				1A: air + inoculation + Melilotus			
	location	2A-1	2A-2	2A-3	2A-4	2A-5	2A-6	1B-1	1B-4	1B-2	1B-3	1A-1	1A-2	1A-3	1A-4
	Grass variety	LP	Grandslam	Mistral/FB	Mistral coat	Mistral coat/ Agr coat	FA	Agreement	Mistral	Agr coat	Mistral coat	LP	Mistral	Agreement	FA
	Seed coating	no	no	no	yes	yes	no	no	no	yes	yes	no	no	no	no
25.06.2021	1st sampling		3a + 3b		4a + 4b			7a + 7b		8a + 8b		*11a + 11b + 11c			#
25.06.2021	Inoculation	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X
01.10.2021	2nd sampling		3a + 3b		4a + 4b			7a + 7b		8a + 8b		11a + 11b + 11c			12
16.06.2022	3rd sampling		3a + 3b		4a + 4b			7a + 7b		8a + 8b		11a + 11b + 11c			12
Control															
Date	phytopillar	2B: no aeration control, no top layer						1D: no aeration control				1C: no aeration control			
	location	2B-1	2B-2	2B-3	2B-4	2B-5	2B-6	1D-1	1D-2	1D-3	1D-4	1C-1	1C-2	1C-3	1C-4
	Grass variety	AE	Mistral coat	Mistral coat	Mistral	Mistral	FA	FA	Agreement	Mistral	LP	Agreement	Mistral	Agr coat	Mistral coat
	Seed coating	no	yes	yes	no	no	no	no	no	no	no	no	no	yes	yes
25.06.2021	1st sampling	*	1a + 1b		2a + 2c			#	6a + 6b + 6c			9a + 9b		10a + 10b	
01.10.2021	2nd sampling		1a + 1b		2a + 2c			5a	6a + 6b + 6c			9a + 9b		10a + 10b	
16.06.2022	3rd sampling		1a + 1b		2a + 2c			5a	6a + 6b + 6c			9a + 9b		10a + 10b	

Tabel 25. Overzicht van de onderzochte stalen voor GC/MS-screening. #: flessen waren gebroken nog voor de aanlevering isodetect waardoor deze stalen niet werden onderzocht. *: vervangstalen werden bezorgd en onderzocht voor staal 12 en 5a.

sample	sampling campaign	n-C_{17}-alkane/pristane ↓	n-C_{18}-alkane/phytane ↓	acenaphthene/fluorene ↑	dibenzofurane/fluorene ↑	naphthalene/(C_2-naphthalenes+C_3-naphthalenes) ↓	phenanthrene/anthracene ↓	(anthracene + phenanthrene) / (C_2-anthracenes + C_2-phenanthrenes) ↓	(pyrene+fluoranthene) / (C_2-pyrene + C_2-fluoranthene) ↓	(chrysene+benz[a]anthracene) / (C_1-chrysene+C_1-benz[a]anthracene) ↓
1a+1b	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.3	0.7	8.1	6.8	5.8
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.5	0.9	10.9	3.7	7.7
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.4	0.4	0.2	1.1	10.2	7.9	6.8
2a+2c	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.5	0.8	9.9	6.0	6.0
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.2	0.5	1.0	9.4	7.9	6.9
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.3	0.5	0.7	9.1	6.7	7.5
5a	2nd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.1	0.3	0.9	10.2	4.7	7.6
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.3	0.8	0.7	11.4	5.8	6.9
6a+6b +6c	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.5	0.5	43.5	8.9	7.4
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.3	0.7	0.9	7.2	5.7	5.7
	3rd	n.d.*	n.d.*	1.2	0.3	0.4	0.6	13.5	4.2	6.3
9a+9b	1st	n.d.*	n.d.*	0.2	0.3	0.1	1.1	6.6	9.1	6.0
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.3	0.6	0.7	11.6	6.3	6.0
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.3	0.4	0.4	0.9	9.9	5.0	5.7
10a+10b	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.3	n.d.#	1.0	11.8	5.9	6.0
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.1	n.d.#	n.d.#	1.0	12.5	5.7	7.8
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.0	n.d.#	0.4	0.7	16.6	4.1	7.9
2B1	1st	n.d.*	n.d.*	n.d.#	n.d.#	n.d.#	n.d.#	32.7	10.9	6.3

Tabel 26. Diagnostic ratio's voor mengstalen van niet geïnoculeerde phytopiles. De pijlen tonen de verwachte evolutie in geval van biodegradatie. N.d.*: pristaan en fytaan niet of slechts als sporen te detecteren. N.d.#: niet detecteerbaar wegens overlappende pieken.

sample	sampling campaign	n-C_{17}-alkane/pristane →	n-C_{18}-alkane/phytane →	acenaphthene/fluorene ↑	dibenzofurane/fluorene ↑	naphthalene/(C_2-naphthalenes+C_3-naphthalenes) →	phenanthrene/anthracene →	(anthracene + phenanthrene) / (C_2-anthracenes + C_2-phenanthrenes) →	(pyrene+fluoranthene) / (C_2-pyrene + C_2-fluoranthene) →	(chrysene+benz[a]anthracene) / (C_1-chrysene+C_1-benz[a]anthracene) →
3a+3b	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	n.d.#	0.9	9.4	7.8	5.9
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.3	0.4	1.0	5.9	8.2	6.6
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.3	0.5	0.6	13.7	6.5	6.8
4a+4b	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.5	0.8	8.4	7.4	5.8
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	n.d.#	0.8	9.1	3.9	7.4
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.2	0.2	0.8	15.9	4.0	7.4
7a+7b	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.3	1.0	11.0	10.7	5.7
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	n.d.#	0.9	6.5	6.6	6.6
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.3	0.3	0.3	0.9	13.9	4.5	6.7
8a+8b	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	n.d.#	1.1	10.7	5.2	5.6
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.3	1.0	0.6	16.0	5.0	7.6
	3rd	n.d.*	n.d.*	n.d.#	0.3	0.7	0.8	12.8	2.7	6.7
1A1	1st	n.d.*	n.d.*	0.3	0.3	0.2	1.6	11.6	8.4	5.8
11a+11b +11c	1st	n.d.*	n.d.*	0.1	0.2	0.2	1.0	10.6	10.0	6.3
	2nd	n.d.*	n.d.*	0.4	0.4	1.0	2.2	15.6	9.0	6.5
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.2	0.4	1.3	24.6	5.5	6.6
12	2nd	n.d.*	n.d.*	0.2	0.2	0.2	0.9	10.4	5.6	7.1
	3rd	n.d.*	n.d.*	0.1	0.3	0.4	0.9	10.1	4.6	5.8

Tabel 27. Diagnostic ratio's voor mengstalen van geïnoculeerde phytopiles. De pijlen tonen de verwachte evolutie in geval van biodegradatie. N.d.*: pristaan en fytaan niet of slechts als sporen te detecteren. N.d.#: niet detecteerbaar wegens overlappende pieken.

Met qPCR gebruikt men primers voor gekende afbraakgenen. Met “open screening” shotgun metagenomics kan men het volledige DNA sequencen zodat het duidelijk wordt of er nog andere afbraakgenen voorkomen buiten de naftaleen dioxygenase en fenantreen dioxygenase, dus nieuwe bacteriën en genen die een verklaring kunnen zijn in de gevonden dalingen van de PAK’s.
DNA shotgun metagenomics in plaats van qPCR kan aldus een aanwijzing geven waarom lange keten-PAK's hier nog steeds afnamen in de piles. Door de grote hoeveelheid PAK's is het waargenomen afbraak-effect echter slechts marginaal. De biologische beschikbaarheid van de PAK's kan door sorptie aan het organisch materiaal een grens vormen voor de biologische afbraak. Daarom zouden we nanopartikels of oppervlakte-actieve stoffen moeten gebruiken om de toegang van de micro-organismen tot de zware PAK-ringen te verbeteren alvorens verdere analyses uit te voeren via diagnostic ratio’s - of DNA-analyses.

4.3.2.2 Evaluatie m.b.t. bereiken saneringsdoelstelling

4.3.2.2.1 Zone 1

Het is duidelijk dat gezien het korte tijdsbestek van het RESANAT-project, de bijhorende piloot-proeven en de heterogeniteit van de bodemverontreniging in zone 1 (noordelijke terreinrand) het niet mogelijk is om de bodemkwaliteit in deze zone aantoonbaar te verbeteren. Verder blijkt uit voorgaande bodemonderzoeken en onderzoeksverrichtingen die in het kader van RESANAT werden uitgevoerd, dat er in zone 1 ook nog verontreinigd grondwater blijft toestromen.

Uit de hoger beschreven resultaten van de monitoring blijkt dat er in zone 1 weldegelijk in een bepaalde mate afbraak plaatsvindt.

Uit de evaluatie van de bodem- en grondwaterkwaliteit in zone 1 die werd uitgevoerd door Witteveen+Bos blijkt dat de afname van de concentraties BTEX de sterkste correlatie vertoont in functie van de tijd, in vergelijking met minerale olie en PAK’s. Van de drie parametergroepen zullen de BTEX het makkelijkst biologisch degraderen.

Verder is het ook duidelijk dat in aanwezigheid van puur product er geen evolutie van concentraties in functie van de tijd kan opgetekend worden.

Voor de 20 monitoringpeilbuizen heeft de afname van BTEX-concentraties in 50 % van de gevallen een positieve correlatie (>0,7) met de tijd, in 40 % geen correlatie (<0,7) en in 10 % een negatieve correlatie (<-0,7).

Wanneer de locaties waarbij ter hoogte van de filterstelling puur product is aangetroffen, of mogelijks kan aangetroffen worden, niet mee in beschouwing genomen worden, wordt er een positieve correlatie (>0,7) vastgesteld voor BTEX in 10 van de 16 monitoringfilters (62,5 %).

Wanneer de locaties waarbij ter hoogte van de boorlocatie puur product is aangetroffen, of mogelijks kan aangetroffen worden, niet mee in beschouwing genomen worden, wordt er voor BTEX een positieve correlatie (>0,7) vastgesteld in 9 van de 12 monitoringfilters (75 %).

BTEX kunnen als meest relevante parameter beschouwd worden qua toxiciteit en verspreidings-gedrag. In deze case zijn er evenwel beduidend lagere concentraties BTEX aangetroffen, in vergelijking met minerale olie en PAK.

Uit de resultaten van monitoring van de grondwater- en massafluxen, uitgevoerd door iFLUX, blijkt de allerhoogste massaflux te zijn vastgesteld in de eerste campagne in peilbuis 8109 op een diepte van 3,2 m voor alle gemeten stoffen. De resultaten wijzen op de aanwezigheid van puur product in deze peilbuis. In de tweede meetcampagne werd een lage massaflux gemeten in deze peilbuis, mogelijk te verklaren door de lagere grondwaterstromingssnelheid of door een verstopping van de filter. In de derde meetcampagne werd opnieuw een hoge massaflux vastgesteld.

De gemeten massaflux in zone 1 bestaat vooral uit naftaleen en minerale olie.

Doorheen de drie meetcampagnes die werden uitgevoerd door iFLUX, was er algemeen een duidelijke afname van de massaflux.
Hoewel fytoremediatie op langere termijn kan bijdragen tot de afname van de concentraties aan verontreinigende stoffen in de bodem en het grondwater, lijkt de algemene afname van de massa-fluxen eerder het gevolg te zijn van variaties in grondwaterstanden en stroomsnelheden. De resultaten van monitoring door iFLUX zijn opgenomen in bijlage 4.31.

De effectiviteit van de techniek situeert zich voor deze zone verder ook in het hydraulisch effect dat de bestaande beplanting en op termijn ook de nieuw aangeplante populieren teweegbrengen. Het is mogelijk om op deze manier een hydraulische barrière te vormen teneinde de verdere verspreiding van het verontreinigde grondwater tegen te gaan. Hiervoor dient de aanplant verder te worden opgeschaald.

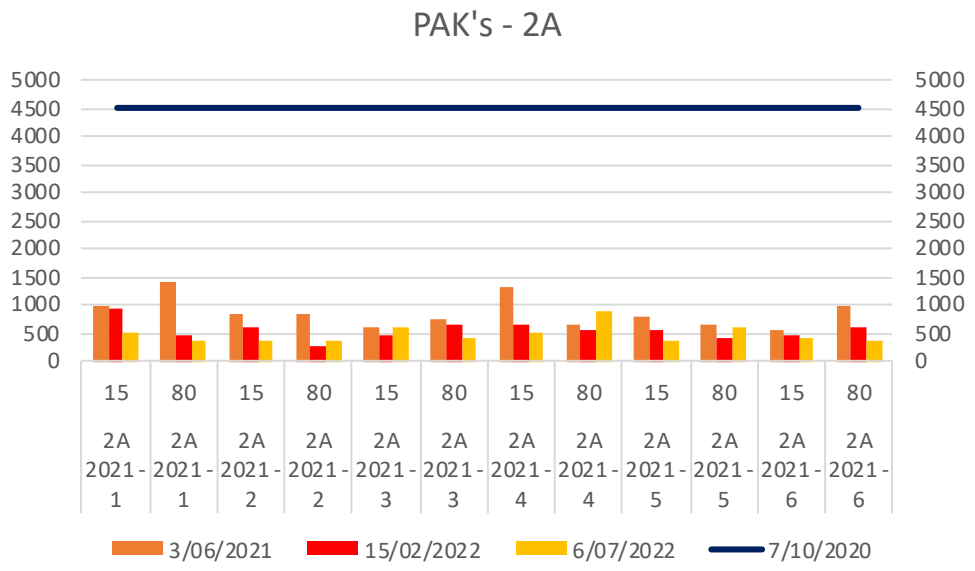
4.3.2.2.2 Zone 2

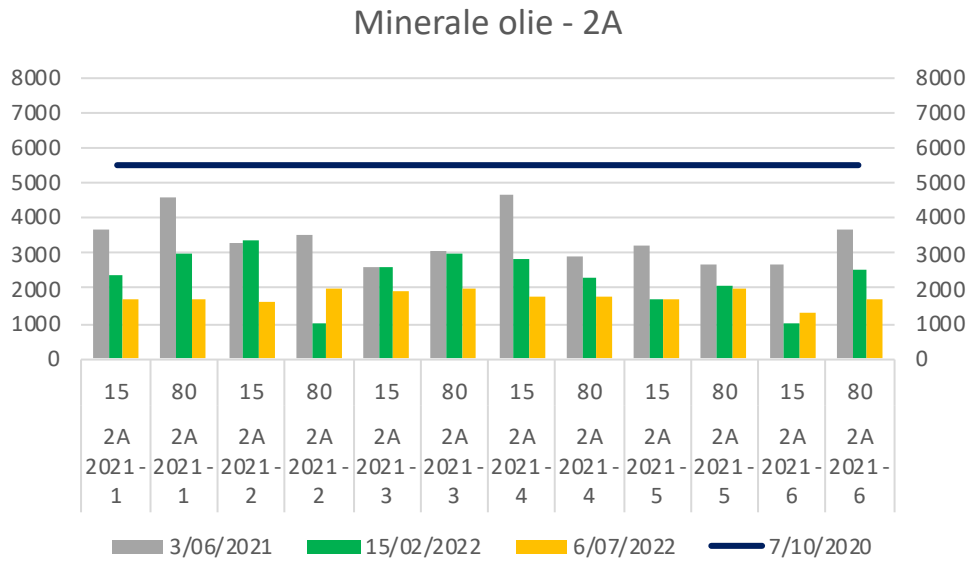
We concluderen dat de hoge concentraties aan verontreinigende stoffen in de oeverzone de efficiëntie van de micro-organismen gestimuleerde fytoremediatie nadelig beïnvloeden. Het lijkt aangewezen om via andere saneringstechnieken de meest verontreinigde bodem te verwijderen en de micro-organismen gestimuleerde fytoremediatie in te zetten voor de aanpak van de restverontreiniging.

4.3.2.2.3 Zone 3

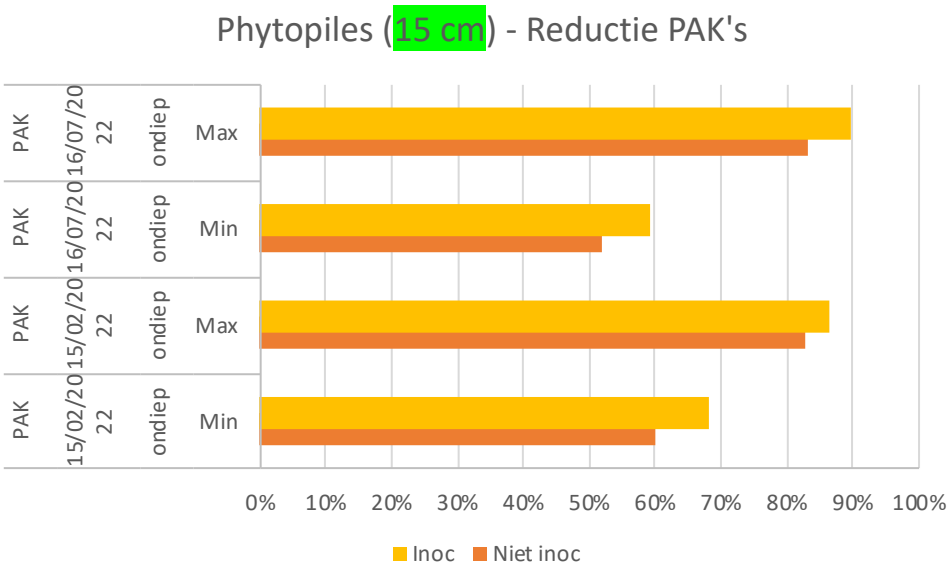
De phytopile die niet was voorzien van een beluchtingsbuis en waarop geen toplaag was aangebracht, blijft het hoogste gehalte aan minerale olie vertonen. De kleinere piles bleken ook lagere eindconcentraties minerale olie te vertonen dan de grotere hopen. Met de qPCR-test werden geen specifiek aangepaste bacteriestammen opgepikt, wellicht door de zware belasting met PCR-remmers. Interpretatie van de diagnostische ratio's toonde aanwijzingen voor de afbraak van pyreen en fluorantheen. Gedurende 18 maanden is er voor PAK's een afname van 52% tot 90% op een diepte van 15 cm en van 62% tot 89% op een diepte van 80 cm. Voor minerale olie is er een vermindering van 49% tot 70% op een diepte van 15 cm en van 43% tot 68% op een diepte van 80 cm. Voorts blijkt uit de resultaten dat inoculatie met geschikte micro-organismen leidt tot ongeveer 10% meer afbraak.

Zowel de haalbaarheidsstudie als de monitoring tonen aan dat minerale olie en PAK afbrekende micro-organismen van nature aanwezig zijn in met deze verbindingen verontreinigde sedimenten en in staat zijn de verontreinigende stoffen in geconstrueerde phytopiles te metaboliseren. Kleinere afmetingen en de aanwezigheid van passieve beluchting lijken deze processen te stimuleren, evenals inoculatie met geschikte micro-organismen.

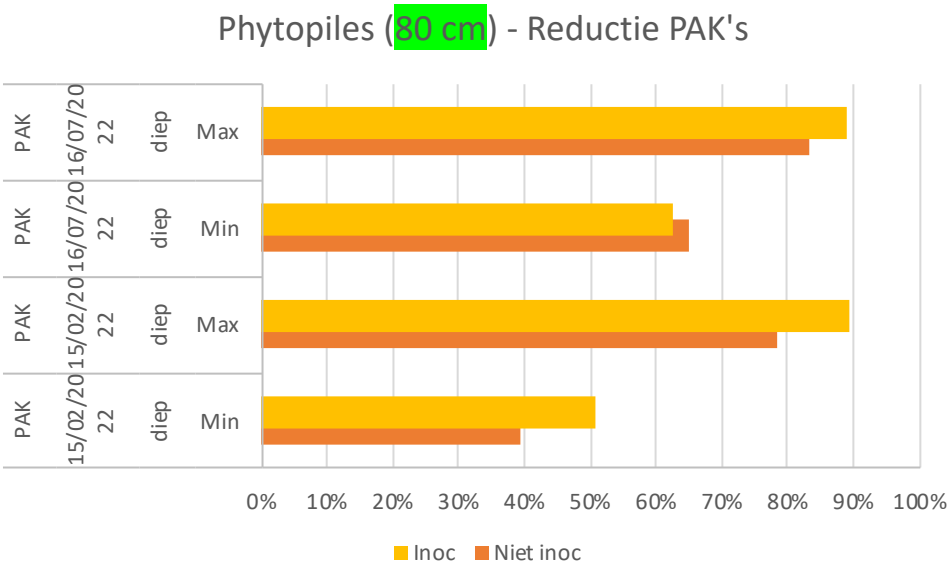




Figuur 88: Evolutie van concentratie aan minerale olie in phytopile 2A



Figuur 89: Minimale en maximale reductie aan PAK's op 15 cm diepte



Figuur 90: Minimale en maximale reductie aan PAK's op 80 cm diepte

4.3.2.3 Criteria voor succes

Welke factoren beïnvloeden het succesvol inzetten van de techniek? Welke factoren moeten worden meegenomen in een vooronderzoek of haalbaarheidsstudie? Bespreking van de effectiviteit van de evaluatie? Welke meetstrategie en procesevaluatie is minimaal nodig om tijdig te kunnen bijsturen? Welke mogelijkheden zijn er om tussentijds bij te sturen?

Factoren die het succesvol inzetten van fytoremediatie beïnvloeden zijn in de eerste plaats de omgevingscondities zoals bodemtype, pH, organische stofgehalte, nutriëntgehalte, aanwezigheid van ondoordringbare lagen, diepte en stromingssnelheid van het grondwater, aanwezigheid van puin, aanwezigheid van puur product, ….

Deze bepalende terreinkarakteristieken zijn reeds beschreven in de code van goede praktijk voor fytoremediatie die in januari 2019 door de OVAM werd gepubliceerd. Hierin wordt algemeen gesteld dat fytoremediatie enkel kan worden toegepast op bodems die plantengroei toelaten en waarbij de verontreiniging in ruime zin bereikbaar is voor de planten.

Het is duidelijk dat de aanwezigheid van relatief dikke puinlagen, zoals specifiek in zone 1, nadelig kan zijn voor de ontwikkeling van de planten, in het bijzonder voor het aanplanten van bomen. Uit de opvolging van de stamomtrekken van de aangeplante populieren blijkt dat deze bijzonder traag groeien in vergelijking met gelijkaardige bomen die in een niet puinhoudende bodem werden aangeplant. Naast de aanwezigheid van puin is de locatie ook gekenmerkt door de aanwezigheid van aanvulgrond tot plaatselijk 4 meter diepte.

Een belangrijke factor is verder het selecteren van de juiste planten. De planten dienen geschikt te zijn voor de betreffende groeiplaatsomstandigheden en dienen naargelang de aard van de verontreinigende stoffen een impact te hebben op de opname, afbraak of vervluchtiging van de verontreiniging met verder een zo kleine mogelijke fytotoxiciteit. De aanwezigheid van puur product kan in dit verband nadeling zijn voor de fytoremediatie.

Heel wat van de hierboven beschreven aspecten kunnen we onderzoeken aan de hand van een haalbaarheidsstudie. Het is dan ook van belang om de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek mee te nemen in het concept.

In situaties met een hoge verontreinigingsgraad en/of waarbij er een nalevering van verontreiniging plaatsvindt, zal het niet mogelijk zijn om op korte tijd een verbetering van de bodem- en grondwater-kwaliteit vast te stellen. Het is belangrijk om de efficiëntie en effectiviteit van fytoremediatie in deze gevallen te bepalen. Dit kan het beste gebeuren met behulp van verschillende technieken, ook wel een "multi line of evidence" genoemd.

Op dit vlak heeft het RESANAT-project sterk bijgedragen aan de evaluatie van verschillende technieken:

- **qPCR**: Aan de hand van qPCR analyses is het mogelijk om de aanwezigheid van specifieke afbraakgenen te onderzoeken. Dit geeft een beeld van het aanwezige fytomediatiepotentieel.
- **GC/MS- analyses** geven een kijk op de aanwezigheid van afbraakproducten. De zogenaamde diagnostic ratio’s geven aan in hoeverre er sprake is van biodegradatie. Dit is mogelijk door verhoudingen van specifieke afbraakstoffen en de wijziging van deze verhoudingen in de tijd te vergelijken met de verwachte evoluties in het geval van biodegradatie.
- **GC/MS analyses** geven ook een zicht op de aanwezigheid van specifieke metabolieten, verbindingen die ontstaan als gevolg van het metabolisme van de aanwezige micro-organismen.
- **BACTRAP:** De BACTRAP bevat een gelabelde doelverbinding die op dragermateriaal in de buis is aangebracht. Vervolgens wordt de BACTRAP geïnstalleerd in de peilbuis, en worden ze gekoloniseerd door micro-organismen. Als alles goed gaat, worden de gelabelde stoffen tijdens de biologische afbraak geassimileerd. Deze test kan meer absoluut bewijs leveren van biologische afbraak (multi-line-of-evidence) door de aanwezigheid van de gelabelde atomen te analyseren in biomoleculen (aminozuren, de bouwstenen van de eiwitten van het organisme).
- **Phytoscreening aan de hand van treecores**: Phytoscreening laat toe om de aanwezigheid van specifieke micro-organismen, afbraakstoffen en metabolieten vast te stellen binnen in de plant.

De hierboven beschreven monitoringstechnieken laten toe om bijvoorbeeld na te gaan of processen zoals rhizodegradatie en fytodegradatie effectief aan de gang zijn. Het is niet voldoende om te weten dat er bijvoorbeeld een afbraakpotentieel is. Er dient ook effectief afbraak door micro-organismen te gebeuren.

4.4 EVALUATIE PILOT

4.4.1 Lessons learned

4.4.1.1 Organisatorisch

Zoals ook vermeld in de code van goede praktijk voor fytoremediatie, is het haalbaarheidsonderzoek een belangrijke factor om fytoremediatie succesvol toe te passen.

De timing van het RESANAT-project liet echter niet toe om de resultaten van het haalbaarheids-onderzoek mee te nemen in het concept. Bijgevolg werd het concept opgesteld en ook de inrichting uitgevoerd voorafgaand aan de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek. Voor de opmaak van het concept baseerde bio2clean zich op resultaten van haalbaarheidsonderzoeken uit andere projecten en op de reeds opgedane kennis en ervaring. Hierdoor werden in het algemeen de juiste beslissingen genomen bij de opmaak van het concept en de inrichting van het terrein. Deze werden bevestigd door de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek.

Bovendien heeft het haalbaarheidsonderzoek dat werd uitgevoerd door de Uhasselt ook een aanzienlijke vertraging opgelopen, onder meer te wijten aan de gevolgen van COVID. Ook in functie van het vervolgtraject met bijvoorbeeld het opstellen van de monitoringscampagne kwamen de conclusies van het haalbaarheidsonderzoek dus laat.

Fytoremediatie is een natuurgebaseerde techniek. De natuur heeft een eigen ritme (seizoenen, groeiperiodes, jaarlijkse schommelingen in de grondwaterstand, …) Inrichting en beheer worden dan ook geënt op dit ritme. Zo is er bijvoorbeeld een specifieke plantperiode voor de bomen van november tot eind februari en dienen inoculaties bijvoorbeeld best te gebeuren in de periode mei/juni. Bijgevolg zijn ook de acties voor de monitoring gelinkt aan specifieke periodes, zeker als er hierbij een onderscheid moet worden gemaakt tussen de periode waarin planten minst of meest actief zijn.
Daarom is het belangrijk om bij dergelijke projecten, waarbij vaak verschillende uitvoerders zijn betrokken, een goede planning uit te werken en deze goed op te volgen. In praktijk blijkt het niet evident om zelfs met een goed en gedetailleerd uitgewerkte planning en een stipte opvolging en coördinatie alles ook effectief volgens plan te laten verlopen.

Een projecttermijn van drie jaar is kort voor fytoremediatie. Zeker omdat er in eerste fase vaak een uitgebreid haalbaarheidsonderzoek dient te gebeuren en er verder voldoende tijd nodig is voor inrichting, inoculatie en monitoring. Een nieuwe aanplant heeft ook een aantal jaren nodig om zich te ontwikkelen vooraleer de effecten van deze beplanting op de verontreiniging duidelijk zichtbaar worden. De monitoring dient ook om het proces indien nodig bij te sturen.

Gezien de korte projectperiode is dergelijke bijsturing in deze periode niet mogelijk. Zo startte de monitoring in 2021 en was de afronding van het project al in 2022.
We adviseren dan ook een vervolgtraject uit te stippelen om de evolutie en effecten, vooral in zone 1 en op het centrale deel van het carcoke terrein verder op te volgen.

4.4.1.2 Technisch

De standplaatseigenschappen en het kiezen van daarvoor geschikte planten zijn een belangrijke succesfactor in de toepassing van fytoremediatie.
Omdat er in de oorspronkelijk geselecteerde hoekzone te weinig verontreiniging aanwezig was, werd gekozen voor zone 1 aan de noordelijke rand van het terrein. In deze zone bleek echter een meters dikke puinlaag aanwezig die niet alleen de plantwerken hinderde maar ook nadelig is voor de evolutie van aangeplante populieren, waardoor deze meer tijd nodig hebben om te ontwikkelen en de verontreiniging te bereiken.
Indien nodig is het aangewezen om bij de aanplant betere groeiomstandigheden te creëren door bijvoorbeeld in de plantput mee compost in te mengen en/of voedingsstoffen toe te voegen via een infiltratiebuis.

In zone 1 was het nodig om de inrichting van de hydraulische barrière aan te passen aan de aanwezigheid van zowel de dikke puinlaag (fundering van de weg), de breedte van de weg en de aanwezigheid van ondergrondse leidingen. Deze aanpassing heeft een nadelig effect op de werking van de hydraulische barrière. We adviseren om deze breder te maken door bijkomende rijen aan te planten ten zuiden van de aangeplante rij populieren in zone 1.

In zone 2 (oever Zijdelings Vaartje) werd getracht in een specifieke zone een beplanting met Grote lisdodde aan te brengen tussen de bestaande rietvegetatie. In het concept werd oorspronkelijk gekozen voor het plaggen van deze zone om de dominante rietvegetatie zo veel als mogelijk te verwijderen. Omdat bij het plaggen echter ook een groot deel van de verontreinigde toplaag zou worden verwijderd, opteerden we uiteindelijk om de rietvegetatie in het voorjaar verschillende keren te branden zodat deze zich minder vlug ontwikkelt. Dit bleek echter niet voldoende om de aangeplante Grote lisdodde tot ontwikkeling te laten komen.
Uit literatuur blijkt dat zowel Gewoon riet als Grote lisdodde geschikt zijn voor fytoremediatie voor de aanwezige verontreiniging. Zoals weergegeven in de code van goede praktijk is het dus vaak aangewezen om verder te werken met de reeds aanwezige vegetatie, zeker in het geval van dominante soorten. Voor het inmengen van andere soorten is het nodig om de aanwezige vegetatie zo goed mogelijk te verwijderen, bijvoorbeeld door te plaggen. De vrijgekomen verontreinigde grond kan dan alsnog elders op het terrein bijvoorbeeld in een phytopile verder aan de hand van fytoremediatie worden gereinigd.

In het kader van de monitoring is de keuze van de staalnamepunten en locaties van de peilbuizen van groot belang. Hierbij dient men rekening te houden met de aanwezige verontreiniging, de grondwaterstromingssnelheid en -richting, alsook met de aanwezige planten. Omgevingsfactoren zoals aanwezigheid van puinfunderingen en ondergrondse leidingen kunnen de optimale keuze van de locaties voor peilbuizen en staalnames nadelig beïnvloeden.

Door de aanwezige puinlaag was het moeilijk om in zone 1 de wortelzone van de bestaande bomen te bereiken voor staalname in functie van monitoring. Daardoor werd de monitoring meer toegespitst op het grondwater en zijn de vastgestelde effecten niet met zekerheid toe te wijzen aan processen in de wortelzone. Het is nochtans in de wortelzone dat de meeste fytoremediatie-effecten worden verwacht voor de betreffende verontreiniging met minerale olie en naftaleen.
We adviseren om in een vervolgtraject in zone 1 bijkomend monitoringsacties (met behulp van een graafmachine) uit te voeren in de wortelzone van zowel de bestaande bomen als van de nieuw aangeplante bomen.

4.4.1.3 Belangrijke elementen in de rapportage (meetstrategie / hypothese)

Factoren die het succesvol inzetten van fytoremediatie beïnvloeden, zijn in de eerste plaats de omgevingscondities zoals bodemtype, pH, organische stofgehalte, nutriëntgehalte, aanwezigheid van ondoordringbare lagen, diepte en stromingssnelheid van het grondwater, ….

Een belangrijke factor is verder het selecteren van de juiste planten. De planten dienen geschikt te zijn voor de betreffende groeiplaatsomstandigheden en dienen naargelang de aard van de verontreinigende stoffen een impact te hebben op de opname, afbraak of vervluchtiging van de verontreiniging met verder een zo kleine mogelijke fytotoxiciteit. De aanwezigheid van puur product kan in dit verband nadelig zijn voor de fytoremediatie.

Heel wat van de hierboven beschreven aspecten kunnen we onderzoeken aan de hand van een haalbaarheidsstudie. Het is dan ook van belang om de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek mee te nemen in het concept.

In de meetstrategie maken we een onderscheid tussen enerzijds de monitoring die we specifiek in functie van de fytoremediatie uitvoeren en anderzijds de monitoring van de bodem- en grondwaterkwaliteit die door de erkend bodemsaneringsdeskundige wordt uitgevoerd. Deze laatste is eerder een momentopname waarbij het effect van een aanplant en/of inoculatie pas in de latere fase zichtbaar wordt in de resultaten. De specifieke monitoring in functie van de fytoremediatie laat echter toe om in een vroeg stadium het bewijs te leveren van bijvoorbeeld de afbraak van organische verontreinigende stoffen. Hiermee krijgen we zicht op de verschillende processen en kunnen we indien nodig ook gaan bijsturen om deze processen te optimaliseren. Geschikte technieken hiervoor zijn onder andere:

- onderzoek naar micro-organismen (vb via qPCR);
- onderzoek naar afbraakproducten en metabolieten (vb via GC/MS);
- Isotoop-analyses (vb via BACTRAP).

4.4.1.4 Financiële aspecten

Het is kenmerkend voor fytoremediatie dat hiervoor meerdere jaren tijd nodig zijn.
De staalnames tijdens de uitvoering dienen in aanvang vooral gericht te zijn op het monitoren van de verschillende processen in functie van het goede verloop en eventuele bijsturing van de sanering. Verbetering van de bodem- en grondwaterkwaliteit zal dan ook vaak na zekere tijd of tegen het einde van de sanering merkbaar zijn.
De frequentie van de staalnames en de aard van de analyses dienen voor elke situatie te worden geoptimaliseerd om de kosten voor monitoring haalbaar te houden.

4.4.1.5 Duurzaamheid

Uit de resultaten van de CO_2 calculator blijkt dat het toepassen van een sanering door middel van fytoremediatie in de vorm van een hydraulische barrière met populieren op het betreffende terrein over een oppervlakte van 200 m x 8 m na 30 jaar zorgt voor een netto CO_2 vastlegging.

Naast de vastlegging van CO2 zijn ook volgende criteria voor duurzaamheid relevant:

- Duurzaamheid
  - Verbruik materialen en energie
  - CO2-sequestratie
  - Bio-energie
  - Opslag van broeikasgassen
- Biodiversiteit
  - Bodemherstel
  - Bodemstructuur, bodemvruchtbaarheid en erosie
  - Bodemleven en microbiële diversiteit
  - Bodemkwaliteit
  - Wilde dieren en planten
- Leefomgevingskwaliteit
  - Stedelijke groene infrastructuur
  - Reduceren geluidshinder
  - Luchtkwaliteit
  - (lokale) klimaatregulatie
  - Aantrekkelijke natuurrijke landschappen

Als we het hebben over Nature Based Saneringstechnieken dan wordt veelal verondersteld dat dit tevens de meest duurzame technieken zijn. Dat hoeft echter niet altijd het geval te zijn, aangezien een techniek daarvoor moet scoren op meerdere duurzaamheidsindicatoren binnen de dimensies 'People', 'Planet' en 'Prosperity'. Twee zwaarwegende duurzaamheidsindicatoren zijn kosten (een indicator voor 'Prosperity') en carbon footprint (een indicator voor 'Planet'). Bovendien zijn beide indicatoren kwantificeerbaar en kunnen daardoor objectief worden beoordeeld. In bijlage 4.37 tem 4.41 zijn de carbon footprint en de kosten van een full-scale toepassing van pilootproef 1 op de Carcoke site doorgerekend.

Ontwerpgrondslagen fytoremediatie

Pilootzone 1 bevindt zich op de noordelijke terreinrand en behelst een fytoremediatievariant die dient om de aanwezige en instromende verontreiniging af te vangen en af te breken waardoor geen verdere verspreiding van verontreiniging mogelijk is. De totaal aangeplante oppervlakte bedraagt 100 m x 4 m = 400 m². Maar bij een full scale toepassing zou, als bio2clean de ruimte en de mogelijkheden (geen nutsleidingen, etc.) had gekregen, over een zone van 1.600 m²2 (200 m x 8 m) fytoremediatie zijn toegepast. De door bio2clean vastgelegde data met betrekking tot CO2- relevante onderdelen voor de 400 m² grote piloot zijn daartoe opgeschaald tot een full-scale toepassing van 1.600 m². Er wordt uitgegaan van de aanplant van in totaal circa 700 stuks plantmateriaal in de vorm van populier (poten), duindoorn en wilgenstekken. Er hoeft voorafgaand aan de aanplant niet of nauwelijks vegetatie te worden verwijderd. Er is gebruik gemaakt van een graafmachine voor de aanplant. Er wordt 240 m aan drainagebuis geplaatst.

Materialen en aanplant zijn aangevoerd per bestelwagen/transporter en personen per personenwagen (verkenning, aanleg, monitoring en onderhoud). De (beheers)maatregel wordt 30 jaar in stand gehouden. In de tussentijd wordt geen nieuwe vegetatie aangeplant, maar er wordt wel in de eerste 2 jaar onderhoud gepleegd rond de nieuwe aanplant (vrijstellen planten door middel van maaien). Daarna vindt er eens per 5 jaar onderhoud plaats in de vorm van snoeien/zagen. Het groenafval wordt op locatie gehouden in de vorm van bv een takkenwal. Wat betreft de monitoring (staalname) zal deze in de eerste 3 jaren halfjaarlijks gebeuren en voor de rest van de saneringsduur jaarlijks. In bijlage 4.38 zijn de ontwerpgrondslagen voor de carbon footprint in tabelvorm opgenomen.

Berekening carbon footprint

De carbonfootprint, althans de uitstoot, is bepaald met behulp van de CO2-calculator voor bodemsaneringen van TAUW (versie 1.4.2). Aanvullend op de eerdergenoemde ontwerpgrondslagen onder hoofdstuk 2 is voor de CO2-footprint rekening gehouden met:

- Het gebruik van fossiele brandstof voor voertuigen (transport en handling on- en off site)
- Het gebruik van fossiele brandstof voor gebruik van apparatuur, zoals graafmachine en kettingzaag
- Productie van gebruikte materialen (drainagebuis). Voor de vastlegging van CO2 is gebruik gemaakt van de 'CO2-rekentool beplantingen Rijkswaterstaat' – versie 2.0 (januari 2020, Probos / Face the future).

Uitgangspunten hierbij zijn:
- Oorspronkelijk grasland (baselinevastlegging) wordt omgevormd tot bos (projectvastlegging). De netto vastlegging = projectvastlegging – baselinevastlegging
- In het model is gerekend met populier en met douglas als substituut voor wilg; de wilg zit niet in het model, maar heeft vergelijkbare koolstofopslag als douglas
- Het model laat niet toe dat er ook nog duindoorn wordt meegenomen; dat heeft te maken met (1) een maximum eis van het aantal planten per oppervlakte-eenheid in het model (de aanplant in Zeebrugge zit hier nog boven) en (2) er geen keuzemogelijkheid in het model is voor een heester onder een boom. Hierdoor wordt mogelijk CO2-vastlegging misgelopen. Dit wordt enigszins gecompenseerd door in het model nu niet te rekenen met het 5-jaarlijkse verlies van snoeiafval van populier en wilg waardoor opgeslagen CO2 (op termijn) weer verloren zou gaan.

In bijlage 4.39 is de modelinvoer en -uitvoer van de CO2-calculator voor bodemsaneringen van TAUW (versie 1.4.2) opgenomen van de fytoremediatie variant. De CO2-uitstoot wordt geraamd op 10,2 ton CO2 over 30 jaar.

De vastlegging als gevolg van de aanwas van biomassa en hout wordt geraamd op 56,3 ton CO2 over 30 jaar (=352 ton CO2/ha voor 1.600 m²). Daarbij dient te worden opgemerkt dat pas na een periode van circa 5 jaar sprake is van een netto vastlegging, omdat als gevolg van de aanplant het oorspronkelijke grasland op deze strook verdwijnt, welke tevens een CO2-vastlegging teweegbracht en de nieuw aangelegde vegetatie initieel nog nauwelijks aanwas van biomassa en hout kent. In bijlage 4.40 is de modelinvoer en -uitvoer opgenomen van de 'CO2-rekentool beplantingen Rijkswaterstaat'.

Netto wordt de CO2-footprint van de fytoremediatievariant geraamd op ongeveer -46 ton CO2 na 30 jaar, oftewel een netto vastlegging. Hierbij dient dus opgemerkt te worden dat de netto vastlegging in werkelijkheid mogelijk nog wat hoger ligt als gevolg van de aanwezigheid van duindoorns.

Bij alternatieve saneringsvarianten zonder fytoremediatie zal geen sprake zijn van een netto vastlegging van CO2. Een alternatief voor de noordelijke rand van het Carcoke terrein zou hier een beperkte grondwateronttrekking met zuivering kunnen zijn, zoals uitgewerkt in het kader van werkpakket 3 voor de Lieve. Ter vergelijking was, voor een lengte van 100 meter ipv 200 meter maar met een veel grotere toestroomsnelheid van grondwater, sprake van een netto uitstoot van 430 ton CO2 voor een periode van 30 jaar.

Berekening saneringskosten

De kostenraming is opgedeeld in een aanlegfase, de monitoring van de bodemkwaliteit (grond en/of grondwater) en het onderhoud van de vegetatie. De kosten voor de aanlegfase zijn gebaseerd op gegevens verstrekt door bio2clean (geëxtrapoleerd van 400 m² naar 1.600 m²). Voor de mensuren van monitoring en onderhoud van vegetatie is een uurtarief van EUR 100 aangehouden. Voor de monitoring is uitgegaan van een jaarlijkse ronde met 60 stalen in de eerste twee jaar en 30 stalen in de daarop volgende 28 jaar die geanalyseerd worden op BTEX, C10- C40 en PAK. Na het initiële onderhoud gedurende de eerste 2 jaar wordt er vanuit gegaan dat onderhoud van vegetatie eens per 5 jaar dient plaats te vinden vanaf het jaar 2025, waarbij 2 personen ieder een dag arbeid verrichten (=2 mensdagen per 5 jaar). Er wordt geen groenafval afgevoerd; het groenafval wordt op de locatie verwerkt.
Tot slot is uitgegaan van:

- Een saneringsduur van 30 jaar
- 8% Algemene kosten; 7% winst en risico
- Rentepercentage 0%.

In bijlage 4.37 is een overzicht van de kostenraming opgenomen. De kosten van fytoremediatie toegepast over een oppervlak van 1.600 m² en gedurende 30 jaar wordt geraamd op ongeveer EUR 375.000 (excl. btw). Omgerekend naar jaarlijkse kosten is dit ca. EUR 12.500. Dit is een laag bedrag voor een beheersing vergeleken met conventionele beheerstechnieken zoals P&T.

Op zowel het aspect kosten als CO2-footprint scoort de toegepaste fytoremediatie variant uitermate goed. Ook op nu niet nader bekeken duurzaamheidsaspecten zoals biodiversiteit, invloed op luchtkwaliteit, klimaatadaptatie, verbruik van energie (in welke vorm dan ook) en afvalproductie scoort deze variant goed. Hiermee is voldoende aannemelijk gemaakt dat de hier beschouwde nature based saneringstechniek een duurzame optie is.

4.4.2 Aanbevelingen voor codes van goede praktijk

In de code van goede praktijk voor fytoremediatie zijn volgende aanvullingen een meerwaarde:

Met betrekking tot de verontreinigende stoffen:
Ook zwaardere oliefracties en naftaleen kunnen aan de hand van fytoremediatie worden verwijderd. Hiervoor kan worden verwezen naar de resultaten van het RESANAT-project.
Intussen kan het overzicht ook verder worden aangevuld met PFAS en bijhorende referenties.

Met betrekking tot de haalbaarheid:
Het is belangrijk om de resultaten van het haalbaarheidsonderzoek mee te nemen in het concept en de planning hierop af te stemmen.

Belangrijk om hierin mee te nemen zijn in de eerste plaats de omgevingscondities zoals bodemtype, pH, organische stofgehalte, nutriëntgehalte, aanwezigheid van ondoordringbare lagen, diepte en stromingssnelheid van het grondwater, aanwezigheid van puin, aanwezigheid van puur product, ….

Een belangrijke factor is verder het selecteren van de juiste planten. De planten dienen geschikt te zijn voor de betreffende groeiplaatsomstandigheden en dienen naargelang de aard van de verontreinigende stoffen een impact te hebben op de opname, afbraak of vervluchtiging van de verontreiniging met verder een zo kleine mogelijke fytotoxiciteit. De aanwezigheid van puur product kan in dit verband nadelig zijn voor de fytoremediatie.

De uitwerking van het haalbaarheidsonderzoek is al vrij goed omschreven in de code van goede praktijk, maar kan nog worden aangevuld met betrekking tot de aanwezigheid van puinlagen en de mogelijke gevolgen voor de aanleg en de ontwikkeling van de planten.

Een aantal aspecten die in de code van goede praktijk zijn beschreven bij het haalbaarheidsonderzoek waaronder het zoeken naar de meest geschikte micro-organismen voor het uitvoeren van de inoculatie kunnen indien gewenst in een latere fase worden uitgevoerd, ook na het afwerken van het concept.
We adviseren om deze aspecten eerder te benoemen als optimalisatie-onderzoek. Het antwoord op deze vragen leidt niet tot een beslissing voor het al dan niet uitvoeren van fytoremediatie maar tot een hoger saneringsrendement.

Met betrekking tot de inrichting:
Het is aangewezen om in de code van goede praktijk er de aandacht op te vestigen dat het inbrengen van soorten, ondanks de geschikte standplaatseigenschappen, in het geval van een reeds aanwezige dominante vegetatie een gepaste voorbereiding kan vergen. Dit kan bijvoorbeeld bestaan uit het plaggen van de bodem en/of het verwijderen van wortelresten.

Voor het aanleggen van phytopiles is het aangewezen richtlijnen op te nemen in de code van goede praktijk. Zo blijkt uit de resultaten van het RESANAT-project dat kleinere piles een voordeel opleveren naar saneringsrendement evenals het gebruik van verluchtingsbuizen.

Om de kieming en het vestigen van ingezaaide grassen te bevorderen is het aangewezen om een 5 cm dikke toplaag aan te brengen bestaande uit composthoudende grond. In het RESANAT-project werd hiervoor volgende samenstelling gebruikt: organisch bodemverbeterend middel samengesteld uit zandleem, groencompost en schorscompost.

Met betrekking tot de monitoring:
In situaties met een hoge verontreinigingsgraad en/of waarbij er een nalevering van verontreiniging plaatsvindt, zal het niet mogelijk zijn om op korte tijd een verbetering van de bodem- en grondwaterkwaliteit vast te stellen. Het is belangrijk om de efficiëntie en effectiviteit van fytoremediatie in deze gevallen te bepalen. Dit kan het beste gebeuren met behulp van verschillende technieken, ook wel een "multi line of evidence" genoemd.

Volgende technieken kunnen richtinggevend worden opgenomen in de code van goede praktijk voor fytoremediatie:

- **qPCR**: Aan de hand van qPCR analyses is het mogelijk om de aanwezigheid van specifieke afbraakgenen te onderzoeken. Dit geeft een beeld van het aanwezige fytomediatiepotentieel.
- **GC/MS- analyses** geven een kijk op de aanwezigheid van afbraakproducten. De zogenaamde diagnostic ratio's geven aan in hoeverre er sprake is van biodegradatie. Dit is mogelijk door verhoudingen van specifieke afbraakstoffen en de wijziging van deze verhoudingen in de tijd te vergelijken met de verwachte evoluties in het geval van biodegradatie.
- **GC/MS analyses** geven ook een zicht op de aanwezigheid van specifieke metabolieten, verbindingen die ontstaan als gevolg van het metabolisme van de aanwezige micro-organismen.
- **BACTRAP:** De BACTRAP bevat een gelabelde doelverbinding die op dragermateriaal in de buis is aangebracht. Vervolgens wordt de BACTRAP geïnstalleerd in de peilbuis, en worden ze gekoloniseerd door micro-organismen. Als alles goed gaat, worden de gelabelde stoffen tijdens de biologische afbraak geassimileerd. Deze test kan meer absoluut bewijs leveren van biologische afbraak (multi-line-of-evidence) door de aanwezigheid van de gelabelde atomen te analyseren in biomoleculen (aminozuren, de bouwstenen van de eiwitten van het organisme).
- **Phytoscreening aan de hand van treecores**: Phytoscreening laat toe om de aanwezigheid van specifieke micro-organismen, afbraakstoffen en metabolieten vast te stellen binnen in de plant.

Het is aangewezen om verschillende van deze technieken in te zetten in functie van een multi-line-of-evidence.

Andere technieken kunnen evenwel worden gehanteerd als ze evenwaardig zijn en bijdragen aan de multi-line-of-evidence aanpak. Het is namelijk cruciaal om zicht te krijgen op de verschillende processen en het effect van de fytoremediatie op de aanwezige verontreiniging. Op die manier is het mogelijk om indien nodig de sanering ook bij te sturen.

5 WERKPAKKET 5

Samenvatting

Op de Dura-Vermeer locatie Cebeco te ‘s Gravenmoer is sprake van een creosootverontreiniging in de grond en het grondwater. Op de verontreinigde locatie is een houtbewerkingsbedrijf actief geweest aan de Havenkade te ‘s -Gravenmoer van 1962 tot midden jaren 90.
In januari 2010 is er begonnen met de sloop van de gebouwen en is de bodemsanering van start gegaan. Eind 2011 is een geohydrologische barrière geplaatst, bestaande uit een bentoniet-diepwand met aan beide uiteinden een deepwell-onttrekking. Het onttrokken grondwater wordt na zuivering op het riool geloosd. Het grootste deel van de locatie is ontwikkeld als woonwijk. Ter plaatste van de restverontreiniging is een speeltuin met leeflaag geplaatst.
Het oorspronkelijke Cebeco project bevindt zich nu in de monitoringsfase en zou eigenlijk overgaan in een nazorgfase. Daarnaast is er het algemene beleid dat men in Nederland af wil van de IBC-locaties (projecten met eeuwigdurende nazorg). DVIM wil graag met de locatie Cebeco in de praktijk meewerken om als voorbeeldproject te dienen. Creosoot, en met name naftaleen, zijn veel voorkomende verontreinigen welke nu vaak met minder duurzame technieken of met een oneindig durende nazorg worden gesaneerd of beheerst. Dit project levert een bijdrage aan het onderzoek naar de mogelijkheden voor een duurzame, bio-based oplossing voor dit soort locaties door middel van in-situ biostimulatie.

Het doel van het onderzoek binnen het project RESANAT is te onderzoeken of het mogelijk is door middel van biostimulatie de actieve onttrekking en zuivering van grondwater te stoppen en daarmee de locatie op een duurzame manier nazorgloos maken. Mocht dit niet haalbaar blijken, wordt onderzocht of biostimulatie kan bijdragen aan het zo efficiënt mogelijk (met minimale kosten en inspanning) beheersen van de aanwezige restverontreiniging.
De effectivititeit van de pilots is getoetst aan de hand van de bewijslijnen voor biologische afbraak:
1. Verandering van de grondwatersamenstelling;
2. Veranderingen in de verontreiniging;
3. De aanwezigheid van micro-organismen met afbraak-capaciteit.

In de periode van 11 oktober 2021 tot 10 oktober 2022 zijn er op de projectlocatie 3 pilootonderzoeken uitgevoerd. Om het effect van de pilots te monitoren is gemeten op verontreinigingsparameters (BTEX, PAK, Minerale Olie), nutriënten en elektronacceptoren (sulfaat, nitraat, zuurstof, ammonium, fosfaat, TOC), bromide en biologische parameters (totaal bacteriën, 2 bacteriesoorten, ncrC).

Het doel van het nazorgloos maken van de locatie door middel van biostimulatie blijkt op basis van de pilootonderzoeken niet haalbaar. De anaerobe pilots hebben onvoldoende een meetbaar verschil gemaakt om bij te dragen aan het beheersen van de verontreiniging. De aerobe pilot heeft op basis van de afname in elektronacceptor en afname in verontreinigingsconcentraties wel de potentie om bij te dragen aan de beheersing.

5.1 INLEIDING

5.1.1 Veralgemeende probleemstelling & oplossing

Minerale olie, teer, creosoot en naftaleen zijn veel voorkomende verontreinigen welke nu vaak met mindere duurzame technieken of met een oneindige durende nazorg worden gesaneerd of beheerst. Dit project levert een bijdrage aan het onderzoek naar de mogelijkheden voor een duurzame, bio-based oplossing voor dit soort locaties door middel van *in-situ* biostimulatie. *In-situ* biostimulatie is het versnellen van biologische afbraak van verontreiniging in de grond door middel van micro-organismen.
Het is een niet-invasieve en extensieve manier om verontreiniging in vuilvracht en verspreiding, en daarmee risico, te laten afnemen, omdat dit proces in de bodem zelf plaatsvindt en ten opzichte van reguliere technieken zoals ontgraving weinig materiaal en energie vraagt.

Het doel van het onderzoek is het op een duurzame manier nazorgloos maken van de locatie. Mocht dit onverhoopt niet mogelijk blijken, is het secundaire doel om de huidige beheersmaatregel zodanig te optimaliseren dat risico's van de aanwezige restverontreiniging zo efficiënt mogelijk (met minimale kosten en inspanning) worden beheerst.

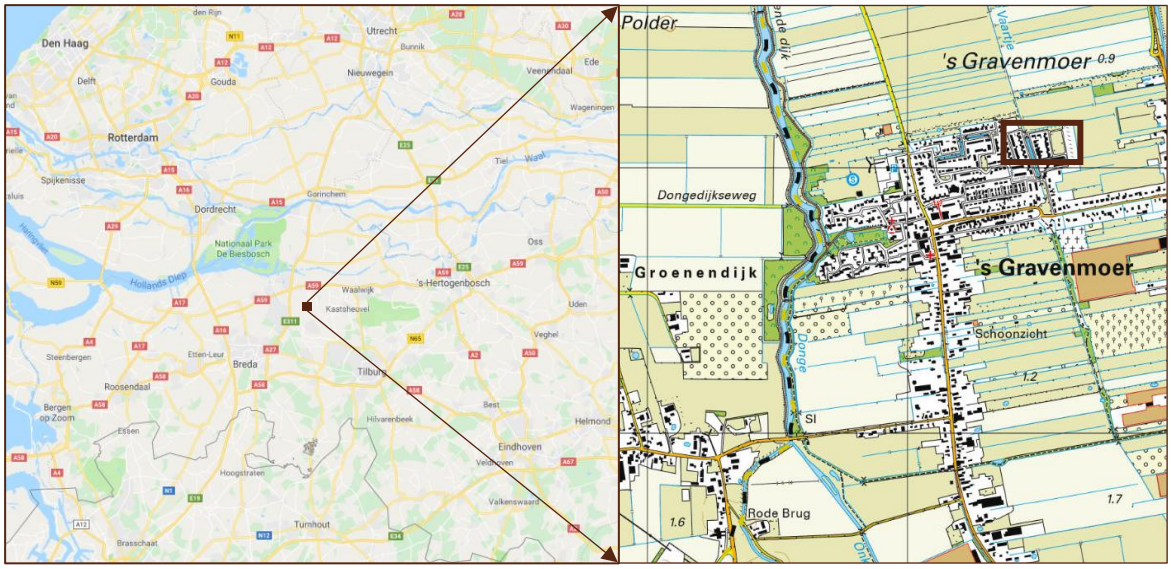
5.1.2 Algemeen kader werkpakket 5

Het toepassen van in-situ biostimulatie is een duurzame manier van saneren, omdat het een niet-invasieve en extensieve manier van saneren is. Het is een bewezen saneringstechniek die al meermaals in de praktijk is toegepast.

De effectiviteit van de techniek is zeer afhankelijk van de plaatselijke omstandigheden, waardoor goed vooronderzoek noodzakelijk is. Ook hebben bacteriën (en met name anaerobe bacteriën) een traag metabolisme, waardoor de techniek een lange doorlooptijd heeft. Hierdoor kan de verdere ontwikkeling van de locatie lang duren.

5.1.3 Onderzoekslocatie

Van 1962 tot midden jaren '90 is op het terrein aan de Havenkade in 's Gravenmoer een houtbewerkingsbedrijf gevestigd geweest. In Figuur 91 is de ligging van de locatie opgenomen. Tijdens de bedrijfsactiviteiten tot in de jaren '80 is een aanzienlijke grond- en grondwaterverontreiniging ontstaan.



Figuur 91. Ligging van de locatie in ’s Gravenmoer. In het bruine kader rechts de locatie van het voormalig houtbewerkingsbedrijf.

Houten palen werden met creosootolie behandeld en opgeslagen op het terrein. Het gecreosoteerde hout werd op voorraad geproduceerd en de opslagcapaciteit van het hout op het terrein was aanzienlijk. Om uitloging van creosoot uit de palen te beperken, werd het hout langdurig nabehandeld in een lucht- of watersproeitunnel. Het afvalwater dat bij het verduurzamingsproces vrijkwam werd tot 1985 geloosd op de watergangen. Creosoot (puur product) werd opgevangen in een bezinksloot gevuld met houtkrullen of boomschors. De houtkrullen/schors werden vervolgens afgevoerd naar het westelijk gelegen weiland of verbrand. Met name bij de bezinksloot is puur product in de bodem terechtgekomen.

In januari 2010 is er begonnen met de sloop van de gebouwen en is de bodemsanering van start gegaan. Eind 2011 is een geohydrologische barrière geplaatst, bestaande uit een bentoniet-diepwand tot op de afsluitende kleilaag op 36 m-mv. Aan weerszijden van deze diepwand zijn deepwells geplaatst om te voorkomen dat verontreinigd grondwater langs de barrière afstroomt. Deze situatie is weergegeven in Figuur 92. Op deze manier wordt de verontreiniging conform beschikking beheerst. (In de Nederlandse wetgeving geeft een beschikking aan dat deze manier van beheersen door het bevoegd gezag is goedgekeurd). Het onttrokken grondwater wordt na zuivering op het riool geloosd.

Het grootste deel van de locatie is ontwikkeld als woonwijk. Ter plaatste van de restverontreiniging is een speeltuin met leeflaag geplaatst.

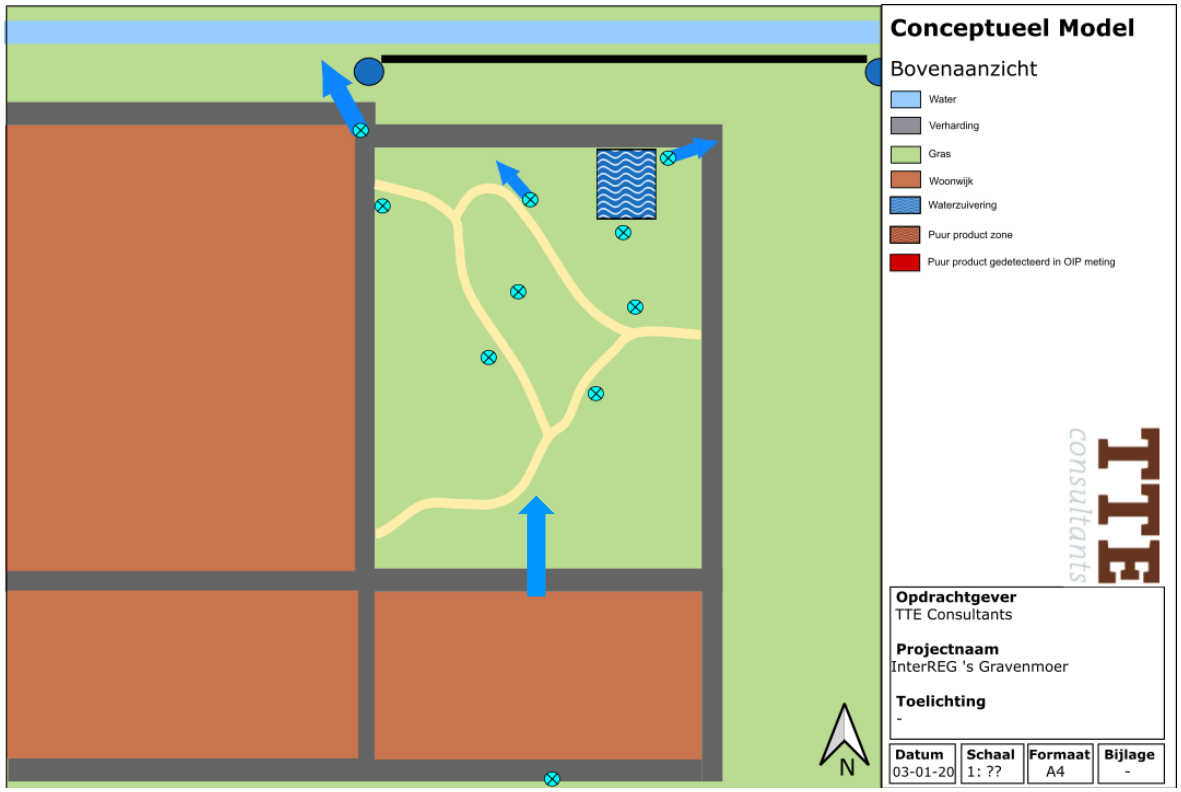
5.2 OPZET

5.2.1 Conceptueel model van de pilot

5.2.1.1 Terreinkarakteristieken

De bodem bestaat voornamelijk tot 29 m-NAP[1] uit goed doorlaatbaar zand (NAP: Normaal Amsterdams Peil), met plaatselijk grind- en lemige lagen. Hierdoor ontstaat een zekere heterogeniteit. Rond 29 m-NAP bevindt zich een slecht doorlatende laag, bestaande uit silt en klei.

De grondwaterstromingssnelheid ligt gemiddeld rond de 40-70 m/jaar. De stromingssnelheid neemt af rond 5,5 m-NAP en neemt in de diepte verder toe tot de hoogst gemeten snelheid van 125 m/jaar rond 16 m-NAP.

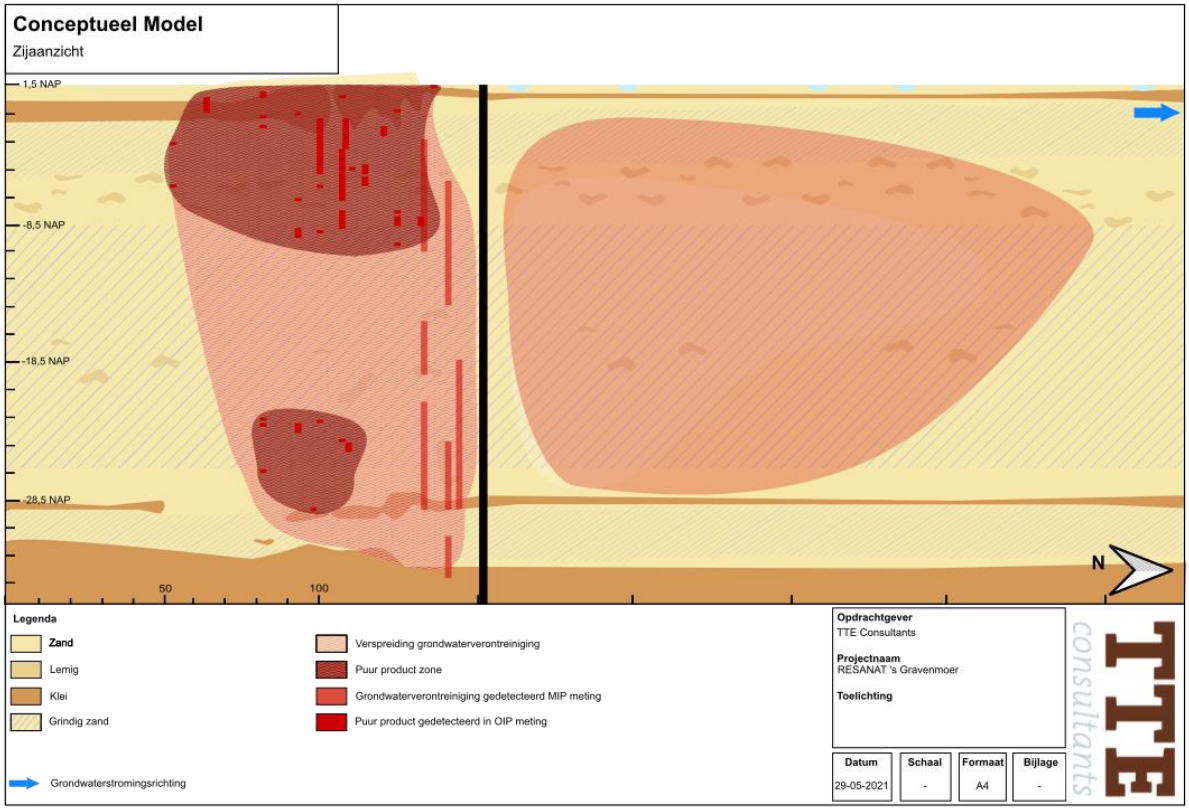


Figuur 92. Grondwaterstromingsrichting op de locatie

De grondwaterstromingsrichting op de onderzoekslocatie loopt gemiddeld richting de westelijke deepwell. Het filter in de meest oostelijke peilbuis geeft een stromingsrichting naar de oostelijke deepwell. De regionale grondwaterstromingsrichting is noordnoordwestelijk.

5.2.1.2 Specifieke verontreinigingssituatie

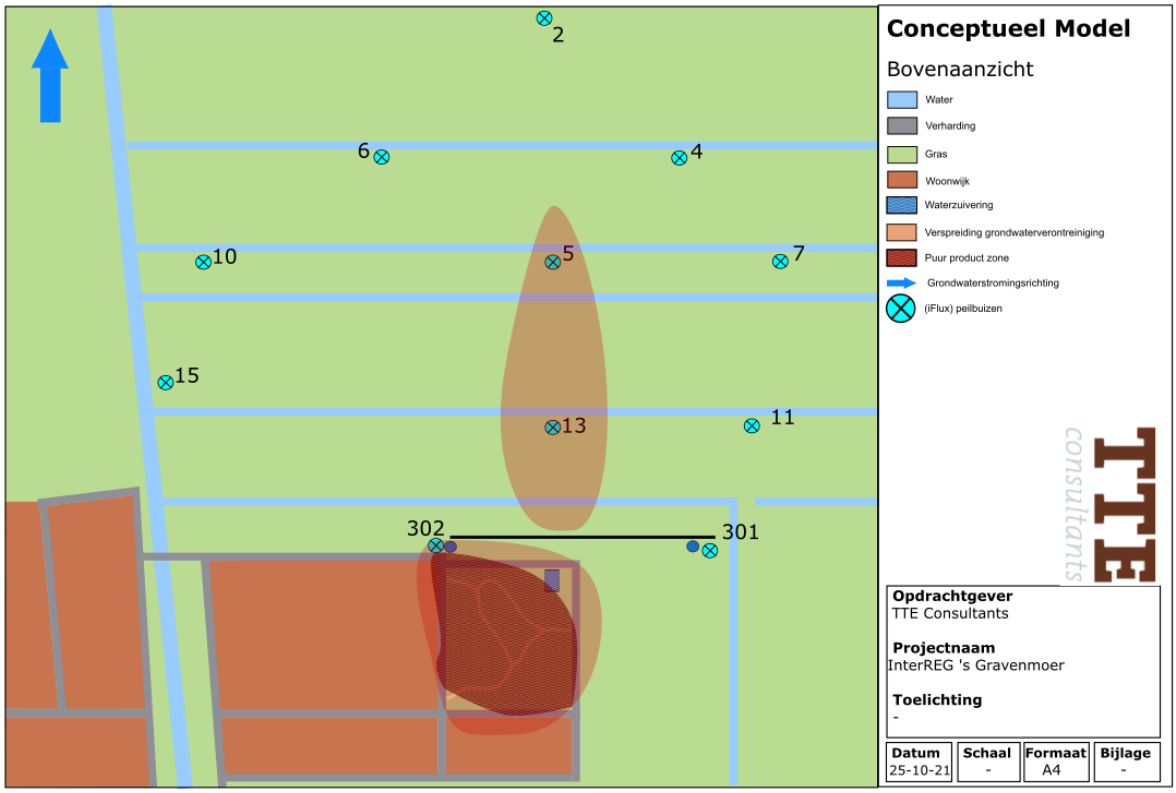
Het puur product is zintuigelijk onzichtbaar en zeer heterogeen verdeeld over een groot deel van de locatie. Er lijkt sprake te zijn van twee verticaal gescheiden zones waarin het puur product nog aanwezig is, zoals zichtbaar in Figuur 93.



Figuur 93. Schematisch beeld van de verontreinigingssituatie geactualiseerd n.a.v. de resultaten van het veldonderzoek naar aanwezigheid van puur product

Het puur product bestaat voornamelijk uit 2- en 3-ring polycyclische verbindingen, zoals naftaleen. Dit komt overeen met de samenstelling van creosootolie. Ook in het eluaat van het puur product is deze samenstelling, dat voor bijna 50% uit 2-ring polycyclische verbindingen (voornamelijk naftaleen) bestaat, terug te vinden. De geanalyseerde grondwatermonsters lijken in samenstelling sterk op de emissie van het puur product. Dit geeft de indicatie dat het grondwater vrijwel in evenwicht staat met het puur product en er waarschijnlijk weinig tot geen biologische afbraak heeft plaatsgevonden.

De grondwaterverontreiniging bestaat vrijwel volledig uit naftaleen en minerale olie. De hoogste verontreinigingsfluxen zijn in de puur product zones aangetroffen of nabij het onttrekkingsfilter, wat aangeeft dat de beheersing naar behoren werkt.



Figuur 94. Ligging standaard monitoringspeilbuizen achter de damwand (zwart).

Er bevindt zich nog een verontreinigingspluim achter de bentonietwand. De concentraties nemen stroomafwaarts af en liggen over het algemeen lager dan sinds de start van de monitoring in 2013. Er is geen sprake van verspreiding achter de bentonietwand.

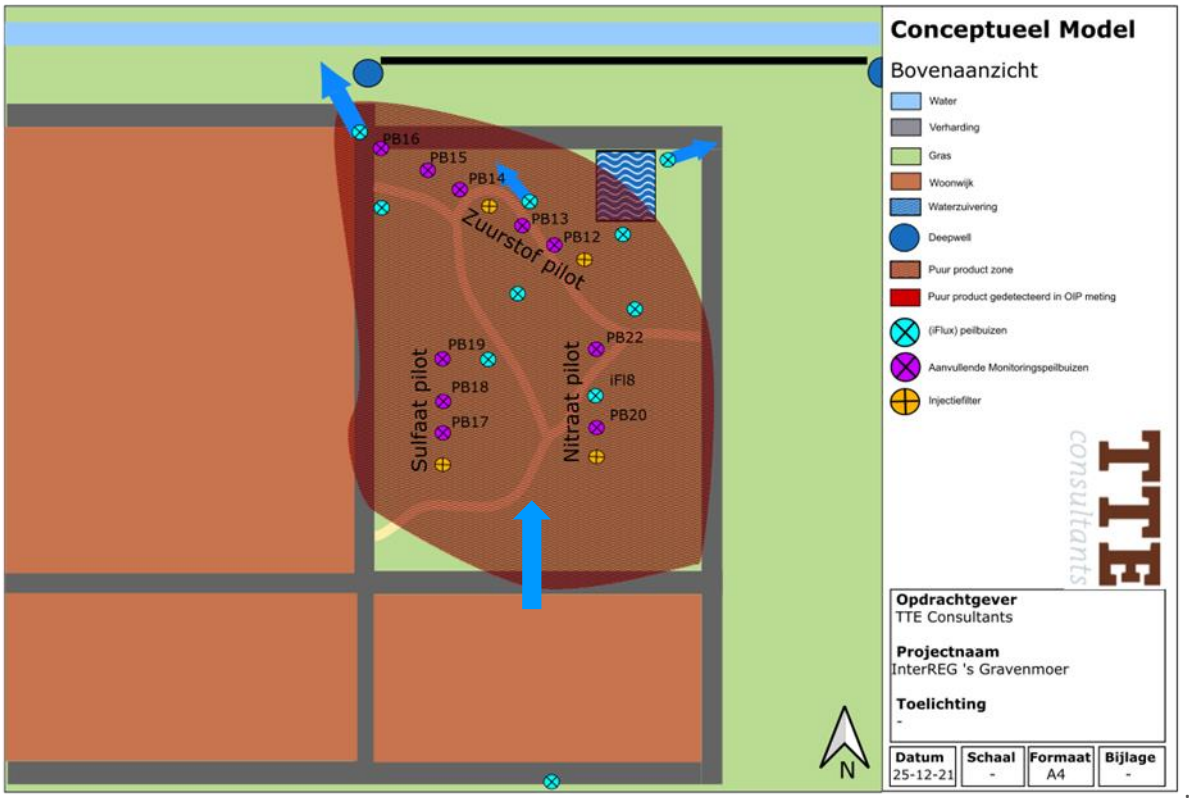
5.2.1.3 Externe factoren

In het onderzoek voorafgaand aan de pilot zijn de belangrijkste processen met betrekking op de doelstelling op de onderzoekslocatie gedefinieerd:

- Nalevering van verontreinigingen vanuit de bron naar het grondwater: Bepalend voor concentratie en samenstelling van de verontreiniging in het grondwater;
- Verspreiding grondwaterverontreiniging: Bepalend zijn de snelheid en richting van het grondwater vóór en achter de barrière;
- Biologische afbraak verontreiniging: Bepalend zijn de redoxcondities, de beschikbaarheid van (macro) nutriënten en de aanwezigheid van bacteriën (in de ondergrond en in de zuivering).

5.2.1.4 (Technisch) ontwerp en inrichting van het systeem

In april 2021 is een plan voor de pilots opgesteld (zie bijlage 5.2). Het plan bestaat uit 3 verschillende pilootopstellingen die parallel tegelijkertijd aan elkaar hebben plaatsgevonden. De locaties van de verschillende opstellingen zijn in de afbeelding hieronder weergegeven. In een eerste modellering van Orvion is ingeschat dat met deze opstelling de pilots geen invloed van elkaar ondervinden.



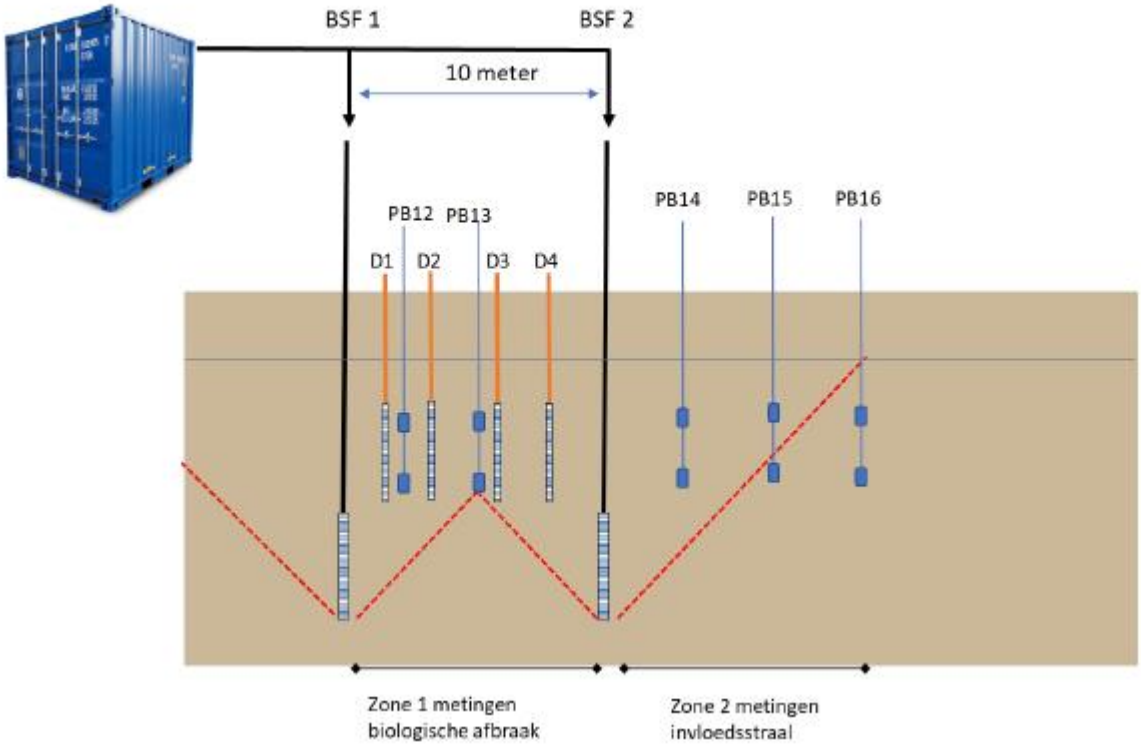
Figuur 95. Globale ligging pilots, met grondwaterstroming in blauwe pijlen.

Alle drie de pilots richtten zich, in het bodempakket van 4,5 tot 6,5 m-mv, op 3 verschillende redoxcondities en zullen in de volgende hoofdstukken apart besproken worden.

5.2.1.4.1 Aeroob (biosparging/luchtinjectie)

In Pilot 1 is zuurstof door middel van biosparging/luchtinjectie in de bodem gebracht. In deze pilot is gekeken naar de *in-situ* aerobe biologische afbraak van de verontreiniging. Zuurstof heeft een grote potentie voor de stimulatie van biologische afbraak van creosootcomponenten. Op basis van de samenstelling van het puur product op de locatie zou 97% van de grondwaterverontreiniging en 87% van het puur product met zuurstof kunnen afgebroken worden (Oliekarakterisatie, TTE Consultants, 2021).

Vanuit een bovengrondse container zijn de luchtfilters op 12-14 m-mv intermitterend van lucht voorzien. De compressor voorzag de injectiefilters om de beurt 3 uur van lucht. De compressor is nabij de zuivering geplaatst en van stroom voorzien. De looptijd van de proef was omstreeks 3 maanden.



Figuur 96. Dwarsdoorsnede opstelling aerobe pilot.

Naast de biosparging filters BSF1 en BSF2 is bij de start van de proef een nutriëntenoplossing voor extra voeding gedoseerd, in filter D1 tot en met D4 (Figuur 96). De monitoringpeilbuizen staan met intervallen van 2,5 m van elkaar en de injectiefilters.

5.2.1.4.2 Nitraat

In Pilot 2 is een oplossing van kaliumnitraat, bromidetracer en natriumhexametafosfaat in de bodem gebracht door middel van een infiltratiefilter. Nitraat heeft, op basis van literatuur, na zuurstof de meeste potentie voor afbraak. Nitraat is goed oplosbaar, waardoor bij infiltratiemomenten een grote hoeveelheid in het water gebracht kan worden en geen permanente bovengrondse installatie noodzakelijk is.
Enkel bij de start van de proef zijn er bovengrondse apparaten aanwezig. Er is gebruik gemaakt van vaste infiltratiefilters en een tijdelijk leidingwerk. Tijdens de 24 uur durende infiltratie is het mengvat op overdruk gehouden met stikstof om te voorkomen dat er lucht (en daarmee zuurstof) in het mengsel terecht komt. De looptijd van de proef is ongeveer 12 maanden. Nitraat blijft volgens de modellering op basis van geschatte afbraaksnelheid maximaal 60 dagen aanwezig, dus heeft er herdosering plaatsgevonden. Meer informatie over de pilotopstelling en modellering is opgenomen in Bijlage 5.1.

5.2.1.4.3 Sulfaat

Bij Pilot 3 is een oplossing van natriumsulfaat, ammoniumacetaat, bromidetracer en natriumhexametafosfaat in de bodem gebracht door middel van een infiltratiefilter. Als elektronacceptor is sulfaat minder efficiënt dan zuurstof of nitraat. Er zijn echter op de locatie bacteriën aangetroffen die aromaten kunnen afbreken onder sulfaatreducerende omstandigheden. Daarom is ervoor gekozen om deze bacteriën ook met sulfaat als elektronacceptor te stimuleren. Sulfaat is goed oplosbaar, waardoor bij infiltratiemomenten een grote hoeveelheid in het water gebracht kan worden en er geen bovengrondse installatie noodzakelijk is.

Enkel bij de start van de proef zijn er bovengrondse apparaten aanwezig. Er is gebruik gemaakt van vaste infiltratiefilters en een tijdelijk leidingwerk. Tijdens de 24 uur durende infiltratie is het mengvat op overdruk gehouden met stikstof om te voorkomen dat er lucht (en daarmee zuurstof) in het mengsel terecht komt. De looptijd van de proef is ongeveer 12 maanden. Sulfaat blijft volgens de modellering op basis van geschatte afbraaksnelheid maximaal 90 dagen aanwezig, dus heeft herdosering plaatsgevonden. Meer informatie over de pilotopstelling en modellering is opgenomen in Bijlage 5.1.

5.2.2 Opvolging en procesevaluatie

5.2.2.1 Specifieke saneringsdoelstellingen

Het doel van het pilootonderzoek is te onderzoeken of het mogelijk is om door middel van biostimulatie de actieve onttrekking en zuivering van grondwater te stoppen en daarmee de locatie op een duurzame manier nazorgloos te maken. Mocht dit niet haalbaar blijken, wordt onderzocht of biostimulatie kan bijdragen aan het zo efficiënt mogelijk (met minimale kosten en inspanning) beheersen van de aanwezige restverontreiniging.

5.2.2.2 Hypothese & meetstrategie

De hypothese voor de pilot is dat in de zuurstofpilot de grootste effecten zichtbaar zijn, gevolgd door nitraat en mogelijk sulfaat. Om de effectiviteit van de pilots te monitoren wordt gemeten op verontreinigingsparameters (BTEX, PAK, Minerale Olie), nutriënten en elektronacceptoren (sulfaat, nitraat, zuurstof, ammonium, fosfaat, TOC), bromide en biologische parameters (totaal bacteriën, 2 aromatenafbrekende bacteriesoorten en aromatenafbrekend gen ncrC).

Voor de anaerobe pilots worden de bovenstaande metingen elke 3 maanden uitgevoerd. Voor de aerobe pilot heeft de zuurstofmeting elke maand plaatsgevonden en de overige metingen aan het begin en eind van de pilot.

5.2.2.3 Procesevaluatie

Ieder onderzoek wordt beïnvloed door onvoorziene omstandigheden. Voor het voorliggende onderzoek geldt dat de consequenties daarvan werden versterkt door de Coronacrisis doordat het projectteam niet bij elkaar kon komen om de oplossingen gezamenlijk te ontwikkelen.
Door diverse oorzaken waren in het eerste jaar van het onderzoek minder faciliteiten voor laboratoriumonderzoek beschikbaar. Vanuit de wens om toch het volwaardige onderzoeksprogramma binnen de beschikbare tijd uit te kunnen voeren is ervoor gekozen om 3 verschillende pilots tegelijk naast elkaar in het veld uit te voeren en zaken als reducerend vermogen en afbraakcapaciteit in het veld te onderzoeken.

Daarbij werd te veel vanuit ‘wishful thinking’ geredeneerd: batchexperimenten in het lab zouden sneller en nauwkeuriger resultaat opgeleverd hebben.
Deze informatie had gebruikt kunnen worden voor het dimensioneren van de pilots en had waarschijnlijk gezorgd voor een andere pilootopstelling.

5.3 RESULTATEN

5.3.1 Monitoringsresultaten

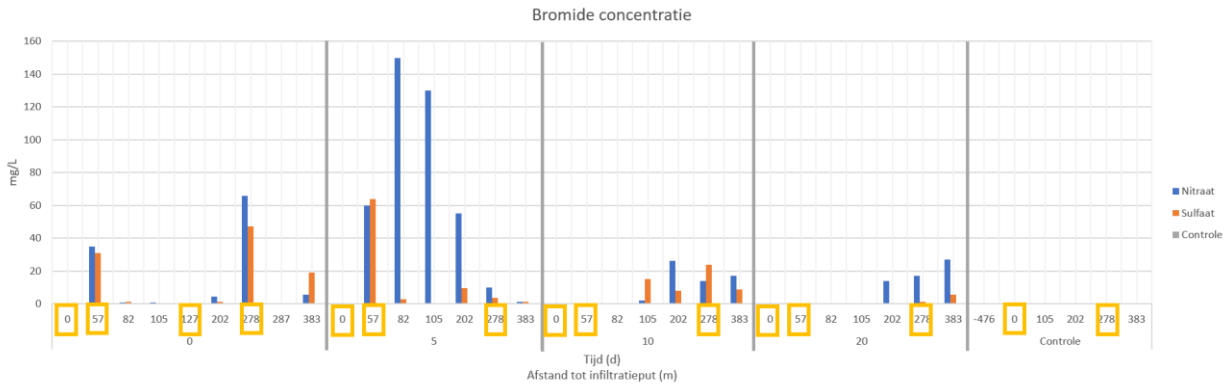
5.3.1.1 Algemeen

De aerobe pilot heeft ca. 100 dagen gedraaid (van 4 juli 2022 tot 10 oktober 2022). De twee anaerobe pilots hebben 350 dagen geduurd (van 11 oktober 2021 tot 10 oktober 2022).

De effectiviteit van de pilots is getoetst aan de hand van de bewijslijnen voor biologische afbraak:
1. Verandering van de grondwatersamenstelling (hoofdstuk 5.3.1.2);
2. Veranderingen in de verontreiniging (hoofdstuk 5.3.1.3);
3. De aanwezigheid van micro-organismen met afbraak-capaciteit (hoofdstuk 5.3.1.4).

De parameters voor deze bewijslijnen zijn op verschillende plekken in de pilots gemeten. Om te weten welke meetpunten relevant zijn voor het beantwoorden van de onderzoeksvraag, moet gekeken worden naar de stroomafwaartse invloedssfeer van de pilots, welke bepaald wordt door de grondwaterstroomsnelheid.

Grondwaterstromingssnelheid
Om de stroomsnelheid van het grondwater en daarmee invloedssfeer van de anaerobe pilots te meten is tijdens de infiltratie kaliumbromide als tracer toegevoegd. In onderstaande figuur is het verloop van de tracer in meter vanaf de infiltratieput weergegeven. De meetrondes direct voor een nieuw injectiemoment zijn met gele kaders aangeduid. Tussen de twee anaerobe pilootsopstellingen bevindt zich iFl2, die in de grafieken als controlemeting is opgenomen.



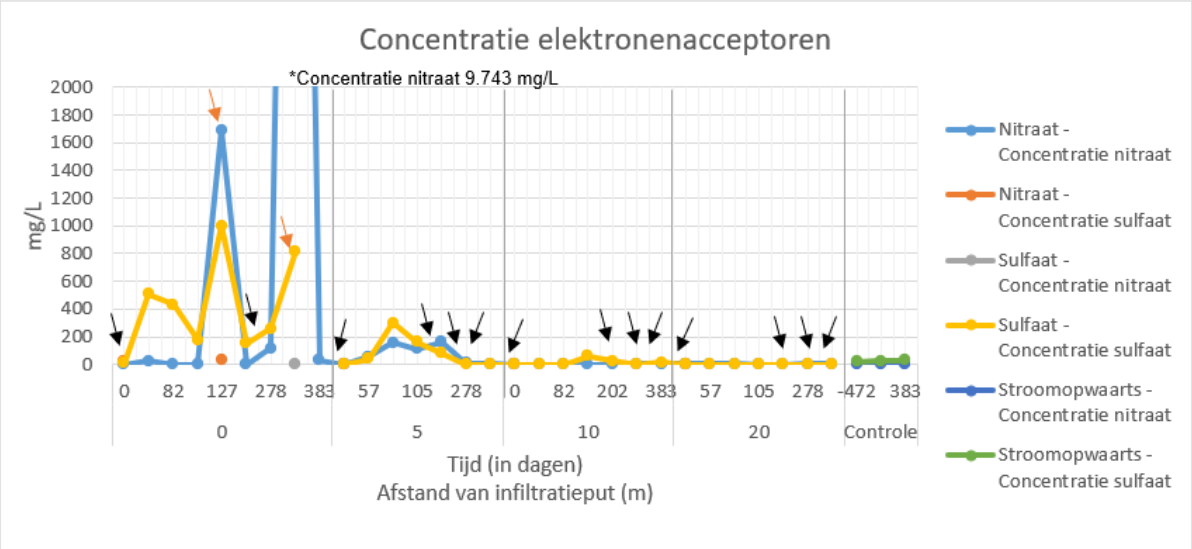
Figuur 97. Bromide tracers anaerobe pilots op verschillende afstanden (in m) vanaf de infiltratieput (meetronden direct vooraf aan injectiemomenten in geel)

Met de snelheid waarmee de tracer bij de peilbuizen op 10 en 20 meter is aangekomen, wordt een grondwaterstromingssnelheid van circa 40 m/jaar berekend. Dit is vergelijkbaar met de stromingssnelheid zoals gemeten in het onderzoek in juli 2020.

5.3.1.2 Verandering van de grondwatersamenstelling

Bij de biologische afbraak van creosoot verontreinigingen kunnen door bacteriën elektronen acceptoren als nitraat, sulfaat en zuurstof gebruikt worden. De afname in concentratie van deze stoffen is dus een mogelijke aanwijzing voor biologische afbraak.

Nitraat en sulfaat

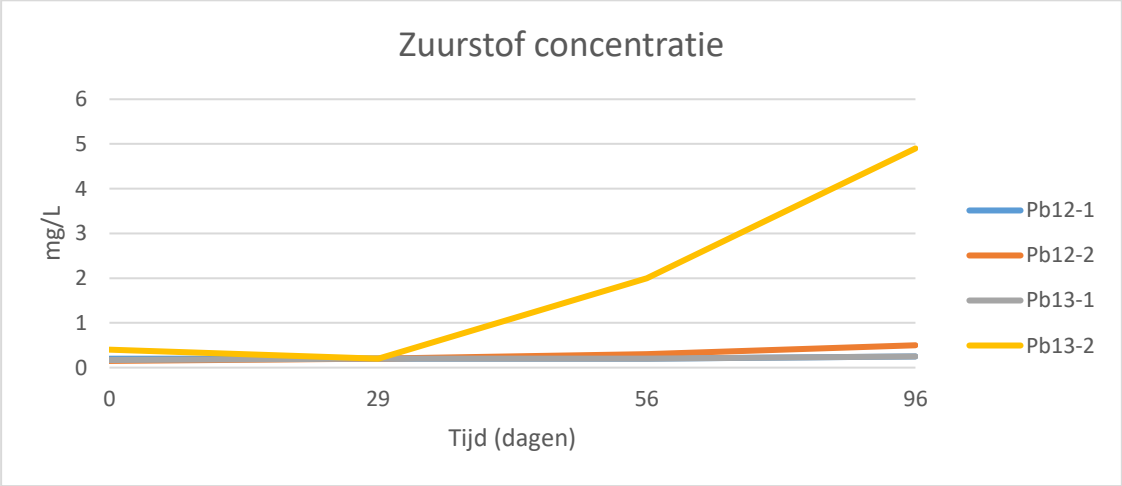


Figuur 98. Elektronacceptoren anaerobe pilots. De zwarte pijltjes geven infiltratiemomenten weer. De oranje pijltjes zijn metingen binnen een week na de infiltratie.

In de peilbuizen op 10 en 20 meter van het infiltratiefilter worden gedurende de looptijd van de pilots nauwelijks elektronacceptoren gemeten. De sterke afname in acceptor concentraties in de filters op 0 en 5 m kan een aanwijzing zijn voor de afbraak van verontreiniging. Het is ook mogelijk dat de acceptor gebruikt is in de omzetting van natuurlijk aanwezige elektrondonoren in de bodem, zoals ijzer, ammonium en organische stof.

Zuurstof

In Figuur 99 zijn de meetresultaten voor zuurstof weergegeven. Peilbuizen 12 en 13 liggen tussen twee injectiefilters in en hebben 2 filters op verschillende dieptes zoals zichtbaar in Figuur 96.

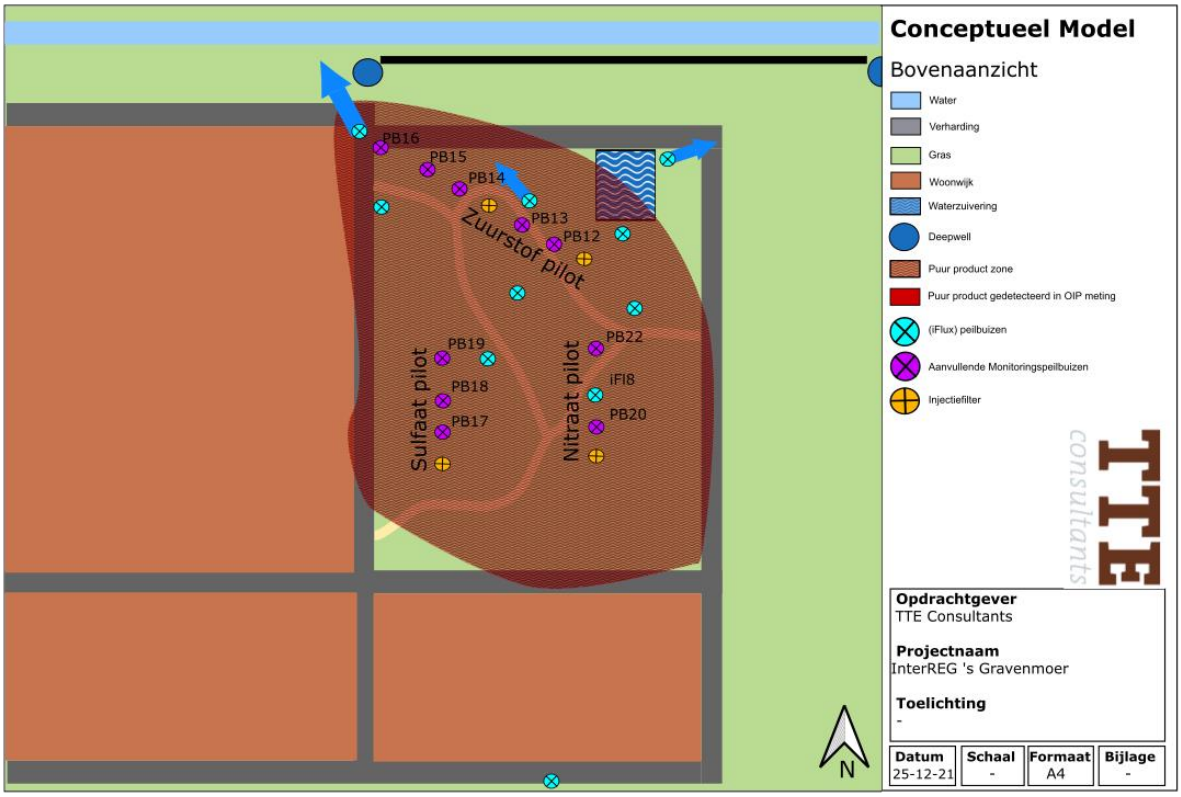


Figuur 99. Elektronacceptor aerobe pilot

Uit de zuurstofmetingen blijkt dat na het intensiveren van de biosparging alleen in het diepe filter van peilbuis 13 significante hoeveelheden zuurstof is gemeten. Stijghoogtemetingen aan het eind van de pilot lieten zien dat alleen in dit specifieke filter tijdens de beluchtingsperiode een stijging van de grondwaterstand optrad. Dit is een aanwijzing dat de perslucht mogelijk via een preferente stroombaan is gegaan die niet langs de monitoringsfilters loopt.

5.3.1.3 Veranderingen in de verontreiniging

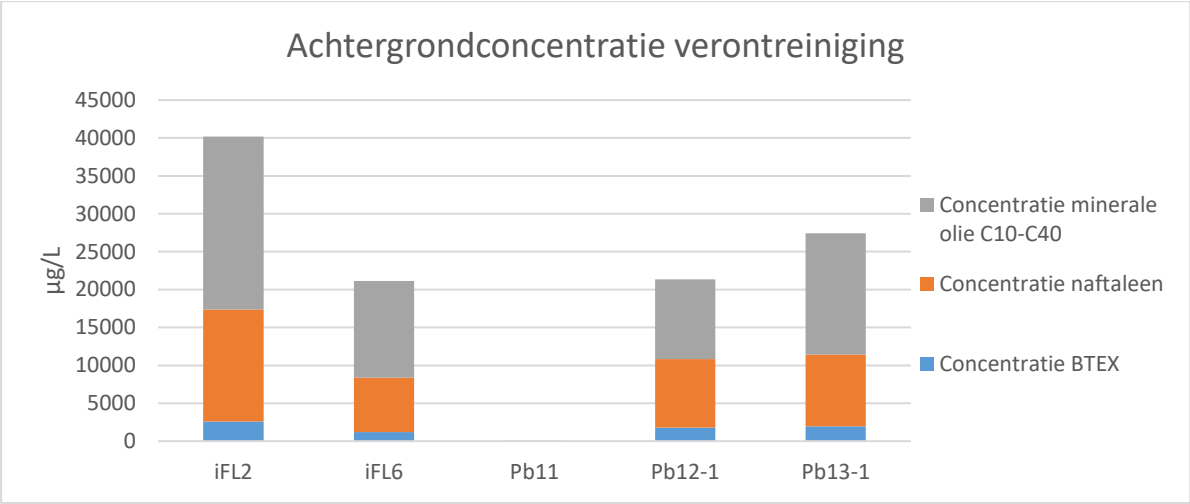
Op de locatie is een grote zone met daarin heterogeen verspreide spots puur product aanwezig (zie hoofdstuk 5.2.1.2). Alle drie de pilots bevinden zich binnen deze zone, zoals zichtbaar in Figuur 100.



Figuur 100. Ligging pilots ten opzichte van puur product zone

Door zeer geringe wisselingen in de grondwaterstroming kan de verontreinigingsconcentratie plaatselijke verschillen en daardoor fluctuaties in de peilbuis geven. Hierdoor zijn de verschillen in verontreinigingsconcentraties moeilijk direct te relateren aan biologische afbraak.

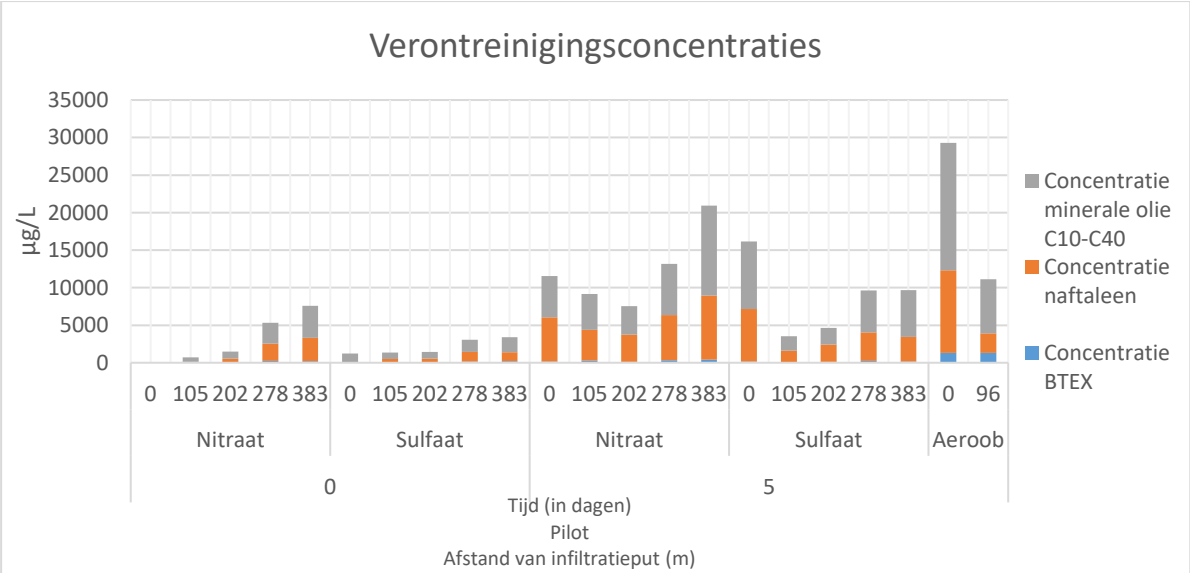
In de anaerobe en aerobe pilots zijn er filters die buiten de invloed van de pilots staan. Deze kunnen als controle voor deze natuurlijke fluctuatie gebruikt worden. Peilbuis 11 staat stroomopwaarts (onderaan Figuur 100) en is de controle voor verontreinigd grondwater. Om een idee te krijgen van de plaatselijke verschillen in verontreinigingsconcentraties zijn de concentraties van de controle peilbuizen in Figuur 101 weergegeven.



Figuur 101. Plaatselijke verschillen in achtergrondconcentratie

De concentraties minerale olie (C10-C40) wisselen tussen de 8.200 en 37.000 ug/L. Naftaleen tussen 7.100 en 19.000 ug/L. De aanwezige PAKs bestaan voor meer dan 90% uit naftaleen, daarom is alleen naftaleen weergegeven.

In de onderstaande Figuur 102 zijn de verontreinigingsconcentraties in de pilots weergegeven, in het filter dat gebruikt wordt voor infiltratie (in nitraat en sulfaat pilots) en op 5 m van het infiltratie-/injectiefilter (alle pilots).

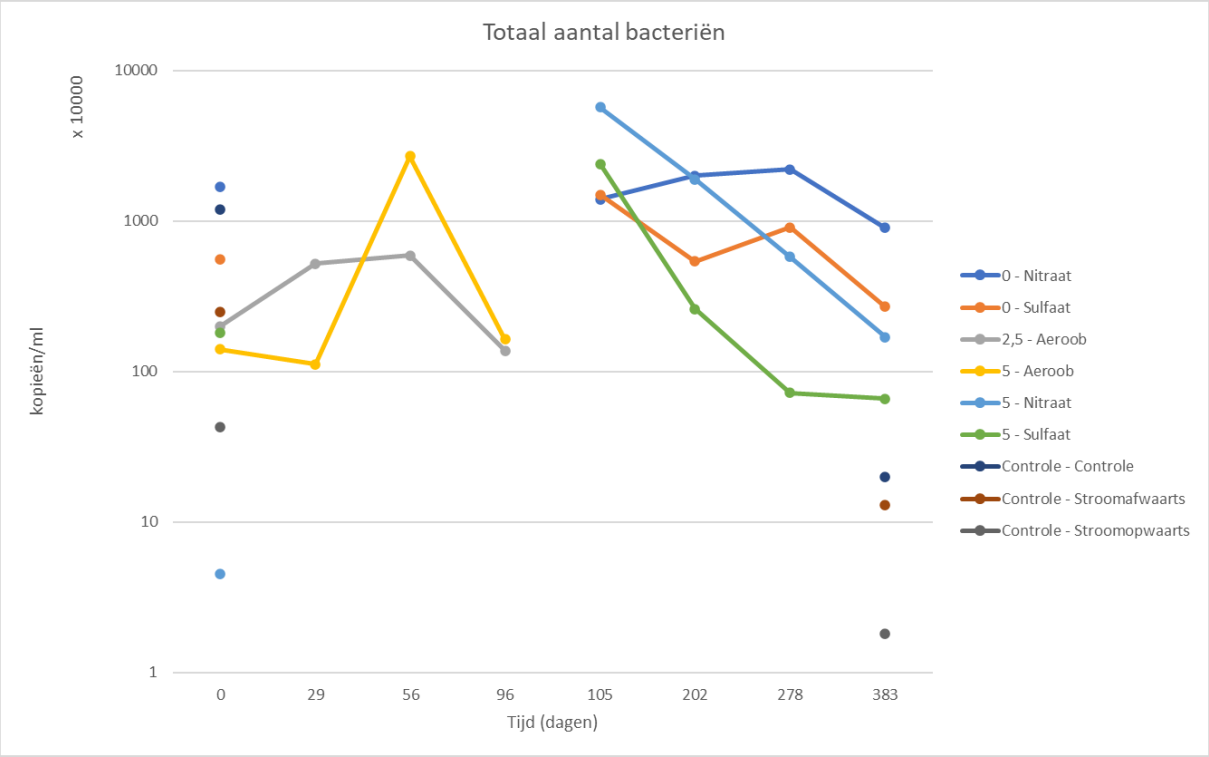


Figuur 102. Verontreinigingsconcentraties in pilots

In de anaerobe pilots is geen afname van de concentratie in de tijd zichtbaar, er is eerder sprake van een toename in de concentratie. Dit kan veroorzaakt worden door de verontreiniging die in het infiltratiewater is bijgemengd, omdat onttrokken water uit de deepwells voor de infiltratie wordt gebruikt (zie bijlage 5.2). Er zit wel een verschil tussen de concentraties op het infiltratiepunt en op 5 meter afstand, maar deze valt binnen de eerder bepaalde natuurlijke fluctuatie.
In de aerobe pilot liggen in de tweede metingen de verontreinigingconcentraties lager dan in de eerste meting. Er zijn echter te weinig datapunten om hier een conclusie over te trekken.

5.3.1.4 De aanwezigheid van micro-organismen met afbraak-capaciteit

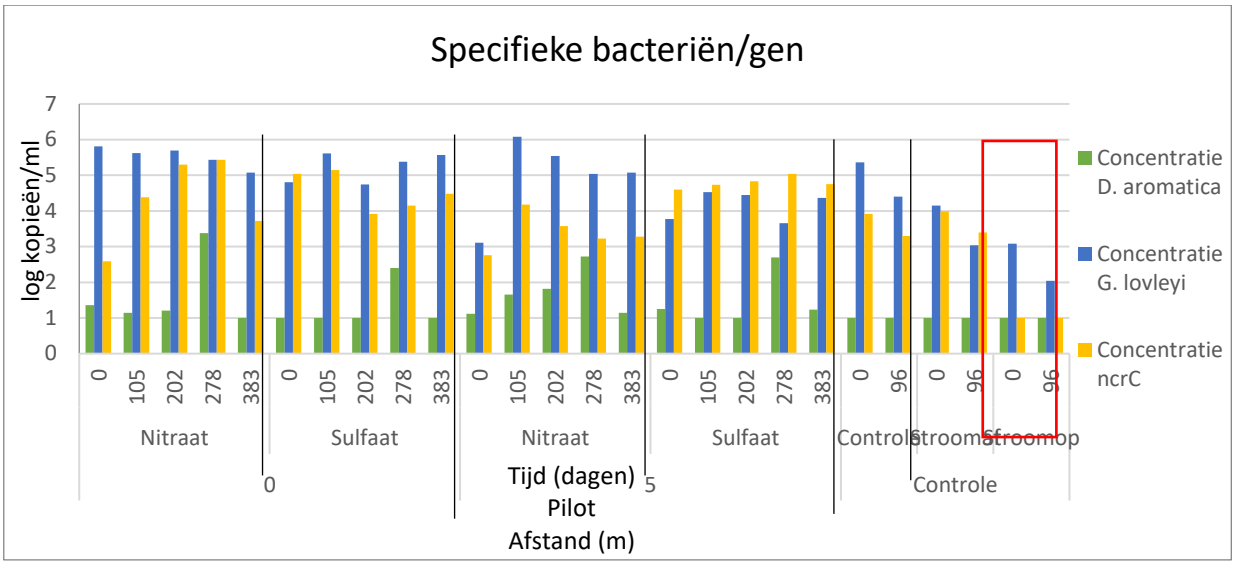
De laatste bewijslijn voor biologische afbraak is de aanwezigheid van micro-organismen die in staat zijn de desbetreffende verontreiniging af te breken. Door de toevoeging van elektronacceptoren en nutriënten kan de groei van bacteriën gestimuleerd worden, waardoor de capaciteit voor afbraak toeneemt. In alle drie de pilots is daarom het totaal aantal bacteriën gemeten. In de onderstaande figuur is op verschillende afstanden van het infiltratiepunt (0 tot 5 m) het totaal aantal bacteriën in de tijd weergegeven. Daarnaast zijn 3 controle meetpunten opgenomen, stroomopwaarts, stroomafwaarts en IFl2 als "controle", die tussen de twee anaerobe pilots in staat .



Figuur 103. Totaal aantal bacteriën

In alle pilots ligt het totaal aantal bacteriën gemiddeld hoger dan de stroomopwaartse controlemeting, zowel voorafgaande aan de start van de pilots als gedurende de pilots. Het verschil met de controle peilbuis die tussen de twee anaerobe pilots in ligt, de stroomafwaartse peilbuis en de pilots is echter zo klein dat er geen echte sprake is van een toename van het totaal aantal bacteriën in de pilots.

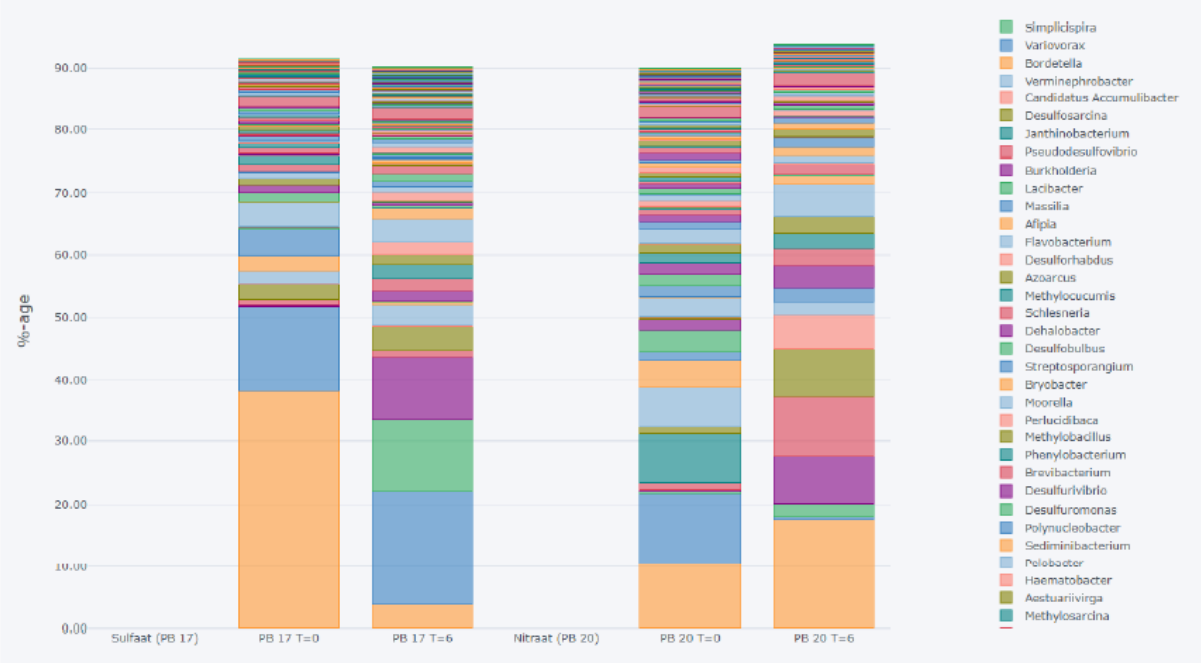
Het totaal aantal bacteriën zegt niet of er daadwerkelijk micro-organismen in de populatie zitten die verontreiniging kunnen afbreken. Daarom is er naast totaal aantal bacteriën in de anaerobe pilots ook gekeken naar 2 soorten (*D. aromatica* en *G. lovleyi)* waarvan de afbraakcapaciteit van aromaten onder anaerobe omstandigheden bekend is en 1 gen (*ncrC :* 2-napthoyl-CoA reductase) wat codeert voor een enzym dat bij afbraak van naftaleen gebruikt wordt.



Figuur 104. Concentratie specifieke bacteriën/genen

Ten opzichte van de stroomopwaartse meting (rood kader) lijkt op de locatie bij aanvang van de pilots meer *ncrC* en *G. Lovleyi* aanwezig te zijn. Gedurende de looptijd van de pilots lijkt er een stijging in de aantallen *D. aromatica*, maar deze neemt in de laatste meting weer af tot het niveau aan het begin van de pilots. Mogelijk betreft de toename van deze bacteriën op dag 278 een meetfout. Het is daarom onwaarschijnlijk dat *D. aromatica* bijdraagt aan de toename in ncrC. Vermoedelijk zijn er naast *G. lovleyi* andere bacteriesoorten op de locatie die voor de toename in ncrC hebben gezorgd.

Dit vermoeden wordt ondersteund door de resultaten van NGS-analyses. In de anaerobe pilots is onderzoek gedaan naar de gehele bacteriepopulatie met de DNA-analyse techniek *Next Generation Sequencing* (NGS). De analyse is uitgevoerd aan de start van de pilot (T=0) en halverwege de pilot (T=6 maanden).



Figuur 105. NGS-analyse van de monsters van de anaerobe pilots

Uit de NGS-analyse is zichtbaar dat er een verschuiving in de populatie heeft plaatsgevonden. De populutie op T=0 van zowel PB17 als PB 20 verschilt met de populatie op T=6, zie Figuur 105. In de nitraatpilot is dit een

verschuiving naar meer nitraatreducerende bacteriesoorten en in de sulfaatpilot is dit een verschuiving naar meer sulfaatreducerende bacteriesoorten. De resultaten laten zien dat de toevoeging van nitraat en sulfaat in de pilots een duidelijk effect hebben op de bacteriepopulaties en dat respectievelijk nitraat- en sulfaatreducerende omstandigheden zijn gerealiseerd.

5.3.2 Evaluatie resultaten

5.3.2.1 Kwantitatieve en kwalitatieve evaluatie van de monitoringsresultaten

In de periode van 11 oktober 2021 tot 10 oktober 2022 zijn er op de projectlocatie 3 pilootonderzoeken uitgevoerd. Om het effect van de pilots te monitoren is gemeten op verontreinigingsparameters (BTEX, PAK, Minerale Olie), nutriënten en elektronacceptoren (sulfaat, nitraat, zuurstof, ammonium, fosfaat, bromide en biologische parameters (totaal bacteriën, 2 bacteriesoorten, ncrC).

De grootste uitdaging aan het meten van de verontreinigingsparameters, is dat op een groot deel van de pilootlocaties puur product aanwezig is. Door zeer geringe wisselingen in de grondwaterstroming kan de verontreinigingsconcentratie plaatselijk verschillen en voor fluctuaties bij de peilbuis zorgen.
Hierdoor zijn de verschillen in verontreinigingsconcentraties moeilijk direct te relateren aan biologische afbraak.

De chemische samenstelling van het grondwater in de bodem speelt ook een rol bij het interpreteren van wisselingen in concentraties van nutriënten en elektronacceptoren. Een afname in acceptor concentraties kan een aanwijzing zijn voor de afbraak van verontreiniging.

Het is ook mogelijk dat de acceptor gebruikt is in de omzetting van natuurlijk aanwezige elektrondonoren in de bodem, zoals ijzer, sulfide, ammonium en organische stof. Daarnaast kan de plaatselijke heterogeniteit in de bodemopbouw bij de aerobe pilot een grote rol hebben gespeeld. Stijghoogtemetingen aan het eind van de pilot lieten zien dat slechts op één locatie een stijging van de grondwaterstand optrad tijdens de injectie van lucht. Dit is een aanwijzing dat de perslucht via een preferentiële stroombaan is gegaan die niet langs de monitoringsfilters loopt. Een mogelijke verklaring hiervoor zijn de plaatselijk aanwezige zwak tot matig grindige zandlagen.

De heterogeniteit speelt ook een rol bij de DNA-analyses. In de bodem bevindt zich een deel van de bacteriën in het grondwater (waarop geanalyseerd wordt), maar een groter deel van de populatie is gehecht aan de vaste bodem. Het kan zijn dat de populatie in het vaste deel van de bodem daarom verschilt van de resultaten uit de DNA-analyses van het grondwater. Daarnaast is er bij DNA-analyses een methodische variatie aanwezig, die niet is opgenomen in de resultaten.

5.3.2.2 Evaluatie m.b.t. bereiken saneringsdoelstelling

Het doel van het pilootonderzoek was te onderzoeken of het mogelijk is door middel van biostimulatie de verontreinigingssituatie op een duurzame manier nazorgloos te maken. Mocht dit niet haalbaar blijken, wordt onderzocht of biostimulatie kan bijdragen aan het zo efficiënt mogelijk (met minimale kosten en inspanning) beheersen van de aanwezige restverontreiniging.

De effectiviteit van de pilots is getoetst aan de hand van de bewijslijnen voor biologische afbraak:
1. Verandering van de grondwatersamenstelling;
2. Veranderingen in de verontreiniging
3. De aanwezigheid van micro-organismen met afbraak-capaciteit.

Aan de hand van de resultaten kan voor de bewijslijnen het volgende worden geconcludeerd:

- **Verandering van de grondwatersamenstelling:** Er is een afname in de elektronacceptorconcentratie. Deze afname is echter niet volledig te relateren aan biologische afbraak van verontreiniging. Waarschijnlijk komt de afname door de afbraak van natuurlijk aanwezige reducerende stoffen, zoals ijzer en mangaan.
- **Veranderingen in de verontreiniging:** Er is geen waarneembare afname van de verontreinigingsconcentraties in de anaerobe pilots. Eventuele veranderingen vallen binnen natuurlijke fluctuaties, waarschijnlijk veroorzaakt door de aanwezigheid van puur product. Er is een mogelijk een afname van verontreinigingsconcentraties zichtbaar in de aerobe pilot, maar er zijn onvoldoende meetpunten op hier een conclusie aan te verbinden.
- **De aanwezigheid van micro-organismen met afbraak-capaciteit**: Op basis van de DNA-analyses kan gesteld worden dat er een duidelijk verschil is tussen de stroomopwaartse metingen en metingen op de onderzoekslocatie. Er is echter verschil tussen de pilootlocaties en controlelocatie, die buiten de invloed van de pilot staan. Daarentegen is met de NGS-analyse aangetoond dat de toevoeging van nitraat en sulfaat in de pilots een duidelijk effect hebben op de bacteriepopulaties en dat respectievelijk nitraat- en sulfaat reducerende omstandigheden zijn gerealiseerd.

Conclusie
Het doel van het nazorgloos maken van de locatie door middel van biostimulatie is op basis van de pilootonderzoeken niet haalbaar. De anaerobe pilots hebben onvoldoende meetbaar verschil gemaakt om bij te dragen aan het beheersen van de verontreiniging. De aerobe pilot heeft op basis van de afname in elektronacceptor en mogelijke afname in verontreinigingsconcentraties wel de potentie om bij te dragen aan de beheersing.

5.3.2.3 Criteria voor succes

Het ingezette onderzoek door EnISSA en later door iFLUX heeft een belangrijk inzicht gegeven in de situatie op locatie. De gegevens zijn verwerkt in het CSM waardoor een veel duidelijker beeld van de situatie in-situ is verkregen.

Daarna konden de pilots worden ontworpen, waarbij vanaf het begin veel meer oog moet zijn voor, en focus moet liggen op, het praktische/ technische doel van de pilot. Wetenschappelijke resultaten (indien nodig) worden bepaald in het lab of op bench scale. Bij ontwerp, uitvoering en evaluatie van de pilot moet alles gericht zijn op het beoogde doel in de praktijk, in dit geval: het eindig of minder intensief maken van het systeem.
In dit onderzoek is de pilot wat betreft opzet en uitvoering te veel gestuurd vanuit wetenschappelijke interesse. De beschikbare tijd daartoe was te beperkt, de variaties in de praktijk, op pilootschaal, te groot.

5.4 EVALUATIE PILOT

5.4.1 Lessons learned

5.4.1.1 Organisatorisch

- Onderscheid maken tussen (voor het onderzoeksdoel) noodzakelijke wetenschappelijke kennis en praktische kennis. Daartoe dienen twee sporen opgezet te worden: goed controleerbare labstudies (wetenschap) en op uitvoering gericht veldwerk (rekening houdend met de variatie daar).
- Vanwege tijdsdruk en budget zijn beide sporen gemengd in de tijd, waardoor noodzakelijke info soms ontbrak, en resultaten lastiger te interpreteren waren.
- Tijd die nodig was voor het opzetten en uitvoeren pilots is onderschat en daarnaast heeft de corona-epidemie vanaf begin 2020 ook voor vertraging gezorgd.
- De communicatie tussen kennisinstituten (fundamenteel geïnteresseerd) en praktijk (gericht op praktisch resultaat) vergt meer aandacht, deze praten soms langs elkaar heen. Afbraak aangetoond (in het lab) is iets héél anders dan 'afbraak is in de praktijk bruikbaar'.

5.4.1.2 Technisch

- Nieuwe technieken m.b.t. karakteriseren van een verontreinigingssituatie en grondwaterstroming zijn zéér waardevol in de praktijk (bij CSM-ontwikkeling en dimensionering full-scale)
- Het reducerend vermogen van grond en grondwater dient vooraf bepaald te worden.
- De aanwezigheid van puur product moet meegenomen worden bij de opzet van de pilot, door bijvoorbeeld andere analyses te gebruiken voor het aantonen van een verandering in de verontreiniging. De invloed van de aanwezigheid van puur product werd onderschat waardoor een aantal (theoretische) vragen niet in het veld kon worden beantwoord.
- Er is dus een risico voor overschatting van de effectiviteit de veldproeven (en een onderschatting van de daarvoor benodigde tijd). Wetenschappelijk onderzoek in het veld is moeilijk, kostbaar en tijdrovend.
- De technische uitvoerbaarheid/opzet van de pilots moet directer gekoppeld worden aan de wenselijkheid van het full scale concept en daarop worden gebaseerd. Vuilvrachtverwijdering en voorkomen verspreiding lopen nu als doel te vaak door elkaar.
- Achteraf beschouwd is het puur product te heterogeen aanwezig om in de gekozen pilot opzet effectief te onderzoeken. Vertaald naar full scale is het erg lastig om de gehele site aan te pakken waardoor het optimaliseren van het systeem middels een actieve in-situ zone (scherm) effectiever is. Dit is een waardevol eindresultaat van het onderzoek.

5.4.1.3 Belangrijke elementen in de rapportage (meetstrategie / hypothese)

- Er moet meer tijd (en vooral budget) worden gereserveerd voor de noodzakelijke labonderzoeken.
- Het veldonderzoek blijkt zeer waardevol. De opzet van de pilots is onvoldoende aangepast nadat heterogeen puur product werd aangetoond.
- Belangrijk resultaat uit het vooronderzoek was dat er geen aaneengesloten puur product (drijflagen of zaklagen) is aangetoond en dat het volume puur product veel minder was dan oorspronkelijk gedacht.
- Door de vaststelling dat er een relatief schone tussenlaag voorkomt, kon daarop in de opzet van de pilots worden ingespeeld.
- In het project dienen meer evaluatie- en terugkoppelmomenten opgenomen te worden.
- In ieder onderzoeksproject ligt 'whishfull thinking' op de loer. Door tijdgebrek is hier onvoldoende bij stil gestaan. Er was onvoldoende tijd om effectief bij te sturen.

5.4.1.4 Financiële aspecten

Welke financiële aspecten zijn relevant voor deze toepassing?

- Veldonderzoek is kostbaar
- Partners moeten allen voldoende kunnen bijdragen, anders moet de kennis van buiten worden gehaald, waardoor de kosten extra oplopen.

5.4.1.5 Duurzaamheid

De belangrijkste meerwaarde is besparen op energie (CO2) en veel minder hinder veroorzaken naar de omgeving (zuivering). Zowel procesmatig (potentie) als milieutechnisch heeft zuurstof op basis van het onderzoek de voorkeur: injectie van nitraat of sulfaat introduceert een stof in de bodem en heeft op deze locatie waarschijnlijk onvoldoende effect op de verontreiniging om de sanering eindig te maken.

5.4.2 Aanbevelingen voor codes van goede praktijk

- Voer in eerste instantie labotesten en zet succesvolle labotesten om in piloottesten
- Neem voldoende afstand en tijd om resultaten te interpreteren.
- Geef aan hoe de resultaten geïnterpreteerd kunnen worden en zorg dat dit op een zodanige wijze kan dat betrouwbare conclusies genomen kunnen worden.

Algemene conclusies en aanbevelingen:
Neem voldoende tijd om zaken te concretiseren en te interpreteren, voorkom wishfull thinking bij praktijkgericht onderzoek.

6 TOEPASSING IFLUX EN HRSC-METINGEN – PRAKTIJKVOORBEELDEN

6.1 WP 3 - PILOOTOPSTELLING : DE LIEVE, EEN REACTIEVE MAT ALS BARRIÈRE

Doel piloot

De piloot opzet betreft een barrière om de verspreiding van de verontreiniging vanuit het grondwater tegen te gaan en te verhinderen dat het oppervlaktewater wordt verontreinigd.
Dat de verontreiniging ter hoogte van de barrière wordt afgebroken is niet het doel op zich maar draagt bij tot een duurzaam beheer van de barrière.

Inzet HRSC-tools

Parallel met de stroom werden 15 OIP sonderingen en 3 EnISSA-MIP sonderingen uitgevoerd in bronzone en pluimzone van de verontreiniging in kaart te brengen in de dichte omgeving van het kanaal de Lieve. Hiermee konden kritische zones voor de barrière geïdentificeerd worden op een snelle en inzichtelijke manier.
De grootste verontreiniging zone kon gelokaliseerd worden tussen sonderingen 5 en 8 waarbij op te merken valt dat er in sonderingen 6 en 7 ook nog op grotere diepte product grote aanwezigheid van verontreiniging vastgesteld werd. Met MIP-sonderingen 10-12 kan de pluim stroomafwaarts (zuidelijke richting) ook verder afgeperkt worden met de identificatie van naftaleen als gidscomponent. In de OIP-beelden valt vooral de verscheidenheid aan fluorescentiekleuren op. Dit wijst op een complexe samenstelling van verontreiniging die heel lokaal verandert

Inzet fluxmetingen

De barrière is geïnstalleerd in de waterweg, na dat deze is uitgebaggerd. Voor het ontwerp van de barrière zijn de instroom van het grondwater en de verontreiniging kritische parameters.
Ter voorbereiding van de pilootopzet en tijdens de monitoring zijn deze geëvalueerd en bepaald met behulp van on-site fluxmetingen.
Er zijn grondwater- en massafluxmetingen uitgevoerd in de peilbuizen in de oever (horizontale flux) en rechtstreeks in het sediment (verticale flux) van het kanaal de Lieve.

- Flux metingen in de oever en de bodem van de waterloop laten toe om de verplaatsing van de verontreiniging en grondwater te meten.
- De verticale flux metingen in het sediment van de waterloop zijn een maat voor de uitwisseling tussen grond- en oppervlaktewater.

Bevindingen
Tijdens deze piloot is vastgesteld dat instroom van water en verontreiniging doorheen de mat sterk kan variëren, in ruimte en tijd. De belangrijkste oorzaken van deze variaties dienen in acht genomen te worden bij het bepalen van het aantal nodige meetpunten, de frequentie en duurtijd van de metingen. De volgende randvoorwaarden zijn bepalend voor de fluxmetingen, en dit geval ook voor het slagen van de sanering:

- Verhardingen in de omgeving (bebouwing braakliggend terrein);
- Rioleringen, afvoer water;
- Ondergrondse infrastructuur;
- Aanwezigheid, bodemopbouw en vormfactor van de waterlopen (en onderhoud);
- Waterwinningen of infiltratievoorzieningen;
- Seizoenale schommelingen;
- Extreem voorkomen van droogte of net heel natte periodes;
- …

6.2 WP4 – PILOOTOPSTELLING CARCOKE ZEEBRUGGE FYTOREMEDIATIE

Doel piloot
Bij fytoremediatie wordt gebruik gemaakt van planten en hun geassocieerde micro-organismen om verontreiniging uit de bodem te halen, af te breken of om verontreiniging te stabiliseren.

Inzet HRSC-tools
Voor een goede evaluatie van het project is het belangrijk om een goed inzicht te hebben in de bodemkarakteristieken en verontreinigingssituatie. Hiervoor werden 19 OIP sonderingen uitgevoerd om verspreiding van de verontreiniging in beeld te brengen

Inzet flux metingen
Voor opstart van de piloot zijn op de locatie o.a. fluxmetingen uitgevoerd om de verontreiniging beter in beeld ter brengen en de locatie van de piloten te bepalen. Er is uiteindelijk gekozen voor locaties met in de ondiepe bodemlagen relatief hoge massa fluxen.
Het is de bedoeling dat ten gevolge van de fytoremediatie de massaflux vanuit de zone met beplanting geleidelijk aan afneemt. Tijdens de piloot is ook getracht om met behulp van fluxmetingen de invloedstraal van de beplanting te bepalen. We stellen echter vast dat site specifiek en seizoenale invloeden het resultaat van de flux metingen sterk beïnvloeden. Hierdoor is het effect van de fytoremediatie niet altijd eenduidig te bepalen. Daarnaast is de beplanting nog jong. Als de beplanting de komende jaren verder aansterkt, kan het effect duidelijker worden en de verontreinigingstoestand mogelijks verbeteren.

Bevindingen
Gezien de omstandigheden op de locatie, de gekozen beplanting en tragere biologische processen van fytoremediatie is de duur van het project (3 jaar) te kort in verhouding met de omvang van de restverontreiniging.

Hieruit besluiten we dat bij monitoring van de fytoremediatie het belangrijk is om deze af te stemmen op de te verwachten groeicurve van de beplanting. Daarnaast dient de nulsituatie voldoende in beeld gebracht te worden, voorafgaandelijk de aanplant en opmaak van het monitoringsplan. Het volstaat niet om het bepalen van de nulsituatie te beperken tot een eenmalige bemonstering. Belangrijk is om ook inzicht te verwerven in de variaties die optreden (seizoenaal, weer- of klimaat gebonden en site specifiek).

6.3 WP5 – ’S GRAVENMOER

Doel piloot

Te ’s Gravenmoer is in verschillende opstellingen getest of de biologische afbraak versneld kan worden door middel van stimulatie. Het doel van dit onderzoek is om na te gaan of door middel van gestimuleerde biologische afbraak de nalevering van de verontreinigingskern naar de pluim kan verminderen met als uiteindelijk doel het uitschakelen of passief beheersen van de geohydrologische barrière, bestaande uit een bentonietwand met deepwell onttrekking.

Inzet HRSC-tools

Ter uitrbreiding en verfijning van het CSM werden sonderingen uitgevoerd in 2 fases. In de eerste fase werden 11 OIP-UV sonderingen tot max 36 m-mv uitgevoerd in de vermoedelijke kernzone en richting het noord-westen. Er werd ook een MIP-GCMS-sondering uitgevoerd en een OIP-G sondering ter verificatie. In een tweede fase werden vervolgens nog 7 OIP-UV en 2 MIP-GCMS sonderingen uitgevoerd ter verdere afperking van de kernzone. Er werden ook 6 liners genomen waarop ex-situ OIP-UV metingen gedaan werden en vervolgens grondstalen ter analyse opgestuurd werden. Dit om een site-specifieke interpretatie te krijgen van de verkregen OIP-UV data. De informatie werd gebundeld en in een intertactieve 3D visualisatie tool weergegeven. Hiermee konden vervolgens verschillende volumeberekeningen worden uitgevoerd

Inzet fluxmetingen

Voor opstart van de piloot testen zijn flux metingen uitgevoerd om de grondwaterstromingsrichting beter in beeld te brengen, alsook de distributie en verspreiding van de verontreiniging.
O.a. op basis van de fluxmetingen zijn de locaties gekozen voor de pilootopstellingen en is de locatie van de monitoringspeilbuizen bepaald, het onderzoeksplan hiervan is opgenomen in bijlage 5.1.
Tijdens de piloot zijn geen fluxmetingen uitgevoerd ter opvolging van de effectiviteit. Dit is opgevolgd met behulp van conventionele concentratiemetingen. Met de iFLUX samplers kan, indien wenselijk, aanvullend ook de verdeling en verspreiding van injectieproduct (nitraat en sulfaat) opgevolgd worden.
In november 2022 is een 2de iFLUX monitoringscampagne uitgevoerd. Tijdens deze campagne zijn grondwater – en massafluxen in de ondiepe bodem gemeten, gezien hier de meeste effecten verwacht werden van de uitgevoerde testen.

Bevindingen

Een gedetailleerd conceptueel model van de bodemmatrix werd bekomen op basis van de conductiviteits- en HPT-metingen. Hierin is er duidelijk een toplaag aanwezig met een fijnere korrelgrootte. Vervolgens een bemerken we vooral een zandige bodemmatrix waarin er nog 2 subzones kunnen.

De zone boven -8 à -10 mNAP en deze eronder. De subzones onderscheiden zichzelf door de grotere aanwezigheid van fijne laagjes met een fijn korreligere matrix (klei-ige laagjes) in de bovenste laag en de meer homogene matrix in de onderste laag. Onder deze zandige bodemlaag (ronde -28 à -31 mNAP) wordt in de meeste sonderingen een klei-ige laag aangetroffen.

Met de OIP-metingen werd voornamelijk de aanwezigheid van puur product in het centraal gebied aangetroffen tussen 0 en -10 mNAP. Bemerkelijk hierbij is de hoge heterogeniteit van verspreiding in de diepte door waarschijnlijk eerder een druppelvormige aanwezigheid van deze verontreiniging. Verder valt ook nog op dat de verontreiniging naar beneden wordt geduwd door de aanwezigheid van een minder doorlatende laag in het noorden van het terrein.
Buiten deze ondiepe verontreiniging wordt er ook nog tussen -26 en -39 mNAP verontreiniging aangetroffen in de centrale zone van het onderzoeksgebied.

Aan de zuidoostzijde (IF8) worden hoge massa fluxen gemeten op diepte 8-10 m -mv en 27-33 m -mv. Bij ophalen van de cartridges is puur product vastgesteld. Het aanwezige puur product levert nog sterk na naar het grondwater. Bij puur product is het transport van de verontreiniging gedreven door diffusie. Met flux metingen kunnen we dit vaststellen in de metingen (massa versus grondwater flux). Fluxmetingen zijn echter gericht op het kwantitatief meten van het advectief transport en worden dus bij voorkeur buiten puur product zones uitgevoerd. Net als de EnISSA metingen bevestigen ook de iFLUX metingen dat de ingetekende contouren voor puur product voor interpretatie zijn. De on-site gemeten massa flux levert aanvullende informatie over de verdeling van de verontreiniging en de verspreiding ervan.
De grondwaterstromingsrichting is gemeten voor de barrière op diepte 18-19 m -mv. Het grondwater wordt tegengehouden door de geohydrologische barrière. De waterscheiding bevindt zich tussen IF4 en IF5.
Op basis van de gemeten grondwater en massa fluxen stellen we in de lagen 8-10 m -mv en 18-19 m -mv een hogere flux vast nabij de deepwells. In de lagen 4-6 m -mv en 27-33 m -mv is de invloed van de geohydrologische barrière respectievelijk niet en minder meetbaar. Dit is verder op te volgen gezien in deze lagen hoge massaflux wordt gemeten en dus nalevering vanuit de kern optreedt.

Referenties

Lijst van tabellen

Tabel 1:Grondwaterconcentraties in oostelijke oever van de Lieve na ruiming in maart 2020 (in µg/l) 27
Tabel 2. Oppervlaktewaterconcentraties in de Lieve na ruiming in maart 2020 (in µg/l) 28
Tabel 3. Toetsing maximale oppervlaktewaterconcentraties 1e helft 2020 aan kwaliteitsnormen (MKN-waarden) 28
Tabel 4. Gemeten influx van verontreiniging in oppervlaktewater na ruiming (in mg/m2 per dag) 29
Tabel 5: Te bereiken resultaten van de bodemsaneringswerken (saneringsdoelstelling) 33
Tabel 6: Te verwachten resultaten van de bodemsaneringswerken 34
Tabel 7. Logboek m.b.t. situatie bij de Lieve tijdens meetronden 41
Tabel 8. Gemiddeld zuiveringsrendement (n=4) per stof per meetronde 44
Tabel 9. Resultaten verticale massaflux voor stoffen boven de rapportagegrens 49
Tabel 10. Gemiddelde redoxpotentiaal grondwater (pb 20, 50, 90 en 100) 51
Tabel 11. Waterstanden grondwater en oppervlaktewater en stijghoogteverschil (verhang) 56
Tabel 12. Afweging saneringsalternatieven op duurzaamheidsindicatoren (ontgraving, P&T en reactieve mat) 66
Tabel 13: Diagnostic ratios biodegradatie (bron: haalbaarheidsonderzoek Uhasselt) 80
Tabel 14: Resultaten van de eerste potproef (bron: haalbaarheidsonderzoek UHasselt) 82
Tabel 15: aanplant pilootzone 1 87
Tabel 16: Meetstrategie pilootzone 1 (noordelijke terreinrand) (bron: rapport monitoring UHasselt) 99
Tabel 17. Meetstrategie pilootzone 2 (Zijdelings Vaartje) (bron: Rapport monitoring UHasselt) 99
Tabel 18. Meetstrategie pilootzone 3 (phytopiles) (bron: rapport monitoring UHasselt) 99
Tabel 19. DNA-concentratie en qPCR-hits (uitgedrukt in kopieën van genen per ml grondwater) voor de Eubacteria (EBU) en voor naftaleendioxygenase (NAH) 102
Tabel 20. Olieafbraak in % voor RES11 en andere stammen die werden geïsoleerd op de Resanat site 104
Tabel 21:Resultaten diagnostic ratio's 108
Tabel 22 . Metabolieten van verschillende verontreinigende stoffen waaronder naftaleen via aërobe en anaërobe afbraakwegen 109
Tabel 23. DNA-concentraties en qPCR resultaten voor EUB 110
Tabel 24. DNA-concentraties en qPCR resultaten voor EUB en AlkB in zone 3 (phytopiles) 113
Tabel 25. Overzicht van de onderzochte stalen voor GC/MS-screening. #: flessen waren gebroken nog voor de aanlevering isodetect waardoor deze stalen niet werden onderzocht. *: vervangstalen werden bezorgd en onderzocht voor staal 12 en 5a. 114
Tabel 26. Diagnostic ratio’s voor mengstalen van niet geïnoculeerde phytopiles. De pijlen tonen de verwachte evolutie in geval van biodegradatie. N.d.*: pristaan en fytaan niet of slechts als sporen te detecteren. N.d.#: niet detecteerbaar wegens overlappende pieken. 115
Tabel 27. Diagnostic ratio’s voor mengstalen van geïnoculeerde phytopiles. De pijlen tonen de verwachte evolutie in geval van biodegradatie. N.d.*: pristaan en fytaan niet of slechts als sporen te detecteren. N.d.#: niet detecteerbaar wegens overlappende pieken. 116

Lijst van figuren

Figuur 1. Voorstelling Conceptueel Site Model 6
Figuur 2 Aanvullend onderzoek ter ondersteuning van het ontwerp van de sanering (Remedial Design Characterisation - RDC) reduceert onzekerheden 8
Figuur 3. EniSSA MIP methode 11
Figuur 4 . Enissa -profielen 12
Figuur 5. Enissa – sonde + profiel geleidbaarheid 13
Figuur 6 – HPT sonde + profiel 14
Figuur 7 Calibratiecurve doorlatenheid 14
Figuur 8. Overzicht OIP Probe 15
Figuur 9. Voorbeeld OIP UV resultaten 15
Figuur 10 Voorbeeld OIP Green resultaten 16
Figuur 11 OIP signaal respons (bron: Geoprobe ©) 16
Figuur 12 a) Veldopstelling met een iFLUX passieve sampler (b) in een peilbuis, opgebouwd uit 2 cartridges (c) 17
Figuur 13: stroombanen in de aquifer 18
Figuur 14: sampler verticale flux 18
Figuur 15: iFLUX digitale sensor 19
Figuur 16: voorbeeld van een dashboard met de real-time data van de digitale iFLUX sensoren 19
Figuur 17. Impressie van reactieve mat en werking 22
Figuur 18. Ligging van de onderzoekslocatie: de Lieve en de voormalige Lumco-site 24
Figuur 19. Schematische voorstelling van situatie bodemverontreiniging en de Lieve 26
Figuur 20: Aanduiding segmenten De Lieve 29
Figuur 21. De drie best geteste adsorptie materialen 31
Figuur 22. Vullen en aanbrengen van de reactieve matten in de Lieve 37
Figuur 23. Traject en ligging van de matelementen in de Lieve 38
Figuur 24. Ligging peilbuizen (OIP2/PB20; OIP5/PB50; OIP9/PB90; OIP10/PB100) en meetpunten oppervlaktewater (201-207; meetpunt 208 ligt 460 meter stroomafwaarts van 207) 39
Figuur 25. Acenafteen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 41
Figuur 26. Pyreen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 42
Figuur 27. Fenantreen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 42
Figuur 28. Naftaleen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 42
Figuur 29. Antraceen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 43
Figuur 30. Benzeen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 43
Figuur 31. Xylenen (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 43
Figuur 32. C5-C10 (µg/l) in oppervlaktewater per meetpunt in de tijd 44
Figuur 33. Ligging kortsluitstroming eind 2021 en constatering puur product 45
Figuur 34. Acenafteen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 46
Figuur 35. Pyreen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 46
Figuur 36.Fenantreen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 46
Figuur 37. Naftaleen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 47
Figuur 38. Antraceen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 47
Figuur 39 . Benzeen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 47
Figuur 40 . Xylenen (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 48
Figuur 41. C5-C10 (µg/l) in oppervlaktewater over het gehele meettraject 48

Figuur 42. Mat-flux sampler (rood: sorptie massaflux; blauw: sorptie en tracers waterflux) en situering in de Lieve 49
Figuur 43. Geleidbaarheid (µS/cm) in het oppervlaktewater boven de biochar matten (meetpunt 203 en 205) 50
Figuur 44. Redoxpotentiaal (mV) in het oppervlaktewater boven de biochar matten (meetpunt 203 en 205) 50
Figuur 45. Resultaten meetpunt 203 DNA-analyse / qPCR 51
Figuur 46. Resultaten meetpunt 205 DNA-analyse / qPCR 52
Figuur 47.Fenolindex (µg/l) over het meettraject op verschillende tijdstippen 54
Figuur 48. Acenafteen en pyreen (µg/l) in grondwater ter hoogte van pb 20, 50, 90 en 100 54
Figuur 49. Fenantreen en naftaleen (µg/l) in grondwater ter plaatse van pb 20, 50, 90 en 100 55
Figuur 50. Antraceen en benzeen (µg/l) in grondwater ter plaatse van pb 20, 50, 90 en 100 55
Figuur 51. Antraceen en benzeen (µg/l) in grondwater ter plaatse van pb 20, 50, 90 en 100 55
Figuur 52. Impressie van traject de Lieve met reactieve matconstructie in januari 2022 57
Figuur 53. Pilootzone 1, noordelijke rand van het terrein 77
Figuur 54 . Pilootzone 2, Oever van Zijdelings Vaartje 78
Figuur 55. Pilootzone 2, overzicht analyseresultaten bodem (bron: Witteveen+Bos) 78
Figuur 56: Olie en naftaleen afbrekende genen in de bodem ter plaatse van zone 1 (bron: haalbaarheidsonderzoek Uhasselt) 80
Figuur 57: Functionele genen van olie en PAK afbrekende micro-organismen in zone 1 (bron: haalbaarheidsonderzoek UHasselt) 81
Figuur 58: Percentage afbraak van verschillende oliefracties bij geïsoleerde bacteriën 83
Figuur 59: dikke puinlaag bij uitgraving 85
Figuur 60. boorwerken Witteveen+Bos 85
Figuur 61. aanplant pilootzone 1 86
Figuur 62. Pilootzone 1a - 5/03/2020 (links) en 20/03/2020 (rechts) 87
Figuur 63. Pilootzone 1a - 15/04/2020 88
Figuur 64 . Pilootzone 1b - 15/04/2020 89
Figuur 65. Voorstel opdeling pilootzone 2 91
Figuur 66 . Pilootzone 2 - sleuf drainagedarm 92
Figuur 67. Pilootzone 2 - V-vormige sleuf 92
Figuur 68. Grote Lisdodde Figuur 69. Pilootzone 2 - aanplant 93
Figuur 70. Aanleg phytopiles 95
Figuur 71. Overzicht phytopiles 95
Figuur 72. Locatie phytopiles op terrein Envisan 96
Figuur 73: Opzet phytopiles 97
Figuur 74. Aëroob metabolisme voor naftaleen (bron: https://www.researchgate.net/figure/Aerobic-naphthalene-biodegradation-25_fig2_230793131 101
Figuur 75. pVI4.1, 80 kb plasmide dat codeert voor een volledig naftaleen operon, nahAaAbAcAdBFCED om naftaleen om te zetten in salicylaat en het lagere nahGTHINLOMKJY operon om salicylaat via catechol om te zetten in tussenproducten van de tricarbonzuurcyclus (TCA). 103
Figuur 76. Naftaleenafbraak door stam VI4.1 en VI4T1 vergeleken met een onbehandeld controlestaal (zand met naftaleen) 104
Figuur 77. Overzicht van het piekspectrum en scheiding van de afzonderlijke pieken na een run van 2 uur per monster. 1D-kolom (Rxi-5Sil MS) - 2D-kolom (Rxi-17Sil MS), Modulatie: 4,8 sec, Injectie 2 µl - Split 1/50.105
Figuur 78. Resultaten van de 2DGC analyses en dieseldegradatietest voor stam RES11 en RES20 ... 105
Figuur 79. Installatie van de BACTRAP in een peilbuis op het terrein 106
Figuur 80. Werkingsprincipe van de BACTRAPS 106

Figuur 81. Resultaten BACTRAP met 13C-naftaleen en de incorporatie in aminozuren 107
Figuur 82. Afbraak van BTEX verbindingen door VI4.1 110
Figuur 83. Wijziging in de samenstelling van de verschillende koolwaterstoffen in functie van de biodegradatie 111
Figuur 84. Foto en schema van de fytopiles (09/2020). Arrhenatherum elatius (AE): Frans raaigras. Lolium Perenne (LP): Engels raaigras. Festuca arundinacea (FA): Rietzwenkgras. Mistral, Agreement (Agr). Grandslam: varieties of Lolium perenne. I=geïnoculeerd. Coat=gecoate zaden. 112
Figuur 85. Evolutie van de groei van de grassen. De beelden tonen het kiemen (11/2020), de bedekking door de gegroeide grassen (30/04/2021), vaststelling van de wortellengte (> 18 cm) en een detailbeeld met de aanwezigheid van de plaatselijk mee ingezaaide Honingklaver (*Melilotus alba*). 113
Figuur 86: Evolutie van concentratie aan minerale olie in phytopile 2A 119
Figuur 87: Minimale en maximale reductie aan PAK's op 15 cm diepte 120
Figuur 88: Minimale en maximale reductie aan PAK's op 80 cm diepte 120
Figuur 89. Ligging van de locatie in ’s Gravenmoer. In het bruine kader rechts de locatie van het voormalig houtbewerkingsbedrijf. 132
Figuur 90. Grondwaterstromingsrichting op de locatie 133
Figuur 91. Schematisch beeld van de verontreinigingssituatie geactualiseerd n.a.v. de resultaten van het veldonderzoek naar aanwezigheid van puur product. 134
Figuur 92. Ligging standaard monitoringspeilbuizen achter de damwand (zwart). 135
Figuur 93. Globale ligging pilots, met grondwaterstroming in blauwe pijlen. 136
Figuur 94. Dwarsdoorsnede opstelling aerobe pilot. 137
Figuur 95. Bromide tracers anaerobe pilots op verschillende afstanden (in m) vanaf de infiltratieput (injectiemomenten in geel) 139
Figuur 96. Elektronacceptoren anaerobe pilots. De zwarte pijltjes geven infiltratiemomenten weer. De oranje pijltjes zijn metingen binnen een week na de infiltratie. 140
Figuur 97. Elektronacceptor aerobe pilot 140
Figuur 98. Ligging pilots ten opzichte van puur product zone 141
Figuur 99. Plaatselijke verschillen in achtergrondconcentratie 142
Figuur 100. Verontreinigingsconcentraties in pilots 142
Figuur 101. Totaal aantal bacteriën 143
Figuur 102. Concentratie specifieke bacteriën/genen 144
Figuur 103. NGS-analyse van de monsters van de anaerobe pilots 144

Lijst van bijlagen

Bijlagen Werkpakket 3:

Bijlage 3.1: Rapportages meetronden oppervlaktewater en grondwater (RSK)
Bijlage 3.2: Rapportages qPCR-analyses (Avecom)
Bijlage 3.3: Rapportages fluxmetingen (iFLUX)
Bijlage 3.4: Tabellen met meet- en analyseresultaten grondwater en oppervlaktewater & logboek
Bijlage 3.5: Samenvatting kostenraming saneringsvarianten
Bijlage 3.6: Modelinvoer en -uitvoer CO2-footprint saneringsvarianten

Bijlagen Werkpakket 4:

Bijlage 4.1: Ligging van het terrein
Bijlage 4.2: Restverontreiniging met BTEX in het vaste deel van de bodem
Bijlage 4.3: Restverontreiniging met minerale olie in het vaste deel van de bodem
Bijlage 4.4: Restverontreinging met PAK's in het vaste deel van de bodem
Bijlage 4.5: Restverontreiniging met teer in het vaste deel van de bodem
Bijlage 4.6: Restverontreiniging met cyanide in het vaste deel van de bodem
Bijlage 4.7: Restverontreiniging met zware metalen in het vaste deel van de bodem
Bijlage 4.8: Rapport OIP-metingen (Witteveen+Bos)
Bijlage 4.9: EniSSA OIP-rapport
Bijlage 4.10: Analyseresultaten zone 2
Bijlage 4.11: Restverontreiniging minerale olie in ondiep grondwater
Bijlage 4.12: Restverontreiniging minerale olie in diep grondwater
Bijlage 4.13: Restverontreiniging benzeen in ondiep grondwater
Bijlage 4.14: Restverontreiniging benzeen in diep grondwater
Bijlage 4.15: Restverontreiniging naftaleen in ondiep grondwater
Bijlage 4.16: Restverontreiniging naftaleen in diep grondwater
Bijlage 4.17: Restverontreiniging cyanide in ondiep grondwater
Bijlage 4.18: Analyseresultaten grondwater
Bijlage 4.19: Analyseresultaten grondwater per parameter
Bijlage 4.20: Overzicht bestaande peilbuizen
Bijlage 4.21: Boorbeschrijvingen
Bijlage 4.22: Analyseresultaten grondwater
Bijlage 4.23: Analyseresultaten slib phytopile
Bijlage 4.24: Analyseresultaten bodem in nieuwe zone 1
Bijlage 4.25: Analyseresultaten grondwater in nieuwe zone 1
Bijlage 4.26: Rapport haalbaarheidsonderzoek Uhasselt
Bijlage 4.27: Rapport monitoring van de Uhasselt
Bijlage 4.28: Evaluation of pollutant biodegradation at the Resanat site of a former Carcoke coking plant in Zeebrugge (Belgium), pilot 1 (verslag van Isodetect)
Bijlage 4.29: Evaluation of pollutant biodegradation at the Resanat site of a former Carcoke coking plant in Zeebrugge (Belgium), pilot 2 (verslag van Isodetect)
Bijlage 4.30: Evaluation of pollutant biodegradation at the Resanat site of a former Carcoke coking plant in Zeebrugge (Belgium), pilot 3 (verslag van Isodetect)
Bijlage 4.31: Eindrapport Fluxmetingen Interreg Resanat WP4, iFLUX
Bijlage 4.32. Bodemonderzoek voormalige cokesfabriek Carcoke ikv RESANAT
Bijlage 4.33. Output O4.1 Saneringsconcept Fytoremediatie
Bijlage 4.34. Output O.4.2. Verslag aanplant

Bijlage 4.35 Literatuurstudie RESANAT haalbaarheid
Bijlage 4.36. Output O 4.9 Rapport Evaluatie
Bijlage 4.37. Kostenraming
Bijlage 4.38. Ontwerpgrondslagen
Bijlage 4.39. In- en uitvoer Carbon footprint calculation model TAUW
Bijlage 4.40. In- en uitvoer CO2 rekentool KWS beplanting
Bijlage 4.41. Beoordeling van carbon footprint en kosten van full scale fytoremediatie

Bijlagen Werkpakket 5:

Bijlage 5.1. Biostimulatie voormalig CEBECO terrein ‘ s Gravenmoer incl. Bijlage
Bijlgage 5.2. Ontwerp RESANAT pilots CEBECO terrein