

Teerpompen onderzoek Griftpark



Teerpompen onderzoek Griftpark

Auteur(s)

Annemieke Marsman

Jan Gerritse

Nefeli Elezi

Romee van Dam

Teerpompen onderzoek Griftpark

Opdrachtgever	Gemeente Utrecht Dienst Stadsontwikkeling
Contactpersoon	Bart Manders
Referenties	
Trefwoorden	Griftpark, teerpompen, grondwaterverontreiniging, biologische afbraak

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	12-12-2025
Projectnummer	11208329-002
Document ID	11208329-002-BGS-0004
Pagina's	46
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

Annemieke Marsman
Jan Gerritse
Nefeli Elezi
Romee van Dam

Samenvatting

Aanleiding en doel

In het Griffpark in Utrecht zijn de bodem en het grondwater ernstig vervuild door de voormalige gasfabriek, die er tussen 1860 en 1960 stond. De vervuiling bestaat vooral uit pure teer en opgeloste stoffen. In de jaren negentig is de verontreiniging geïsoleerd met schermwanden, afdekking en grondwaterzuivering. Uit onderzoek blijkt dat bacteriën in de bodem de teeraromaten in het grondwater langzaam maar actief afbreken, waardoor het risico op verspreiding kleiner wordt.

Teerpompen is een techniek die succesvol wordt toegepast bij de voormalige vetgasfabriek in Amersfoort. Op deze locatie is sprake van sterk verontreinigde bodem en grondwater door lozing van olie en teer in de bodem in de eerste helft van de vorige eeuw. In de huidige situatie worden mogelijke risico's op verspreiding weggenomen door het benutten van biologische afbraak, het plaatsen van een bioscherm en het zoveel mogelijk verwijderen van mobiel puur product door middel van teerpompen.

Het doel van dit onderzoek is om inzicht te krijgen in de haalbaarheid van het toepassen van de techniek teerpompen in het Griffpark. Hiervoor moeten een aantal vragen beantwoord worden om deze inschatting te kunnen doen. Om de kans op succes van het teerpompen goed in te kunnen schatten is naast informatie over omvang, distributie in de bodem en gedrag ook inzicht nodig in de fysische eigenschappen van de aanwezige mobiele teer. Belangrijke parameters zijn met name de viscositeit en het soortelijke gewicht. Deze gegevens maken het mogelijk te bepalen of teerpompen hier een mogelijk effectieve techniek kan zijn. Daarnaast is het belangrijk te beoordelen in welke mate, na het oppompen van de mobiele fractie, de achtergebleven residuaire teer nog aromaten afgeeft aan het grondwater en of deze worden afgebroken.

Dit onderzoek richt zich op de aanwezigheid, de eigenschappen, en het gedrag van pure fase teer in het Griffpark in Utrecht. Deze studie onderzoekt die aanwezigheid en mobiliteit van teer in het Griffpark door middel van veldwerk, historisch onderzoek, modellering, en laboratoriumonderzoek. Het laboratoriumonderzoek onderzoekt hoe de teer draineert uit kolommen met grof en fijn sediment uit het Griffpark, en hoe aromaten uit de pure fase oplossen in het grondwater en onder anaerobe omstandigheden microbiologisch kunnen afbreken.

Aanwezigheid en mobiliteit van teer

Uit onttrekkingsput B22 is teer opgepompt van een diepte van 45 m-mv. De teer kan in put B22 terecht zijn gekomen vanuit een ondiepe laag en via de put naar een diepte van 45 m-mv zijn gezakt, of de teer is in de put beland vanuit een diepe laag, net boven de kleilaag op ca. 50 m -mv diepte. De bemonsterde teer blijkt relatief stroperig, hydrofoob en heeft een hoge dichtheid (1,0910 kg/L bij 15°C). De in dit onderzoek bepaalde fysische eigenschappen zijn gebruikt voor twee-fase modellering. De modellering laat zien dat de fysische eigenschappen van de teer in het Griffpark geschikt zijn voor oppompbaarheid. De dichtheid en viscositeit zijn hoger dan bij de teer aangetroffen bij de vetgasfabriek in Amersfoort. Modellering van beide type teer laat zien dat deze verschillen kunnen leiden tot een trager verloop van het teerpompen met een grotere opbrengst in het Griffpark ten opzichte van de vetgasfabriek in Amersfoort.

Historisch onderzoek gevolgd door UVOST sonderingen laat zien dat er puur product teer van mogelijk enkele meters dik aanwezig is op de kleilaag die het eerste en tweede watervoerende pakket van elkaar scheidt.

De samenstelling laat zien dat de teer die is aangetroffen op ca. 45 m -mv voor 20% uit mono- en di-cyclische aromatische koolwaterstoffen bestaat, waarvan naftaleen en andere di-cyclische aromaten in de hoogste concentraties aanwezig zijn. Het is aannemelijk dat ca. 80% van de teer grotendeels uit zwaardere polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) bestaat, maar deze zijn niet detecteerbaar met de gebruikte analysemethode. Een partitietest bij 12°C toont aan dat maximaal 28,6 mg/L van de gedetecteerde mono- en di-cyclische aromatische verbindingen in het grondwater oplost. De verdelingscoëfficiënten van individuele stoffen zijn bepaald en kunnen worden gebruikt voor toekomstige grondwatermodellering en risicobeoordeling. De resultaten bevestigen dat het in 2018 bemonsterde grondwater van bronpomp B22 verzadigd is met teeraromaten.

Drainage-experimenten en residuaire teer

Door middel van kolomproeven met zand en grondwater uit het Griftpark zijn de drainage-eigenschappen van teer onderzocht. In grof zand stroomde water langzamer en teer sneller dan in fijn zand. Dit betekent dat teer zich vooral door grovere zand- en grindlagen in de bodem kan verplaatsen.

Na drainage bleef op gewichtsbasis $2,1 \pm 0,6\%$ residuaire teer achter in grof zand en $7,1 \pm 1,8\%$ in fijn zand, wat aangeeft dat teer minder goed uit het fijne sediment verwijderd kan worden. De residuaire teer kan echter nog steeds teeraromaten aan het grondwater afgeven, wat een verhoogde opgeloste verontreiniging kan veroorzaken.

Anaerobe afbraak van teeraromaten

De anaerobe afbraak van acht opgeloste teeraromaten is onderzocht in duplo batches met grondwater dat in 2018 is bemonsterd bij bronpomp B22 in het Griftpark. Onder methanogene omstandigheden (zonder toevoeging van elektronenacceptoren) varieerden de kortste halfwaardetijden van individuele aromaten in de duplo's van 4 tot 12 jaar. De toevoeging van ijzer(III)hydroxide of nitraat stimuleerde alleen de afbraak van ethylbenzeen, terwijl de andere aromaten minder goed afbraken. Het creëren van sulfaat-reducerende omstandigheden in de batches stimuleerde de afbraak van alle aromaten. De kortste halfwaardetijden lagen in de range van 0,6 tot 2,9 jaar. Naftaleen brak het snelste af, met een halfwaardetijd van 0,6 jaar. Dit is relevant omdat veel sulfaat in het grondwater van het Griftpark aanwezig is, dat kan bijdragen aan natuurlijke afbraakprocessen die de verspreiding van teeraromaten in het grondwater beperken.

Conclusies en adviezen

Uit het onderzoek naar de aanwezigheid en eigenschappen van teer in het Griftpark blijkt dat deze verontreiniging zich als pure fase kan verplaatsen, wat duidt op mobiliteit. UVOST-sonderingen hebben aangetoond dat zich op de kleilaag tussen het eerste en tweede watervoerende pakket een aanzienlijke hoeveelheid puur product teer bevindt, mogelijk enkele meters dik. Dit vormt een bron voor verdere oplossing van verontreiniging in het grondwater. Daarnaast is er een risico op verticale migratie van puur product door de kleilaag richting het tweede watervoerende pakket. De fysisch-chemische analyse bevestigt dat het type teer geschikt is voor mechanische verwijdering, zoals oppompen. Drainage-experimenten tonen aan dat de efficiëntie van verwijdering sterk afhankelijk is van de korrelgrootte van het sediment; grof zand blijkt het meest geschikt voor snelle extractie.

Hoewel verwijdering mogelijk is, blijft residuaire teer achter in de bodem, wat kan leiden tot een verhoogde oplosflux van aromatische verbindingen naar het grondwater. Onder anaerobe omstandigheden treedt biodegradatie op, voornamelijk via sulfaatreducerende processen.

De resultaten van dit onderzoek worden gebruikt voor de modellering ten behoeve van monitoring in het Bestparc Fase 3 project om nazorg in te richten.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	Onderzoek	10
2	Historisch onderzoek	11
	Algemene beschrijving gedrag DNAPLs	13
3	Veldonderzoek	14
3.1	Camera-inspectie	14
3.2	UVOST sonderingen	15
4	Teer-, grondwater-, en grondmonsters uit het Griftpark	18
4.1	Teer	18
4.1.1	Fysische eigenschappen	18
4.1.2	Chemische samenstelling	21
4.2	Grondwater	23
4.3	Grond	24
5	1-D modellering	26
6	Partitie van teeraromaten in grondwater	27
7	Kolomtesten	29
7.1	Opbouw en vullen van de kolomopstellingen	29
7.2	Tracerexperiment	29
7.3	Drainagetesten met grondkolommen met teer in het Griftpark	31
7.3.1	Drainage	32
7.3.2	Residuaire teer	34
7.4	Oplossen en afbraak van teeraromaten	36
7.4.1	Water recirculeren door een gedraineerde kolom	36
7.4.2	Batches met bron B22 grondwater	38
8	Discussie en conclusies	40
8.1	Discussie	40
8.2	Conclusies	41
9	Literatuur	43
10	Bijlagen	45

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het Griftpark in Utrecht is sprake van een omvangrijke en complexe verontreinigingssituatie in de bodem en het grondwater. In de periode van 1860 tot 1960 was op deze locatie een gasfabriek gesitueerd. Binnen die periode is er een uitbreiding geweest met steenkool-, water-, en oliegasfabrieken. Daarbij is de bodem ernstig en grootschalig verontreinigd geraakt. De verontreinigingen bestaan vooral uit puur product teer en stoffen die hieruit oplossen in het grondwater.

In de jaren negentig zijn er zogenaamde IBC (Isoleren, Beheren en Controleren) maatregelen toegepast: de verontreiniging is “ingepakt” door middel van schermwanden tot op de waterscheidende kleilaag (ca. 50 meter onder maaiveld), afdekking, grondwateronttrekking met bovengrondse zuivering en grondwatersanering in het buitengebied.

Er is onderzoek gedaan naar de opgeloste verontreinigingen, hoe deze getransporteerd worden door het grondwater en processen zoals retardatie en biologische afbraak. In het onderzoek in het BestParc project is vastgesteld dat de microbiële populaties die van nature in de bodem van het Griftpark voorkomen, de in het grondwater opgeloste teeraromaten onder de heersende anoxische omstandigheden actief afbreken (Deltares, 2021). Ondanks dat sommige teeraromaten relatief langzaam afbreken, vermindert dit proces het verspreidingsrisico van opgeloste stoffen in het grondwater (Faber, 2023). In een vervolgonderzoek is vastgesteld dat met de huidige IBC maatregelen er momenteel geen aanwijzingen zijn voor significante verspreiding van opgeloste teerverontreiniging vanuit het geïsoleerde gebied naar het tweede watervoerende pakket (2^e wvp) onder en stroomafwaarts van het Griftpark (Deltares, 2025).

In het Bestparc project is vastgesteld dat pure fase teer voorkomt op dieptes variërend van 3-4 m-mv, tot op de kleilaag rond 46 m-mv. Verwacht werd dat er zich mogelijk een omvangrijke hoeveelheid teer in het geïsoleerde gebied bevindt, met name rond de locatie van de voormalige oliegasfabriek en de voormalige gashouders. Vooral de voormalige oliegasfabriek is in dit project relevant, aangezien oliegasteer meestal een vloeibare teersoort is en daardoor relatief gemakkelijk door de bodem stroomt ten opzichte van meer viskeuze koolteer. Het is niet bekend hoeveel teer in de bodem aanwezig is, waar het zich bevindt, of het mobiel is en of het kan worden opgepompt.

Een belangrijke aanleiding voor dit onderzoek is de succesvolle toepassing van teerpompen bij de vetgasfabriek in Amersfoort. Bij deze voormalige gasfabriek in Amersfoort is de ondergrond vervuild met gasteer. Hoewel er in Amersfoort biologische afbraak plaatsvindt, is de keuze gemaakt om daarnaast de pure teer in de bronzone actief te verwijderen. Dit gebeurt succesvol met een pompsysteem dat alleen teer verwijdert, zonder grondwater op te pompen (Bussink et al., 2019). Pure teer kan langzaam peilbuizen of pompputten in stromen: dit proces kan gebruikt worden om een grote massa teer te verwijderen.

Dat de voormalige vetgasfabriek in Amersfoort heeft aangetoond dat toepassen van teerpompen technisch mogelijk is, biedt een referentiepunt voor het onderzoeken van pure teerbronnen in het Griftpark. Dit onderzoek heeft als doel om de haalbaarheid van teerpompen in het Griftpark te beoordelen. Voor een betrouwbare inschatting van de effectiviteit van teerpompen is inzicht vereist in de omvang, verdeling en het gedrag van de teer, evenals in de fysische eigenschappen, waaronder viscositeit, soortelijk gewicht, watergehalte, kookpunt en het oppervlaktetensspanningsverschil tussen water en teer.

Bij het verwijderen van mobiele teer ontstaat residuaire teer die in druppeltjes in de poriën in de bodem achterblijft na het teerpompen. Het oppervlak tussen teer en water wordt daardoor groter dan voor het pompen. Het is aannemelijk dat in de residuaire zone na het teerpompen door het vergrote contactoppervlak in eerste instantie meer teeraromaten in het grondwater zullen gaan oplossen. Een hierdoor tijdelijk verhoogde flux van opgeloste teercomponenten in het grondwater kan mogelijk een risico zijn, afhankelijk van de grondwaterstromingssnelheid en -richting, en de afbraaksnelheid van verontreinigingen door micro-organismen in de omringende bodem. Om de toekomstige kwaliteit van het grondwater na het teerpompen te kunnen inschatten is het daarom belangrijk om inzicht te krijgen in de hoeveelheid residuaire teer, en het mogelijk verhoogd oplossen, transport en afbraak van opgeloste teercomponenten.

1.2 Onderzoek

In dit rapport wordt het onderzoek beschreven wat Deltares, Aveco de Bondt en UU hebben uitgevoerd om te komen tot beter inzicht in de locaties, omvang en het gedrag van mobiele pure fase teer in het Griftpark. Daarbij zijn de eigenschappen van pure fase teer uit het Griftpark bekeken en is er gemodelleerd en laboratoriumonderzoek gedaan naar het gedrag van pure teer.

In dit rapport worden de resultaten beschreven van de volgende onderdelen:

1. Historisch onderzoek: Op 8 December 2022 is informatie verzameld in het Utrechts archief. Op basis van deze informatie is een aantal locaties aangewezen die het meest kansrijk zijn voor het onderzoek naar puur product
2. Veldonderzoek: in het kader van dit onderzoek zijn de volgende veldonderzoeken uitgevoerd en worden beschreven in dit rapport: Zaklaagmeting, Camera inspectie en sonderingen (UVOST)
3. Modelling: 1-D meergefase modelleringsexperimenten
4. Laboratoriumonderzoek: Onderzoeksvragen hierbij zijn:
 - Wat zijn de fysische en chemische eigenschappen van Griftpark teer?
 - Welke componenten lossen vanuit pure fase teer op in het grondwater?
 - Hoe snel loopt teer uit kolommen met Griftparkzand met verschillende porositeit?
 - Hoeveel residuaire teer blijft er achter?
 - Wat is de te verwachten afbreekbaarheid van teeraromaten in het grondwater?

2 Historisch onderzoek

Om inzicht te krijgen in de huidige situatie over de locatie en omvang van het pure teerproduct in de ondergrond, is het van belang het historisch verloop in beeld te brengen. De vraag is hoe de teer zich op basis van historische gegevens vanaf de bron in de periode 1860-1960 heeft verplaatst in de bodem. Welke bronnen zijn er te identificeren?

In het Utrechts archief is informatie verzameld over leidingen, putten, berg-/bezinkbassin etc. In een eerdere fase van het BestParc project is ook onderzoek gedaan naar archiefmateriaal. In dit project is aanvullende gezocht specifiek naar bronnen voor pure teer. Er is voornamelijk gekeken waar vloeistoffen zijn gebruikt en/of opgeslagen binnen het huidige Griftpark.

De details van het historisch onderzoek, de geraadpleegde bronnen en kaarten zijn te vinden in Bijlage 1. De gevonden potentiële verdachte locaties voor bodem belastende activiteiten zijn in Figuur 1 bij elkaar gebracht.

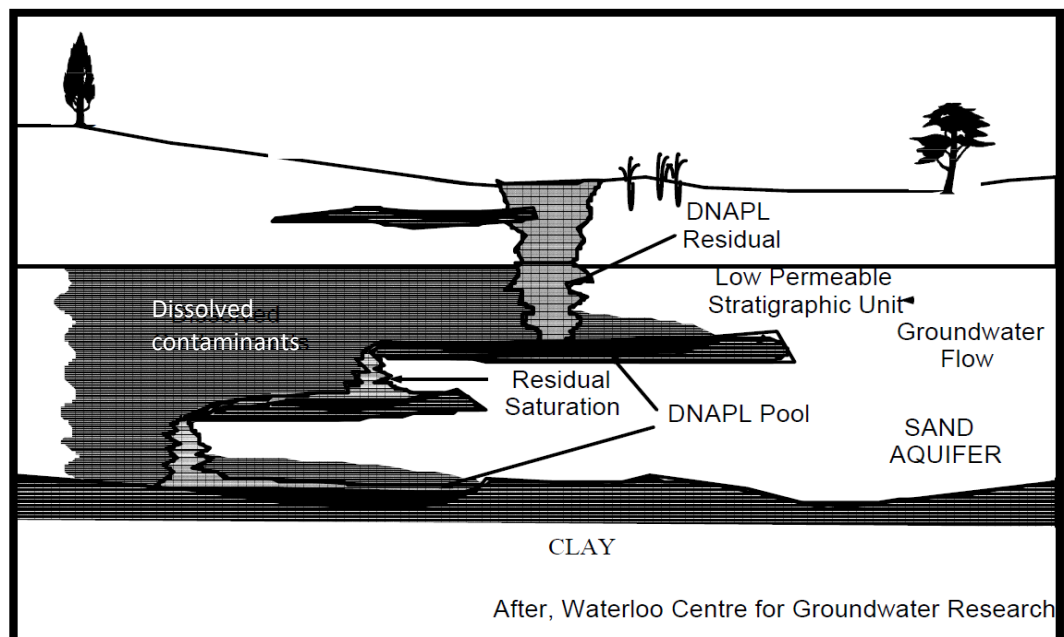
Dit project richt zich op het noordelijke deel van het Griftpark: uit eerder onderzoek (Faber, 2023) bleek dat met name in het noordelijke deel van het Griftpark het vermoeden bestaat dat er op meerdere locaties teer aanwezig is tot op grote diepte. Hier zijn diverse potentiële bronnen vast te stellen: Gashouders, leidingen, teertanken, teerputten, pomphuis en olieteergasfabriek.

Algemene beschrijving gedrag DNAPLs

DNAPLs (Dense Non-Aqueous Phase Liquids) zijn industrieel veel gebruikt sinds de 20e eeuw, bijvoorbeeld creosoot, teer en gechloreerde oplosmiddelen (TCE, PCE). Ze vormen een groot risico voor grondwater

Teer gedraagt zich als een zwaarder dan water en niet-watervloeiend fasevloeistof (DNAPL). Dit betekent dat de teer een hogere dichtheid heeft dan water en dat de stroming door de ondergrond wordt gedreven door dichtheidsverschillen. De hoge viscositeit vertraagt de verticale stroming van de teer. Het gedrag en de samenstelling van de teer zijn locatie-specifiek. Dit hangt onder andere af van de doorlatendheid van de bodem, de dichtheid, viscositeit en interfaciale spanning van de teer, en de hoeveelheid achterblijvende/residuele teer in de bodem.

In de bodem zitten poriën die gevuld kunnen zijn met water, lucht of DNAPL. De saturatie geeft het volume van een bepaalde fase in verhouding tot het totale poriënvolume aan. Er is sprake van restverzadiging of residuele saturatie wanneer DNAPL in de vorm van kleine druppeltjes wordt ingesloten door de waterfase. Hierbij gaan we ervan uit dat water de wetting vloeistof is en de DNAPL de non-wetting vloeistof. De DNAPL is dan niet meer mobiel. Wanneer de saturatie boven een kritische drempel komt, kan de DNAPL zich verplaatsen door de poriën en is mobiel. Op het moment dat de DNAPL mobiel is, betekent dit dus dat er sprake moet zijn van een significante verzadiging van de poriën. Mobile DNAPL migreert tot het een slecht doorlatende laag bereikt en kan daar een pool vormen. Deze pool kan zich lateraal verspreiden of mobiliseren door veranderingen zoals wateronttrekking.



Figuur 2. DNAPL verspreiding in de ondergrond. Bron: Hulling and Weaver (1991).

Bijlage 4 (Verslag internship van Dam), bevat een uitgebreide beschrijving van DNAPL's.

3 Veldonderzoek

3.1 Camera-inspectie

Vanuit eerdere onderzoeken (Faber, 2023) is er teer aangetroffen bij het nemen van grondmonsters. Bij boring C (zie Figuur 3) is in één van de 21 MLS filters (multi level samplers) daadwerkelijk teer opgepompt en bij pompput B22 wordt incidenteel teer opgepompt. Daarnaast wijst het boorprofiel van boring C uit dat er potentieel vloeibare teer aanwezig is in het traject van circa 26 tot 49,50 m –mv (tot op de kleilaag).



Figuur 3. Overzicht van boringen en verdachte locaties.

Er is een camera-inspectie uitgevoerd in de bron in put B22 om te onderzoeken of en waar in het filtertraject van B22 teer de buis binnen zou sijpelen. De vraag is vanaf welke diepte de teer in put B22 terecht komt: is dit via een ondiepe laag en stroomt het dan in de put naar beneden of komt de teer in de put via een diepe laag, net boven de kleilaag op ca. 50 m -mv diepte.

Tijdens de camera-inspectie in put B22 bleek dat de in de bron aanwezige teer veel dieper zat dan van te voren kon worden aangenomen: dit veroorzaakte problemen met de capaciteit van de aanwezige pomp en dunne slangen. Hierdoor was slechts een beperkte hoeveelheid teer op te pompen t.b.v. de kolomproeven. Het was op dat moment nog onduidelijk hoeveel teer zich bevindt in put B22. Ook onduidelijk was, hoeveel teer zich bevindt in het gebied tussen de mogelijke bronnen en de aangetroffen teer in put B22.

Het verslag van de camerameting is opgenomen in Bijlage 2.

3.2 UVOST sonderingen

Om voldoende inzicht te krijgen of er een substantiële hoeveelheid teer aanwezig is alvorens over te gaan tot een boorprogramma, zijn er sonderingen op 6 locaties tot op de kleilaag gedaan, op basis van het historisch onderzoek en reeds eerder geplaatste MIP sonderingen. Er is gekozen voor UVOST sonderingen in plaats van MIP sonderingen omdat deze dieper komen dan MIP sonderingen en betrouwbaardere informatie geven over aanwezige concentraties. In tegenstelling tot MIP sonderingen geeft UVOST geen tailing.

UVOST-sonderingen zijn een type bodemonderzoek waarbij gebruik wordt gemaakt van UV-fluorescentie om verontreinigingen met olieachtige stoffen in de bodem in kaart te brengen. UVOST staat voor UltraViolet Optical Screening Tool.

Tijdens een UVOST-sondering wordt een sonde de bodem in gedrukt. Aan het uiteinde van deze sonde zit een sensor die UV-licht uitzendt. Als er verontreinigingen met polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's) aanwezig zijn – zoals olie, diesel, benzine, creosoot of teer – dan fluoresceren deze stoffen onder UV-licht. De sensor meet die fluorescentie en geeft zo een indicatie van

- Aanwezigheid van verontreiniging
- Diepte van de verontreiniging
- Relatieve hoeveelheid/verdeling (maar geen exacte concentraties)

Met de UVOST is het dus niet mogelijk om exacte concentraties aan te geven. Er kan wel met zekerheid gezegd worden dat er een pure verontreinigingsfase aanwezig is zodra er een duidelijk UVOST-sigitaal wordt gegeven.

De uitgebreide weergave van de resultaten van de UVOST sonderingen staan beschreven in Bijlage 3. Een overzicht van de locatie en gemeten puur product is weergegeven in Figuur 4.

In Tabel 1 is de interpretatie van de UVOST sonderingen te zien. Op een aantal locaties was het niet direct mogelijk om de sondering tot aan de kleilaag uit te voeren, waardoor de sondering binnen enkele meters opnieuw is uitgevoerd (bijvoorbeeld 14 en 14a). In de tabel wordt onderscheid gemaakt tussen locaties waar overduidelijk pure teer aanwezig is en locaties waar de UVOST niet een heel duidelijk signaal geeft (toevoeging onzeker). De UVOST sonderingen laten zien dat op locatie 11 en 16 pure teer aanwezig is tot op de kleilaag: op locatie 11 tussen 49 en 51 m -mv en op locatie 16 tussen 45,5 en 47,7 m -mv en tussen 49,6 en 51,4 m -mv . De aanwezigheid op deze diepte duidt erop dat de pure teer mobiel genoeg is om tot 50 m diep te komen. Dat betekent dat de DNAPL als continue fase aanwezig is en dus niet als losse druppels en de verzadiging hoger moet zijn dan de residuele verzadiging.

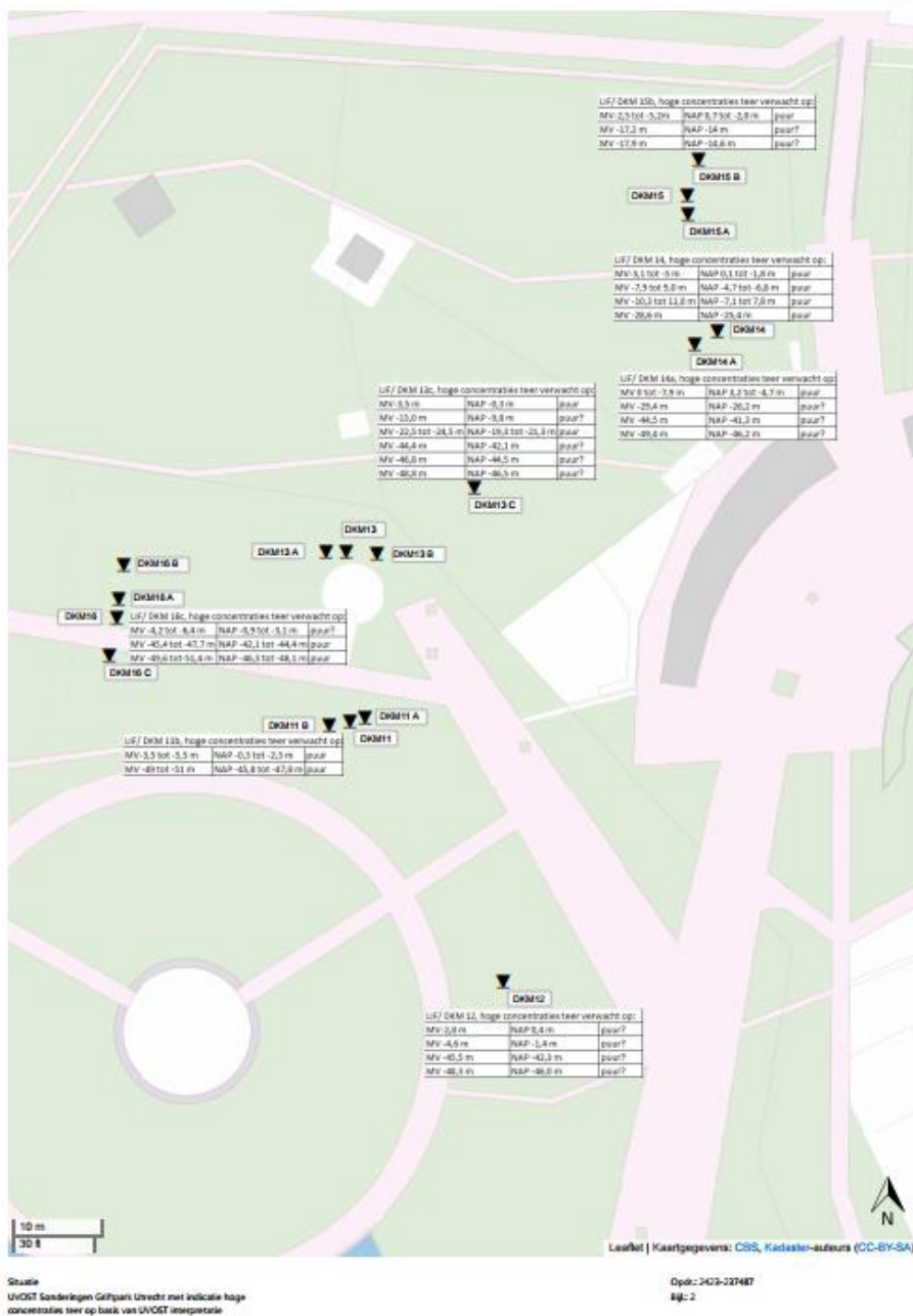
Ook ondieper is teer aanwezig op locatie 11 en 16 op een diepte van ca. 5 m -mv. Op locaties 14 en 14a is zeer ondiep pure teer aanwezig: tot ca. 11 m -mv. De verschillen tussen 14 en 14a laten zien dat de pure teer zeer grillig gedrag vertoont bij het naar beneden zakken.

Locatie 12, meer in zuidelijke richting laat een minder duidelijk UVOST signaal zien voor de aanwezigheid van puur product.

Tabel 1. Overzicht met interpretatie UVOST aanwezigheid teer

Locatie (UVOST)	Aanwezigheid teer m -mv
16	4,2 tot 6,4 onzeker

	45,5 tot 47,7
	49,6 tot 51,4
11	3,5 tot 5,5
	49 tot 51
14	3,1 tot 5
	7,9 tot 9,0
	10,3 tot 11
	28,6
14a	0 tot 7,9
	29,4 <i>onzeker</i>
	44,5 <i>onzeker</i>
	49,5 <i>onzeker</i>



Figuur 4. UVOST Sonderingen Griffpark Utrecht met indicatie hoge concentraties teer op basis van UVOST interpretatie.

4 Teer-, grondwater-, en grondmonsters uit het Griftpark

4.1 Teer

Door Aveco de Bondt is op basis van het historisch onderzoek in oktober 2022 (zie hoofdstuk 2) een verkenning gedaan naar de aanwezigheid van oppompbare teer in beschikbare peilbuizen in het Griftpark. Uit een peilbuis bij bron B22, aan de noordwestzijde van de heuvel in het Griftpark, is vanaf een diepte van ca. 45 m-mv twee keer een halve liter teer opgepompt (Figuur 5). Eén fles van een halve liter is opgestuurd naar SGS Nederland voor het bepalen van de fysische eigenschappen van de teer (Tabel 3 en Bijlage 6). De andere fles met een halve liter teer is gebruikt voor het analyseren van de chemische samenstelling (Tabel 4) en voor het doen van laboratoriumexperimenten bij Deltares (Elezi, 2023). In mei 2023 is nogmaals ca. 6 liter teer opgepompt uit peilbuis B22. Deze teer is wel geanalyseerd, maar verder niet gebruikt voor de kolomproeven. Voor het oppompen van teer is gebruik gemaakt van een HDPE mantelbuis, HDPE slang, marpreen pompslang en een Watson-Marlow 601S peristaltische pomp.



Figuur 5. Foto impressie van het oppompen van teer bij bron B22

4.1.1 Fysische eigenschappen

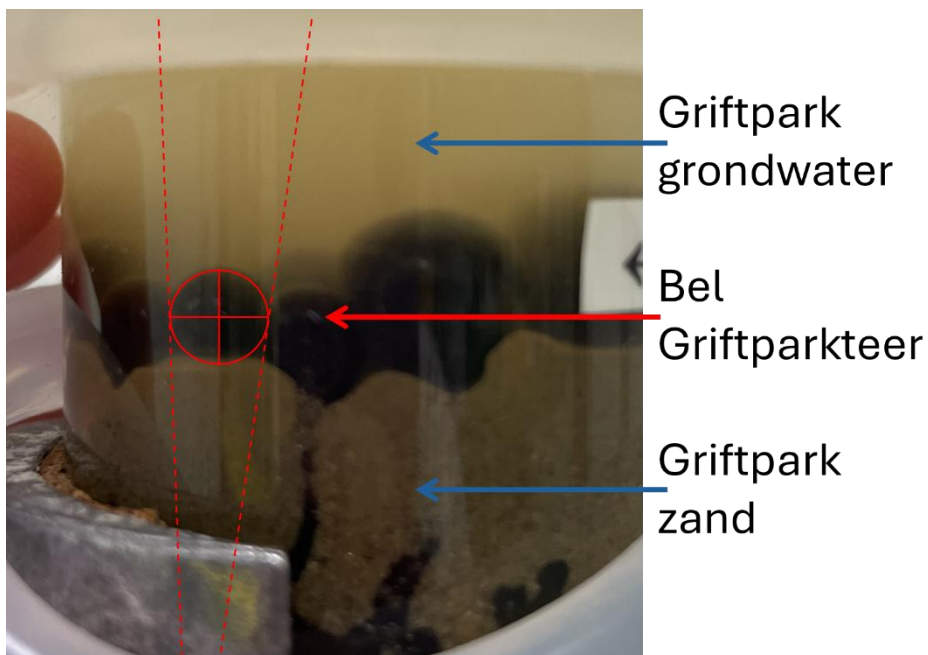
De dichtheid van de in het Griftpark bemonsterde teer (1,0910 kg/L) is hoger dan eerder gevonden voor teer van de Vetgasfabriek locatie in Amersfoort (1,0308-1,0593 kg/L), (Van Dam, 2023).

Tabel 2 Metingen dichtheid en viscositeit in het Griftpark en Amersfoort.

Parameter	Griftpark	Amersfoort 001	Amersfoort 002	Amersfoort 003	Amersfoort 004
Density 15°C [kg dm ⁻³]	1.0910	1.0593	1.0308	1.0498	1.0576
Dynamic Viscosity 10°C [mPa s]	90.57 ¹	39.41	18.56	31.58	34.52
Dynamic Viscosity 25°C [mPa s]	34.80 ¹	18.25	9.721	14.66	16.05
Dynamic Viscosity 50°C [mPa s]	11.43 ¹	7.224	4.531	6.199	6.603
Dynamic Viscosity 75°C [mPa s]	5.511 ¹	3.798	2.611	3.339	3.352

Hiermee is in overeenstemming dat teer in het Griftpark een hoger vlamptpunt, viscositeit (0,05 Pa s in Griftpark en 0,01-0,02 Pa s in Amersfoort) en kookpuntbereikverdeling heeft dan Vetgasteer. Dit betekent dat de bemonsterde teer stroperiger en minder vloeibaar is, wat de stroomsnelheid door de poriën in de bodem zal verlagen⁶. Aan de andere kant is er door het grotere dichtheidsverschil met water wel een sterkere drijvende zwaartekracht voor de teer om door de bodem te zakken. Hoewel bij de dichtheidsanalyses door SGS en Deltares de temperatuur en methode anders waren, is het relatief grote verschil tussen de bepaalde dichtheid opvallend en onverwacht (Tabel 3). Mogelijk is er een verschil in de teersamenstelling in de fles die naar SGS gestuurd is en die door Deltares gebruikt is voor de laboratoriumexperimenten. Een additionele analyse van de door Deltares gebruikte teer door SGS zou kunnen helpen om dit verschil te duiden.

De bevochtigbaarheid (Engels: “wettability”) van teer in het Griftpark is bepaald door de contacthoek (θ) te meten van teerbellen die zich tijdens het beladen vormden op een kolom met waterverzadigd Griftparkzand (Figuur 6). Voor de contacthoekmetingen is gebruik gemaakt van de beeldanalyse software van ImageJ. De contacthoek van Griftpark teerbellen in grondwater ($\theta = 98,1 \pm 3,2^\circ$) was hoger dan die in kraanwater ($\theta = 93,5 \pm 3,7^\circ$), wat vermoedelijk het gevolg is van de hogere ionische sterkte van het grondwater (Tabel 3). De hoge contacthoek duidt op het sterk hydrofobe karakter van teer en de neiging om als pure fase in de bodem aanwezig te zijn.



Figuur 6. Contacthoekmeting

Tabel 3. Fysische eigenschappen van teer in het Griftpark uit peilbuis B22 (SGS Bijlage 6)

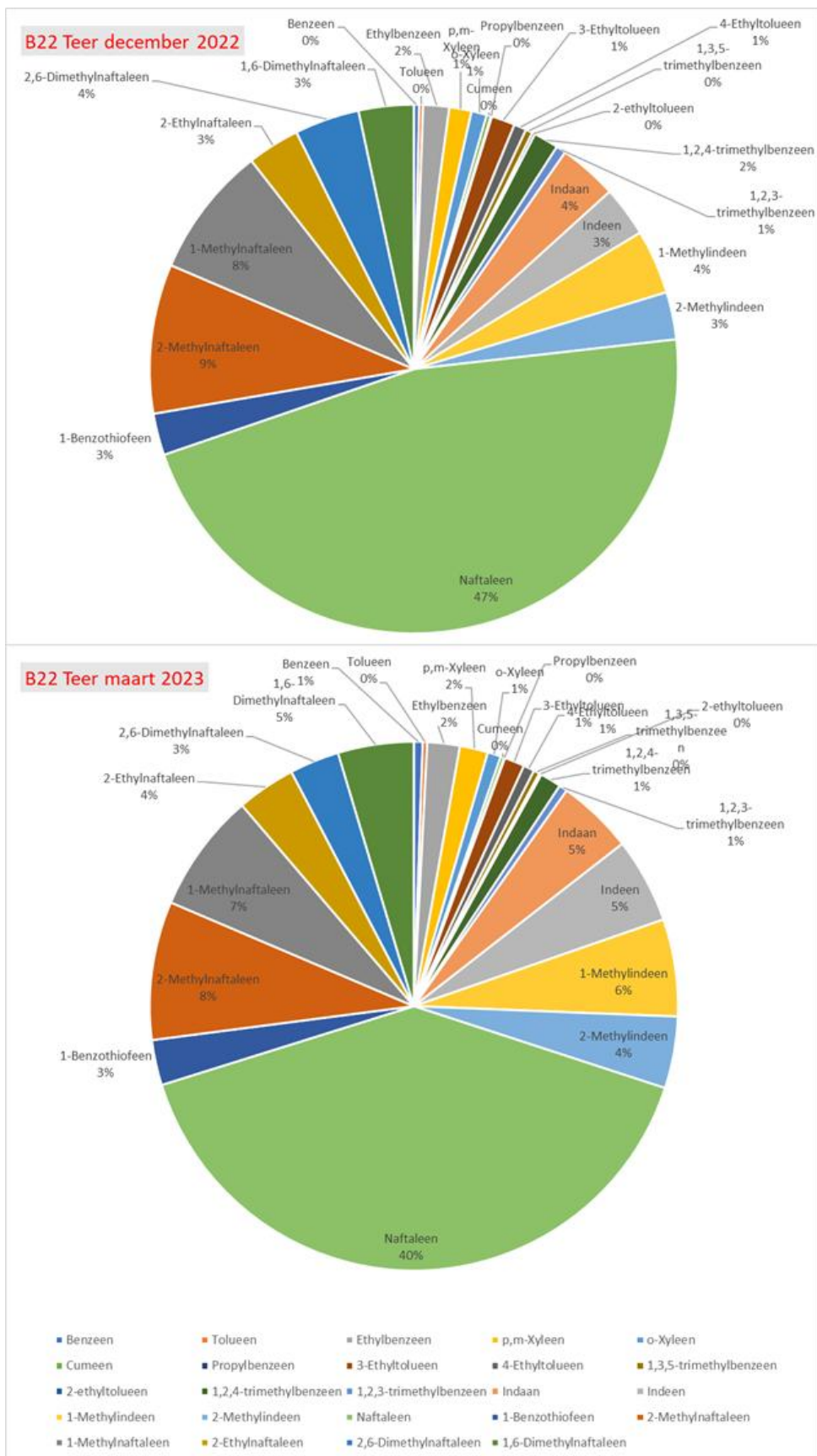
Parameter	Eenheid	Waarde	Methode
Dichtheid bij 15°C	kg/L	1,0910	ASTM D 4052
Dichtheid bij 20°C	kg/L	1,047±0,017 (n=4)	Gewicht/volume Deltares
Watergehalte	%	0,27	ASTM D 6304 procedure C
Vlampunt	°C	79,5	ASTM D 93 procedure A
Contacthoek (θ)			
- in grondwater	°	98,1±3,2	Beeldanalyse Deltares
- in kraanwater	°	93,5±3,7	
Dynamische viscositeit			
- 10°C	mPa·s	83,04	ASTM D 7042
- 25°C	mPa·s	31,90	
- 50°C	mPa·s	10,48	
- 75°C	mPa·s	5,051	
Kookpuntbereikverdeling met gaschromatografie			
- Initieel kookpunt	°C	134,5	ASTM D 7169
- 5% teruggewonnen	°C	175,5	
- 10% teruggewonnen	°C	203,0	
- 15% teruggewonnen	°C	204,5	
- 20% teruggewonnen	°C	224,0	
- 25% teruggewonnen	°C	226,5	
- 30% teruggewonnen	°C	244,0	
- 35% teruggewonnen	°C	250,5	
- 40% teruggewonnen	°C	268,5	
- 45% teruggewonnen	°C	283,5	
- 50% teruggewonnen	°C	298,5	
- 55% teruggewonnen	°C	314,0	
- 60% teruggewonnen	°C	330,0	

- 50% teruggewonnen	°C	591,0
- 55% teruggewonnen	°C	>720,0
- 60% teruggewonnen	%	98
- 65% teruggewonnen	%	2
- 70% teruggewonnen		
- 75% teruggewonnen		
- 80% teruggewonnen		
- 85% teruggewonnen		
- 90% teruggewonnen		
- 95% teruggewonnen		
- Laatste kookpunt		
- Totaal teruggewonnen		
- Verlies		

4.1.2 Chemische samenstelling

Voor de analyse van de chemische samenstelling is 0,1 gram teer opgelost in 50 ml aceton (>99%, VWR chemicals). Na verdere verdunning en toevoeging van een interne standaard (mengsel van 2 mM D6-benzeen, D8-tolueen, D10-ethylbenzeen, D12-1,3,5-trimethylbenzeen en 2,2 mM D8-naftaleen in aceton) is 1 µl geanalyseerd op een gaschromatograaf-massaspectrometer (GC-MS) in de SIM/SCAN modus. Ten opzichte van de eerder ontwikkelde methode zijn 1-, en 2-methylindeen, 1-benzothiofeen, 1-methylnaftaleen, 2-ethylnaftaleen, en 2,6- en 1,6-dimethylnaftaleen aan het analysepakket toegevoegd ^{4,7}.

De som van de massa's met GC-MS geïdentificeerde teeraromaten was 19 tot 21% van de totale hoeveelheid geëxtraheerde teer. Dit betekent dat naast de gedetecteerde mono- en di-aromatische koolwaterstoffen zo'n 80% aan ongeïdentificeerde stoffen in de teer aanwezig is. Vermoedelijk zijn dit vooral zwaardere polycyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK) die te weinig vluchtig zijn om met de gebruikte GC-MS kolom geanalyseerd te worden (Van Leeuwen et al., 2020). Dit onderzoek heeft zich verder gericht op de gedetecteerde meer vluchtige componenten die beter oplosbaar en meer mobiel zijn in het grondwater en hierdoor een groter verspreidingsrisico met zich meebrengen (Figuur 7). Het naftaleengehalte in de teermonsters was 85-88 g/kg teer (Tabel 4). Dit is relatief hoog voor koolteer en ligt iets onder de range gevonden voor vetgasteer (Van Leeuwen et al., 2020, Blott et al., 2001). De in beide teermonsters met deze GC-MS methode gedetecteerde aromaten bestonden voor 10% uit mono-cyclische aromaten en voor 90% uit di-cyclische verbindingen (Figuur 7).



Figuur 7. Gewichtspercentages (%) van de met GC-MS gedetecteerde aromaten van de in december 2022 (boven) en maart 2023 (onder) bij locatie B22 bemonsterde teer

Tabel 4. Teer in B22 gedetecteerde aromaten (waarden zijn gemiddelden en standaarddeviaties van triplo analyses)

Component	Teer december 2022			Teer maart 2023	
	g/kg teer	st.dev.		g/kg teer	st.dev.
Benzeen	0,62	0,02		1,13	0,09
Tolueen	0,45	0,21		0,58	0,22
Ethylbenzeen	3,00	0,82		4,19	1,88
p,m-Xyleen	2,57	0,71		3,63	1,60
o-Xyleen	1,79	1,00		1,72	0,74
Cumeen	0,49	0,27		0,45	0,19
Propylbenzeen	0,12	0,06		0,11	0,05
3-Ethyltolueen	2,72	1,60		2,60	1,11
4-Ethyltolueen	1,44	0,88		1,41	0,62
1,3,5-Trimethylbenzeen	0,81	0,46		0,77	0,34
2-Ethyltolueen	0,33	0,19		0,29	0,12
1,2,4-Trimethylbenzeen	2,88	1,65		2,73	1,16
1,2,3-Trimethylbenzeen	1,14	0,63		1,07	0,46
Indaan	6,77	1,96		9,81	2,95
Indeen	5,83	1,65		10,98	3,35
1-Methylindeen	7,43	2,00		12,52	4,04
2-Methylindeen	5,47	1,47		9,24	2,82
Naftaleen	87,94	0,00		84,67	0,00
1-Benzothiofeen	4,82	2,40		5,83	1,68
2-Methylnaftaleen	17,24	4,31		17,84	5,09
1-Methylnaftaleen	15,17	3,76		15,42	4,40
2-Ethylnaftaleen	6,07	1,55		7,59	3,37
2,6-Dimethylnaftaleen	7,49	3,11		6,40	2,03
1,6-Dimethylnaftaleen	6,36	1,64		9,77	3,54

4.2 Grondwater

Grondwater dat is gebruikt voor de laboratoriumexperimenten is bemonsterd in mei 2023 uit peilbuis B2, 44-45 m-mv, bij boorlocatie B ten oosten van de vijver in het Griftpark. Het grondwater is met een peristaltische pomp (Eijkelpark) voorzien van een marpreen pompslang via een HDPE slang in glazen flessen van 1 en 10 liter gepompt. De flessen zijn volledig afgevuld en gasdicht afgesloten om er voor te zorgen dat er geen zuurstof bij het

grondwater kon komen. De flessen zijn in een donkere koelcel bij 4°C bewaard, tot ze gebruikt zijn voor de experimenten. Het grondwater had een temperatuur van 12°C en de elektrische geleidbaarheid (E.C.) was 1376 µS/cm. Dit is in overeenstemming met de in 2019 gevonden waarden (Deltares, 2021). De soortelijke dichtheid van het grondwater was 1013 ± 0,1 kg/L. In het grondwater werd een lage concentratie teeraromaten van ca. 11 µg/L gedetecteerd (Tabel 5). Benzeen, methylindeen en naftaleen waren de componenten met de hoogste concentraties.

Tabel 5. In grondwater uit peilbuis B2 44-45 m-mv gedetecteerde teeraromaten (waarden zijn gemiddelden en standaarddeviaties van triplo analyses)

Component	Concentratie	
	µg/L	st.dev.
Benzeen	1,4	0,01
Tolueen	0,09	0,01
Ethylbenzeen	0,07	0,01
p,m-Xyleen	0,10	0,02
o-Xyleen	0,04	0,01
Cumeen	0,18	0,01
Propylbenzeen	0,04	0,01
3-Ethyltolueen	0,06	0,01
4-Ethyltolueen	0,04	0,02
1,3,5-Trimethylbenzeen	0,03	0,02
2-Ethyltolueen	0,04	0,02
1,2,4-Trimethylbenzeen	0,06	0,02
1,2,3-Trimethylbenzeen	0,04	0,02
Indaan	0,25	0,09
Indeen	0,65	0,14
2-Methylindeen	5,09	0,31
Naftaleen	2,58	0,11
2-Methylnaftaleen	0,11	0,07
1-Methylnaftaleen	0,15	0,09
Totaal	10,96	

4.3 Grond

Grondmonsters met verschillende porositeit zijn geselecteerd uit de collectie die bij Deltares is verzameld tijdens de boringen voor het Bestparc project. Voor de experimenten zijn schone grondmonsters gebruikt van boorlocaties 101 en B. Monsters met grof en fijn zand zijn geselecteerd op basis van de boorbeschrijvingen en grondwateranalyses om de

5 1-D modellering

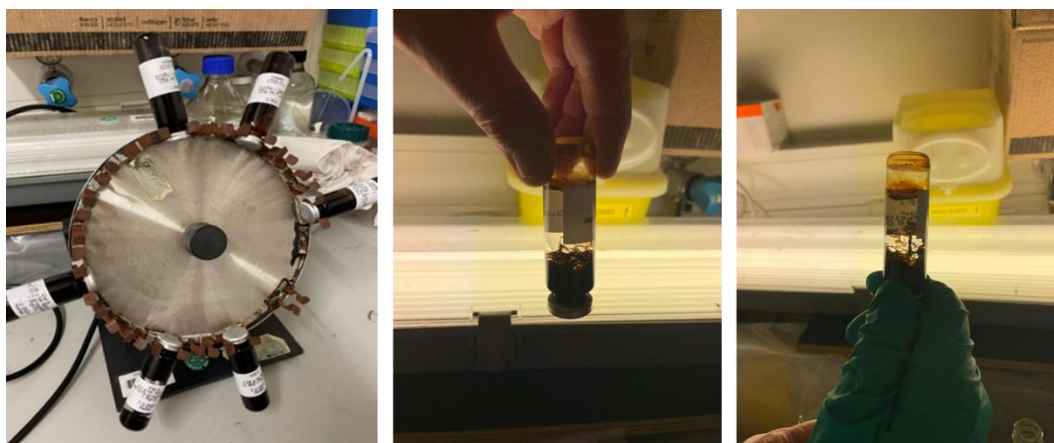
In het kader van dit onderzoek is door Romee van Dam 1-D meergefase modellering uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de mobiliteit en oppompbaarheid van teer in het Griftpark (Van Dam, 2023). In dit hoofdstuk worden de belangrijkste punten samengevat. In Bijlage 4 is het volledige rapport van dit onderzoek te vinden.

Bij de aanvang van dit onderzoek was er weinig data beschikbaar over de eigenschappen van de teer. Daarom is een numerieke gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om een eerste inzicht te krijgen in het gedrag van teer in de ondergrond van het Griftpark. Voor de numerieke simulaties is de meergefase-stromingssimulator STOMP gebruikt. Het conceptuele model is gebaseerd op een kolomexperiment dat ook binnen dit onderzoek is uitgevoerd. Uit de gevoeligheidsanalyse bleek dat met name de doorlatendheid van de bodem belangrijk is voor het voorspellen van de teerstream. De doorlatendheid bepaalt grotendeels de stroomsnelheid: een hogere doorlatendheid leidt tot een hogere teerflux. De ruimtelijke heterogeniteit bepaalt uiteindelijk het stromingspatroon. Daarnaast beïnvloeden de dichtheid, viscositeit, interfaciale spanning (IFT) en van Genuchten-parameters ook het gedrag van de teer, zij het in mindere mate dan de doorlatendheid. De dichtheid vormt de drijvende kracht, terwijl de viscositeit en IFT de stroming remmen. De porositeit, irreducable waterverzadiging, maximale insluiting en de numerieke kritische vangstfactor bleken slechts een minimale tot verwaarloosbare invloed te hebben op het gedrag van de teer.

Een mogelijk pompschema is kwalitatief opgesteld met verwijzing naar het pompschema van een vergelijkbare situatie in Amersfoort (vetgasfabriek Bussink, 2019)). De teer in het Griftpark heeft een hogere dichtheid en viscositeit dan de teer in Amersfoort. De hogere viscositeit resulteerde in een tragere teerflux. Dit betekent dat lagere pompsnelheden en langere pauzes in het intermitterende pompschema nodig zijn om een continue teerstream te waarborgen, vergeleken met het pompschema van Amersfoort. De hogere dichtheid betekent een grotere drijvende kracht, waardoor er langer gepompt kan worden met een constant terugwinningspotentieel voordat een pauze nodig is. De hogere dichtheid kan echter ook resulteren in een grotere laterale verspreiding wat resulteert in een lagere DNAPL-terugwinning. Dit is afhankelijk van de doorlatendheid van de ondergrond.

6 Partitie van teeraromaten in grondwater

Om het oplossen van teeraromaten vanuit de pure fase te bepalen is een partitietest gedaan met teer uit peilbuis B22 (december 2022) en grondwater van boorlocatie 101 (68,75-69,25 m-mv). Voor de partitietest is in triplo 2 ml teer en 12 ml grondwater in 20 ml glazen vials (VWR) gepipetteerd. Om microbiële activiteit te stoppen is 2 ml van een 0,35 g/L kwikchloride-oplossing (HgCl₂) toegevoegd, waarna de vials zijn afgesloten met een bimetalen krimpkapje met een butyl rubber / teflon septum (Macherey-Nagel). Als referentie zijn triplo vials met teer, demiwater en HgCl₂ geprepareerd, maar omdat hierin geen goede scheiding tussen teer en water optrad zijn de resultaten niet meegenomen in dit onderzoek. De vials zijn in een orbitale rotator geklemd en in een donkere koelcel bij 12°C met 9 rotaties per minuut gemengd om een evenwicht te laten ontstaan tussen de pure fase en opgeloste teer (Figuur 9 links). Na het mengen zijn de vials vier weken op zijn kop in de koelcel geplaatst om een goede scheiding tussen de waterfase en de teer te krijgen (Figuur 9 midden). Vervolgens is de waterfase bemonsterd met een glazen spuit met verwisselbare naald (Figuur 9 rechts). Na het verwisselen van de met teer besmeurde voor een schone naald zijn de watermonsters 10 en 100 keer verdund in vials met demiwater met HgCl₂, voor het kwantificeren van de opgeloste teeraromaten met GC-MS.



Figuur 9. Laboratoriumschaal partitietest

Van de mono- en di cyclische aromaten is voor elke verbinding de verdelingscoëfficiënt (partiticoëfficiënt) berekend uit de concentraties gemeten in het grondwater en in de pure fase teer volgens de Rixey *et al.* (1999). Hierbij is uitgegaan van een lineaire verdeling waarbij de evenwichtsconcentratie van component *i* in de teer (C_t^i) en in het water (C_{aq}^i) is gerelateerd aan de verdelingscoëfficiënt (K_{tw}^i) volgens vergelijking 1:

$$\text{Vergelijking 1: } K_{tw}^i = C_t^i / C_{aq}^i$$

Uit de partitietest blijkt dat uit Griftpark B22 teer bij 12°C maximaal 28,6 mg/L mono- en di-cyclische aromaten in het grondwater oplost (Tabel 7). Componenten met concentraties boven 1 mg/L zijn in afnemende volgorde: naftaleen > indaan > indeen > 2-methylindeen > ethylbenzeen > p,m-xyleen > 1-methylindeen (Tabel 7). Ondanks de gemiddeld betere oplosbaarheid zijn op gewichtsbasis minder mono-cyclische (ca. 20%) dan di-cyclische aromaten (ca. 80%) na partitie in het grondwater gedetecteerd. In grondwater uit de in 2018 bij B22 bemonsterde peilbuis is 23,9 mg/L teeraromaten gedetecteerd (Faber, 2023). Dat lijkt iets lager, maar wanneer we de in de huidige partitietest extra geanalyseerde aromaten weglaten dan komt hier 24,0 mg/L uit. In het B22 grondwater was vooral minder indaan en

indeen, en meer 2-methylnaftaleen aanwezig. Omdat er meer dan vier jaar tijd tussen de bemonstering van het B22 grondwater en de B22 teer was, is dit verschil moeilijk te duiden.

Tabel 7. Concentraties teeraromaten en hieruit berekende verdelingscoëfficiënten tijdens partitie van Griftpark B22 teer van december 2022 in grondwater bij 12°C

Component	Concentratie in teer	Concentratie na partitie in grondwater	Verdelingscoëfficiënt		Concentratie in B22 grondwater in 2018 ¹
	C_t (mg/L)	C_{aq}^i (mg/L)	K_{tw}^i	Log K_{tw}^i	(mg/L)
Benzeen	675	0,58	1173	3,1	1,53
Tolueen	486	0,45	1091	3,0	1,17
Ethylbenzeen	3275	1,54	2126	3,3	1,17
p,m-Xyleen	2799	1,21	2306	3,4	1,18
o-Xyleen	1947	0,53	3678	3,6	1,03
Cumeen	531	0,08	6262	3,8	0,33
Propylbenzeen	134	0,02	8920	4,0	
3-Ethyltolueen	2971	0,37	8121	3,9	1,49
4-Ethyltolueen	1567	0,19	8320	3,9	0,37
1,3,5-Trimethylbenzeen	883	0,10	9084	4,0	
2-Ethyltolueen	360	0,04	8457	3,9	0,32
1,2,4-Trimethylbenzeen	3144	0,34	9348	4,0	0,36
1,2,3-Trimethylbenzeen	1239	0,12	10267	4,0	0,01
Indaan	7383	5,29	1395	3,1	0,92
Indeen	6357	3,81	1669	3,2	1,06
1-Methylindeen	8104	1,59	5099	3,7	
2-Methylindeen	5973	1,11	5405	3,7	
Naftaleen	95943	9,19	10443	4,0	8,80
1-Benzothiofeen	5258	0,45	11770	4,1	
2-Methylnaftaleen	18814	0,76	24814	4,4	4,11
1-Methylnaftaleen	16554	0,62	26578	4,4	
2-Ethylnaftaleen	6627	0,10	65775	4,8	
2,6-Dimethylnaftaleen	8174	0,05	160040	5,2	
1,6-Dimethylnaftaleen	6939	0,06	124559	5,1	
totaal	206138	28,58			23,87

7 Kolomtesten

7.1 Opbouw en vullen van de kolomopstellingen

Voor de experimenten zijn glazen kolommen gebruikt met een binnendiameter van 35 mm en een hoogte van 300 mm (Glasgerätebau Ochs, Bovenden, Duitsland). De kolommen zijn in een frame in een afzuigkast gemonteerd en opgebouwd. Aan de onderkant van de kolommen kon met een teflon kraan de flow van grondwater en teer worden gestart en gestopt. Aan de bovenkant waren de kolommen afgesloten met een glazen slijpstop die via een influent- en een effluentpijpje verbonden was met een Minipuls 3 peristaltische slangenpomp. Met deze pomp kon grondwater uit een gasdichte 2 liter fles via viton rubber slangen en een marpreen pompslang (Rubber b.v., Hilversum) van bovenaf aan de kolom worden gedoseerd en afgevoerd. Door de gasfase van de doseerfles te verbinden met een gas-zak met N₂/CO₂ meng-gas (95%/5% v/v) werd het grondwater anaeroob gehouden en werd een constante waterdruk van ongeveer 25 cm gegenereerd tijdens het draineren van de kolom. Voor een goede verdeling van de doorstroming is onder in de kolom een laagje van 10 gram 3 mm glaspereels gedaan (Sigma Aldrich). Voor het pakken kon de kolom zuurstofloos worden gemaakt met een constante flow van N₂/CO₂ meng-gas. Van onderaf is geleidelijk anaeroob grondwater in de kolom gepompt, terwijl gelijktijdig gedroogd Griftpark zand met een spatel via een trechter in de kolom is geschept (Figuur 10). Om tijdens het pakken gasbelletjes te verwijderen is de kolom getrild door er tegenaan te kloppen en door er met een vlakschuurmachine tegenaan te drukken ¹¹. Met deze manier van “nat slurry pakken” is de kolom volledig verzadigd met anaeroob Griftpark grondwater. Na het pakken is een siliconenslang om de kolom gewikkeld, waarmee deze met een recirculatie waterbad (Haake F6 C25) is gekoeld op 12°C. Voor de uitloogexperimenten is water en teer opgevangen in 50 ml Greinerbuizen (VWR) die tijdens het draineren iedere minuut automatisch zijn gewogen met een aan een laptop gekoppelde balans (Mettler Toledo) die onder de kolom was geplaatst (Figuur 11).

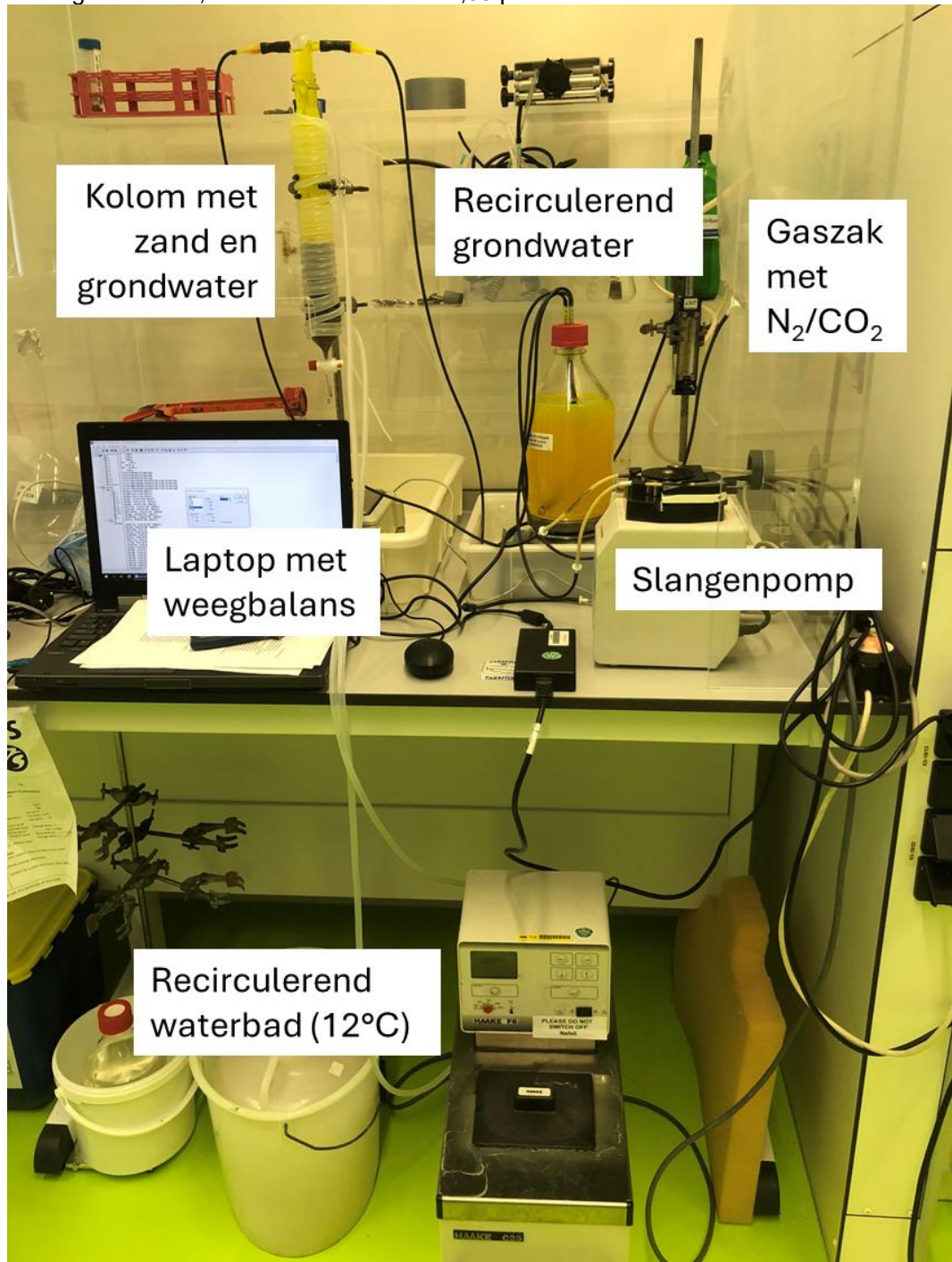


Figuur 10. Het vullen van een kolom met Griftpark zand en grondwater

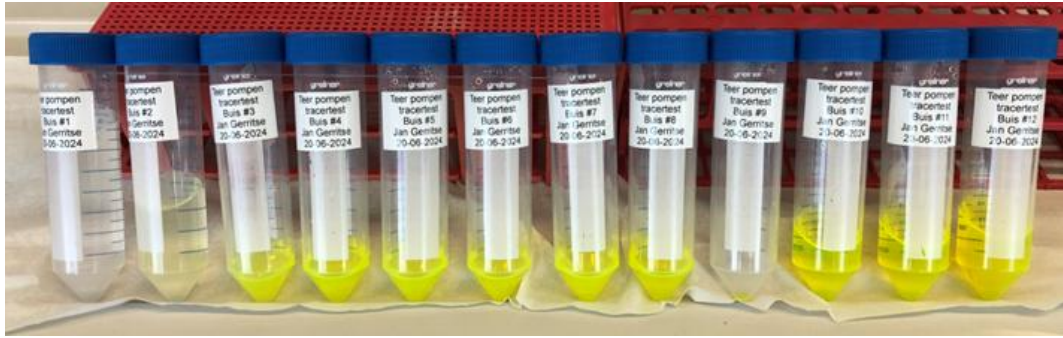
7.2 Tracereperiment

Om de kwaliteit van de pakking van het sediment in de kolom te verifiëren is een tracertest gedaan met matig fijn zand en grondwater van boring B 40–45 m-mv (Tabel 4). Fluoresceïne (0,1 g/L) is als tracer aan het grondwater toegevoegd (Figuur 11). Tijdens het draineren is de tracerconcentratie in het opgevangen grondwater bepaald door de absorptie van licht bij een golflengte van 490 nanometer (A490) te bepalen. Het tracereperiment is gedaan met een bovenstaande waterkolom van 245 mm. Na het openen van de kraan aan de onderkant van de kolom zijn gedurende ruim vijf uur watermonsters opgevangen in Greinerbuizen (Figuur

12). In deze periode was de stroomsnelheid van het water $0,48 \pm 0,02$ ml/min, en is er 143 ml water gedraineerd, wat overeenkomt met 2,33 porievolumes.

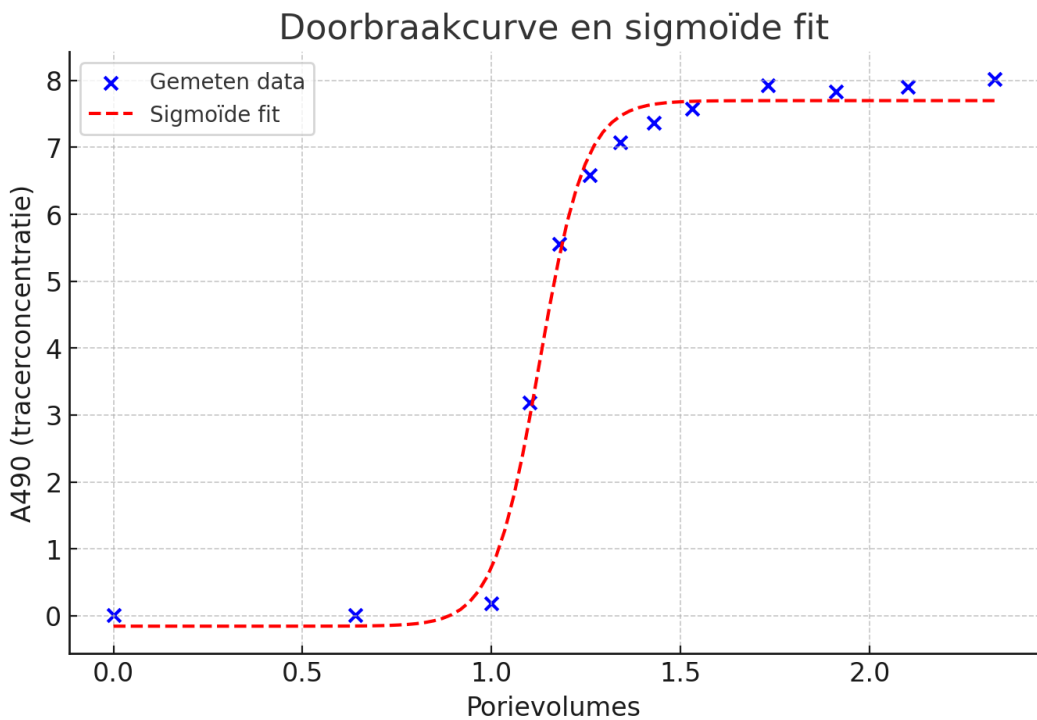


Figuur 11. Overzicht van de gebruikte kolomopstelling



Figuur 12. Gedraineerd grondwater met tracer opgevangen in 50 ml Greinerbuizen

De gemeten absorptiedata van de fluoresceïne tracer komen goed overeen met een sigmoïdaal model van een ideale doorbraakcurve (Figuur 13). Dit betekent dat de zandkolom homogeen gepakt is en dat er geen sprake is van dode zones, bypass-effecten of kanaalvorming door gasbellen of slecht verdichte zones. Tracerdoorbraak (50% van de maximale concentratie) vond plaats bij 1,13 porievolumes en een doorbraaktijd van 137 minuten. De uit de modelfit afgeleide dispersiecoëfficiënt (D) is $0,00182 \text{ m}^2/\text{min}$. Deze lage waarde duidt op een homogene stroming met weinig menging.



Figuur 13. Doorbraakcurve van fluoresceïne tijdens drainage door een kolom met fijn zand van boorlocatie B in het Griftpark

7.3 Drainagetesten met grondkolommen met teer in het Griftpark

Er zijn drie drainagetesten gedaan met “B22 december 2022 teer” en verschillende typen sediment (Tabel 8). Een eerste verkennende test is gedaan met grof zand in een kolom gevuld met aerob. grondwater. De tweede test was met grof zand en grondwater en de derde test met fijn zand en grondwater.

7.3.1 Drainage

Voor de drainagetesten is teer met een plastic spuit langzaam van de onderkant in de met water verzadigde zandkolommen gespoten (Figuur 14). Het volume en gewicht van de teer, de spuit en de HDPE aansluitslang zijn bepaald om vast te stellen hoeveel teer aan de kolommen is gedoseerd (Tabel 8). Tijdens het doseren kleurde het sediment in de kolommen zwart. Er is teer gedoseerd totdat het boven het zand doorbrak, en een dun laagje van enkele milliliters op het sediment vormde. Na het doseren van de teer was er een toename van het volume van het sediment. Kennelijk duwde de teer de zandkorrels uit elkaar, waardoor er een groter porievolume ontstond. De hoeveelheid teer die aan de kolommen gedoseerd is was daarom meer dan het oorspronkelijke porievolume van de kolommen (Tabel 8). Na het starten van de drainage zakten de kolommen binnen enkele seconden weer in tot het oorspronkelijke volume.

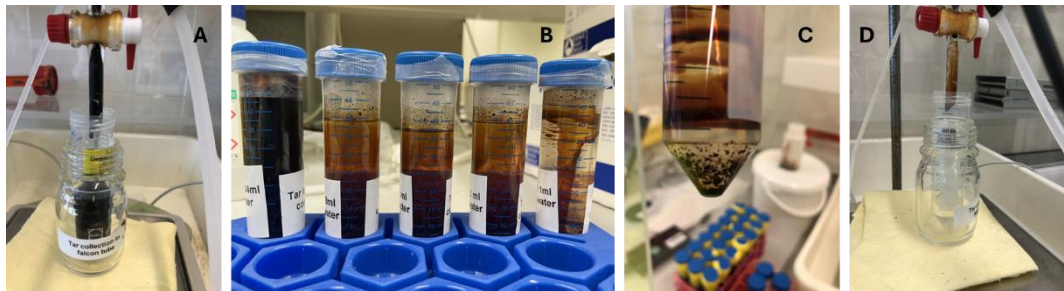
Tabel 8. Overzicht van de drainagetesten met teer in het Griftpark

Drainagetest	#1	#2	#3
Sediment (zie Tabel 4)	Zand, zeer tot uiterst grof Locatie 101 (106-108 m-mv) Porositeit 34,6±0,4%	Grind en zand, zeer fijn tot uiterst grof Locatie B (26,5-28,5 m-mv) Porositeit 38,2±2,9%	Zand, matig fijn Locatie B (40,5-42,5 m-mv) Porositeit 45,5±3,2%
Water	Kraanwater	Grondwater Peilbuis B2 (44-45 m-mv)	Grondwater Peilbuis B2 (44-45 m-mv)
Sediment kolom (mm)	135	111	140
Sediment volume (cm³)	130	107	135
Porievolume (cm³)			
- Zonder teer	44,9	40,8	61,3
- Met teer	56,5	55,5	65,7
Water kolom (mm)	230	254	245
Teer (ml)	68,6	62,7	66,0

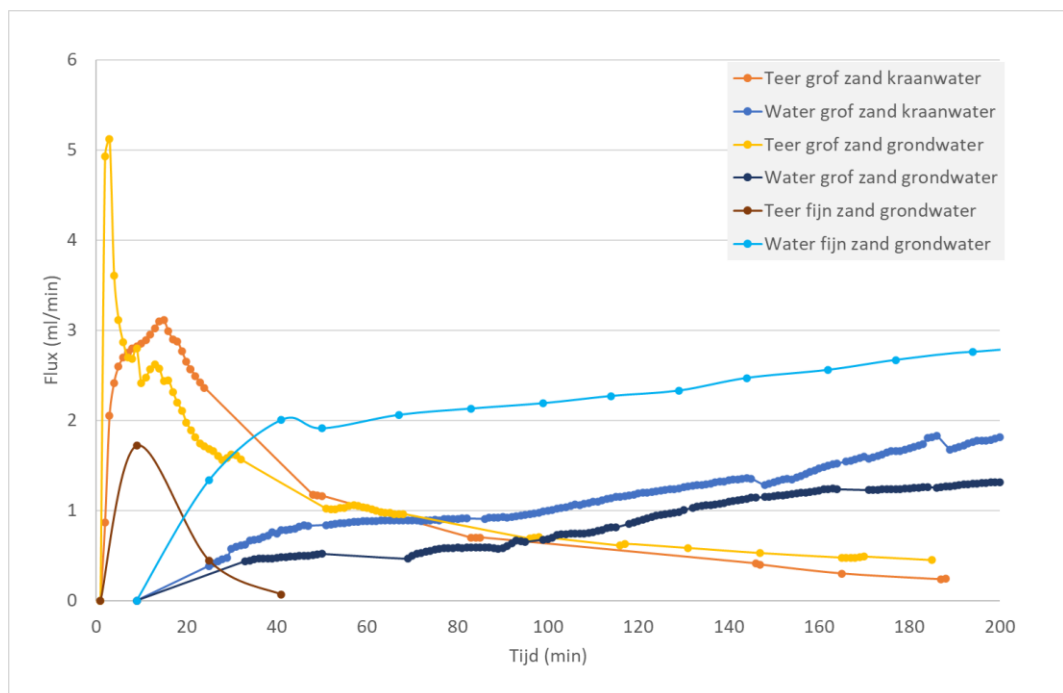


Figuur 14. Dosereren van teer aan een zandkolom

Na het beladen met teer zijn de kolommen twee dagen gestabiliseerd bij 12°C voor het starten van de drainagetesten. Na het openen van de kraan aan de onderkant van de kolom is het drainerende water en de teer onder de kolom opgevangen in 50 ml Greinerbuizen (Figuur 15A). Tijdens het draineren is het gewicht van de opvangbuizen gelogd. De flux van water en teer is bepaald door in de loop van de tijd het volume van water en teer af te lezen van de schaalverdeling van de opvangbuizen (Figuur 15B). Tijdens de test met fijn zand was het aflezen van de opgevangen hoeveelheid teer lastig, omdat de teer geen duidelijke laag op de bodem van de opvangbuizen vormde, maar zich verdeelde in kleine klodders en zich hechtte aan de wand van de buizen (Figuur 15C). De drainagetesten zijn voortgezet totdat er alleen helder water en geen zichtbare teer meer in de buizen werd opgevangen (Figuur 15D).



Figuur 15. Opvangen van teer en water tijdens de drainagetesten



Figuur 16. Flux van teer en water in de eerste 200 minuten draineren van de kolommen

In het eerste half uur van de drainagetesten was er een relatief hoge flux van teer uit de kolommen (Figuur 16). In de experimenten met grof zand was de maximale teerflux 2,5 tot 3,1 ml per minuut. Hierbij wordt opgemerkt dat de piek tot 5 ml/min in het experiment met grof zand en grondwater komt door een onbedoelde drukopbouw in de kolom bij de start van het experiment. In het experiment met de kolom met fijn zand kon alleen de initiële teerflux worden gekwantificeerd. Deze was met 1,7 ml/min lager dan tijdens de experimenten met grof zand. In tegenstelling tot de teerflux was de waterflux (ca. 2,0 tot 2,8 ml/min) hoger in de kolom met fijn zand dan in de kolommen met grof zand (ca. 0,5 tot 1,8 ml/min). Dit is in

overeenstemming met de grotere porositeit van het fijne zand. De kolomtesten laten dus zien dat in het grove zand water trager en teer juist sneller kan stromen.

7.3.2 Residuaire teer

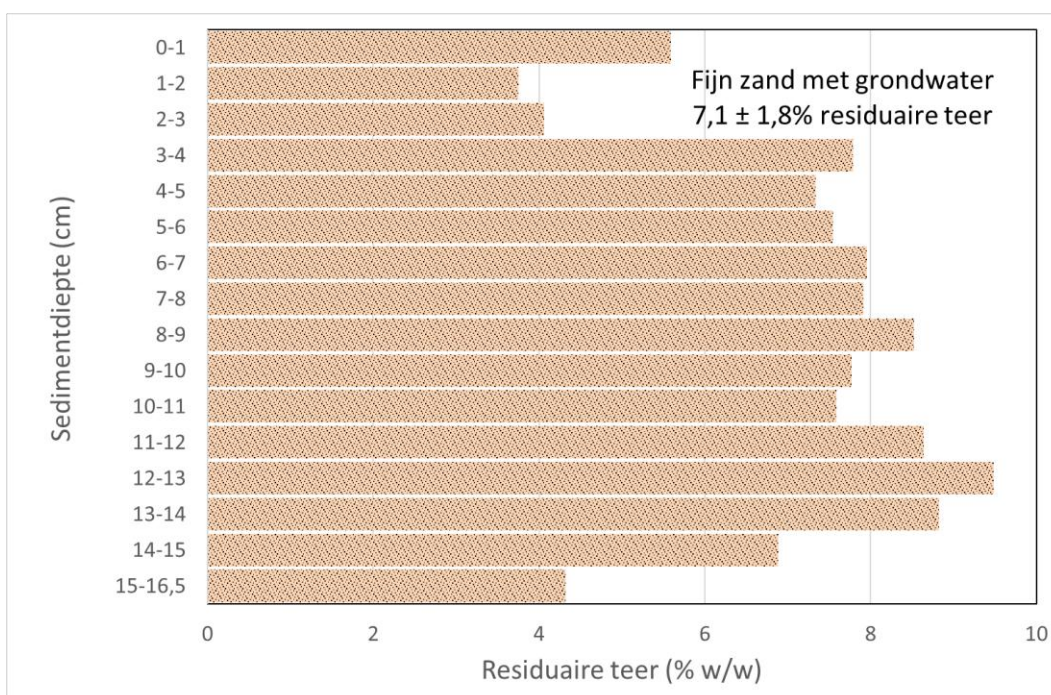
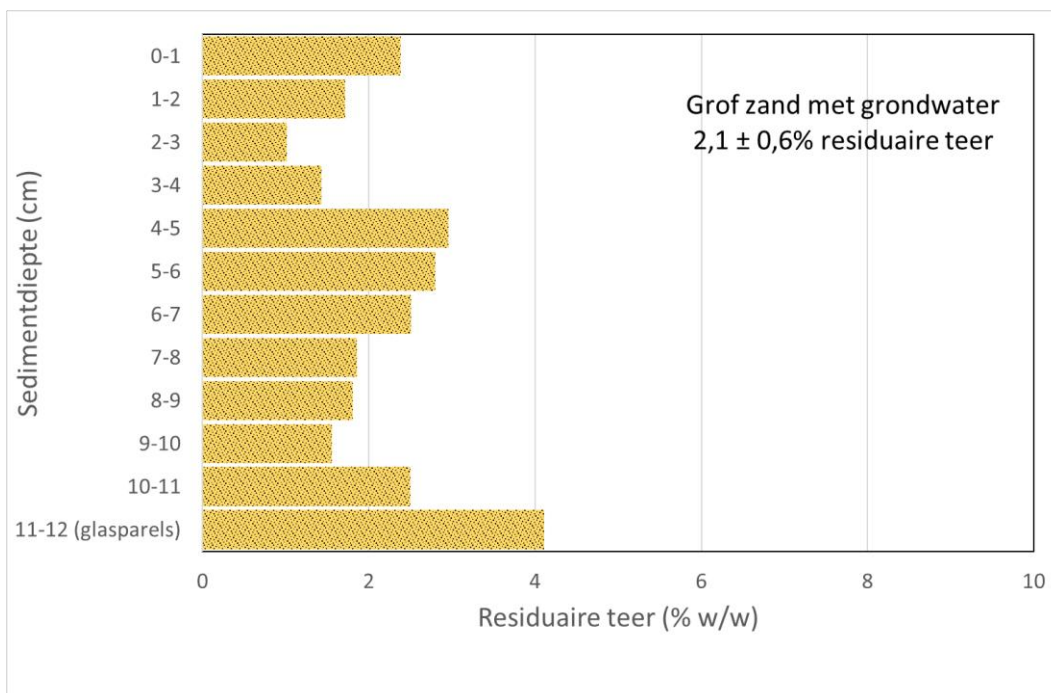
Het tijdens de drainagetesten met grof zand en kraanwater of grondwater opgevangen volume teer was naar schatting respectievelijk 96% en 99% van de aan de kolommen gedoseerde hoeveelheid. De op basis van de opvangvolumes berekende hoeveelheden residuaire teer (gram teer per gram sediment) zijn respectievelijk 1,2% en 0,3% (w/w) in de kolommen met grof zand en kraanwater of grondwater. De volumemetingen van de teer waren echter lastig, en bij de test met fijn zand is het zelfs niet gelukt om zo de gedraineerde teerhoeveelheid te kwantificeren. Er is daarom ook geprobeerd om met beeldanalyse de residuaire teer in de kolommen te kwantificeren, maar deze methode bleek eveneens onnauwkeurig (Figuur 17) (Deltares, 2014). Om een meer nauwkeurige analyse van de residuaire teer te doen zijn daarom na uitlogen met grondwater, de kolommen met grof en fijn zand onderzocht met een thermogravimetrische analyse (TGA). Dit is een techniek waarbij de massa van een monster wordt gemeten terwijl de temperatuur wordt verhoogd. Voor de TGA-analyse zijn de kolommen met een spatel leeg geschapt, zodat diepteprofielen van de residuaire teer in sub-monsters konden worden bepaald. In de eerste stap van de TGA-analyse zijn de monsters bij 105°C verwarmd om het water te verdampen. Ook enkele zeer vluchtige componenten in de teer (m.n. benzeen) zullen in deze stap verdampen. Vervolgens is de temperatuur verhoogd en is de gewichtsafname van het monster van 105 tot 450°C, van 450 tot 550°C, van 550 tot 800°C, en van 800 tot 1000°C nauwkeurig bepaald. Bij de eindtemperatuur zijn nagenoeg alle teercomponenten uit de sedimentmonsters verdampt (zie Tabel 3). Vervolgens kan uit de gewichtsafname tussen 105 en 1000°C de hoeveelheid residuaire teer per gram sediment worden berekend.

De TGA-analyse toont aan dat de hoeveelheid residuaire teer in de kolom met grof zand lager was dan in de kolom met fijn zand (Figuur 18). In de kolom met grof zand was de verdeling van residuaire teer in het zand niet homogeen, en deze varieerde op gewichtsbasis van 1,0% tot 3,0%, met een gemiddelde van $2,1 \pm 0,6\%$ (Figuur 18 boven). In de kolom met fijn zand was na drainage 3,8% tot 9,5% residuaire teer aanwezig, met een gemiddelde van $7,1 \pm 1,8\%$ (Figuur 18 onder). Van nature is er in het schone zand al organisch stof aanwezig dat ook wordt gemeten met de TGA-analyse. Voor het grove zand is dit bepaald op 0,6% en voor het fijne zand op 2,5%. De werkelijke residuaire teerconcentraties kunnen daarom mogelijk iets lager zijn wanneer niet al dit natuurlijke organische stof met de teer uit de kolommen is gedraineerd.

Met de residuaire teer is het mogelijk om het verwijderingsrendement van teer uit de sedimentkolommen te berekenen. Voor de kolom met grof zand komt 2,1% residuaire teer overeen met 2,1 gram teer per 100 gram sediment. In de grof zand kolom zat 107 cm^3 sediment met een dichtheid van $1,85 \text{ gram/cm}^3$. Er was dus $107 \times 1,85 = 200$ gram sediment in de kolom met daarin $2,1 \times 2 = 4,2$ gram teer. Dit komt overeen met $4,2 / 1,090 = 3,85$ ml residuaire teer, wat 6,1% van de aan de kolom gedoseerde hoeveelheid is. Het verwijderingsrendement is dus $100 - 6,1 = 93,9\%$. Het voor de kolom met fijn zand berekende verwijderingsrendement was 75,8%.



Figuur 17. Foto's van de gedraineerde kolommen met grof zand en kraanwater (links) grof zand en grondwater (midden) en fijn zand en grondwater (rechts)



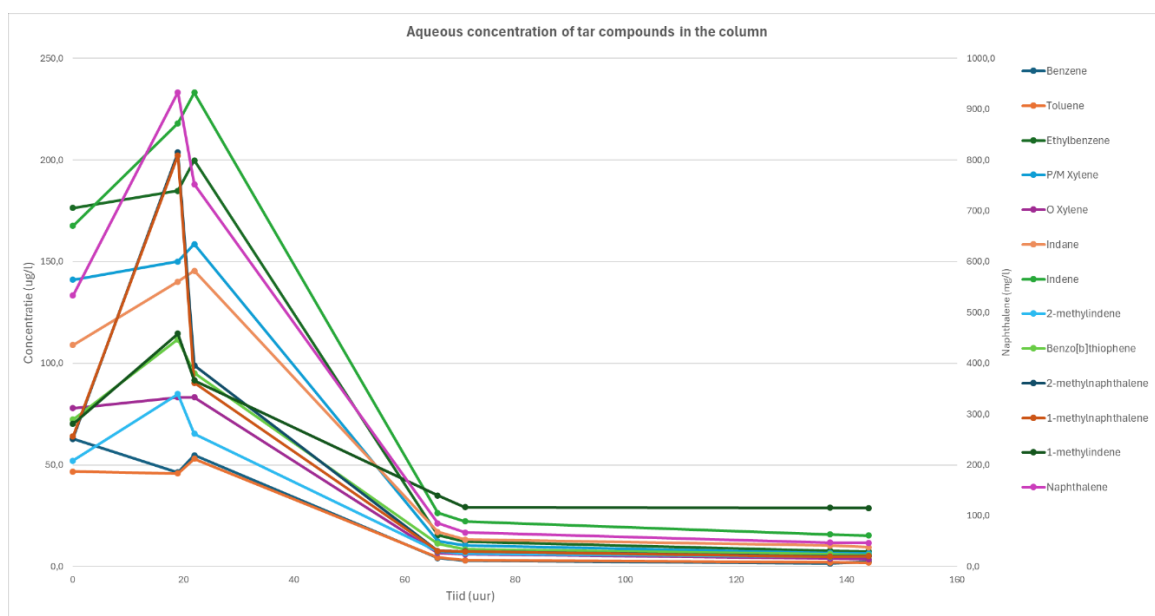
Figuur 18. TGA-analyses van residuaire teer na drainage uit de kolom met grof zand (boven) en fijn zand (onder)

7.4 Oplossen en afbraak van teeraromaten

7.4.1 Water recirculeren door een gedraineerde kolom

Een schatting van het oplossen van teercomponenten is gedaan na de drainagetest van teer uit de kolom met grof zand en kraanwater. De kolom met kraanwater is gebruikt omdat de gedraineerde kolommen met grondwater zijn “opgeofferd” voor de bepaling van residuaire

teer met de TGA-analyse. Zeven dagen na de start van het drainage-experiment is het water in de gedraineerde kolom van onder naar boven door het sediment rondgepompt. Gedurende 6 dagen is het recirculerende water regelmatig bemonsterd voor het bepalen van de concentratie van opgeloste teeraromaten (Figuur 19). Een uur na het starten van de recirculatiepomp werden al zeer hoge concentraties teeraromaten in het recirculerende grondwater gemeten, orde grootte tien keer hoger dan gevonden tijdens de partitietest. Mogelijk is er iets mis gegaan met de analyse, maar de aanwezigheid van een drijfvlag op het recirculerende grondwater bevestigt het aanwezig zijn van maximale oplosbaarheids concentraties van teercomponenten. Na het starten van de waterrecirculatie was er de eerste dag een verdere toename van de concentraties van de meeste teeraromaten (Figuur 15). De tweede dag daalden de concentraties echter sterk, wat mogelijk het gevolg is van aerobe afbraak met zuurstof dat in het kraanwater aanwezig was. Hoewel het aantal meetpunten in de tijd beperkt is blijkt uit het recirculatie-experiment dat zowel de toename van de concentraties teeraromaten de eerste dag na de start van water recirculeren als de afname na een dag recirculeren (halfwaardetijd 0,41 tot 1,14 dagen) snel ging (Tabel 9).



Figuur 19. Concentratie teeraromaten in het recirculerende water na draineren van teer uit de kolom met grof zand en kraanwater

Tabel 9. Toename van de concentraties teeraromaten in de eerste 22 uur en afname na 22 uur water recirculatie door de gedraineerde kolom met grof zand

	Halfwaardetijd (dagen)
Benzeen	0,56
Tolueen	0,58
Ethylbenzeen	0,55
p,m-Xyleen	0,54
o-Xyleen	0,54
Cumeen	0,56
Propylbenzeen	0,58
3-Ethyltolueen	0,54
4-Ethyltolueen	0,53

1,3,5-Trimethylbenzeen	0,50
2-Ethyltolueen	0,53
1,2,4-Trimethylbenzeen	0,52
1,2,3-Trimethylbenzeen	0,52
Indaan	0,64
Indeen	0,64
2-Methylindeen	0,55
Naftaleen	0,57
1-Benzothiofeen	0,59
2-Methylnaftaleen	0,41
1-Methylnaftaleen	0,41
1-Methylindeen	1,14

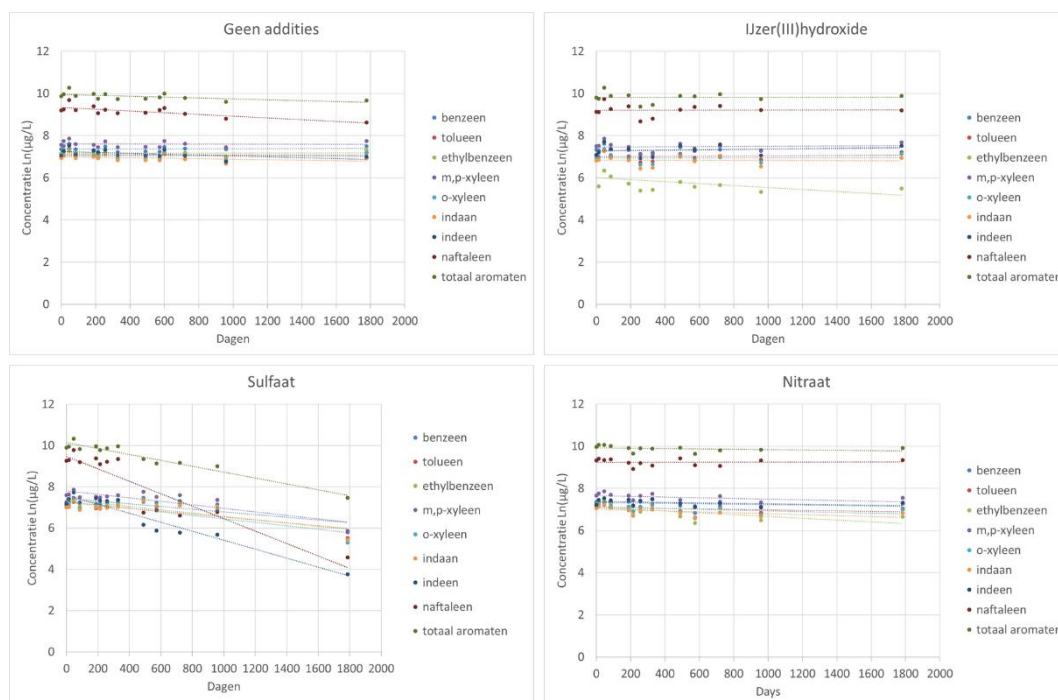
7.4.2 Batches met bron B22 grondwater

De anaerobe afbraak van teeraromaten is een traag proces, met typische halfwaardetijden in de orde van jaren (Elezi, 2023, zie Bijlage 8). Om de anaerobe afbraak van Griftpark teeraromaten te kunnen onderzoeken is daarom gebruik gemaakt van batchincubaties met bron B22 grondwater die in juli 2018 in duplo zijn ingezet (Faber, 2023 Brown et al., 2006). In het B22 grondwater dat voor de batches is gebruikt waren kleine teerbolletjes zichtbaar, en hoge concentraties teeraromaten, vergelijkbaar met de in de partitietest gevonden waarden (Tabel 7). De teeraromaten in B22 batches zonder toevoeging, met sulfaat, driewaardig ijzer, of nitraat als potentieel in Griftpark grondwater beschikbare elektronenacceptoren zijn voor dit onderzoek nogmaals doorgemeten, om afbraak in een periode van 5 jaar te bepalen.

In Figuur 20 is de natuurlijke logaritme (Ln) van de concentraties teeraromaten in de batches uitgezet tegen de tijd, en Tabel 10 geeft de uit de trendlijnen afgeleide halfwaardetijden. In de batches zonder toevoegingen "Geen addities" was alleen CO₂ als elektronenacceptor aanwezig. In deze batches heersen methanogene omstandigheden. In duplo batch "Geen addities A" was er een afname van naftaleen en indeen met halfwaardetijden van respectievelijk 4,6 en 8,9 jaar (Tabel 10). Voor de andere componenten waren de afgeleide halfwaardetijden >50 jaar, wat te lang is voor een betrouwbare berekening. In duplo batch "Geen addities B" was er een concentratieafname alle 8 analyseerde teeraromaten met halfwaardetijden uiteenlopend van 4,1 tot 11,8 jaar. In de batches waaraan ijzer(III)hydroxide was gedoseerd werd alleen een significante afname van ethylbenzeen vastgesteld (Figuur 20). Kennelijk zijn de ijzer-reducerende omstandigheden zoals wij ze in de batches hebben gecreëerd ongunstig voor anaerobe afbraak. Met sulfaat was er wel een simulering van anaerobe aromatenafbraak. Onder sulfaat-reducerende omstandigheden was naftaleen de component die met een halfwaardetijd van 0,63 jaar het snelste werd afgebroken. Dit is belangrijk omdat naftaleen in de hoogste concentraties in het grondwater oplost uit teer in het Griftpark. Ook met sulfaat was er een verschil tussen de beide duplo batches. In batch "Sulfaat A" was de halfwaardetijd van alle geanalyseerde teeraromaten <3 jaar (Tabel 10). In batch "Sulfaat B" werden benzeen, ethylbenzeen, xyleen en indaan minder snel afgebroken. In de batches met nitraat was er alleen een stimulering van ethylbenzeen-afbraak. De andere componenten werden niet, of minder snel afgebroken dan in de methanogene batches zonder toevoegingen.

Opgemerkt moet worden dat door de analytische spreiding in de GC-MS metingen, de berekening van halfwaardetijden >10 jaar nog onzeker is. De batches zouden hiervoor gedurende een langere periode doorgemeten moeten worden. Daarnaast is het belangrijk om

vast te stellen dat de omstandigheden voor afbraak in de batches in het laboratorium zijn geoptimaliseerd. De batches zijn namelijk geïncubeerd bij 20°C en worden continu gemengd. Hierdoor kunnen microbiologische afbraakprocessen sneller verlopen en zijn er geen diffusiegradiënten van verontreiniging, elektronenacceptoren en nutriënten die in de bodem snelheidsbepalend kunnen zijn.



Figuur 20. Concentraties teearomaten in batches met B22 grondwater zonder (linksboven), met ijzer(III)hydroxide (rechtsboven), sulfaat (linksonder), of nitraat (rechtsonder) als elektronenacceptor

Tabel 10. Halfwaardetijd in jaren van teearomaten in duplo batches met B22 grondwater en verschillende elektronenacceptoren

	Geen addities A	Geen addities B	Sulfaat A	Sulfaat B	Ijzer(III) A	Ijzer (III) B	Nitraat A	Nitraat B
Benzeen	>	11,8	2,9	60,1	>	>	19,3	36,8
Toluene	116	10,4	2,6	2,6	>	>	15,5	11,0
Ethylbenzeen	>	9,2	2,4	20,7	6,0	4,1	4,4	1,2
m,p-Xyleen	3517	9,6	2,2	6,2	>	>	11,3	>
o-Xyleen	57,9	7,7	2,2	14,8	>	>	10,2	>
Indaan	154	5,4	2,7	15,6	>	148	8,3	>
Indeen	8,9	4,1	0,87	1,2	>	>	16,8	>
Naftaleen	4,6	4,6	0,63	0,63	>	>	>	13,1
Totaal aromaten	9,2	5,9	1,3	2,2	>	>	24,4	17,6

8 Discussie en conclusies

8.1 Discussie

Vanuit het historische onderzoek en de UVOST sonderingen is gebleken dat de resultaten van de UVOST sonderingen consistent zijn met de hypothese dat de pure teer de bodem inzakt tot op de kleilaag op ca. 45 m -mv en zich daarbij mogelijk ook horizontaal van NO naar ZW richting verplaatst. Historisch onderzoek laat een oude leiding zien en een teerput in de noordoostelijke hoek van het Griftpark en op deze plek wordt tot op 7 m -mv pure teer aangetoond. Zowel uit de UVOST sonderingen als uit de camera inspectie en zaklaagmetingen is gebleken dat er zich waarschijnlijk een laag van enkele meters dikke pure teer in B22/locatie 16 bevindt. Dit duidt op een mogelijke NO-ZW richting waarin de teer zich tijdens het uitzakken naar de kleilaag horizontaal beweegt richting locatie 16. Het is ook mogelijk dat de teer in B22 vanuit een ondiepere laag via de put op deze diepte terecht is gekomen. Het signaal in de UVOST metingen op locatie 16 op een interval van enkele meters vlak boven de kleilaag duidt op een significante hoeveelheid teer die zich daar op de kleilaag bevindt. Locatie 12, in zuidelijke richting laat een minder duidelijk signaal zien.

De aanwezigheid van pure teer op de kleilaag geeft een potentieel risico op verticale migratie van de teer door de kleilaag naar het tweede watervoerende pakket. Door de hoge dichtheid en hydrofobe eigenschappen van teer, zal er onder invloed van zwaartekracht een drijvende kracht bestaan voor verticale migratie.

De tijdschaal van deze migratie is onzeker en afhankelijk van factoren zoals kleidikte, porositeit, aanwezigheid van discontinuïteiten en chemische interacties tussen teer en kleimatrix. Dit betekent dat, hoewel de kleilaag op korte termijn een effectieve barrière lijkt, er op lange termijn een reëel risico bestaat op doorbraak naar diepere watervoerende lagen, wat kan leiden tot secundaire bronvorming en uitbreiding van de verontreinigingspluim.

In de 1-D modellering is de gemeten viscositeit en dichtheid van het teer van het Griftpark uit B22 gebruikt. De pure teer in het Griftpark heeft een hogere dichtheid en een hogere viscositeit dan de pure teer in de vetgasfabriek in Amersfoort. Dit resulteert in een langzamere stroming en hogere opbrengst. De modellering laat zien dat oppompen van pure teer in het Griftpark wat betreft de eigenschappen van het teerproduct mogelijk is op basis van de gemeten viscositeit en dichtheid.

Uit de fysische eigenschappen blijkt dat Griftpark B22 teer relatief zwaar, stroperig en hydrofoob is. Dit is in overeenstemming met de neiging om als pure fase in de bodem aanwezig te zijn. De GC-MS analyses laten zien dat de bemonsterde teer voor 20% (w/w) uit mono- en di-cyclische aromatische koolwaterstoffen bestaat. Van de gedetecteerde componenten waren naftaleen en andere di-cyclische aromatische koolwaterstoffen in 9 keer hogere concentraties aanwezig dan mono-cyclische aromaten. Het is aannemelijk dat het grootste deel van de niet met onze GC-MS analyse geïdentificeerde componenten zwaardere PAK zijn. Hoewel deze stoffen minder goed in grondwater oplossen en minder mobiel zijn, is het aan te bevelen om in de toekomst ook PAK-analyses en indicatoren voor natuurlijke afbraak mee te nemen. Hiermee kan een beter inzicht worden verkregen in de mogelijke verspreiding en risico van zwaardere teercomponenten in het grondwater.

De partitietest waarmee het oplossen van teercomponenten vanuit de pure fase in het grondwater is vastgesteld, bevestigt het ontstaan van hoge concentraties mono- en di-cyclische aromatische koolwaterstoffen. Zowel het in de huidige test gemeten patroon als de concentraties van aromaten komen goed overeen met in het verleden in B22 grondwater

gemeten verontreiniging. Dit suggereert dat het grondwater dat met bronpomp B22 wordt onttrokken verzadigd is met teer die in samenstelling sterk lijkt op de in dit project bemonsterde teer. De in dit onderzoek bepaalde verdelingscoëfficiënten van individuele teeraromaten zijn input voor model- en afbraakstudies waarmee verspreiding van deze stoffen in het grondwater in verschillende scenario's kan worden gesimuleerd en voorspeld (Deltares 2021, Faber 2023, Deltares 2017, Deltares 2019).

De tracertest met fluoresceïne laat zien dat de door ons gebruikte methode van nat slurry pakken geschikt is om homogene, volledig met water verzadigde zandkolommen te verkrijgen. Tijdens het met teer beladen ontstond er weliswaar een toename van het porievolume in de kolommen, maar dit herstelde zich direct na het starten van teer draineren. In kolommen met grof zand was de stroomsnelheid van water lager en van teer hoger dan in de kolommen met fijn zand. Dit kan mogelijk verklaard worden door de hogere porositeit van het hier gebruikte fijne zand. Een andere mogelijkheid zou kunnen zijn dat de aanwezige teer blokkerend werkt. Het zou goed zijn om dit met modellering te bevestigen (Deltares, 2025). In de praktijk betekent dit dat de teer zich vooral door grovere zand- en grindlagen in de bodem kan verplaatsen. De bepalingen van de volumes opgevangen en residuaire teerlaten zien dat uit grof zand ca. 94% en uit fijn zand ca. 76% van de gedoseerde teer verwijderd werd. Na drainage was de residuaire teer heterogeen verdeeld in de sedimentkolommen aanwezig. In het grove zand was op gewichtsbasis na drainage $2,1 \pm 0,6\%$ en in het fijne zand $7,1 \pm 1,8\%$ residuaire teer aanwezig. Wanneer in het Griftpark teer zou worden opgepompt dan kan dat het snelst uit de grovere lagen worden gedaan, waaruit ook de meeste teer kan worden onttrokken. Het experiment waarin water door een gedraineerde kolom gerecirculeerd werd laat zien dat uit de residuaire teer hoge concentraties aromaten in het water oplossen.

Het batchexperiment waarin de afbraak van acht teeraromaten in B22 grondwater is onderzocht bevestigt dat al deze uit teer opgeloste stoffen onder anaerobe omstandigheden kunnen worden afgebroken (Blott et al., 2001). Wanneer er geen elektronenacceptor aan het grondwater werd toegevoegd lagen de kortste halfwaardetijden in de range van 4 tot 12 jaar. Het doseren van ijzer(III)hydroxide of nitraat stimuleerde alleen de afbraak van ethylbenzeen, en niet die van de andere aromaten. Sulfaat stimuleerde de afbraak van alle aromaten, met de kortste halfwaardetijden in de range van 0,6 tot 2,9 jaar. Dit is een belangrijke waarneming, omdat in het Griftpark op enige meters afstand van verontreinigingsbronnen veel sulfaat beschikbaar is in het grondwater (Blott et al., 2001). Het is goed mogelijk dat de microbiële populaties in het Griftpark zich hierom sterk hebben aangepast aan de anaerobe afbraak van teeraromaten met sulfaat als elektronenacceptor.

De in de batches gevonden afbraakconstanten kunnen niet zomaar gebruikt worden voor (scenario) modellering van de verspreiding van verontreiniging in het grondwater. De omstandigheden voor afbraak zijn in het laboratorium namelijk geoptimaliseerd. Daarnaast is het door de relatief korte meetperiode van 5 jaar nog niet mogelijk om betrouwbare berekeningen te doen van afbraak met halfwaardetijden >10 jaar. Voor modellering moet daarom rekening gehouden worden met ten minste 2 tot 10 keer lagere afbraaksnelheden dan gevonden in deze batchexperimenten.

8.2 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was om de haalbaarheid van teerpompen te beoordelen. Om deze vraag te beantwoorden is onderzoek uitgevoerd naar de omvang, verdeling en het gedrag van de teer, evenals naar de fysische eigenschappen, waaronder viscositeit, soortelijk gewicht, watergehalte, kookpunt en het oppervlaktetensionsverschil tussen water en teer.

De analyses van de opgepompte teer uit bron B22 tonen aan dat deze teer relatief zwaar en stroperig is in vergelijking met de teer die bij de vetgasfabriek in Amersfoort is aangetroffen. UVOST sonderingen bevestigen de aanwezigheid van de teer als zaklaag tot op de kleilaag, met een mogelijke dikte van enkele meters. Dit wijst op een significante bron op deze diepte met een risico op verticale migratie door het kleipakket richting het tweede watervoerend pakket. Op basis van 1-D modellering met de gemeten dichtheid en viscositeit blijkt dat het technisch mogelijk is om pure teer op te pompen. Drainage experimenten met kolommen tonen aan dat de verwijderingsefficiëntie afhankelijk is van de korrelgrootte: grof zand bevatte na drainage gemiddeld slechts $2,1 \pm 0,6\%$ residuaire teer, tegenover $7,1 \pm 1,8\%$ in fijn zand. Dit impliceert dat oppompen vooral effectief kan zijn in zones met hoge permeabiliteit. Chemische analyses laten zien dat de teer voor circa 20% bestaat uit mono- en di-cyclische aromatische koolwaterstoffen (PAK's). In een partitietest bij 12°C loste maximaal $28,6 \text{ mg/L}$ detecteerbare aromaten op in het grondwater, en zijn de verdelingscoëfficiënten voor 24 aromaten bepaald. Na drainage bereiken kolommen binnen één week maximale oplosbaarheids concentraties bij de aromaten, wat wijst op een verhoogde oplossing vanuit residuaire teer.

Biodegradatie-experimenten onder anaerobe condities tonen aan dat toevoegen van sulfaat de afbraak van aromaten significant versnelt (halfwaardetijden $0,6\text{--}2,9$ jaar), terwijl het toevoegen van ijzer(III)hydroxide en nitraat slechts beperkte effecten had.

Geconcludeerd kan worden dat er aanwijzingen zijn dat de teer in het Griftpark wat betreft fysische eigenschappen oppompbaar is. Daarnaast zijn er aanwijzingen uit de UVOST sonderingen dat er een significante hoeveelheid teer aanwezig is tot op de kleilaag. Dit duidt op haalbaarheid van teerpompen in het Griftpark als techniek om puur product te verwijderen. Als deze techniek ingezet zou worden, is er aanvullend onderzoek nodig om meer inzicht te krijgen in de distributie en hoeveelheid teer die aanwezig is.

De resultaten van dit onderzoek zullen meegenomen worden in het project *Modellering en monitoring afbouw grondwateronttrekking Griftpark* (Deltares 11204855).

In dit project wordt een monitoringsstrategie ontwikkeld ten behoeve van het nieuwe nazorgplan op basis van modellering. Scenario's worden gedefinieerd en gemodelleerd op basis van onzekerheden in de opbouw van de bodem en afbraakparameters, waarbij ook rekening wordt gehouden met de aanwezigheid van puur product.

De monitoringsstrategie zal bestaan uit compliance monitoring (controle of een verontreiniging zich over de grens van een beheersgebied of zich naar een receptor dreigt te verspreiden) en trend en proces monitoring (ter inzicht of aangenomen parameters in de veldsituatie correct zijn). Binnen de trend en proces monitoring zal ook de onzekerheid over de aanwezigheid van pure teer worden meegenomen.

1. Blott, S. J. & Pye, K. Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf Process Landf* **26**, 1237–1248 (2001).
2. Brown, D. G., Gupta, L., Kim, T. H., Keith Moo-Young, H. & Coleman, A. J. Comparative assessment of coal tars obtained from 10 former manufactured gas plant sites in the Eastern United States. *Chemosphere* **65**, 1562–1569 (2006).
3. Bussink, T., van der Velde, A., & van Leeuwen, J. (2019). *Gefaseerd saneringsplan voormalige Vetgasfabriek Amersfoort*.
4. Dam, van R. MSc thesis. Numerical sensitivity analysis of DNAPL flow in a simulated column experiment for Griffpark tar. (Wageningen University, 2023).
5. Deltares rapport, Gerritse, J., Sommer, E., Meuwissen, D., Braaksma, S. & van Leeuwen, J. *Karakterisering En Natuurlijke Afbraak van Teer Aromaten in Het Griffpark*. (2021).
6. Deltares rapport, Gerritse, J. *Onderzoek Naar Het Voorkomen En Het Biologische Afbraakpotentieel van Teerverontreiniging in Het Tweede Watervoerende Pakket van Het Griffpark*. (2025).
7. Deltares rapport 2014, de Weert, J. & van Leeuwen, J. A. *Gedrag van Mobiele DNAPL Op Temperatuursinvloed Tot 50°C in Verontreinigde Bodem*. (2014).
8. Deltares rapport 2019, Gerritse, J., van Leeuwen, J. A., van der Waals, M. & Marsman, A. *Anaerobe Afbraak van Aromatische Koolwaterstoffen Door Biostimulatie En Bioaugmentatie - Een Veldtest Bij Een Voormalige Gasfabriek*. (2019).
9. Deltares rapport 2017, Gerritse, J. *et al. Onderzoek Naar de Anaerobe Afbraak van Benzeen Op de Locatie van Een Voormalige Vetgasfabriek*. (2017).
10. Elezi, N. MSc thesis, Removal of tar from the contaminated subsurface of Griffpark in Utrecht, the Netherlands, and its biodegradation by microorganisms. (Radboud University Nijmegen, 2023).
11. Faber, S. C. PhD thesis, Field investigations and reactive transport modelling of biodegrading coal tar compounds at a complex former manufactured gas plant. (Utrecht University, Utrecht, 2023).
12. Van Leeuwen, J. A. *et al.* The dissolution and microbial degradation of mobile aromatic hydrocarbons from a Pintsch gas tar DNAPL source zone. *Science of the Total Environment* **722**, (2020).
13. OECD 312. OECD Guidelines for the testing of chemicals - Leaching in Soil Columns. 1–15 Preprint at (2004).
14. Physical and Chemical Hydrogeology - Patrick A. Domenico, Franklin W. Schwartz - Google Books.
https://books.google.nl/books?hl=en&lr=&id=aCijEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Domenico+and+Schwartz+1998+Physical+and+chemical+hydrology&ots=TpNr1Vawlv&sig=IBqWNS-Z0P6u_HwA2yZ-V40spMg#v=onepage&q&f=false.
15. Rixey, W. G., Garg, S. & Nie, Y. Comparison of the fixed-bed and batch leaching characteristics of aromatic compounds in residually trapped crude oils and oily wastes. *J Hazard Mater* **64**, 137–156 (1999).

16. Sommer E. MSC thesis. Assessing the microbial potential for aromatic hydrocarbon degradation in groundwater from the Griftpark, Utrecht and in batch experiments. (Utrecht University, Utrecht, 2018).

10 Bijlagen

- Bijlage 1. Archiefonderzoek Griffpark Utrecht
- Bijlage 2. Camera Inspectie (CTA Watertechnologie)
- Bijlage 3. UVOST sonderingen
- Bijlage 4. Verslag 1-D modellering
- Bijlage 5. Analysecertificaten
- Bijlage 6. SGS teeranalyse
- Bijlage 7. BRIEFRAPPORT VERSLAG ONDERSTEUNING VELDONDERZOEK EN ANALYSERESULTATEN GROND BORINGEN A, B EN C GRIFTPARK TE UTRECHT
- Bijlage 8. Internship report N. Elezi

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl