

Conceptueel model, hypotheses en strategie voor procesmonitoring – opzet van het nul-onderzoek

Concept, dd. 03-12-2012.

Auteurs: T.J. Heimovaara, H. Oonk, R. Comans

N.b. Dit document betreft een tussenproduct.

Samenvatting

Tot in het begin van de jaren negentig van de vorige eeuw werd het merendeel van het Nederlandse afval verwerkt op stortplaatsen. Emissies uit deze stortplaatsen worden beheerst door IBC-maatregelen (Isoleren, Beheersen en Controleren). De verspreiding van emissies wordt voorkomen. De verontreinigingsbron zelf blijft hierbij in stand. Het project Introductie Duurzaam Stortbeheer richt zich op het toepassen van brongerichte maatregelen, waarmee het emissiepotentieel van stortplaatsen substantieel kan worden verminderd. Wanneer succesvol, leidt dit tot een afname van het risicopotentieel van stortplaatsen en daarmee tot een reductie van nazorginspanningen.

Voor demonstratie van duurzaam stortbeheer worden drie pilotprojecten voorbereid. Het doel van deze pilotprojecten is het aantonen dat dit concept succesvol kan worden toegepast in de Nederlandse context. Opzet en uitvoering van deze pilots is beschreven in een Integraal Plan van Aanpak [Oonk 2012] en ter beoordeling voorgelegd aan de Technische Commissie Bodem (TCB). Advies van de TCB [TCB 2012] was onder meer om concrete hypothesen te formuleren, die ten grondslag liggen aan duurzaam stortbeheer. Deze hypothesen dienen de basis te vormen voor een verdere uitwerking van de meet- en monitoring activiteiten die bij de start, gedurende en na afloop van de pilotprojecten worden uitgevoerd. Dit document is een invulling daarvan.

Het emissiepotentieel van het afvalpakket is de hoeveelheid verontreiniging, die op een zeker moment in het afvalpakket potentieel uitloogbaar is. Dit emissiepotentieel wordt bepaald door de afvalsamenstelling, de mate waarin biologische afbraak van organisch materiaal heeft plaatsgevonden en de chemische en fysische omstandigheden in het afvalpakket, zoals pH, redox en temperatuur. Het emissiepotentieel komt vrij als gevolg van uitspoeling met infiltrerende neerslag. De kwaliteit van het vrijkomend water (percolaat) wordt deels bepaald door het emissiepotentieel van het afval, maar deels ook door de manier waarop water zich door het afvalpakket verplaatst. Dit gebeurt vooral via een beperkt aantal voorkeurskanalen. Verontreiniging uit andere delen van het afvalpakket kunnen alleen vrijkomen, wanneer deze door middel van diffusie vanuit de bulk van het afvalpakket in een voorkeurskanaal terecht komen. Wanneer door stimulering van biodegradatie deze versneld en meer compleet afloopt, neemt het emissiepotentieel af. Voor andere componenten kan het emissiepotentieel worden gereduceerd door uitspoeling. Dit wordt nagestreefd bij het nemen van verduurzamingsmaatregelen als percolaatinfiltatie en beluchting.

Een tweede doel van het project IDS is het vergroten van de kennis van de processen die plaatsvinden in het afvalpakket zodat het emissiegedrag van het afvalpakket op de (zeer lange) termijn kan worden voorspeld. Een aantal deelprocessen kan al adequaat modelmatig worden beschreven. Hier sluiten modelvoorspellingen op basis van mechanistische inzichten goed aan bij waarnemingen in het veld. Een voorbeeld hiervan is de kennis van geochemische processen die de uitloogbaarheid controleren van de anorganische componenten in het afval. Voor een aantal andere processen is overwegend empirische informatie beschikbaar en is het mechanistisch beeld nog onderontwikkeld. Een voorbeeld hiervan is de kennis over de veranderingen in de concentraties en samenstelling van organische stof als gevolg van de afbraak in het afvalpakket (zowel in termen van het vaste materiaal als ook in het percolaat). De afbraak heeft een grote invloed op de mate van vastlegging van metalen en organische microverontreinigingen in het afvalpakket. Daarnaast is er een belangrijke kennishiaat op het gebied van de hydrologie van het afvalpakket. Hier ontbreken goede monitoringgegevens waar modelvorming op kan worden gebaseerd.

Dit document geeft een overzicht van de belangrijkste hypothesen die de basis vormen voor de maatregelen die leiden tot een verlaging van het emissiepotentieel. Het emissiepotentieel van het afvalpakket wordt vooral bepaald door de vorm van verontreinigingen in het afvalpakket. De aanname is dat makkelijk afbreekbare organische stof in het afvalpakket leidt tot verhoogde emissies door een reeks van processen. De verduurzamingsmaatregelen zijn er op gericht om de hoeveelheid makkelijk afbreekbare organische stof in het afvalpakket binnen relatief korte tijd aanzienlijk te verlagen waardoor de emissies sterk zullen afnemen. Vanuit deze hypothesen is het monitoringprogramma van de pilotprojecten opnieuw tegen het licht gehouden. Het accent op monitoring van de dynamiek van hoeveelheid en samenstelling van vrijkomend percolaat is verzaagd (ten opzichte van de plannen in het Integraal Plan van Aanpak). In aanvulling daarop worden monsters genomen in het afval. De monsters dienen onder meer voor validatie van modellen voor beschrijving van ontwikkeling van de percolaatkwaliteit. Tenslotte wordt zwaarder accent gelegd op de chemische vormen en reactiviteit van organisch materiaal in oplossing en beschrijving van de ontwikkeling hiervan als gevolg van de verduurzamingsmaatregelen.

De opzet en uitvoering van het nulonderzoek voorafgaande aan de verduurzamings pilots is een integraal onderdeel van het monitoringprogramma. Om de dynamiek van percolaatkwaliteit als gevolg van variaties in regenval goed te begrijpen zal het nul-onderzoek minimaal één jaar moeten omvatten.

1 Introductie

1.1 Doelstelling duurzaam stortbeheer

In het door het ministerie van IenM opgestelde projectplan staat de doelstelling van duurzaam stortbeheer als volgt verwoord:

Het doel van duurzaam stortbeheer is om het emissiepotentieel van de verontreinigingen in stortplaatsen substantieel terug te brengen, zodanig dat de eeuwigdurende nazorg en nazorgkosten substantieel kunnen worden verminderd of geminimaliseerd. Dit onder voorwaarde dat de immissies van stoffen naar de omgeving (belasting van bodem, (grond)water en lucht) zowel voor de korte als lange termijn acceptabel zijn binnen de doelen van het preventieve beleid. Voor de toetsing hierop worden zogenoemde emissiegrenswaarden opgesteld.

Verder is het de bedoeling dat lichtere vormen van eindafwerking mogelijk worden wanneer duidelijk is dat het acceptabele emissieniveau (emissie grenswaarden) niet wordt overschreven.

Als nadere toelichting wordt vervolgens het volgende gesteld:

Sinds enige jaren wordt in binnen- en buitenland gewerkt aan de ontwikkeling van innovatieve technieken zoals duurzaam storten, in-situ stabilisering en duurzame nazorg. Deze technieken zijn erop gericht stortplaatsen zodanig te beheren dat een stabiele en inherent veilige situatie wordt bereikt.

Duurzaam stortbeheer is gebaseerd op de wetenschap dat in het gestorte afval gunstige omstandigheden voor het optreden van biochemische processen aanwezig zijn. Met deze processen kan het emissiepotentieel van verontreinigende stoffen in het stortpakket substantieel worden verminderd of zodanig worden geneutraliseerd, dat de restemissies uit het stort volledig aanvaardbaar zijn.

De manier om stortplaatsen een duurzaam karakter te geven, is ervoor te zorgen dat de natuurlijke biochemische processen in het afval in stand worden gehouden én worden gestimuleerd en/of geoptimaliseerd. Hiervoor is de structurele aanwezigheid van water en lucht een absolute randvoorwaarde. Aanleg van een water- (en gas-) dichte bovenafdichting, zoals huidige regelgeving dat voorschrijft, werkt contraproductief op deze processen.

Tijdens de (natuurlijke) afbraakprocessen komen verontreinigende stoffen in het afvalpakket vrij, of ontstaan stoffen ten gevolge van de afbraak. Het stimuleren van deze processen zal in die periode leiden tot een toename van het vrijkomen van deze stoffen binnen het stortpakket. De betreffende stoffen worden voor zover aanwezig in het percolaat opgevangen, afgevoerd en behandeld in een waterzuiveringsinstallatie in de periode dat nog een functionerende onderafdichting aanwezig is. Stimulering van de processen zal naar verwachting niet leiden tot een verhoogde immissie van stoffen naar bodem- en grondwater, c.q. tot een verhoogde belasting van de bodem met verontreinigde stoffen. Nadat de processen tot een eind zijn gekomen, zijn de meeste verontreinigingen door afbraak en uitspoeling uit het afvalpakket verwijderd of gebonden aan de vaste delen van het afval. Ook als er in de verre toekomst nog water door het stort stroomt, zullen de op dat moment nog aanwezige, en aan de vaste fase gebonden stoffen, naar verwachting niet tot onacceptabele emissie uit het afvalpakket leiden. Om dit te toetsen worden binnen dit project zogenaamde emissiegrenswaarden opgesteld. Een goed functionerende onderafdichting van de stortplaats (of daaraan conform het Stortbesluit gelijkwaardig gestelde voorziening) is vanuit het oogpunt van bodembescherming een harde voorwaarde gedurende de periode waarin de proeven voor duurzaam stortbeheer worden uitgevoerd.

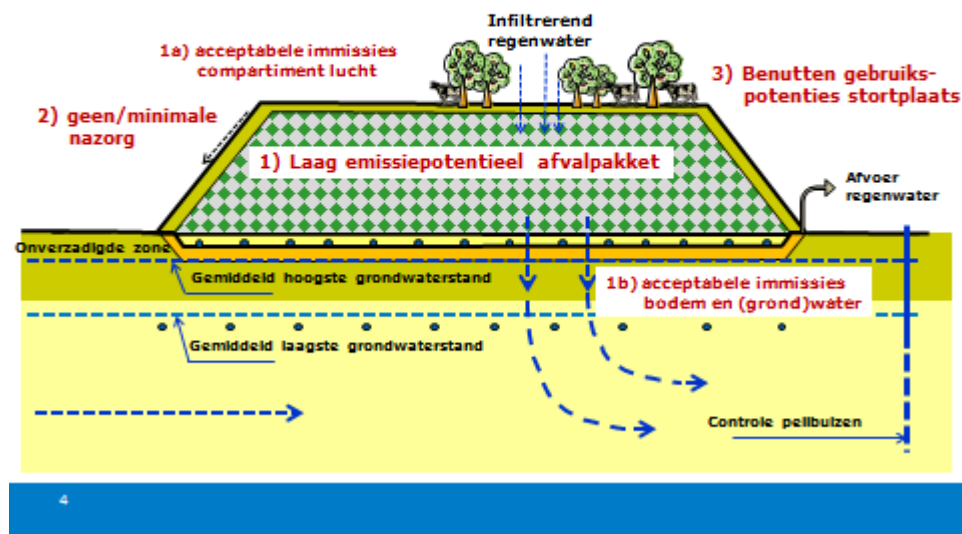
Op basis hiervan wordt geconcludeerd dat het primair gaat om het emissiepotentieel van het afvalpakket zelf, dus om de mogelijkheid dat verontreinigende stoffen op enig moment wel/niet uit de stortplaats kunnen emitteren richting bodem, (grond)water en lucht.

De hoofddoelstelling van duurzaam stortbeheer is dus het realiseren van een voldoende laag emissiepotentieel van het afvalpakket (doelstelling 1 van figuur 1). Dit dient zodanig laag te zijn, dat de daarbij mogelijk optredende emissies naar bodem, (grond)water en lucht vallen binnen hetgeen toelaatbaar is vanuit het vigerende beschermingsbeleid, bij voorkeur zonder beschermende (isolerende) voorzieningen (1a en 1b van figuur).

De uit de hoofddoelstelling afgeleide doelen zijn:

- Het substantieel verlagen van de toekomstige nazorg, zoals het kunnen afzien van isolerende voorzieningen aan de bovenzijde van de stortplaats (doelstelling 2 van figuur 1);
- Het vergroten van de ruimtelijke gebruiksmogelijkheden (doelstelling 3).

Doelstelling verduurzamen



Figuur 1: Doelstelling duurzaam stortbeheer

De discussies die zijn gevoerd in de afgelopen jaar hebben geleid tot een behoefte aan een document waarin de hypothesen die ten grondslag liggen aan duurzaam stortbeheer zijn samengevat. Deze hypothesen dienen de basis te vormen voor een verdere uitwerking van de meet- en monitoring activiteiten die bij de start, gedurende en na afloop van de pilotprojecten worden uitgevoerd.

Dit document beschrijft de concepten die de inhoudelijke basis vormen voor de experimenten en activiteiten die zullen worden uitgevoerd in het kader van de pilotprojecten. Vanuit deze inhoudelijke basis wordt een aantal hypothesen geformuleerd t.a.v. de processen in het afvalpakket van de pilotstortplaatsen tijdens het verduurzamen. Deze hypothesen dienen getoetst te worden gedurende de uitvoering van de pilotprojecten op basis van kwantitatieve metingen. De meet- en monitoringactiviteiten voor het vaststellen van de nulsituatie en het monitoren en sturen van de ontwikkelingen gedurende de pilotprojecten worden beschreven.

Het document is een werkdocument voor gebruik binnen het kernteam van de stichting duurzaam storten. Daarnaast is het document bedoeld om andere inhoudelijk geïnteresseerden te informeren en in staat te stellen de activiteiten van het kernteam te beoordelen. Het karakter van een werkdocument brengt met zich mee, dat minder aandacht is besteed aan bijvoorbeeld vormgeving. Voor inhoudelijke referenties wordt verwezen naar het review, geproduceerd door TU Delft (2011).

Dit document is leidend bij de opzet en uitvoering van de monitoring van de verduurzamingspilots. Een samenvatting van dit document wordt vastgelegd in het integraal plan van aanpak. Voor de afzonderlijke pilots wordt de monitoring vervolgens verder uitgewerkt in deelplannen van aanpak.

Gedurende de looptijd van de pilotprojecten is het noodzakelijk de effectiviteit van de verduurzamingsmaatregelen te beoordelen (procesmonitoring). Aan het einde van het project dient op basis hiervan en door middel van een verificatieonderzoek te worden vastgesteld in hoeverre aan de doelstelling is voldaan (eindonderzoek). De in ontwikkeling zijnde Emissie Toetswaarden (ETW) spelen hierbij een belangrijke rol. De wijze waarop de ETW dienen te worden gebruikt bij deze beoordeling is vastgelegd in de 'Handreiking gebruik emissietoetswaarden'.

1.2 Conceptueel model & hypothesen

De beschrijving van de processen die met het treffen van maatregelen in het kader van het verduurzamen worden geïnitieerd en/of gestimuleerd vindt plaats op basis van een conceptueel model. Met dit conceptueel model is het mogelijk om op basis van aanwezige inzichten en kennis de consequenties van deze processen te "kwantificeren". Omdat op dit moment veel kennis ontbreekt van de betekenis van de diverse factoren die deze processen beïnvloeden wordt het weergeven van het verloop van deze processen in de tijd gedaan op basis van een groot aantal aannamen en veronderstellingen. Het gaat derhalve om hypothesen, die tijdens het verduurzamingsproces zullen worden getoetst op basis van gegevens verkregen uit meet en monitoring activiteiten.

Het conceptueel model en de hypothesen moeten de inzichten die er zijn over processen die optreden in het afvalpakket beschrijven in de context van de maatregelen die worden geïmplementeerd in de verschillende pilotprojecten. Ze geven daarmee een inhoudelijke verklaring voor de effecten van de maatregelen op het emissiegedrag van het afvalpakket en hoe dit emissiegedrag zal veranderen als gevolg van de geïmplementeerde maatregelen. Veel van de achterliggende kennis is gebaseerd op wetenschappelijke kennis en inzichten. In dit document wordt getracht een meer algemene beschrijving te geven. Het belangrijkste doel van deze beschrijving is hoe we op basis van waarnemingen aan het afvalmateriaal, het geproduceerde percolaat, de onttrokken stortgas, etc., inzicht krijgen in de beoogde verandering van het emissiepotentieel. Deze beschrijving moet de onderbouwing geven voor het meet- en monitoringprogramma dat wordt gebruikt om de nulsituatie en ontwikkeling in het emissiepotentieel tijdens de uitvoering van de pilotprojecten vast te stellen. De metingen zullen ook gebruikt worden om de procesvoering zo optimaal mogelijk te laten verlopen.

2 Processen

2.1 Biologische afbraak

2.1.1 Anaerobe afbraak

Het grootste deel van de organische stof aanwezig in het afval zal onder anaerobe (zuurstofloze) omstandigheden door micro-organismen worden omgezet in methaan. Dit is een proces dat verloopt langs een aantal stappen: hydrolyse → fermentatie → acetogenese → methanogenese. In de praktijk komen de diverse stappen naast elkaar voor. In oude stortplaatsen is de snelheidsbepalende stap het “afbreken” van het vaste organische materiaal, ofwel de hydrolyse. Eenmaal in oplossing wordt het opgeloste organische stof door micro-organismen verder relatief snel omgezet volgens genoemde stappen.

Hydrolyse is de splitsing van een organisch molecuul onder opname van een watermolecuul. Afhankelijk van het te hydrolyseren organische molecuul ontstaan carbonzuren, vetzuren, alcoholen, suikers, amines, aminozuren etc. Bij hydrolyse wordt complex, onopgelost materiaal omgezet in minder complex opgeloste organische stoffen, die vervolgens door in de waterfase levende micro-organismen worden opgenomen en verder afgebroken.

Bij **fermentatie** worden de opgeloste stoffen omgezet naar nog eenvoudigere verbindingen, die weer worden uitgescheiden. Deze zogenoemde fermentatieproducten zijn vluchtige vetzuren, alcoholen, melkzuur CO_2 , NH_3 , H_2S , etc. Met de energie dat beschikbaar komt, kunnen de micro-organismen overleven en groeien.

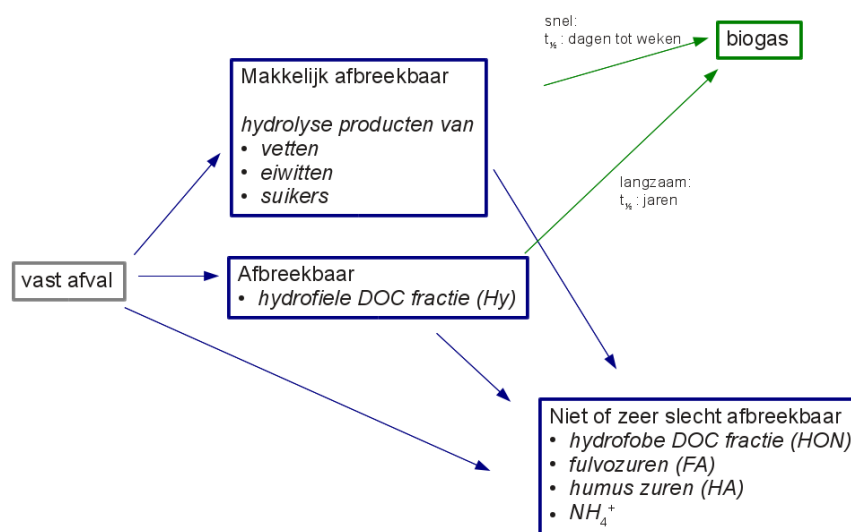
Naarmate het systeem verder gereduceerd raakt worden deze fermentatie producten omgezet naar acetaat, waterstof en carbonaat. Dit proces wordt **acetogenese** genoemd. Acetaat, waterstof en carbonaat worden in de methanogenese stap omgezet naar methaan, CO_2 en nieuw celmateriaal. **Methanogenese** treedt alleen op onder zeer reducerende omstandigheden.

Hoewel fermentatie, acetogenese & methanogenese de dominante biologische processen zijn in het afvalpakket, zullen micro-organismen ook andere beschikbare **elektronenacceptoren** benutten. Het consortium aan micro-organismen heeft een sterke voorkeur voor bepaalde elektronenacceptoren als deze beschikbaar zijn. In afnemende voorkeursvolgorde zijn de belangrijkste: zuurstof, nitraat, Fe(III), Mn(IV) en sulfaat waarbij de volgorde overeenkomt met afnemende energie opbrengst bij de omzetting van organische stof. De snelheid waarmee deze elektronenacceptoren worden omgezet is groot in vergelijking met de overige omzettingen. Met uitzondering van sulfaat en mogelijk ook Fe(III) is de nalevering van deze elektronenacceptoren in het afvalpakket beperkt.

De **snelheid** van de omzettingen hangt met name af van het soort afval (snel afbreekbaar keukenafval, matig afbreekbaar tuinafval of slechts langzaam afbreekbaar houtachtig materiaal), de aanwezige micro-organismen, eventuele limiterende factoren (onvoldoende substraat of nutriënten voor een maximale omzetting door gebrekkige hydrolyse of trage diffusie), toxische effecten van andere componenten (ammoniak, vetzuren, zware metalen en / of zouten), het vochtgehalte, de temperatuur en, de zuurgraad en zo nog een aantal factoren. Het gevolg is dat de omzetting van organische stof een relatief traag proces is in vergelijking met overige processen in het afval pakket zoals de vorming van minerale neerslagen, de emissie van gassen en het stromen van water.

De laatste stap, (methanogenese) is het proces waarmee organische stof uit het stortlichaam verdwijnt als gevolg van een overgang van de gevormde methaan en CO_2 naar de gas fase. Dit gas kan worden teruggewonnen door middel van de stortgasonttrekking of zal diffuus worden geëmitteerd naar de atmosfeer. Bij optimale condities voor gasvorming zal de snelheid waar mee organische stof in oplossing komt in **evenwicht** zijn met de snelheid waarmee het gevormde gas uit de oplossing verdwijnt. Het gevolg zal zijn, dat de DOC concentratie een min of meer constante waarde zal bereiken. Deze waarde wordt bepaald door de snelheid van hydrolyse en de snelheid van methaanvorming (verwijdering van DOC). Bij een lagere snelheid van gasvorming zal de DOC gehalte in oplossing bij gelijkblijvende hydrolyse snelheid moeten toenemen. Bij afnemende hydrolyse snelheden zal bij gelijkblijvende gasvormingssnelheid de concentratie van DOC moeten dalen.

Bovenstaande beschouwing is een grove vereenvoudiging van een complex systeem aan processen. DOC is een verzamelnaam voor grote hoeveelheid aan organische moleculen in oplossing. Een deel hiervan zal zeer eenvoudig afbreken, een deel zal niet afbreken en er is een deel dat matig tot slecht afbreekbaar is. Dit betekent dat er in de loop van de tijd een verschuiving in de samenstelling zal optreden (Huo et al., 2008). In het begin is er sprake van een hoge concentratie aan relatief makkelijk afbreekbaar materiaal, dat ook vrij snel wordt aangevuld door het hydrolyse proces. Naarmate de afbraak van het vaste materiaal vordert neemt het beschikbare makkelijk afbreekbaar materiaal af, de gasvormingssnelheid zal dan ook gaan dalen omdat slechts moeilijk afbreekbaar DOC beschikbaar is. In de vaste fase neemt de fractie aan niet afbreekbaar organisch materiaal toe, deze fractie wordt ook wel POC (Particulate Organic Matter) genoemd. Een illustratie van dit concept is te vinden in figuur 2. Naarmate het DOC steeds verder “verweert” is de verwachting dat de verhouding POC/DOC zal toenemen en dat de oplosbaarheid van de organische moleculen afneemt met de tijd, waardoor DOC gehalten in de tijd zullen dalen. Hoe dit precies mechanistisch in elkaar zit is momenteel onderwerp van veel wetenschappelijk onderzoek. Dit inzicht is van zeer groot belang voor de lange termijn voorspelling van de uitloging van zware metalen etc. waardoor metingen aan de samenstelling van DOC een belangrijk speerpunt zal moeten zijn gedurende de pilotprojecten.



Figuur 2, schema omzetting vast organisch materiaal naar biogas en DOC.

2.1.2 Aerobe afbraak

Mochten er lokaal in afvalpakket **zuurstofrijke** omstandigheden voorkomen dan zal zuurstof worden gebruikt als elektronenacceptor omdat dit de grootste hoeveelheid energie op levert voor een groot aantal micro-organismen. Het gevolg is dat een deel van het organische stof dat onder anaerobe omstandigheden niet afbreekt, onder aerobe omstandigheden nog wel afbreekt. Echter, onder normale omstandigheden is een afvalpakket methanogeen waardoor het een overmaat aan **reductiecapaciteit** heeft waardoor het niet waarschijnlijk is dat natuurlijke processen zullen leiden tot aerobe condities in het afvalpakket.

2.1.3 Gevolgen van biologische afbraak

Biologische afbraak van organische stof zorgt ervoor dat het afvalpakket in een sterk **gereduceerde status** komt. Door afbraak van organisch materiaal wordt de zuur-base neutraliserende capaciteit zuurgraad van het percolaat sterk gebufferd met pH waarden tussen 6.5 tot 8.5. In deze range is de oplosbaarheid van mineralen met zware metalen minimaal. De oplosbaarheid van metaaloxides, hydroxides, carbonaten etc. neemt af en de binding van metalen aan reactieve minerale oppervlakken en organische stof neemt toe met de verschuiving van zure naar neutrale pH. Voor oxyanion vormers zoals As, Se, Mo, Sb is dit echter minder gunstig.

Onder deze anaerobe omstandigheden komt zwavel vooral voor in de vorm van sulfiden die met **zware metalen onoplosbare mineralen** vormen. De vraag is daarbij wel of er voldoende sulfiden kunnen worden gevormd t.o.v. de beschikbare hoeveelheid/potentieel uitloogbare hoeveelheid metalen. Dit kan niet algemeen worden aangenomen (Baun and Christensen, 2004; Ostman et al., 2006). Waarschijnlijk zal substantiële sulfidenvorming grotendeels beperkt blijven tot de zones waar gips en/of bouw- en sloopafval is gestort.

Voortschrijdende biologische afbraak zal leiden tot een toename in de verhouding POC/DOC en deze verschuiving is de belangrijkste uitloging-bepalende factor. Voor metalen waarvan de vastlegging wordt gedomineerd door binding aan organische stof kan deze pH verschuiving weinig effect hebben, omdat deze zowel aan de POC als DOC kant optreedt en daarmee netto teniet kan worden gedaan (zie de vaak relatief lage pH gevoeligheid van Cu uitloging in organische stof rijke matrices).

Door de biologische afbraak verdwijnt vast organisch materiaal als methaan en CO₂ uit het afvalpakket. Het gevolg is dat de **porositeit** van het afvalpakket toeneemt totdat het door het eigen gewicht wordt dichtgedrukt (**zettingen**). Dit is waar te nemen als een spontane daling van het maaiveld (Olivier and Gourc, 2007).

Stikstof is een belangrijk bestanddeel van organische stof. Met de hydrolyse van vast organisch materiaal zal ook organisch stikstof in oplossing komen in de vorm van organische stikstofmoleculen (aminozuren) en ammonium. Een deel van dit stikstof wordt weer opgenomen in de biomassa van de micro-organismen maar verder zal dit stikstof vrij inert zijn. De concentraties in het percolaat zullen daardoor gelijk blijven of langzaam toenemen.

Zonder zuurstof zal stikstof niet afbreken. Met zuurstof kunnen bacteriën stikstof omzetten naar nitriet en nitraat, en vervolgens **denitrificeren** naar stikstofgas. Ammonium oxiderende bacteriën behorende tot de geslachten Nitrosomonas en Nitrosospiria kunnen ammonium oxideren naar nitriet. De tweede stap van nitriet naar nitraat wordt gedaan door bacteriën uit de geslachten Nitrospira en Nitrobacter.

In de derde stap kan nitraat vervolgens door andere bacteriën (zowel autotrofe als heterotrofe geslachten) onder zuurstofloze condities worden benut als elektronenacceptor. Hierbij wordt nitraat in enkele stappen gereduceerd tot stikstofgas (NO₃⁻ NO₂⁻ NO N₂O N₂).

Een alternatieve afbraak route van ammonium wordt gerealiseerd door de **Anammox** bacterie, hierbij wordt ammonium geoxideerd met behulp van nitriet als elektronenacceptor. In de waterzuiveringstechnologie worden op dit moment processen ontwikkeld waarmee een de eerste stap van nitrificatie tot nitriet wordt gekoppeld aan een tweede stap waarbij de Anammox bacterie de stikstof omzet in N₂. Het is niet zeker of dit proces ook kan optreden onder de ongecontroleerde omstandigheden zoals die voorkomen in het afvalpakket.

2.2 Waterstroming in het afvalpakket bij infiltratie

2.2.1 Onverzadigd systeem

Het waterpeil in IBC-stortplaatsen is afhankelijk van de mate waarin percolaat in het onder het afvalpakket liggende drainagesysteem wordt afgevoerd door middel van het drainagesysteem onder het afvalpakket. Het systeem wordt in het algemeen zo ingesteld dat de waterspiegel altijd onder de zool van het afvalpakket blijft. Het afgepompte percolaat in het drainagesysteem wordt (na behandeling) geloosd of naar een naar een waterzuivering afgevoerd. Het gevolg van deze waterbeheersing is dat het afvalpakket in **onverzadigde** conditie is. In de poriënvolume van het afval zal er naast gebonden water voornamelijk lucht aanwezig zijn. Het met water gevulde poriënvolume zal met de diepte toenemen als gevolg van een toenemende dichtheid van het afval. Het poriënvolume zal daardoor afnemen met toenemende de diepte waardoor meer water door capillaire krachten wordt vastgehouden in de kleine poriën (**poriënwater**). Waterstroming door onverzadigde systemen is een niet lineair proces. Kleine veranderingen in watergehalten kunnen daardoor grote effecten kunnen hebben op het stromingsgedrag van water.

In onverzadigde systemen zoals bodems wordt de waterstroming in het algemeen gedomineerd door de zwaartekracht. In stortplaatsen is deze situatie gecompliceerder. Het afvalmateriaal is zeer heterogeen en, heeft een grote variatie in porositeit. Daarnaast is door de manier van storten en compactie het afvalmateriaal in horizontale lagen verdicht. Dit betekent dat de waterdoorlatendheid grote variaties vertoont. In situaties met een hoge neerslag flux kan het zo zijn dat er lokaal in het afval gedeeltes ontstaan waarin het poriënvolume volledig met water is verzadigd, er is dan sprake van 'hangwater' (schijnwaterspiegels"). In deze gedeeltes is sprake van een stagnatie in de inzijging en kan (tijdelijk) horizontale stroming optreden.

Het gevolg van watertransport in een onverzadigd afvalpakket is dat het water zich voornamelijk langs **preferentiële stroombanen** zal bewegen (**voorkeursstroming**). Hierbij wordt een zeer groot deel van het afval niet direct doorstroomd door het water dat als neerslag op de stortplaats valt. Een zeer sterke aanwijzing voor de aanwezigheid van voorkeursstroming is het feit dat men al vrij snel (in de orde van uren tot dagen) na een grote regenbui, een toename ziet in percolaat productiesnelheden in het drainage systeem. Als er geen sprake zou zijn van preferentiële stroming zou men, bij een gemiddelde vochtgehalte van 10% en een gemiddelde neerslag hoeveelheid van 300 mm per jaar en een afvalpakket van 15 m hoogte, pas na ongeveer 5 jaar een effect in het drainage systeem kunnen waarnemen (15*0.1/0.300).

Globaal genomen bestaat het poriënwater in het afvalpakket uit twee delen, een deel dat aanwezig is in de voorkeurskanalen: **mobiel water**, en een deel dat aanwezig is buiten deze kanalen (in afval met een hoge porositeit met kleine poriëngroottes): **immobiel water**. Regenwater dat in het afvalpakket infiltreert, is in eerste instantie mobiel water. Een klein deel van dit water wisselt uit met de immobiele fractie. De mate van uitwisseling hangt af van de verblijfstijd van het water in het afvalpakket. In de literatuur is een stortplaats beschreven met een extreem gedrag van voorkeursstroming waarbij het stromingsvolume werd geschat op minder dan 2% (Laner et al., 2011). Dit betekent dat in dit geval meer dan 98% van het afvalpakket niet direct wordt doorspoeld.

2.2.2 Waterstroming, uitwisseling en percolaatsamenstelling

De *uitwisseling* tussen het mobiele en immobiele water aanwezig in het afvalpakket is een *traag proces* dat wordt gedomineerd door diffusie. Veel voorkeursstroming in combinatie met hoge stroomsnelheden (stevige regenbuien) leidt er toe dat de verblijfstijd van het regenwater in het afvalpakket vrij kort is, de mate van uitwisseling is dan gering waardoor het regenwater nauwelijks kan worden beïnvloed door het water uit het immobiele deel van het afvalpakket voordat het in de drainagesysteem komt. Er is dan weliswaar sprake van een groot volume aan geproduceerd percolaat, alleen deze percolaat kan een lage concentratie aan opgeloste stoffen hebben. Andersom, bij lage stroomsnelheden zal er wel sprake kunnen zijn van een significante uitwisseling. Percolaat productievolumes zijn klein, terwijl concentraties van opgeloste stoffen in dit percolaat hoger zullen zijn doordat er meer uitwisseling is geweest met het immobiele poriënwater. Gemiddeld genomen zullen de productievolumes en de kwaliteit van het percolaat, variëren tussen minimum en maximum waarden die sterk gerelateerd zijn aan het neerslag regime.

Watergehalte en waterdoorlatendheid zijn zeer sterk aan elkaar gerelateerd waarbij de relatie niet-linear is. Als de stroomsnelheid groter is dan de waterdoorlatendheid, dan zal het watergehalte in het systeem langzaam stijgen tot dat de stroomsnelheid en doorlatendheid gelijk zijn. Dit betekent ook dat het volume aan mobiel water toeneemt. Als de stroomsnelheid weer afneemt (na een periode van regelval), zal het watergehalte weer langzaam afnemen, waardoor het mobiel watervolume kleiner wordt. Hieruit volgt dat preferentiële waterstroming is een zeer dynamisch proces is, waarbij de mobiele en immobiele poriënvolumes sterk zullen variëren. Het kwantificeren van deze volumes is complex en sterk afhankelijk van de lokale omstandigheden.

2.2.3 Waterstroming in relatie tot biologische afbraak

De biologische afbraaksnelheid hangt sterk samen met het *watergehalte* en de mobiliteit van water. Biologische afbraak treedt overal op in het afvalpakket op waar het nat genoeg is, zowel in het mobiele als het immobiele deel van het afvalpakket. Afval dat gestort wordt is vrij droog en om de biologische afbraak op gang te brengen zal het afval moeten worden bevochtigd (Pommier et al., 2007). Het optreden van preferentiële stroming beperkt het bevochtigen van het afvalpakket in zijn totaliteit. Als gedurende langere tijd de stromingssnelheid van water in het afvalpakket wordt verhoogd, wordt de uitwisseling tussen het mobiele en het immobiele deel van het afvalpakket gestimuleerd. Dit leidt tot een bevochtiging van het immobiele deel van het afvalpakket wat zal leiden tot een verhoogde afbraak hetgeen is waar te nemen in verhoogde stortgasproductiehoeveelheden. Verhoogde afbraak leidt tot meer zettingen wat grote veranderingen te weeg brengt in de structuur van het afvalpakket. Deze veranderingen in het structuur leiden tot een verandering in het preferentiële stroomgedrag en daardoor veranderde uitwisseling met andere immobiele delen. Er is daardoor sprake van een positieve terugkoppeling tussen verhoogde waterstroomsnelheden, uitwisseling met het immobiele deel van het afvalpakket en versnelde biologische afbraak.

2.2.4 Stofftransport

Verontreinigende stoffen zullen, afhankelijk van de samenstelling, na verloop van tijd vanuit het afval oplossen in het poriënwater van het afval. Organische stoffen vooral als gevolg van hydrolyse en, anorganische verontreinigingen stoffen door een veelheid aan chemische reacties. Deze opgeloste stoffen zullen dan met het mobiele poriënwater *uitspoelen* naar het drainage systeem. Opgeloste stoffen aanwezig in het immobiele poriënwater zullen langzaam diffunderen naar het mobiele water. De diffusiesnelheid wordt bepaald door het watergehalte in de poriën van het afvalpakket en de lengte waarover de diffusie moet plaatsvinden. Hogere watergehalten en kortere diffusielengtes gaan gepaard met de grootste diffusiesnelheden.

De concentratie aan opgeloste stoffen dat uiteindelijk met het water uitspoelt in het drainage systeem zal afhangen van de *verblijftijd* van het water in het afvalpakket. Water met een korte verblijftijd zal lage concentraties hebben, water met een lange verblijftijd zal hogere concentraties hebben.

De *dynamiek* in infiltratie als gevolg van neerslag is zeer groot. Gemiddeld valt de neerslag (in de vorm van regen, ijzel, sneeuw of hagel) gedurende 7% van het jaar. De totale hoeveelheid neerslag per jaar ligt gemiddeld tussen 700 en 800 mm per jaar, met uitschieters naar lokaal 500 mm in zeer droge jaren en meer dan 1000 mm in zeer natte jaren. Het aantal dagen per jaar waarbij de neerslag groter is dan 20 mm/dag zijn in Nederland, ondanks klimaatveranderingen, nog zeer beperkt. In het grootste deel van de tijd valt veel minder neerslag. Dit betekent dat de gemiddelde stroomsnelheid in het afvalpakket kleiner of gelijk zal zijn aan 20 mm/dag. Door preferentiële stroming kan dit lokaal echter veel aanzienlijk groter zijn omdat binnen enkele dagen reeds effecten van extreme neerslag in het drainagesysteem zijn waar te nemen. De verblijftijd van dit water is zodanig kort dat dit water qua samenstelling sterk met regenwater overeenkomt.

2.3 Geochemische vastlegging

De vorm waarin chemische stoffen voorkomen wordt *speciatie* genoemd. De biologische afbraak van organisch materiaal (zie par. 2.1.3) onder methanogene omstandigheden gebeurt onder zeer sterk gebufferde omstandigheden waarbij de pH-waarden variëren tussen 6.5 en 8.5. Er zijn vrijwel geen sterke oxiderende componenten meer aanwezig. De concentratie in oplossing van een groot aantal zware metalen is in dit pH-regime relatief laag is ten opzichte van

zure of sterk alkalische condities. Dit hangt zowel samen met de oplosbaarheid van potentiële minerale fasen die in het afvalpakket kunnen ontstaan, als met de binding van metalen aan reactieve minerale en organische oppervlakken in het afval, die een pH-afhankelijke lading vertonen (zoals de belangrijkste functionele groepen in de organische stof en ijzer(hydr)oxides; zie hieronder).

Stortplaatsen bevatten een aantal **zwavel houdende afvalstromen** zoals bijvoorbeeld gips en vast organisch materiaal. Onder de heersende reducerende omstandigheden zal het zwavel vooral voorkomen als **sulfiden**. Sulfiden en zware metalen vormen **mineralen met een zeer lage oplosbaarheid**.

Het in algemene zin naar verwachting belangrijkste proces dat de uitloging van metalen in stortplaatsen bepaalt is de vorming van **organische metaalcomplexen**. Metalen kunnen sterk binden aan vooral carboxyl- en fenolische-functionele groepen in organische stof. In afval met een grote hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal zal door hydrolyse het gehalte aan organische stof in het percolaat (DOC) hoog zijn waardoor er veel organische metaal complexen in oplossing kunnen worden gevormd met een hoge metaal-uitloging tot gevolg. Op het moment dat de hoeveelheid beschikbaar organisch materiaal in het afvalpakket door afbraak vermindert en stabiliseert, wordt verwacht dat de oplosbaarheid van DOC en daarmee de concentraties sterk zullen dalen. Het gevolg is dat de verhouding POC/DOC toeneemt waardoor metalen sterker aan de vaste afvalmatrix gebonden worden en de metaalconcentraties in het percolaat zullen afnemen.

Toevoer van zuurstof zal leiden tot de **oxidatie** van gereduceerde componenten waaronder de sulfiden. Het gevolg is dat de zware metalen dan mogelijk weer in oplossing kunnen komen. De verwachting is dat dit een lokaal optredend proces is. Dit gecombineerd met het feit dat de hoeveelheid reducerende componenten aanwezig in methanogeen afval zodanig groot is dat toegevoerde zuurstof zeer snel wordt omgezet leidt tot de aanname dat oxidatie van sulfiden slechts een zeer beperkt effect zal hebben op de oplosbaarheid omdat de geoxideerde producten weer zullen worden gereduceerd als de zuurstof toevoer stopt. In (al dan niet periodieke) geoxideerde zones van het afvalpakket zullen echter ijzer(hydr)oxides neerslaan waar metalen en ook de meest reactieve fracties van DOC (humus- en fulvozuren) aan kunnen binden. Deze processen dragen onder oxiderende omstandigheden bij aan de binding van metalen aan de afvalmatrix.

Om de geochemische speciatie processen te beschrijven wordt aangenomen dat lokaal het systeem voor de anorganische reacties, inclusief de interacties tussen zware metalen en de (op dat moment aanwezige) organische stof, in **evenwicht** verkeert. Dit betekent dat de snelheid van de reacties ten opzichte van de tijdschaal van waarneming niet beperkend is en dat de speciatie voorspeld kan worden met behulp van geavanceerde geochemische speciatie modellen. De reductie en oxidatie reacties die optreden in het systeem worden gecontroleerd door de snelheid van microbiële afbraak van organische stof welke veel trager verloopt. Deze processen, die de concentraties en verdeling van reactieve organische stof tussen de vaste matrix en het percolaat bepalen, worden met behulp van een kinetische beschrijving gemodelleerd. De genoemde geochemische speciatie modellen zijn inmiddels zeer goed in staat om de interacties van metalen met vaste en opgeloste stof te beschrijven. Daarnaast zijn er inmiddels goede (en door ISO gestandaardiseerde) meetmethoden beschikbaar om de reactiviteit van organische stof te monitoren en deze modellen te parameteriseren.

2.4 Zettingen

Op een stortplaats treden een drietal vormen van zettingen op:

- 1 Primaire zettingen direct na het storten van het afval. Deze zettingen worden veroorzaakt door de herschikking van het afvalmateriaal onder het gewicht van het de bovenliggende afval. Na een periode van enkele maanden tot hooguit een jaar zijn deze snelle zettingen goeddeels uitgedempt. Voor duurzaam stortbeheer zijn deze zettingen niet meer relevant omdat er al jaren geen materiaal meer wordt gestort;
- 2 De tweede vorm bestaat uit de zettingen als gevolg van de afbraak van vast materiaal uit het afvalpakket als gevolg van hydrolyse en methaanvorming. Gedurende het afbraakproces neemt het poriënvolume aanvankelijk geleidelijk toe. Op een bepaald moment is de structuur van het afvalpakket door deze vergrote porositeit instabiel geworden waardoor het afvalpakket onder eigen gewicht zal inzakken. Dit leidt lokaal tot een spontaan optredende en soms aanzienlijke verkleining van het poriënvolume;
- 3 De derde vorm is zettingen als gevolg van de geleidelijke veranderingen in het afvalmateriaal. Hierbij speelt een groot aantal mechanische en hydrologische processen een rol. Deze zettingen verlopen zeer geleidelijk waarbij de snelheid naarmate de tijd vordert steeds verder zal afnemen.

3 Methoden om het Emissiepotentieel te verlagen

3.1 Technologische aanpak

De technologie achter duurzaam stortbeheer is in de praktijk ontwikkeld en wordt in verschillende landen al op ruime schaal toegepast. De aanpak is vooral ontwikkeld om versneld het organische materiaal, aanwezig in het afval pakket, af te breken. Versnelde afbraak voorkomt grote zettingen in de toekomst en verlaagt ongecontroleerd diffuse methaanemissies op langere termijn. Op grond van de beschrijving van het conceptueel model in hoofdstuk 2, zal afbraak van organisch materiaal ook leiden tot een verandering in de samenstelling van het DOC in het percolaat en ook

tot een verlaging in de concentraties van DOC. De verandering in de samenstelling van POC in de vaste fase leidt daarnaast tot een toenemende vastlegging van verontreinigingen zoals zware metalen en organische microverontreinigingen.

Het stimuleren van de afbraak van organische stof in een afval pakket kan op twee manieren:

- 1 Door infiltratie van water gecombineerd met recirculatie van percolaat. Dit leidt tot hogere watergehalten in het afvalpakket waardoor de anaerobe afbraak wordt gestimuleerd;
- 2 Door het actief beluchten van het afvalpakket waardoor er zuurstof in het pakket komt en aerobe afbraakprocessen opgang komen.

3.2 Infiltratie/recirculatie

Het doel van infiltratie en recirculatie van water is het **verhogen van het vochtgehalte** en het verhogen van de **mobiteit van water** in het afvalpakket om daarmee de omstandigheden voor de biologische afbraak van vast organisch materiaal naar methaan te verbeteren. Er is een aantal methoden beschikbaar om, naast het nuttig neerslagoverschot, extra water in afvalpakketten te infiltreren:

- het **sproeien** van water aan de bovenkant van de stortplaats. Deze methode heeft echter een aantal nadelen: veel water zal verdampen uit de bovenste lagen van het afvalpakket en als er percolaat wordt gerecirculeerd kan er sprake zijn van geuroverlast etc.;
- het pompen van water in **vertikale infiltratiebuizen** met een geperforeerde filter. Een nadeel hiervan is dat water vooral lokaal wordt gedoseerd waardoor het moeilijk zal zijn om een groter horizontaal volume te bereiken. Een ander nadeel is dat de infiltratieflux vrij beperkt is en dat deze afhangt van de doorlatendheid van de filter, de omstorting van de filter en het afval in de directe nabijheid van de filter;
- het infiltreren van water via **horizontale drains**. De drains zijn dan ingegraven in de top van het afvalpakket. Dit is een goede methode met een groter horizontaal bereik dan infiltratiebuizen. Echter door de dominant vertikale stroming is het moeilijk om de bovenkant van het afval pakket homogeen te bevochtigen. Ook vergt de verdeling van de infiltratie langs de lengte van de drain veel aandacht. Vaak komt het voor dat het water het einde van de drain niet haalt;
- het infiltreren van water via zogeheten **infiltratiebedden**. Dit is een variant op de horizontale drains, water wordt geïnfiltrerd door middel van drains die niet zijn ingegraven in een sleuf, maar die zijn ingegraven in een veld. Het voordeel is een betere horizontale verdeling van water boven in het afvalpakket.

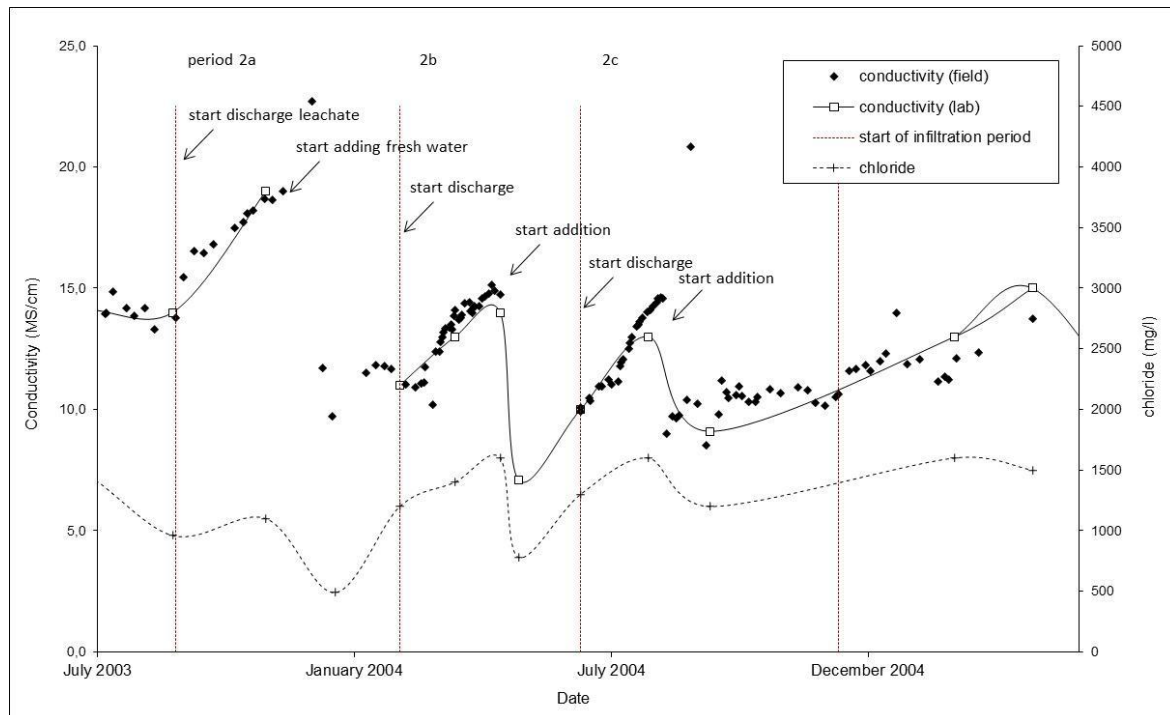
3.3 Beheersing van het infiltratie regime

Infiltratie van water zorgt ervoor dat de doorstroming in het onverzadigde afvalpakket gedurende langere tijd wordt verhoogd. Het gevolg is dat het watergehalte boven in het afvalpakket veel hoger zal zijn dan zonder infiltratie. Ook is het de verwachting dat de combinatie van hogere stroomsnelheden met de grote spreiding in waterdoorlatendheid van het afvalpakket zal leiden tot een lokale waterverzadiging in het pakket. Dit leidt tot hogere diffusiesnelheden en horizontale stroming. Het gevolg is dat het volume aan mobiel en immobiel poriënwater toeneemt en de uitwisseling tussen het immobiele en het mobiele poriënwater sneller verloopt.

Het vergroten van het watergehalte in het afvalpakket leidt tot een toename van de opgeloste concentratie van allerlei stoffen. Door het hergebruiken van percolaat voor de infiltratie (**recirculatie**) zal **zonder spui** een aantal stoffen die alleen worden uitgespoeld en niet worden omgezet, zoals chloride, steeds hogere concentraties krijgen tot deze concentraties in evenwicht zijn met de concentraties in het immobiele deel. Daarnaast zullen stoffen die continue worden gevormd bij de afbraak en die verder niet verder worden afgebroken, zoals ammonium en gereduceerde stikstof (N_{Kj}), in concentraties blijven stijgen. Stoffen zoals de afbreekbare componenten in DOC, zullen uiteindelijk blijven steken op een concentratieniveau dat wordt bepaald door de snelheid van hydrolyse en de snelheid van methaanvorming. Dit betekent dus dat niet ongelimiteerd kan worden gerecirculeerd en dat (aanvullende) maatregelen noodzakelijk zijn.

Door regelmatig het water in de drainage systeem te **spuien** (d.w.z. af te voeren naar de waterzuivering) en weer met vers water te infiltreren, wordt steeds een deel van de verontreinigingen afgevoerd uit het afvalpakket. Direct na infiltratie van vers water zullen de opgeloste concentraties in het percolaat laag zijn, als gevolg van de preferentiële stroming en de trage uitwisseling met het immobiele deel. Tijdens de periode van recirculeren zullen de concentraties weer langzaam stijgen door de uitwisseling. Na elke keer spuien zullen concentraties van zouten, zoals chloride, naar aflopende maximumwaarden stijgen. Voor stoffen die vrij komen bij hydrolyse zullen de concentraties blijven stijgen naar ongeveer dezelfde maximum waarden, zolang de hydrolyse optimaal kan verlopen. Op het moment dat de concentraties van DOC en ammonium naar lagere waarden gaan stijgen, mag worden verondersteld dat de hydrolyse snelheid van het afvalpakket afneemt door het verminderen van de hoeveelheid beschikbaar vast organisch materiaal. Als de snelheid van methaanvorming hierdoor zodanig laag is, dat onttrekking te weinig energetisch rendement oplevert, kan worden besloten om te stoppen met infiltreren en recirculeren.

Het is overigens ook mogelijk om tijdens het recirculeren, continue een deel van het percolaat te spuien en deze te vervangen door schoon water. Interpretatie van concentratie veranderingen wordt dan weliswaar moeilijker, maar het zou noodzakelijk kunnen zijn om piekbelasting op de zuivering te voorkomen. Figuur 3 geeft een reeks metingen, die zijn uitgevoerd tijdens een infiltratie en recirculatie op de Landgraaf bio-reactor pilot uitgevoerd tijdens het project Duurzaam Storten 1. Hierin zijn duidelijk de bovenbeschreven effecten te zien.



Figuur 3, concentratie verloop landgraaf tijdens spuien en recirculeren...

De concentratie van gereduceerd stikstof aanwezig in het percolaat neemt als gevolg van percolaat infiltratie niet of nauwelijks af. Door het *percolaat* tijdens de recirculatie *te behandelen* (bijvoorbeeld te beluchten) kan dit stikstof worden geoxideerd naar nitriet en nitraat. In het afvalpakket wordt dan nitriet en nitraat verder omgezet naar N_2 dat samen met CO_2 en CH_4 wordt afgevoerd. Naast stikstofverbindingen kunnen ook andere verbindingen worden verwijderd tijdens het behandelen van het gerecirculeerde percolaat.

3.4 Beluchting

Op het moment dat de afbraaksnelheid bij infiltratie en recirculatie terugloopt, is het mogelijk om een deel van de resterende organische stof verder af te breken door beluchten van het afvalpakket. Hiermee wordt het afvalpakket verdergaand gestabiliseerd. Het gehalte aan opgeloste DOC wordt verlaagd en tegelijkertijd verandert de samenstelling in meer slecht afbreekbare componenten. Als gevolg hiervan neemt de mobiliteit van onder meer zware metalen af. De beluchting zorgt er naar verwachting ook voor dat gereduceerd stikstof wordt geoxideerd.

Beluchting van het afvalpakket kan op verschillende manieren:

- door **actief lucht in het afvalpakket te blazen** en deze actief af te zuigen. Dit laatste is nodig om emissies naar de lucht te voorkomen. Deze methode heeft als voordeel dat het mogelijk is om snel op grote diepte aerobe condities te verwezenlijken. Een nadeel is dat de invloedssfeer van de geïnjecteerde lucht vrij beperkt zal zijn, er zal sprake zijn van een snelle, voornamelijk verticale stroming naar de atmosfeer;
- door met een relatief grote snelheid gas **uit het afval te onttrekken**. Door de gerealiseerde onderdruk wordt zuurstofrijke lucht uit de omgeving het afvalpakket ingetrokken. Nadeel van deze methode is dat het zuurstof langs voorkeurspaden het afvalpakket in kan stromen en onderweg wordt omgezet. De diepte van indringing kan daardoor beperkt zijn en is moeilijk te controleren. Voordeel van deze methode is dat deze relatief eenvoudig is te implementeren. Een voorwaarde is wel om de lucht vanuit de diepere lagen in het afvalpakket te onttrekken.

Tijdens het beluchten zal het vochtgehalte gaan dalen waardoor het afvalpakket *uitdroogt*. Enerzijds wordt dit veroorzaakt doordat mobiel water langzaam percoleert naar het drainagesysteem en anderzijds doordat veel water wordt afgevoerd met de onttrokken gassen in de vorm van waterdamp. Naast het neerslagoverschot zal het gedurende de beluchtingsfase nodig zijn om regelmatig het afvalpakket te bevochtigen door middel van infiltratie van vers water. Door de beluchting wordt de afbraak gedurende een zekere tijd versneld, met als gevolg versnelde *zettingen*.

4 Hypotheses

4.1 Nut en noodzaak van hypotheses in het kader van IDS

Door de processen beschreven in het conceptueel model (hoofdstuk 2) te combineren met de methoden om het emissiepotentieel te verlagen (hoofdstuk 3) is het mogelijk kwalitatief voorspellingen te doen over veranderingen van bepaalde parameters tijdens de uitvoering van het experiment. Op dit moment ontbreekt echter nog veel kennis hierover (zie ook paragraaf 1.2) en zijn voorspellingen gebaseerd op een groot aantal veronderstellingen en aannamen. De voorspellingen hebben daarmee het karakter van hypothesen. Als de metingen de voorspellingen onderschrijven, is dit een bevestiging van de hypothesen.; Is dat niet het geval dan is sprake van kennisleemtes en zullen de hypothesen moeten worden aangepast op basis van de nieuw verkregen informatie en inzichten.

Dit hoofdstuk geeft een beknopte beschrijving van de hypothesen ten aanzien van het verloop van de processen die zullen optreden tijdens de uitvoering van de pilotprojecten.

4.2 Water & afbraak in de context van IDS

Infiltratie en recirculatie leidt tot:

- een toename van het algehele watergehalte;
- een toename van het doorstroomd volume;
- een versnelde uitwisseling tussen het immobiele en mobiele deel van het afvalpakket;
- met als gevolg meer mobiliteit van water en opgeloste stoffen in het afvalpakket.

Een toename van het vochtgehalte in combinatie met meer mobiliteit leidt tot:

- een toename van hydrolysesnelheid;
- een snelle toename van de stortgasvorming;
- initieel een mogelijke toename in de concentratie van intermediair-DOC, te meten als BZV in het mobiele water (percolaat). Deze toename is afhankelijk van de snelheid van stortgasvorming, de aanwezige DOC-concentratie in het percolaat en de verhouding immobiel en mobiel water en de uitwisselsnelheid.

Een toename in afbraaksnelheid leidt tot versnelde zettingen waardoor het water niet eerder doorstroomde delen van het afvalpakket kan bereiken en er sprake zal zijn van:

- ontsluiting van een nieuwe voorraad aan afbreekbaar vast organisch materiaal;
- toename in hydrolysesnelheid;
- een toename in stortgasvorming.

Nadat het organische materiaal in het afvalpakket meer en meer is afgebroken zal de dynamiek in het afvalpakket gaan afnemen ondanks voortgaande infiltratie en recirculatie. Dit uit zich in een sterke afname van:

- de vormingssnelheid van biogas;
- een verschuiving in de ratio van POC/DOC in het percolaat;
- het aantal spontaan optredende lokale zettingen.

4.3 Water & stoftransport in de context van IDS

Effecten van infiltratie en recirculatie

Door percolaatinfiltratie zal een hoeveelheid opgeloste stoffen vanuit het afvalpakket uitspoelen naar het drainagesysteem. Het verloop en de variatie in concentraties zal bij infiltratie en recirculatie anders verlopen dan een systeem dat enkel onder invloed staat van infiltrerend neerslagoverschot. Indien additioneel schoon water wordt toegevoegd aan het infiltratiesysteem zal het verloop weer anders zijn. Concentraties in het percolaat zullen dan eerst dalen (verdunding) en naarmate er langer wordt gerecirculeerd weer langzaam toenemen tot dat een (dynamisch) evenwicht wordt bereikt met het afvalpakket. Vanaf dat moment zullen de concentraties nauwelijks meer toenemen. De mate waarin dit optreedt, wordt bepaald door de verhouding tussen het mobiele en immobiele volume van het afvalpakket en de snelheid van uitwisseling.

Onder invloed van uitsluitend neerslagoverschot zal er ook sprake zijn van verdunding met als gevolg lagere concentraties, alleen zijn de waterhoeveelheden veel kleiner en is het stromingspatroon veel heterogener. Dit betekent dat de concentraties in het percolaat binnen kleinere bandbreedtes varieert.

Spuien van het percolaat

Voor opgeloste zouten, zoals chlorides, geldt dat de enige manier om tot een reductie te komen, bestaat uit het regelmatig spuien van het percolaat met afvoer naar een waterzuivering en vervolgens weer infiltreren met regenwater of vers water. Naar verwachting zullen de concentraties in de situatie van dynamisch evenwicht in het percolaat dan afnemen. Dit komt mede doordat de vorming van nieuwe DOC eveneens afneemt, omdat het organische materiaal in het afvalpakket meer en meer wordt gestabiliseerd (afbraak, zichtbaar in de concentratie van DOC en de samenstelling van dit DOC).

4.4 Beluchting en Afbraak in de context van IDS

Beluchting van het afvalpakket leidt tot:

- afbraak van vaste componenten die niet afbreekbaar zijn onder anaerobe omstandigheden en vorming van CO₂ als primair afbraakproduct. Weinig tot geen vorming van CH₄;
- een mogelijke stijging van de temperaturen in het afvalpakket, waar te nemen als een temperatuurstijging in het afgezogen gas en in het percolaat;
- De vorming van DOC als gevolg van de afbraak van vaste componenten. Tegelijkertijd een toename in de afbraaksnelheid van opgeloste organische componenten. De samenstelling van het DOC in het percolaat verandert;
- een verhoging van de redox toestand van het afvalpakket met als gevolg het stoppen van de methaanvorming;
- een mogelijke uitdroging van het afvalpakket;
- nitrificatie van ammonium, mogelijk gevolgd door denitrificatie in anaerobe delen van het afvalpakket;
- versnelde zettingen van het afvalpakket.

Het **stoppen van beluchting** leidt tot:

- het herstellen van de anaerobe situatie in het afvalpakket, echter niet zover dat het systeem weer methanogeen wordt;
- een mogelijk doorgaande denitrificatie van nitraat.

4.5 Afbraak mobiliteit & vastlegging in de context van IDS

4.5.1 Organische componenten

De concentratie aan DOC in het mobiele water zal, na een mogelijk initiële stijging na aanvang, gedurende langere periode op een hoog concentratie niveau blijven, of mogelijk iets dalen. Gedurende deze periode zal de samenstelling van dit DOC veranderen waarbij geoxideerde vormen van DOC een groter aandeel zullen gaan vormen van de totale DOC (HA, FA, HON, zie figuur 2). Naast een daling door afbraak kunnen de DOC-gehalten ook gaan dalen door het neerslaan van de stabiele DOC componenten in het afvalpakket en daardoor onderdeel gaan uitmaken van het POC. De verhouding van POC/DOC neemt hierdoor naar verwachting in de tijd toe.

4.5.2 Zware metalen

De mate van vastlegging van zware metalen door adsorptie aan POC en het precipiteren in de vorm van mineralen zal significant zijn. De concentraties van zware metalen in het percolaat zullen gedurende de behandelingsfase aan sterke variaties onderhevig zijn, omdat de samenstelling van het vaste materiaal in het afvalpakket continu verandert als gevolg van de afbraak van organische stof. Naarmate het afvalpakket meer stabiliseert nemen de variaties in percolaat af.

Gedurende de behandelingsfase zal een steeds groter deel van het organisch materiaal dat achterblijft in het afvalpakket bestaan uit slecht afbreekbare POC met een zeer grote adsorptiecapaciteit/adsorptiecapaciteit voor zware metalen en organische microverontreinigingen. De samenstelling van dit residuele afval zal nog steeds een grote variaties hebben. Deze variabiliteit wordt enerzijds veroorzaakt door de oorspronkelijke variabiliteit in de samenstelling van het gestorte afval en anderzijds door de lokale variaties in de geochemische gradiënten in het afvalpakket die het gevolg zijn van de preferentiële stromingsprocessen van water en lucht. De verwachting is dat deze heterogeniteit ook een bijdrage levert aan het immobiliseren van de verontreinigingen omdat er op relatief korte afstand grote verschillen kunnen zijn in bijvoorbeeld redoxpotential.

4.5.3 Zouten

Infiltratie & recirculatie leidt tot:

- een langzame toename in concentratie van zouten in het percolaat door de hydrolyse van het organische stof in het afvalpakket;
- afvlakking van de concentratiestijging naarmate diffusie processen leiden tot een evenwicht in concentraties in het water mobiele volume en het mobiele volume van het afvalpakket. De snelheid waarmee dit gebeurt hangt af van de verhouding in het mobiele en het mobiele volume in het afvalpakket en de uitwisselingsnelheid;

- een kortstondige significante daling in zout concentraties indien spuien gevolgd wordt door infiltratie met schoon water. De grootte van deze daling wordt bepaald door de verdunningsfactor en de uitwisseling tussen de mobiele en immobiele volumes poriënwater. Als na het spuien het percolaat weer wordt gerecirculeerd, zullen de concentraties van zouten in het percolaat weer gaan stijgen door diffusie vanuit het immobiele volume.

4.6 Stikstof in de context van IDS

Infiltratie & recirculatie leidt tot:

- stabilisatie of lichte toename in concentratie van gereduceerde stikstofverbindingen in percolaat. De verwachting is dat deze concentraties minder snel zullen dalen als de zouten omdat er geen mechanisme is dat leidt tot een significante verwijdering van stikstof. Omdat stikstofhoudende organische verbindingen in het vaste afval veelal het snelst afbreken, is het de verwachting de deze concentraties zeer snel zullen stijgen. De concentraties in het mobiele water (percolaat) zullen dan vooral bepaald worden door verdunning met schoon water en de uitwisseling met het immobiele poriënwater;
- binding van een deel van de stikstof n levende biomassa. Dat deel kan toenemen als gevolg van de toename in afbraaksnelheid. Op een bepaald moment heeft deze hoeveelheid biomassa een maximum bereikt afhankelijk van de hydrolyse snelheid;
- een kortstondige significante daling in concentraties bij spuien van percolaat gevolgd door infiltratie met schoon water. De grootte van deze daling wordt bepaald door de verdunningsfactor.

Het is mogelijk om percolaat te **beluchten** tijdens de **recirculatie** waardoor een deel van het ammonium wordt omgezet in nitraat en mogelijk deels ook in nitriet. In het afvalpakket wordt nitraat/nitriet benut door micro-organismen en omgezet naar N_2 dat via de gasfase verdwijnt. In welke mate dit gebeurt moet worden bepaald tijdens de uitvoering van de pilots. Wanneer het percolaat tijdens recirculatie wordt belucht, wordt wel een snelle afname van N_{kj} -concentraties in het percolaat verwacht.

Beluchting van het afvalpakket leidt tot:

- Het oxideren van de gereduceerde stikstofverbindingen naar nitriet en nitraat. Gevormde nitriet en nitraat worden benut als elektronen acceptor bij het afbreken van afbreekbaar DOC;
- Mogelijk vorming van N_2O als nevenproduct. Als beargumenteerd in de Ecofys-studie naar metaanemissies bij verduurzaming (bijlage B in Luning en Oonk, 2011), is dit waarschijnlijk een te verwaarlozen effect.
- Mogelijk wordt bij onvoldoende geschikt afbreekbaar DOC, nitriet en ammonium omgezet naar N_2 in het zogeheten Anammox proces. In hoeverre dit proces optreedt zal moeten worden vastgesteld in de pilot projecten.
- Opname van N in de biomassa, verantwoordelijk voor aerobe omzetting van organisch materiaal;
- Strippen van N_{kj} vanuit de waterfase naar de gasfase

4.7 Emissies in de context van IDS

Infiltratie en recirculatie zal leiden tot een toename van de methaanproductie in het afvalpakket. Dit methaan wordt actief met behulp van het gasonttrekkingssysteem afgevangen en benut als alternatieve energiebron. De afbraak vindt hierbij strikt plaats onder anaerobe omstandigheden, waarbij de vorming van N_2O uitgesloten is.

Infiltratie en recirculatie leidt tot aanzienlijk meer percolaatproductie. Dit vormt een van de redenen voor de eis ten aanzien van het functioneren van de onder afdichting en het drainage systeem van de stortplaats. Een goed functionerende onderafdichting en drainagesysteem biedt goede waarborgen voor het beschermen van de bodem inclusief het grondwater.

4.8 Resultaten van een eenvoudig numeriek uitloog model gebaseerd op deze hypothesen

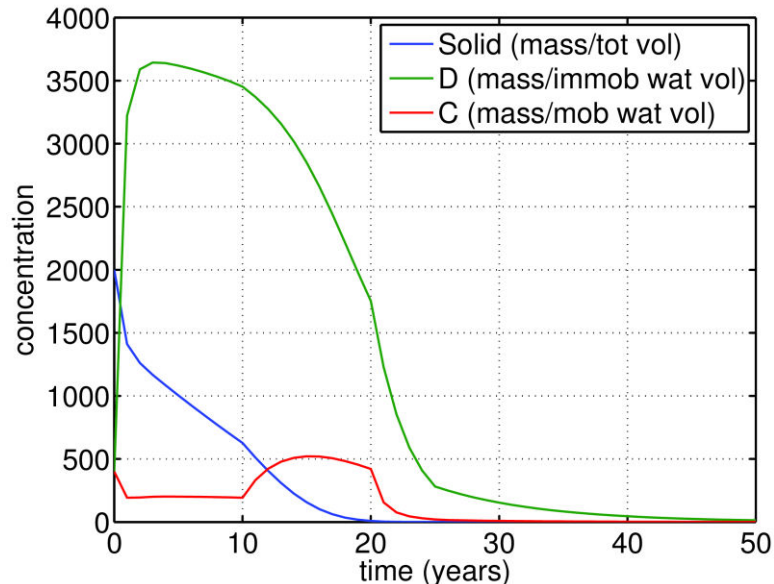
In bijlage A is een eenvoudig uitloogmodel beschreven waarbij de consequenties van de gecombineerde effecten van hydrolyse, afbraak, uitwisseling op de concentraties in het percolaat enigszins kwantitatief inzichtelijk worden gemaakt. Voor een inhoudelijke beschrijving van het model wordt verwezen naar de bijlage. Met dit model wordt het concentratie verloop in het mobiele water (percolaat) beschreven. Het basisscenario voor de berekeningen is als volgt:

1. De eerste 10 jaar wordt er niet actief ingegrepen in het afvalpakket. De percolaatflux wordt bepaald door de infiltratie van regen (300 mm/jaar). Initieel is de concentratie in percolaat gesteld op 400 g/m^3 ;
2. Van 10 jaar tot 20 jaar wordt er gestart met recirculeren. De infiltratie/recirculatie flux is 1.5 m/jaar, 30 % van deze flux wordt continue gespuid en vervangen door schoon water;
3. Van 20 jaar tot 25 jaar wordt het afvalpakket belucht, waarbij de infiltratie flux weer beperkt blijft tot het neerslagoverschot;

4. Na 25 jaar wordt er niet meer actief ingegrepen in het afvalpakket, de percolaatflux wordt bepaald door het neerslagoverschot.

Het model gaat uit van een hydrolysesnelheid dat afhankelijk is van het watergehalte en een maximum concentratie in de waterfase. Daarnaast kunnen de componenten in de waterfase afbreken en uitwisselen tussen het mobiele en immobiele water. Alleen het mobiele water kan zich verplaatsen in het afvalpakket.

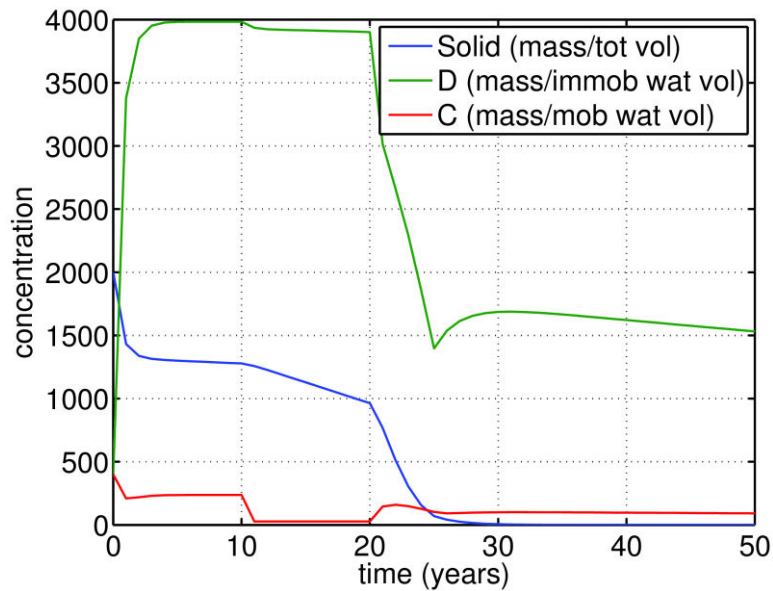
Figuur 4 geeft het concentratie verloop in de vaste fase (S), de mobiele (C) en immobiele (D) waterfase van een matig afbreekbare stof dat vrij komt bij de hydrolyse van vast organisch materiaal. In dit scenario wordt verondersteld dat de snelheidsparameter voor de anaerobe afbraak proces niet verandert op het moment dat wordt geïnfiltrerd en gerecirculeerd. De afbraaksnelheid neemt wel toe in de beluchtingsfase.



Figuur 4, Concentratie verloop in de vaste fase, het immobiele water en het mobiele water van een matig afbreekbare component in het afvalpakket.

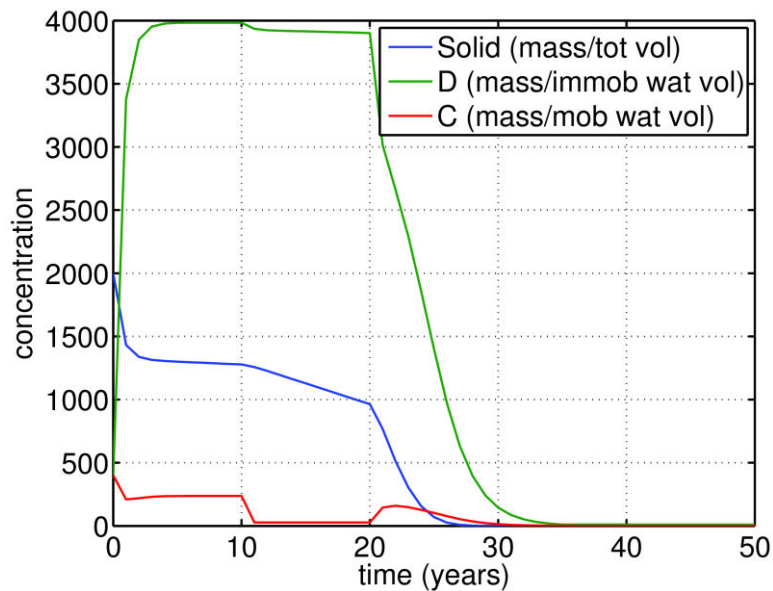
Uit de figuur blijkt dat het vaste organische materiaal (S) in de figuur continu afneemt als gevolg van een continue hydrolyse. De hydrolyse producten lossen op in het immobiele water (D) en diffunderen vervolgens naar het mobiele water (C) alwaar ze kunnen uitspoelen. Zowel in de immobiele als de mobiele waterfase worden de hydrolyse producten afgebroken. De verhouding tussen C en D wordt bepaald door de verhouding tussen de hoeveelheid mobiel en immobiel water en de uitwisselsnelheid. Tijdens infiltratie en recirculatie tussen 10 en 20 jaar nemen beide toe waardoor er een verhoogde uitwisseling plaatsvindt. Dit leidt tot een toename van de concentratie in de mobiele water fase. Tijdens de beluchttingsfase neemt de afbraaksnelheid toe waardoor de concentraties in beide waterfasen snel daalt. Op het moment dat de beluchting stopt vertraagt de afbraak snelheid. Dit is het duidelijkst te zien voor de concentraties in het immobiele water. Voor het percolaat heeft dit vrijwel geen consequenties, door de trage uitwisseling blijven de concentraties in het mobiele water laag.

Figuur 5 geeft het concentratie verloop in de vaste fase (S), de mobiele (C) en immobiele (D) waterfase van een anaeroob zeer slecht afbreekbare stof, dat onder aerobe omstandigheden makkelijk afbreekt. In dit scenario wordt tijdens recirculeren het percolaat belucht waardoor de component in de mobiele fase goed afbreekt. Tijdens het beluchten wordt verondersteld dat een deel van de zuurstof naar het immobiele water kan diffunderen.



Figuur 5, Concentratie verloop in de vaste fase, het immobiele water en het mobiele water van anaeroob en aerob el afbreekbare component in het afvalpakket.

Als men figuur 5 vergelijkt met figuur 4 is heel duidelijk te zien wat de consequenties zijn van het verschil in afbreekbaarheid. De concentraties in de vaste fase nemen voor de niet afbreekbare componenten zeer langzaam af, vooral bepaald door de snelheid van uitloging. De oorzaak voor dit gedrag is het feit dat aangenomen wordt dat de hydrolyse wordt geremd bij hoge concentraties aan hydrolyse producten in oplossing. Infiltratie en recirculatie in combinatie met behandeling van het percolaat van 10 tot 20 jaar, leidt tot een toename in de uitwisseling van de immobiele naar de mobiele waterfase. Dit leidt tot een toename in hydrolysesnelheid. Van 20 tot 25 jaar wordt het afvalpakket belucht, dit leidt tot een toename in afbraaksnelheid en daardoor tot een nog snellere hydrolyse. Na 5 jaar beluchten in het grootste deel van het vaste stof omgezet, echter de concentratie in de immobiele waterfase blijft hoog waardoor na afloop van de beluchting de concentratie in de mobiele waterfase verhoogd blijft door de trage uitwisseling. Door de beluchting nog 10 jaar langer voort te zetten wordt de concentratie in de immobiele waterfase verder verlaagd, waardoor uiteindelijk de concentratie in de mobiele waterfase duurzaam is verlaagd (figuur 6).



Figuur 6, Concentratie verloop in de vaste fase, het immobiele water en het mobiele water van een anaeroob en aerob wel afbreekbare component in het afvalpakket waarbij de beluchting is 15 jaar is voortgezet.

5 Strategie voor procesmonitoring

5.1 Doel van procesmonitoring

Met het in dit document geformuleerde conceptueel model en hypothesen ten aanzien van het gedrag van bepaalde componenten is het mogelijk om een strategie te ontwikkelen voor de meet- en monitoringactiviteiten die uitgevoerd moeten worden gedurende de pilotprojecten. Deze activiteiten dienen verschillende doelen:

- processturing, als uit monitoring blijkt dat bepaalde processen niet verlopen zoals verwacht, kan worden ingegrepen in de uitvoering van de maatregelen;
- controle van het stabilisatieproces, de hypothesen geven aan hoe bepaalde processen naar verwachting zullen verlopen. Metingen zullen moeten worden gedaan om het verloop van deze processen te controleren en de betrouwbaarheid van de hypothesen te toetsen;
- kennisontwikkeling, afwijking van verwachte trends kunnen worden gebruikt om kennisleemtes te identificeren. Mogelijk dat deze afwijkingen aanleiding geven tot aanpassingen in de uitvoering van de pilotprojecten;
- Validatie conceptuele modellen en ondersteunend aan het verificatieonderzoek na afronding van de pilot.

Het recirculeren en beluchten heeft tot doel de afbraak van het afvalpakket te stimuleren en tegelijkertijd de vastleggingscapaciteit in gestabiliseerde afvalpakket te vergroten. Daarnaast wordt tijdens de intensieve behandelingsfase zoveel mogelijk inerte en slecht afbreekbare componenten via het percolaat verwijderd. Bij de monitoring is het dus van groot belang om de massabalans van belangrijke componenten vast te stellen. Metingen aan het percolaat zijn voor het vaststellen van de massabalansen van groot belang.

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de metingen tijdens de uitvoering van de pilots. Het zijn dus metingen, die zowel voorafgaand aan de uitvoering (nul-onderzoek), tijdens de uitvoering en na afloop van de pilots worden uitgevoerd.

De deelactiviteiten voor het gehele monitoringplan staan gespecificeerd in Tabel 1. Deze activiteiten worden verder uitgewerkt in de hoofdstuk 5, waarbij in de tabel tussen haakjes is aangegeven, waar de desbetreffende activiteit nader is beschreven. Een nadere beschrijving van de afvalmonsternamen volgt in hoofdstuk 6. Tabel 1 omvat alleen de monitoringactiviteiten, uitgevoerd voor toetsing van het hier beschreven conceptueel model. Het uiteindelijke monitoringprogramma bij uitvoering van de verduurzamingspilots kan nog aanvullende activiteiten bevatten, bijvoorbeeld voor operationeel beheer van de pilots en beheersing van de risico's. Dit zal verder worden uitgewerkt in de deelplannen van aanpak.

Tabel 1, Samenvatting van het monitoringprogramma. Opzet van nul-onderzoek, monitoring tijdens de proefneming en activiteiten na afloop van de pilotprojecten

	parameter	0-meting	proef	na proef	waar	hoe	frequentie	relevant voor
<i>Percolaat (5.3)</i>								
<i>Kwantiteit (5.3.1)</i>	flow en volume	X	X	X	percolaatputten		continu in de putten	effectiviteit maatregel, inzicht hydrologie
<i>Kwaliteit (5.3.2)</i>	EC	X	X	X	percolaatputten		continu in de putten	biodegradatie - kwalitatief, effectiviteit maatregel, vervuilingspotentieel
	Samenstelling (beperkt)	X	X	X	percolaatputten	labanalyses	1e jaar 2-wekelijks, daarna maandelijks	biodegradatie - kwalitatief, effectiviteit maatregel, vervuilingspotentieel
	Samenstelling (volledig)	X	X	X	percolaatputten	labanalyses	1e jaar 6 keer; daarna 4 keer per jaar	biodegradatie - kwalitatief, effectiviteit maatregel, vervuilingspotentieel
	fractionering DOC	X	X	X	percolaatputten	labanalyses	1e jaar 6 keer; daarna 4 keer per jaar	biodegradatie - kwalitatief, effectiviteit maatregel, vervuilingspotentieel
	temperatuur	X	X	X	percolaatputten	in-situ	1e jaar 2-wekelijks, daarna maandelijks	voorwaarde biologische activiteit
<i>Infiltratie (5.3.3)</i>								
	Samenstelling		X		waterbuffer	labanalyses	1e jaar 6 keer; daarna 4 keer	massabalans
	temperatuur	X	X	X	waterbuffer	in-situ	1e jaar 2-wekelijks, daarna maandelijks	voorwaarde biologische activiteit
	flow, volume en infiltratieregime voor ieder infiltratieveld		X		aanvoerleiding	turbinemeter	continu	massabalans
	spui				afvoerleiding	turbinemeter	continu	massabalans
<i>Startgas (5.4)</i>								
	volumeflow	X	X	X	bij compressor	continuumeting	registratie per week	biodegradatie - kwantitatief
	Samenstelling	X	X	X	bij compressor	continuumeting	registratie per week	biodegradatie - kwantitatief
	gastemperatuur	X	X	X	bij compressor	continuumeting	registratie per week	biodegradatie - kwalitatief, effectiviteit maatregel, vervuilingspotentieel
<i>Beluchting (5.4.5)</i>								
	flow, volume, druk en temperatuur		X		bij compressor	continuumeting	registratie per week	biodegradatie - kwantitatief
onttrokken lucht	flow, volume, druk en temperatuur		X		bij compressor	continuumeting	registratie per week	biodegradatie - kwantitatief
	Samenstelling		X		bij compressor	continuumeting	registratie per week	biodegradatie - kwantitatief
<i>Methaanemissies (5.4.6)</i>								
	diffuse methaanemissies	X	(X)	X	toplaag	FID-screening en boxmetingen	incidenteel	neveneffecten, effectiviteit beluchting
<i>Zettingen (5.5)</i>								
	zettingen, mechanische stabiliteit	X	X	X	zetsbakken	meetlint	4 keer per jaar, 50 m grid	biodegradatie - kwalitatief
<i>Heterogeniteit en schaal (5.6)</i>								
	geoelectrische metingen cq. seismiek	X	(X)	(X)	op afvalpakket		incidenteel, 2 à 3 keer in de gehele periode	effectiviteit infiltratie
	tracer test		X		percolaatopvang		éénmalig	effectiviteit infiltratie
	gas tracer test		X		gasinjectiesysteem		éénmalig tot enkele keren	effectiviteit beluchting
<i>Afvalmonsternamen (6)</i>								
	watergehalte	X		X	afvalmonsters	labanalyses	vooraf en achteraf	effectiviteit infiltratie
	waterbergend vermogen	X		X	afvalmonsters	labanalyses	vooraf en achteraf	effectiviteit infiltratie
	biodegradeerbaarheid, TOC	X		X	afvalmonsters	respiratietest	vooraf en achteraf	biodegradatie - kwantitatief
	uitloogtesten (kolomtest)	X		X	mengmonster	prEN 14997	vooraf en achteraf	vervuilingspotentieel
	uitloogtest (schudtest)	X		X	afvalmonsters	NEN 7373	vooraf en achteraf	vervuilingspotentieel
	uitloogtesten (pH-stat)	X		X	mengmonster	EN 12457-2	vooraf en achteraf	vervuilingspotentieel
meteorologische data	temperatuur, atmosferische druk, neerslag, luchtvochtigheid, windsnelheid	X	X	X	lokaal weerstation		dagelijks	interpretatie algemeen, massabalans

percolaatsamenstelling beperkt is pH, Eh, DOC, Cl-, Nkj

percolaatsamenstelling compleet is pH, Eh, COD, TOC, BOD, TKN, NH4, NO3, NO2, Cl, zware metalen, phenolen, fosfaat, sulphides, AOX

5.2 Doel, opzet en uitvoering nul-onderzoek

Voorafgaand aan de daadwerkelijke uitvoering van de proefneming (ook voordat daadwerkelijk activiteiten worden uitgevoerd voor realisatie voor het systeem voor verduurzaming), zal een nul-onderzoek worden uitgevoerd bij de pilotprojecten. De doelen hiervan zijn:

- Het vaststellen van de uitgangssituatie van het stortlichaam met accent op:
 - ontwikkelingen in hoeveelheid en kwaliteit van het gevormde percolaat;
 - ontwikkelingen in hoeveelheid en samenstelling van onttrokken stortgas;
 - ontwikkelingen in zettingssnelheid van het stortlichaam;
 - de samenstelling en uitloogbaarheid van het afvalpakket.

De definitie van 'uitgangssituatie' hangt af van de specifieke parameter. De gasvorming en zettingen kunnen worden uitgedrukt als een actuele snelheid (m³ per uur, cm/jaar). Hoeveelheid en kwaliteit van percolaat zijn neerslagafhankelijk en is de uitgangssituatie de jaargemiddelde flux, waarin flux het product is van hoeveelheid en concentraties in het percolaat. Voor wat betreft afvalsamenstelling is 'uitgangssituatie' een momentopname;

- Het krijgen van inzicht in de uitgangssituatie is van belang om tijdens de looptijd van de pilot het effect van de maatregel te kunnen beoordelen: wordt de biologische afbraak inderdaad versneld conform de hypothesen?; verloopt de ontwikkeling van de percolaatkwaliteit als verwacht?; blijven de neveneffecten en overige risico's beperkt?;
- Het valideren van de uitgangspunten waarop het ontwerp van de verduurzamingsmaatregelen is gebaseerd. De resultaten van het nulsituatie onderzoek kunnen aanleiding geven om het ontwerp te herzien van zowel de beheersmaatregel als de bijbehorende monitoring.

In het nul-onderzoek zal een aantal metingen gedurende een langere tijd worden uitgevoerd zoals de ontwikkelingen in de hoeveelheid en samenstelling van het percolaat en het stortgas. Vooral de hoeveelheid en kwaliteit van het percolaat zijn dynamisch en weersafhankelijk (neerslag en temperatuur). Het is daarom van belang om deze metingen gedurende minimaal één jaar voorafgaand aan de pilotprojecten te doen om inzicht te krijgen in het effect van de verschillende seizoenen op de percolaatkwaliteit. Op basis van deze informatie kan de jaargemiddelde flux met het percolaat worden berekend voor een standaardjaar.

Het meten van de zettingen in het stortlichaam dient te gebeuren middels hoogtemetingen aan het begin en het eind van een periode van ½ tot 1 jaar met een enkele herhalingsmeting. Overige metingen zoals het bepalen van de samenstelling van het afval etc., zijn éénmalig en kunnen op een gunstig moment gedurende het jaar worden uitgevoerd.

Tabel 2 vat de opzet en uitvoering van dit nulonderzoek nader samen. Specificatie van de diverse onderdelen volgt in de hoofdstukken 5.3 t/m 5.5 en in hoofdstuk 6..

Tabel 2, opzet van het nulonderzoek

	parameter	doel	waar	hoe	frequentie
<i>Percolaat (5.3)</i>					
<i>Kwantiteit (5.3.1)</i>	flow en volume	(i) vaststellen uitgangssituatie, voorafgaand aan de verduurzamingsmaatregel, waardoor effect van de maatregel kan worden gekwantificeerd; (ii) validatie methode	percolaatputten	flowmeter	continuumeting in de putten
<i>Kwaliteit (5.3.2)</i>	EC	aan de verduurzamingsmaatregel, waardoor effect van de maatregel kan worden gekwantificeerd; (ii) validatie methode	percolaatputten	in-situ	continuumeting in de putten
	samenstelling (beperkt)	vaststelling ETW, als beschreven in de handreiking ETW (iii); inzicht te krijgen in de hydrologie in het afvalpakket. Deze meetdata dienen voor parametrisering of validatie van modellering binnen TUD; (iv) informatie relevant voor ontwerp en beheer van de verduurzamingsmaatregel	percolaatputten	labanalyse	2-wekelijks
	samenstelling (volledig)		percolaatputten	labanalyse	6 en 12 keer tijdens
	fractionering DOC		percolaatputten	labanalyse	6 keer tijdens nulmeting
	temperatuur		percolaatputten	in-situ	2-wekelijks
<i>Stortgas (5.4)</i>					
	volumeflow	(i) vaststellen snelheid van afbraak, voorafgaand aan de verduurzamingsmaatregel, waardoor effect van de maatregel kan worden gekwantificeerd; (ii) informatie, relevant voor ontwerp en beheer verduurzamingsmaatregel en maatregelen voor vermindering methaanemissies	bij compressor	continuumeting	registratie per week
	samenstelling		bij compressor	continuumeting	registratie per week
	gastemperatuur		bij compressor	continuumeting	registratie per week
<i>Methaanemissies (5.4.6)</i>					
	diffuse methaanemissies		toplaag	FID-screening en boxmetingen	éénmalig tijdens nulmeting
<i>Zettingen (5.5)</i>					
	zettingen, mechanische stabiliteit	vaststellen zettingsnelheid, voorafgaand aan de verduurzamingsmaatregel, waardoor effect van de maatregel kan worden gekwantificeerd.	zetsbakens	meetlint 50 meter grid	2 à 3 keer tijdens nulmeting
<i>Heterogeniteit en schaal (5.6)</i>					
	geoelectrische metingen cq. seismiek	methodeontwikkeling. Vaststellen anomalieën in het afvalpakket voorafgaand aan verduurzamingsmaatregel.	op afvalpakket	nader te bepalen	als onderdeel TUD-STW onderzoek
<i>Afvalmonsternamen (6)</i>					
	watergehalte	parameter relevant voor massabalans water	afvalmonsters	labanalyse	monsternamen bij aanleg systeem. Ongeveer 40 monsters
	biodegradeerbaarheid, TOC	vaststellen resterende hoeveelheid biodegradeerbaar materiaal, voorafgaand aan de verduurzamingsmaatregel; (ii) parameter relevant voor C-massabalans; (iii) vaststellen mate van biodegradatie per monster, voor correlatie met uitloogtesten (schudtesten) op de individuele monsters; (iv) selectie monsters voor mengmonsters kolomtest en pH-stattest.	lab-test	respiratietest	alle monsters
	uitloogtesten (kolomtest)	vaststellen uitloogpotentieel afval, voorafgaand aan de verduurzamingsmaatregel, waardoor effect van de maatregel kan worden gekwantificeerd.	lab-test	prEN 14997	twee mengmonsters
	uitloogtest (schudtest)		lab-test	NEN 7373	alle monsters
	uitloogtesten (pH-stat)		lab-test	EN 12457-2	twee mengmonsters
<i>meteorologische data</i>					
	temperatuur, atmosferische druk, neerslag, luchtvochtigheid, windsnelheid	informatie voor massabalans water en interpretatie emissiemetingen.	lokaal weerstation		dagelijks

voor specificatie percolaatsamenstelling (beperkt) zie paragraaf 5.3.2

voor specificatie percolaatsamenstelling (volledig) zie paragraaf 5.3.2

5.3 Metingen aan percolaat

5.3.1 Kwantiteit

Het is van belang om de waterhuishouding in het afvalpakket goed in beeld te krijgen, omdat deze bepalend is voor de waterbalans en de hoeveelheid aan schoon water dat aan het afvalpakket kan worden toegevoegd. Deze informatie is nodig voor het bepalen van de verhouding tussen het mobiele en het immobiele deel van het poriënwater en de mate van uitspoeling van stoffen uit het afvalpakket. In verband hiermee worden de volgende metingen uitgevoerd:

05-12-12

19/31

- het volume aan water dat infiltreert (netto neerslag, infiltratie & recirculatie);
- de infiltratie snelheid;
- het volume aan percolaat dat wordt geproduceerd;
- de percolaatproductie snelheid;
- de hoeveelheid aan percolaat dat wordt afgevoerd (gespuid);

Vastlegging van deze metingen dient zo continue mogelijk te worden gedaan. Met de huidige technologie kan vrij eenvoudig met een frequentie van 1x per 15 minuten worden gemeten.

5.3.2 Kwaliteit

Veranderingen in de kwaliteit van het percolaat worden veroorzaakt door processen in het afvalpakket. Goed inzicht in deze veranderingen geeft de mogelijkheid om een aantal procesbepalende parameters te kwantificeren. Hiervoor zal de samenstelling van het infiltrerend water en het gevormde percolaat moeten worden bepaald. De verwachting is dat de samenstelling van het percolaat zeer sterk kan variëren als gevolg van veranderingen in de doorspoeling. Daarom zal met een zo hoog mogelijke frequentie gemeten moet worden. De frequentie waarmee de chemische analyses zullen worden gedaan, hangt af van de beschikbaarheid van sensor technologie, de verwachte dynamiek, het budget etc. Voor dit onderzoek zijn de volgende keuzes gemaakt:

1. Monitoring met een **hoge frequentie (1 x per 15 minuten)**
Automatische meting met behulp van sensoren in een meetreservoir in het drainage systeem. De elektrische geleidbaarheid (EC) is een maat voor de hoeveelheid aan opgeloste ionen in het percolaat. Automatische registratie met een zeer hoge frequentie is mogelijk. Een frequentie van 1 keer per 15 minuten geeft detail informatie over veranderingen als gevolg van verdunning etc. Met een automatische EC-meting wordt tegelijkertijd de temperatuur geregistreerd. De EC is sterk gecorreleerd met zouten, zoals chloride en kan daarmee gebruikt worden om de effecten van verdunning te kwantificeren. Door alle concentraties te normaliseren op basis van EC of chloride kan het effect van verdunning uit de dataset worden gefilterd. Er bestaan sensoren voor het meten van pH, Eh (redox potentiaal), chloride, ammonium sulfaat, bicarbonaat en DOC. Op pH en redox potentiaal na verkeren deze sensoren echter nog in een ontwikkelingsfase. Ze zijn daardoor nog niet geschikt voor toepassing in een moeilijke substraat zoals stortpercolaat. De verwachting is dat de pH en de redoxpotentiaal niet veel zullen variëren omdat het afvalpakket voor deze parameters sterk is gebufferd. Daarnaast is het zo dat pH en redox sensoren zeer gevoelig zijn voor vervuiling waardoor zeer veel onderhoud nodig zal zijn.
2. Monitoring met een **frequentie van 1x per 2 weken**
Eh (redoxpotentiaal), pH (zuurgraad), Cl⁻ (chloride), NH₄⁺ (ammonium), SO₄²⁻ (sulfaat), S²⁻ (sulfide), HCO₃⁻ (bicarbonaat) en DOC worden gemeten door middel van het nemen van monsters en een combinatie van laboratorium en/of veld metingen. Daarnaast wordt in-situ de temperatuur gemeten van het vrijkomend percolaat en de temperatuur van het percolaat in de waterbuffer. Twee wekelijks meten zorgt voor een dataset met voldoende punten om statistisch de relatie vast te stellen met de gemeten EC. Bovendien zijn deze stoffen van belang voor het interpreteren van de dynamiek in de macrochemie van het percolaat;
3. Monitoring met een **frequentie van 1 x per maand:**
Bemonsteren van het percolaat en analyseren op macroparameters in het laboratorium: Na, K, Ca, Mg, Si, Al, Fe(tot), Mn(tot), NO₃⁻, PO₄(tot), NH₄⁺, N_{Kj}, TOC, F⁻. Het meten van pH en EC in het laboratorium is minder zinvol omdat de monsters in het veld zullen worden geconserveerd om eventuele invloeden van redox verandering, neerslagvorming etc. te minimaliseren. In het veld is het van belang om zicht te hebben op de pH en EC ten tijde van monsternamen om de ion-balans te kunnen controleren en de “juiste” pH waarde te kennen (o.a. t.b.v. de geochemische modellering), horend bij de gemeten concentraties van pH-gevoelige stoffen.
4. Monitoring met een frequentie van **1 x per 2 maanden:**
Een uitgebreide micro-pakket: As, Ba, Cd, Cr (tot), Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, V, Zn, BTEXN, Min. Olie, VOCL, Fenol, PAK.
5. **Aanpassingen in meetfrequentie** op basis van de waarnemingen:
De meetfrequentie van de macroparameters zal afhangen van de correlaties met de automatische EC metingen en de variaties in de waarnemingen. Een hoge variatie en slechte correlaties met de EC betekenen dat een hogere frequentie met meer laboratorium analyses noodzakelijk is. Per locatie zal een kosten-baten analyse worden uitgevoerd om keuzes voor de gewenste frequenties te maken. De variaties in de samenstelling van het percolaat kunnen worden geïnterpreteerd worden met behulp van geochemische speciatie modellering. De verwachting is dat verdunning met regenwater de grootste veroorzaker is van veranderingen. Als deze hypothese klopt, dan zal de dynamiek voorspelbaar blijken te zijn en zou de monitoring frequentie kunnen worden verlaagd.
Uit eerder onderzoek blijkt dat het gedrag van de micro-parameters goed is te interpreteren op basis van geochemische modellering waarbij de speciatie vooral wordt bepaald door de aanwezigheid van enkele macro-componenten: pH, Eh, DOC, HCO₃⁻, SO₄²⁻. De verwachting is dat de concentraties van de macrocomponenten vooral zullen afhangen van de mate van verdunning met regenwater. Als deze hypothese

klopt zullen deze micro's goed voorspelbaar blijken te zijn. Mocht deze hypothese niet juist blijken te zijn, dan zal de meetfrequentie moeten worden verhoogd.

6. **Incidentele meetcampagnes** op momenten dat zeer grote dynamiek wordt verwacht: Uitwisseling tussen het immobiele en het mobiele poriënwater is een zeer bepalende factor in het afvalpakket. Het emissiepotentieel hangt vooral samen met de samenstelling van het vaste afval en het immobiele poriënwater. Tijdens periodes van langdurige droogte zal de hoeveelheid mobiele poriënwater in het afvalpakket klein zijn, en is de uitwisseling met het immobiele water significant. Dit betekent dat de concentraties in het mobiele water relatief hoog zullen zijn. Bij de eerste significante hoeveelheid regen zal het eerste fractie van het mobiele poriënwater dat uitspoelt deze hoge concentraties meevoeren naar het percolaat. Het idee is om gedurende een dergelijke periode intensief percolaat monsters te nemen zodat het proces van verdunning na een droge periode kan worden gevolgd. Hierbij kunnen per uur percolaat-monsters worden genomen voor analyse in het laboratorium.

5.3.3 Interpretatie van percolaat-metingen

Waterbalans

De verkregen gegevens moeten in het kader van de processturing worden bewerkt, zodat er kwantitatieve gegevens komen met betrekking tot de massabalans. Hierbij gaat het om de hoeveelheden geïnfiltreerd water en gerecirculeerd percolaat en hoeveelheid geproduceerd percolaat. In eerste instantie wordt verwacht, dat er meer water zal worden geïnfiltreerd dan dat er aan percolaat wordt geproduceerd, het verschil is toe te rekenen aan de hoeveelheid bevochtigd afvalmateriaal. Na verloop van tijd ontstaat er een evenwicht tussen geïnfiltreerd water en geproduceerd percolaat. Bij deze interpretatie zal ook een verband gelegd moeten worden tussen het oppervlak waarin het water infiltreert en het volume dat via de pompput wordt verwijderd. Een drainage systeem zal naast percolaat uit het "eigen" stortvak ook percolaat uit nabij gelegen stortvakken opvangen en vice versa. Impliciet wordt echter aangenomen dat het netto effect gering zal zijn. Door de gemeten percolaatflux te vergelijken met de gemeten neerslaghoeveelheid, is een schatting van het intrekoppervlak te maken zodat deze impliciete aanname globaal kan worden getoetst omdat grote afwijkingen zullen opvallen.

Aannemelijk is echter ook dat dit intrekoppervlak varieert in de tijd. In drogere periodes is de verdamping zo groot dat een groot deel van de neerslag nooit percolaat wordt, bij extreme hoeveelheden neerslag kan een deel oppervlakkig afstromen en daardoor niet in de percolaat drains komen. Inzicht in deze dynamiek is van belang om de relatie tussen neerslag en percolaat te leggen.

Concentratie veranderingen in percolaat

De interpretatie van de percolaat-gegevens zal gericht zijn op het beantwoorden van onder meer de volgende vragen:

1. Wat is de huidige emissie in het percolaat in het drainage systeem? Deze emissie wordt op verschillende manieren berekend: op basis van de hoge frequentie metingen, op basis van de 2 maandelijks gegevens en op basis van de halfjaarlijkse metingen. Een vergelijking van de verschillende resultaten geeft inzicht in hoeverre bepaalde methodes leiden tot over- dan wel onderschattingen van de werkelijke emissies, bepaald op basis van de hoge resolutie metingen. Deze analyses zijn van groot belang voor de ontwikkeling van een interpretatiemethodiek in het kader van de toetsing op de ETW;
2. Wat is de verblijftijd van het water in het stortlichaam? Een gedetailleerde analyse van de gemeten tijdreeksen van enerzijds neerslag en anderzijds percolaat-flux en percolaat-samenstelling biedt de mogelijkheid inzicht te krijgen in de verdeling van verblijftijden van het water in het stortlichaam. Deze analyse is gebaseerd op basis van een statistisch model waarbij een relatie wordt gelegd tussen de mate van verdunning waargenomen in het percolaat en het tijdstip dat er een zekere hoeveelheid neerslag is gevallen op de stortplaats. De achtergrond van deze benadering is, dat water met een lange verblijftijd meer in evenwicht zal zijn met de bulk van het afval in het stortlichaam. Dit water zal daardoor meer inzicht geven over welke stoffen aanwezig zijn in de matrix van de stortplaats. Water met een korte verblijf tijd zal, qua samenstelling, meer lijken op regenwater. Inzicht in de verblijftijden is van belang voor het bepalen van de lange termijn emissie naar de omgeving. Door regelmatig tijdens de looptijd van de pilot-projecten deze analyse te herhalen, kan worden bepaald in hoeverre het stromingsprofiel door het stortlichaam verandert in de tijd;
3. Wat is de verhouding tussen mobiel en immobiel poriënwater in het afvalpakket? Infiltratie van schoon water leidt tot verdunningen in het percolaat. De mate van verdunning hangt samen met de stromingsnelheid van het poriënwater en volume mobiel water. Interpretatie van de productievolumes en de gemeten geleidbaarheden met een transport model geeft de mogelijkheid de mobiele fractie te bepalen. Deze fractie zal afhankelijk zijn van het stromingsregime.

5.4 Stortgas

Stimulatie van de afbraak van organische stof in het afvalpakket door infiltratie en beluchting leidt tot een verwijdering van een grote hoeveelheid stoffen massa via de gasfase. Bij de monitoring is het dus van groot belang om de

massabalans van methaan en CO₂ vast te stellen. Metingen aan het onttrokken gas en het bepalen van de hoeveelheid optredend diffuus methaan zijn voor het vaststellen van deze massabalans van groot belang.

5.4.1 Methaanemissies

Vooraf infiltratie van percolaat zal leiden tot een verhoogde emissie van methaan. De methaanemissies voor, tijdens en na de proefneming zullen daarom worden gemonitord. Dit gebeurt middels methoden die volgens de huidige inzichten het meest geschikt lijken: box-metingen in combinatie met FID-screening om eventuele hot-spots in emissie op te sporen. De ontwikkelingen op het gebied van metingen van methaanemissies staan niet stil en er bestaat een kans dat bij uitvoering van deze meetmethode zal worden afgeweken als betere technieken op dat moment voorhanden zijn.

5.4.2 Gasvorming en -winning

De gegevens over gaswinning moeten zodanig worden bewerkt dat daarmee om een schatting is te maken van de gasvormingssnelheden in het afvalpakket. Met het toenemen van het vochtgehalte en een toename in de mobiliteit van het water in het afvalpakket wordt een toename in gasvormingssnelheid verwacht.

Stortgas wordt volgens de vergunningvoorschriften op alle pilot-locaties gewonnen en benut voor energie winning of via een fakkel verbrandt. Inzicht in de snelheid waarmee methaan in een stortlichaam wordt gevormd geeft inzicht in de mate van biologische afbraak. Het probleem is dat de hoeveelheid aan gas dat wordt gewonnen geen goede maat is voor de snelheid waarmee methaan wordt gevormd, omdat de winning van stortgas wordt gestuurd op basis van gas kwaliteit. Bovendien wordt de winning in sterke mate beïnvloed door de aanwezige infrastructuur in en rondom de stortplaats.

Door de inschatting van de actuele vormingssnelheid te combineren met gegevens van gasflux en gassamenstelling ten tijde van het normale operationele beheer, is het mogelijk om veranderingen in de standaard monitoringsgegevens te gebruiken om een schatting te maken van de actuele vormingssnelheid. Deze analyse is vooral van belang op locaties met een significante hoeveelheid gas winning.

5.4.3 Vastleggen beheer gaswinning tijdens het nul-onderzoek

Het gaswinbeheer in de periode voor aanvang van de proefneming (tijdens het nul-onderzoek) dient zo goed mogelijk te worden vastgelegd. Gedurende de nulmetingen en de proefneming dient dit beheer vervolgens zoveel mogelijk constant te worden gehouden. Om de huidige beheersituatie vast te leggen moeten de volgende vragen worden beantwoord:

- Wat is de capaciteit van de gasbenutting? Hoeveel gas wordt momenteel benut?
- Wordt gas afgefakkeld? Zo ja continu, incidenteel? Wordt dit gemeten?
- Hoe wordt gasonttrekking gemeten. Welke apparatuur, hoe gekalibreerd. Hoe wordt de gassamenstelling gemeten?
- Ontwikkeling van de gaswinning, benutting affakkelen in de laatste jaren?
- Hoe wordt de gasonttrekking (onderdruk bij de blower) geregeld? Op concentratie of op debiet? Welke concentratie? Waar en hoe wordt de onttrekking geregeld?
- Op welke manier worden de individuele bronnen bijgeregeld. Hoe frequent? Volgens welke procedure, op welke concentraties, met welke meetapparatuur en hoe wordt deze gekalibreerd. Is dit allemaal op schrift vastgelegd?

De antwoorden op deze vragen zijn van belang voor het optimaliseren van de gasonttrekking zodat de massabalans optimaal kan worden bepaald waarbij tegelijkertijd de diffuse gasemissies worden geminimaliseerd.

5.4.4 Meting debiet onttrokken stortgas

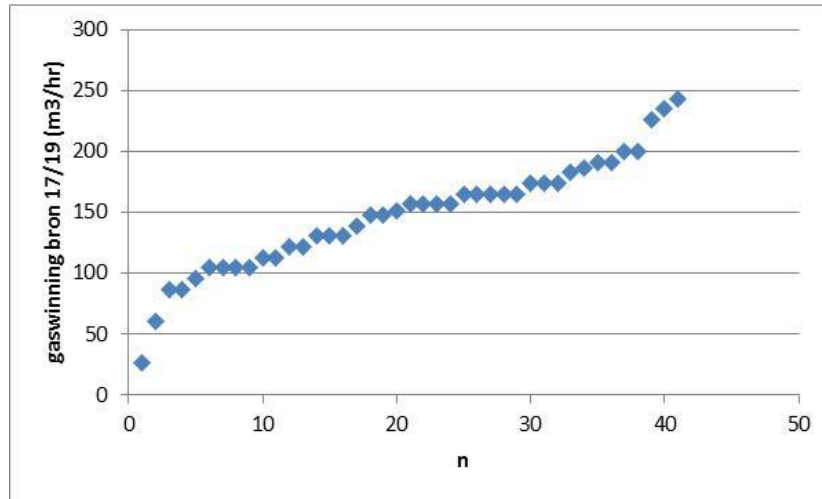
Om zicht te krijgen in de ontwikkeling van de hoeveelheid gevormd en gewonnen stortgas, zal de hoeveelheid onttrokken gas en samenstelling daarvan moeten worden gemeten. Dit moet zoveel mogelijk integraal op een geschikt punt in het gasonttrekkingssysteem voor het pilotgebied plaatsvinden. Ook dient de gasonttrekking in delen naast het testgebied te worden gevolgd.

Gas-flow (m³ per uur) kan op verschillende manieren worden gemeten. Hierbij spelen de ervaringen van de exploitant en de gewenste nauwkeurigheid een rol. Gas-flow kan worden gemeten met anemometers door een 25mm monsternamenafsluiter. Hiervoor is het wel nodig dat er, locatie specifiek en uitvoerder specifiek, een "ijklijn" voor de gassnelheids-/debietmeting wordt opgesteld. Hierbij moet rekening worden gehouden met mogelijk optreden van laminaire stroming en ongevoeligheid van de anemometer voor lage stroomsnelheden. Een andere methode om de gas flux te meten is met behulp van ultrasone flow meters, deze meten niet direct in de stroombaan maar meten de gemiddelde snelheid van het gas in de buis met behulp van reflecties van geluidsgolven gecombineerd met het dopplereffect. Indien de drukval in het systeem acceptabel is kan ook overwogen worden het drukverlies over een meetflens te meten.

Per locatie zal voorafgaand aan de selectie van de definitieve meetmethode op basis van een inschatting van de gestorte hoeveelheid organisch materiaal en de gerealiseerde methaanopbrengsten een inschatting worden gemaakt van het overgebleven methaan vormend potentieel. Op basis van deze inschatting kan de benodigde nauwkeurigheid van de gasflux meting worden geschat, zodat er een gefundeerde keuze kan worden gemaakt uit de grote verscheidenheid aan beschikbare apparatuur. Idealiter wordt de gas en de gassamenstelling zo vaak als mogelijk gemeten. Een

meetfrequentie van eens per week is noodzakelijk, zodat er minimaal 40 betrouwbare observaties tijdens de meting van de nul-situatie worden verkregen.

Toelichting. Er is in 2002 ervaring opgedaan met meten van gasvorming bij de infiltratieproef in Wijster. Hierbij werd gasvorming vastgesteld aan de hand van snelheden in de buis. Er was een zekere variatie in de gasvorming, welke deels verklaard kon worden door variaties in onderdruk. De kansdichtheidsverdeling van de gaswinning in de bron wordt gegeven door onderstaande figuur. Gemiddelde was 147 m³ per uur; standaarddeviatie is 45 m³ per uur. Aantal metingen bedroeg 42. De standaardfout (fout in het gemiddelde) bedroeg 7 m³ per uur. Het 95% betrouwbaarheidsinterval is dan 14 m³ per uur. Een stijging van gasvorming van 10% zou dus met dit aantal waarnemingen aantoonbaar moeten zijn.



Figuur 7, kansdichtheidsverdeling gaswinning.

Wanneer de gasvorming te laag is om continu biogas te onttrekken met voldoende kwaliteit (~50 vol% methaan), is het mogelijk om éénmalig een experiment uit te voeren op één of meerdere gasbronnen. Door de bronnen af te koppelen en deze aan te sluiten op een mobiele fakkel, wordt het mogelijk om de snelheid van de gasonttrekking uit deze gasbronnen te beïnvloeden. Door de snelheid van de onttrekking langzaam op te voeren en tegelijkertijd de samenstelling van het gas te meten (methaan, CO₂ en O₂), kan een inschatting worden gemaakt van de actuele vormingssnelheid. Dit is namelijk het punt waarbij de methaanconcentratie in het onttrokken gas een sterke daling zal vertonen als gevolg van een sterke verdunning met de omgevingslucht dat het stortlichaam wordt ingezogen.

5.4.5 Meting luchthoeveelheden tijdens beluchting

Hoeveelheid geïnjecteerd lucht, samenstelling en temperatuur onttrokken lucht.

Flow, druk en temperatuur van de aangetrokken omgevingslucht wordt separaat gemeten door continue registratie bij de compressor. Daarnaast worden voorzieningen gerealiseerd in het gasverdeelsysteem voor de beluchting. Als onderdeel van de reguliere bedrijfsvoering wordt periodiek de druk op de individuele bronnen gemeten en bijgesteld om een zo homogeen mogelijke verdeling van lucht te realiseren. Meetresultaten en kleppenstanden voor de individuele bronnen zullen hierbij worden geregistreerd.

Hoeveelheid en samenstelling onttrokken lucht.

Flow, druk en temperatuur van de onttrokken lucht van het gehele te verduurzamen oppervlak wordt continu gemeten op vergelijkbare manier als de winning van stortgas (zie 5.4.4). Metingen per individuele bron zijn mogelijk door middel van voorzieningen in het gasverdeelsysteem. Periodiek wordt de onderdruk, samenstelling en temperatuur van de individuele bronnen gemeten en bijgesteld om een zo homogeen mogelijke verdeling van lucht te realiseren. Meetresultaten en kleppenstanden voor de individuele bronnen zullen hierbij worden geregistreerd.

5.4.6 Meten diffuse emissies naar de lucht

Methaanemissies worden gemeten door middel van screening van concentraties boven het stortoppervlak, conform de "Guidance on monitoring landfill gas surface emissions" van UK-EPA. Deze surface screening geeft een kwalitatief beeld van de optredende methaanemissies. Door middel van een dergelijke surface screening kan worden geconstateerd of de methaanemissies toe, dan wel afnemen.

5.5 Zettingen

Optredende lokale zettingen zijn een belangrijke indicator voor de effectiviteit van de biologische afbraak van het vast organisch materiaal in het afvalpakket. Indien onvoldoende gegevens over zettingssnelheden (cm/jaar) uit het recente verleden bekend zijn, dienen (in het nul-onderzoek) hoogtemetingen op zettingsbaken te worden uitgevoerd. Minimaal dient één zettingsbaak per 5.000-10.000 m² te worden geïnstalleerd, met een minimum van 5 per pilot. Voor vaststellen van een zettingssnelheid (cm/jaar) volstaan in principe twee hoogtemetingen (in cm), uitgevoerd op enige tijd van elkaar. Om eventuele uitbijters door meetfouten te kunnen interpreteren is een herhalingsmeting noodzakelijk. Dit betekent dat er voorafgaande aan de uitvoering van de pilot er minimaal 3 hoogtemetingen moeten worden uitgevoerd, waardoor de zettingssnelheid in duplo kan worden vastgesteld.

Tijdens de uitvoering van de pilotprojecten is het aan te bevelen om daarnaast per infiltratieveld één zettingsbaak te installeren en hier ten minste maandelijks een hoogtemeting te doen.

5.5.1 Interpretatie van Zettingen

De verwachting is dat bij actieve biodegradatie van organisch materiaal sprake zal zijn van relatief snelle zettingen die vooral bestaan uit een reeks lokale verlagingen aan het maaiveld. In een gestabiliseerde stortplaats treedt vrijwel geen biologische afbraak meer op waardoor er geen lokale zettingen meer zullen optreden. Zettingen treden nog wel op, maar meer geleidelijk en met afnemende snelheid in de tijd. Onder deze omstandigheden is het niet te verwachten dat het stromingsregime van water en gas door het afvalpakket in de toekomst nog aan sterke veranderingen onderhevig zullen zijn.

5.6 Heterogeniteit en schaal

In het afvalpakket van stortplaatsen is er sprake van een ruimtelijke heterogeniteit veroorzaakt door verschillen in gestort afvalmateriaal en verschillen in wijze van storten. Deze verschillen zullen een effect hebben op het afbraak van het organische materiaal in het afvalpakket en daarmee ook op het emissiepotentieel. Heterogeniteit in het afvalpakket zorgt voor een variatie in de gemeten concentraties in het percolaat gemeten in een pompput wat de interpretatie van de waarneming zal beïnvloeden.

Het vaststellen van de consequenties van deze heterogeniteit is een bijzondere uitdaging vooral vanwege de schaal van een stortplaats in vergelijking met de schaal van een afval monster. Geofysische meettechnieken zoals Elektrische Geleidbaarheid Tomografie zijn meetmethoden die met succes toegepast zijn op stortplaatsen om inzicht te krijgen in de ruimtelijke verspreiding van geïnfiltreerd water, echter de interpretatie van deze metingen is slechts kwalitatief. Andere geofysische technieken die een beeld kunnen geven van de heterogeniteit zijn geo-radar en hoge resolutie seismiek.

6 Strategie om van het emissiepotentieel van een afvalpakket te bepalen

6.1 Doel van het vaststellen van het emissiepotentieel

Het emissiepotentieel van het afval is de hoeveelheid uitloogbare verontreiniging, zoals die zich op een zeker moment in het afvalpakket bevindt. Verduurzaming van het afvalpakket heeft als doel om een significante reductie te realiseren van dit emissiepotentieel (zie inleiding). Brononderzoek naar het effect van het verduurzamen op het emissiepotentieel vormt een centraal thema bij het uitvoeren van de praktijkproef, omdat:

- door vergelijking van het emissiepotentieel voor en na de verduurzamingsmaatregelen kan worden aangetoond dat een substantiële reductie van het emissiepotentieel is gerealiseerd;
- door verdergaand onderzoek het mechanistisch inzicht in de effectiviteit van verduurzamingsmaatregelen op specifieke componenten kan worden verbeterd;
- validatie van methoden mogelijk wordt voor het vaststellen van het emissiepotentieel op basis van inverse modellering;
- hiermee (inclusief een prognose in de tijd van de actuele emissies) kan worden bepaald of een stortplaats voldoende is gestabiliseerd om over te gaan naar de nazorgfase.

Het emissiepotentieel is het gevolg van het samenspel van een groot aantal processen en is als gevolg daarvan niet te bepalen met één enkele meting. Het emissiepotentieel is vast te stellen in de context van het conceptueel model waarbij de aanname is dat het emissiepotentieel samenhangt met de concentratie van een bepaalde component in het mobiele poriënwater en in de vaste fase. De emissie wordt vooral bepaald door de uitwisseling naar het mobiele poriënwater en vervolgens uitspoeling als percolaat. Deze operationele definitie maakt het mogelijk om een numerieke of analytische implementatie van het conceptueel model te maken waarin het emissiepotentieel een stochastische parameter is. Met de verkregen data uit de monitoring is het mogelijk om de waarschijnlijkheidsverdeling van de emissiepotentieel parameter te bepalen met behulp van inverse modellering.

6.2 Vaststelling van emissiepotentieel op basis van inverse modellering

Het conceptueel model kan op meerdere manieren worden beschreven in wiskundige termen. Onderscheid is hierbij te maken van zeer eenvoudig tot complex. Enkele van deze wiskundige modellen worden ontwikkeld om daarmee de variaties in het percolaat en in de stortgas te beschrijven. Inverse modellering is een methode om met behulp van de monitoringsgegevens en de verschillende modellen de statistische verdeling van de parameters in het model te bepalen, dit wordt ook wel model-calibratie genoemd. De uiteindelijke statistische verdeling kan worden gebruikt om de gevoeligheid van het model voor een bepaalde parameter te bepalen en het geeft aan wat de betrouwbaarheid is van de kwantitatieve waarde van een bepaalde parameter. Elk model zal een parameter bevatten dat aangeeft hoeveel er van een bepaalde component op een bepaalde moment aanwezig is in het afvalpakket. Deze parameter vormt een belangrijk deel van het concept emissiepotentieel.

Het is in dit verband belangrijk om te beseffen dat de kwaliteit van het conceptueel model wordt bepaald door de mate waarin het model instaat is om toekomstig gedrag te voorspellen/beschrijven. Hiervoor is het nodig om na afloop van de calibratiefase de monitoring gedurende langere tijd voort te zetten.

Zoals vermeld zullen meerdere wiskundige modellen worden gemaakt. Een kwantitatieve parameter, zoals emissiepotentieel moet altijd in de context van de achterliggende wiskundige implementatie worden beschouwd, omdat de modellen die gebruikt worden een zeer grove vereenvoudiging zijn van de werkelijkheid. De parameters in dergelijke empirische modellen zijn de weerslag van een groot aantal processen die niet expliciet zijn geïmplementeerd in de wiskundige beschrijving. De onzekerheid zit in de statistische verdelingen van de parameters. Het is heel goed mogelijk dat de grootte van een parameter dat de emissiepotentieel kwantificeert heel andere waarden zal hebben voor de verschillende mogelijke mathematische modellen. Dit betekent dat de grootte van een parameter minder van belang is dan de betrouwbaarheid van het kunnen voorspellen van het toekomstige uitloog gedrag. Relatieve veranderingen in parameter waarden als gevolg van de maatregelen om het emissiepotentieel te verlagen zijn daarentegen van grote waarde omdat deze inzicht geven in de mate van succes van het reduceren van het emissiepotentieel. Toepassing en vergelijken van de (relatieve) uitkomsten van verschillende wiskundige implementaties geeft inzicht in de betrouwbaarheid van ons begrip van het conceptueel model en de voorspellingen ten aanzien van de toekomstige emissies.

6.3 Monsternamen om deelaspecten van het conceptueel model te valideren

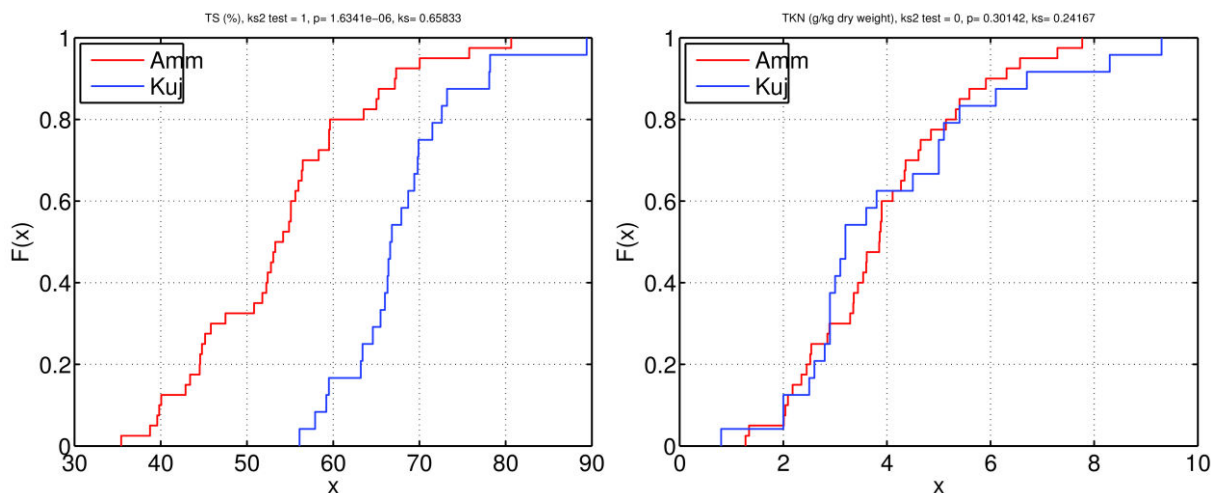
6.3.1 Aantal monsters

Reductie van het emissiepotentieel en het verwijderen van grote hoeveelheden massa zal een groot effect hebben op de karakteristieken van het afvalmateriaal in het afvalpakket. Naast een sterke verlaging van het gehalte aan organische stof, zal ook de samenstelling van het organische stof veranderen waarbij het gehalte aan slecht afbreekbaar organisch materiaal met een groot adsorptie vermogen zal toenemen. Het uitloog gedrag van het materiaal zal als gevolg van deze veranderingen ook veranderen.

Een deel van deze veranderingen kan worden voorspeld vanuit de reguliere monitoringsgegevens in combinatie met het conceptueel model. Het nemen van monsters aan het begin en aan het einde van de verduurzamingspilots om deze voorspellingen te verifiëren is noodzakelijk. De benodigde aantallen van monsters die noodzakelijk zijn voor een statistisch verantwoorde interpretatie zijn gezien de verwachte (doch nu onbekende) heterogeniteit, de grootte van de stortcompartimenten (meerdere hectaren en tot 20 meter diep) en het volume van de te nemen monsters moeilijk vast te stellen.

In de literatuur is een aantal datasets te vinden waarin een relatief groot aantal monsters zijn genomen uit stortplaatsen. In Finland hebben Sormunen et al. [[Sormunen, Ettala & Rintala 2008a,b]] monsters genomen uit twee heel verschillende stortplaatsen (Ämmäsuo, 54 ha en Kujala, 24 ha) waarbij op één stortplaats er 19 (Amm) en op de andere 6 (Kuj) boringen zijn genomen. Uit elke boring zijn één of meerdere monsters genomen (totaal respectievelijk 40 en 24 monsters). De grootte van de monsters was zeer verschillend (Amm: 300 tot 500 liter, Kuj: 10 tot 20 liter). Op deze monsters is in het laboratorium een aantal parameters bepaald onder meer totaal gehalte van vaste stof (TS) en totaal gehalte aan N_{kj} (TKN). Deze datasets kunnen worden gebruikt om een schatting te maken of deze ordegrrootte van boringen en monsternamen voldoende onderscheidend vermogen heeft om de verschillende stortplaatsen van elkaar te onderscheiden, of in het geval van de verduurzamingspilots, of er een verschil zal zijn in voor en na de behandeling.

In figuur 8 zijn de cumulatieve dichtheidsverdelingen weergegeven van TS en TKN zoals gemeten op beide stortplaatsen. Met behulp van de Komogorov-Smirnov test is gekeken of de gegevens verkregen uit de verschillende stortplaatsen statistisch significant van elkaar verschillen. Dit was wel het geval voor de TS en niet het geval voor TKN. De stortplaatsen zijn zeer verschillend met betrekking tot het type afval materiaal en de periode van storten. Dit verklaart het verschil in TS. Het feit dat TKN statistisch niet significant anders is kan liggen in het feit dat stikstof onder anaerobe omstandigheden vrij inert is en dat het materiaal niet of nauwelijks is gestabiliseerd.



Figuur 8 Cumulatieve dichtheid van de TS en TKN metingen aan monsters uit

De resultaten van dit Finse onderzoek geven aan dat het mogelijk is om met minimaal 1 boring per ha waaruit per boring minimaal 5 monsters worden genomen het mogelijk moet zijn om statistisch significant, enig effect van de verduurzaming aan te tonen. Dit omdat door de reguliere monitoring er veel inzicht zal zijn in de massabalans. Het aantonen van een verschil is dan relatief eenvoudig.

6.3.2 Monstername, voorbehandeling en analyses

Zowel tijdens het nul-onderzoek als na afloop van de pilotprojecten kunnen monsters worden genomen. Het nemen van de monsters, de keuze van de monstergrootte, de voorbehandeling en analyse van de monsters wordt gebaseerd op eerdere projecten binnen Duurzaam Storten, met name de pilot in Landgraaf.

Monstername en voorbehandeling.

Belangrijke conclusie is dat afval uit een stortplaats bij opgraving blijkt te bestaan uit een fractie van fijn, deels vergaand materiaal (<< 5-10 cm) en een deel niet of slecht afbreekbaar grover materiaal. Het emissiepotentieel van verontreinigingen en ook resterend gaspotentieel bevindt zich vooral in deze fijnere fractie¹. Wanneer monsters worden genomen om deze parameters in het afval vast te stellen, kan de monstername richt zich dan ook volledig richten op het nemen van representatieve monsters van deze fijne fractie. Om resultaten uiteindelijk te kunnen vertalen dient in in een sorteerproef nog wel het aandeel van de fijnere fractie op het totale afval worden vastgesteld. Op deze manier kon worden volstaan met monsters in de orde grootte van 10 liter.

Deze beperkte monstergrootte maakt ook de opvolgende monstervoorbehandeling een stuk eenvoudiger. Monstervoorbehandeling bestaat uit drie stappen:

- droging van het materiaal, waarbij de gewichtsafname door vochtverlies wordt geregistreerd;
- handmatige afscheiding van inerte materialen, welke kunnen storen bij monsterverkleining of analyses. Voorbeelden daarvan zijn stenen, stukken vast metaal en hard en zacht plastic. De hoeveelheid handmatig afgescheiden materiaal wordt daarbij ingewogen;
- verkleining van het materiaal tot deeltjes, kleiner dan 1 cm. Dit materiaal wordt aangeleverd aan de diverse laboratoria, waar afhankelijk van de specifieke analyse nog verdere voorbehandeling en deeltjesverkleining kan plaatsvinden.

Bepaling van de resterende hoeveelheid biodegradeerbaar organisch materiaal

Voor afvalmonsters bestaan een aantal analyses, voor karakterisering van de hoeveelheid koolstof, of organisch materiaal. Probleem is dat ze vaak net even iets anders meten. Belangrijk hierbij is het verschil tussen koolstof, organische koolstof en het deel daarvan, dat daadwerkelijk biologisch afbreekbaar is. De meest gangbare mogelijkheden voor bepaling van organisch materiaal zijn hieronder geschetst.

Tabel 2, methoden voor bepaling van koolstof, organisch materiaal en biodegradeerbaar organisch materiaal

	meetprincipe	voordelen	nadelen
Gloeiverlies	Gewichtsverlies van	Simpele methode. Goedkoop.	Weinig selectief. Naast droge

¹

Dit is een essentieel verschil in vergelijking met bijvoorbeeld calorische waarde bij verbranding van het materiaal. Dat wordt vooral bepaald door het grover materiaal en dat is een stuk lastiger te bemonsteren.

	gedroogd monster bij verhitting tot 800 °C	Toepasbaar op grotere monsters (~1 kg)	organische stof maken ook plastics, CaCO ₃ en kristalwater deel uit van gloeiverlies.
TOC	CO ₂ -vorming bij verbranding	Simpel, toepasbaar op grotere hoeveelheden	Weinig selectief. Naast droge organische stof maken ook plastics, Kruisgevoeligheden met plastics en anorganische bronnen van CO ₂ (als CaCO ₃)
milde oxidaties (H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ of dichromaat)	Consumptie reagentia	Selectief voor organisch materiaal (afhankelijke van de specifieke methode)	Bepaalt totaal organische stof, niet het deel dat nog biologisch afbreekbaar is. Dure methode, veelal toegepast op kleine monsters (~10-50 mg).
Vergistingstest	Biogasvorming onder anaerobe omstandigheden	Indicatie van restpotentieel aan daadwerkelijk biodegradeerbaar organisch materiaal.	Langzame proef. Normaliter wordt een proef afgebroken na een bepaalde tijd (bijvoorbeeld 21 dagen; soms 72), waardoor dus niet het hele biogaspotentieel wordt vastgesteld.
respiratietests	O ₂ -consumptie en CO ₂ -vorming	Indicatie van restpotentieel afbreekbaar organisch materiaal. Sneller en goedkoper dan een vergistingstest.	Afbreukfout als bij vergistingstest. Niet 100% selectief, want onder aeroob is een groter deel van het organisch materiaal afbreekbaar.

Bij de pilots wordt ervoor gekozen om twee van de bovenstaande analyses te combineren:

- het gloeiverlies om een indicatie te krijgen van de resterende hoeveelheid organisch materiaal. Een gloeiverliesbepaling wordt vaak gecombineerd met een bepaling van het vochtgehalte. Het gloeiverlies is de meest praktische indicator (lage kosten en de relatief grote monsterhoeveelheid, waardoor de test aan nauwkeurigheid wint) voor de totale hoeveelheid organisch materiaal. De selectiviteit van een gloeiverliesbepaling als indicator voor de totale hoeveelheid organische koolstof kan worden verbeterd door (i) de voorgaande droging zorgvuldig uit te voeren en (ii) handmatig plastics en inert af te scheiden.
- respiratietests voor bepaling van de hoeveelheid. Ervaring in eerdere proeven is, dat de respiratietest zinnvollere resultaten oplevert dan een vergistingstest en ook qua kosten aanzienlijk gunstiger. Om de afbreukfout te minimaliseren, wordt de respiratietest gedurende 21 dagen uitgevoerd. Overwogen kan worden om de test door te zetten als na 21 dagen, de zuurstofconsumptie per dag nog groot is.

Overige testen

Het uitlooptententief van het afval kan worden vastgesteld door uitlooptests. Hierbij wordt een monster doorspoeld met een bepaalde hoeveelheid water, waarna de opgeloste concentraties aan verontreinigingen worden bepaald. Deze uitlooptesten worden in een aantal varianten uitgevoerd:

- op de individuele monsters worden schudtesten uitgevoerd, waarbij het monster aan een hoeveelheid water wordt blootgesteld en vervolgens wordt gemeten wat in de waterfase oplost. Dit kan worden gezien als een snelle, goedkope variant van de kolom-uitlooptest. Deze test kan worden gebruikt om een groter aantal monsters te karakteriseren en de heterogeniteit vast te stellen. Twee typen schudtesten worden voorzien:
 - een beschikbaarheidstest (lage pH voor metalen; hoge pH voor anionen)
 - een schudtest bij de "eigen" pH.
De eerste geeft de (resterende) potentiële uitlooptentief en de tweede de actuele uitlooptentief;
- op een mengmonster zal een kolom uitlooptest worden uitgevoerd. Hierbij wordt een monster bij eigen pH doorstroomd met water. Uiteindelijk wordt 10 keer het volume water gebruikt, ten opzichte van het volume van het oorspronkelijke monster. De samenstelling van het eluaat wordt gemeten en er wordt een curve gekregen. Deze test geeft naast een schatting van het uitlooptentief ook een inschatting van de uitlooptentief bij beperkte doorspoeling en de samenstelling van eventueel percolaat, afkomstig van een dergelijk monster. Het mengmonster wordt samengesteld uit materiaal uit zones die in vergelijkbare mate zijn gestabiliseerd. Hierbij wordt gestreefd naar materiaal in verschillende stadia van afbraak. Dit wordt bepaald aan de hand van de resultaten van de analyses op individuele monsters gecombineerd met informatie verkregen uit bijvoorbeeld geofysische waarnemingen en waargenomen zettingen;
- een pH-stat-test, waarbij een schudtest wordt uitgevoerd bij verschillende pH. De pH-stat-test zal worden uitgevoerd op dezelfde mengmonsters als gebruikt voor de kolomproeven;
- speciatie van organisch materiaal (= fractioneren in deelfracties met verschillende reactiviteit), waarbij de hoeveelheid humuszuren, fulvinezuren en hydrofiële componenten in het vaste organische materiaal en in de opgeloste organische stof (DOC, na schudtest met water) wordt vastgesteld. Deze analyse wordt in ieder geval gedaan op de mengmonsters van de kolomproeven en de pH-stat. Op basis van de schudproeven een aantal monsters worden geselecteerd voor deze analyse;

6.3.3 Interpretatie en te verwachten resultaten

Afvalmonsternamen en analyse is bedoeld om de invloed van verduurzaming op het uitloogpotentieel beter te begrijpen en uiteindelijk te onderbouwen dat dit uitloogpotentieel substantieel wordt gereduceerd. De analyses kunnen op verschillende manieren worden geïnterpreteerd.

- uit de *vergelijking* van de resultaten van de metingen *voorafgaand en na afloop* van de pilotprojecten kan een afname in gemiddeld uitloogpotentieel door middel van schudtesten worden bevestigd. De verwachting is wel dat er een grote spreiding zal zijn, een afname met 50% of meer zal echter aantoonbaar moeten zijn. Het emissiepotentieel van het afvalpakket als geheel wordt dan bepaald door deze resultaten te integreren in de wiskundige uitwerking van het conceptueel model waarbij alle overige processen beschreven in dit conceptueel model zullen zijn geïntegreerd;
- de analyseresultaten van monsters, die tijdens de nulmeting worden genomen zullen een relatief grote spreiding vertonen. Dat komt doordat biodegradatie in het afvalpakket niet gelijkmatig verloopt. Delen van het afvalpakket zullen al verregaand zijn omgezet, terwijl in andere delen de omzetting nog niet of nauwelijks op gang is gekomen. Verdergaande stabilisatie houdt in, dat vooral biodegradatie in de niet omgezette delen op gang komt waardoor het materiaal in het afvalpakket homogener wordt. Na afloop van de proefnemingen verwachten we dat de spreiding in analyseresultaten significant zal zijn afgenomen;
- door de resultaten van pH-stat-testen op mengmonsters van het afval voor aanvang en na afloop van de pilotprojecten met elkaar te vergelijken wordt per component, mechanistisch inzicht verkregen in welke fysisch-chemische processen de uitloging bepalen (oplosbaarheid, beschikbaarheid, DOC-mobilisatie, pH, aanwezigheid specifieke minerale fase). Een indicatie van dit effect kan al tijdens het nul-onderzoek worden gekregen, wanneer de resultaten van pH-stat testen van niet of nauwelijks omgezette delen van het afvalpakket wordt vergeleken met de resultaten van verdergaand omgezette delen.

7 Referenties

- Baun D. and Christensen T. (2004) Speciation of heavy metals in landfill leachate: a review. *Waste management & research* 22, 3-23.
- Huo S., Xi B., Yu H., He L., Fan S. and Liu H. (2008) Characteristics of dissolved organic matter (DOM) in leachate with different landfill ages.. *Journal of environmental sciences (China)* 20, 492-8.
- Laner D., Fellner J. and Brunner P. H. (2011) Future landfill emissions and the effect of final cover installation - A case study.. *Waste management* 31, 1522-31.
- Luning L. Oonk H. (2011) Stortgasemissies Duurzaam Stortbeheer, Ecofys rapport, projectnummer: PSUPNL102132, Ecofys, Utrecht.
- Olivier F. and Gourc J.-P. (2007) Hydro-mechanical behavior of municipal solid waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell.. *Waste management (New York, N.Y.)* 27, 44-58.
- Oonk, H. (2012). *Introductie Duurzaam Stortbeheer op praktijkschaal; Integraal Plan van Aanpak*, Rapport Stichting Duurzaam Storten, 's-Hertogenbosch.
- Ostman M., Wahlberg O., Gren S. and Mårtensson A. (2006) Metal and organic matter contents in a combined household and industrial landfill.. *Waste management (New York, N.Y.)* 26, 29-40.
- Pommier S., Chenu D., Quintard M. and Lefebvre X. (2007) A logistic model for the prediction of the influence of water on the solid waste methanization in landfills. *Biotechnology and bioengineering* 97, 473-482.
- Sormunen, K.; Ettala, M. & Rintala, J. (2008a). *Internal leachate quality in a municipal solid waste landfill: vertical, horizontal and temporal variation and impacts of leachate recirculation.*, *Journal of hazardous materials* 160 : 601-7.
- Sormunen, K.; Ettala, M. & Rintala, J. (2008b). *Detailed internal characterisation of two Finnish landfills by waste sampling*, *Waste Management* 28 : 151-163.
- TCB (2012). *Advies Duurzaam Stortbeheer, Fase 1*, Advies Technische Commissie Bodem, Den Haag.

