



Potentiële effecten van het gebruik van thermisch gereinigde grond als dijkversteving

- een effectstudie aan omgevingseffecten en veenaafbraak -



TUSSEN RAPPORTAGE

Summary of Comments on 536 vast een aantal opmerkingen op rapport bijlage Rapportage TGG toepassing Eemdijk TUSSEN RAPPORTAGE.pdf

Page: 1

☰ Number: 1 Author: [REDACTED] Subject: Typemachine Date: 21-10-2021 12:56:04
10.2.e

📄 Number: 2 Author: [REDACTED] Subject: Redactiewijziging Date: 10-1-2022 16:44:48 +01'00'

Titel rapport:

Potentiële effecten van het gebruik van thermisch gereinigde grond als dijkversteving. Een effectstudie aan omgevingseffecten en veenafbraak

Auteurs:

1 *Ijs van Dijk, Yvon Verstijnen, Moni Poelen & Fons Smolders*

Opdrachtgever:

2 *Valk (Waterschap Vallei en Veluwe)*

Rapportnummer: RP-16.128.17.32

Informatie:

Onderzoekcentrum B-WARE B.V.

Radboud Universiteit Nijmegen

Mercator III, Toernooiveld 1

6525 ED Nijmegen

Kamernummer: 02.019

Tel: 024-2122203

3 *vandijk@b-ware.eu*

© Onderzoekcentrum B-WARE B.V., Nijmegen, 2017.

Page: 2

Number: 1 Author: [REDACTED] Subject: Redactiewijziging Date: 26-10-2021 12:44:55

Number: 2 Author: [REDACTED] Subject: Redactiewijziging Date: 26-10-2021 12:44:56

Number: 3 Author: [REDACTED] Subject: Redactiewijziging Date: 26-10-2021 12:45:14

Samenvatting

Wordt pas geschreven nadat alle resultaten beschikbaar zijn en reactie op concept rapportage is ontvangen, per hoofdstuk is wel reeds een kader opgenomen met conclusies

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave.....	4
1. Inleiding.....	6
2. Materiaal & Methode.....	10
2.1 Chemische samenstelling van bodem en potentiële uitspoeling naar omgeving	10
2.2 Effecten van uitspoeling uit TGG laag op de onderliggende veenlaag	12
2.3 Bemonstering en chemische analyse van bodem en water.....	14
3. Resultaten	19
3.1 Wat is de chemische samenstelling van de TGG en de onderliggende bodemlagen?.....	19
3.1.1. Wat is de chemische samenstelling van de thermisch gereinigde grond en verschilt deze van de van nature aanwezige bodemlagen?	19
3.1.2. Is de samenstelling van TGG anders als de omgeving en voldoet deze aan de normen?	21
3.2 Heeft de thermisch gereinigde grond een effect op de omgeving?.....	24
3.2.1. Is er kans op uitspoeling van vervuiling uit de TGG	25
3.2.2. Zijn er in het veld effecten op onderliggende bodemlagen?	26
3.2.3. Zijn er in het veld effecten op het grondwater?.....	30
3.2.4. Effecten op oppervlaktewater	34
3.3 Hoe functioneert de dijk hydrologisch en in welk mate kan vervuiling uit de TGG laag zich in de omgeving verplaatsen?	38
3.4 Effecten van uitspoeling van sulfaat en zouten uit de thermisch gereinigde grond op biogeochemische processen en afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag?	38
3.4.1. Uitspoeling vanuit TGG laag en de consequenties voor de onderliggende veenlaag.....	38
3.4.2. Effecten van TGG op afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag.....	42
4. Discussie.....	46
4.1 Eigenschappen van TGG	46
4.1.1 Samenstelling van TGG in relatie tot de omgeving en het milieu	46
4.1.2 Uitspoeling van natrium en sulfaat uit de TGG laag.....	46
4.1.3 Uitspoeling van zware metalen en anionen uit de TGG laag en normoverschrijding	48
4.2 Biogeochemische en ecologische effecten van uitspoeling van natrium en sulfaat uit de TGG laag naar de omgeving	49
4.2.1 Kation-mobilisatie	49
4.2.2 Verhoogde pH & mobilisatie van reactief organisch materiaal	49
4.2.3 Beschikbaarheid van nutriënten in de bodem	50
4.2.4. Consequenties van verhoogde sulfaat uitspoeling en hieruit volgende sulfaatbelasting op oppervlaktewater	50
4.2.5 Consequenties van verhoogde natrium uitspoeling en hieruit volgende natriumbelasting op oppervlaktewater	51
4.3 Effecten van uitspoeling uit TGG op afbraakprocessen en structuur in de onderliggende veenlaag	52
4.3.1 Effecten van uitspoeling uit TGG op afbraakprocessen in de veenlaag	52
4.3.2 Fysische effecten van uitspoeling uit TGG op de veenlaag i.r.t. de bodemstructuur	53
5. Conclusies & Aanbevelingen	55
5.1 Conclusies.....	55
5.2 Aanbevelingen.....	57
5.2.1 Hoe om te gaan met de huidige onderzoek locatie.....	57
5.2.2 Productie van en toekomstige toepassing van TGG.....	57
5.2.3 aanbevelingen voor vervolgonderzoek	58
6. Literatuur	60
Bijlage	61

3. Inleiding

De dijk langs het Eemmeer tussen Bunschoten-Spakenburg en Eemdijk is in 2016 verstevigd. Met deze dijkversteviging is de dijk aan de landinwaartse zijde verbreed en verstevigd. Tijdens deze werkzaamheden zijn er aan de binnenzijde van de dijk verschillende materialen aangebracht en is de parallel aan de dijk gelegen sloot gedempt. Daarna is er verder landinwaarts een nieuwe sloot aangelegd. Voor de versteviging van de dijk is thermische gereinigde grond (TGG) toegepast. Nadat een deel van de dijkverstevigingswerkzaamheden verzet waren werd geconstateerd dat de waterkwaliteit, in enkele watergangen welke in contact stonden met het dijklichaam, aanzienlijk verslechterde in vergelijking met andere watergangen in de polder. Tevens werd er in de media vervolgens een verband gelegd tussen de veranderende waterkwaliteit en de gezondheid c.q. sterfte van kalveren van een aangrenzend gelegen agrarisch bedrijf.

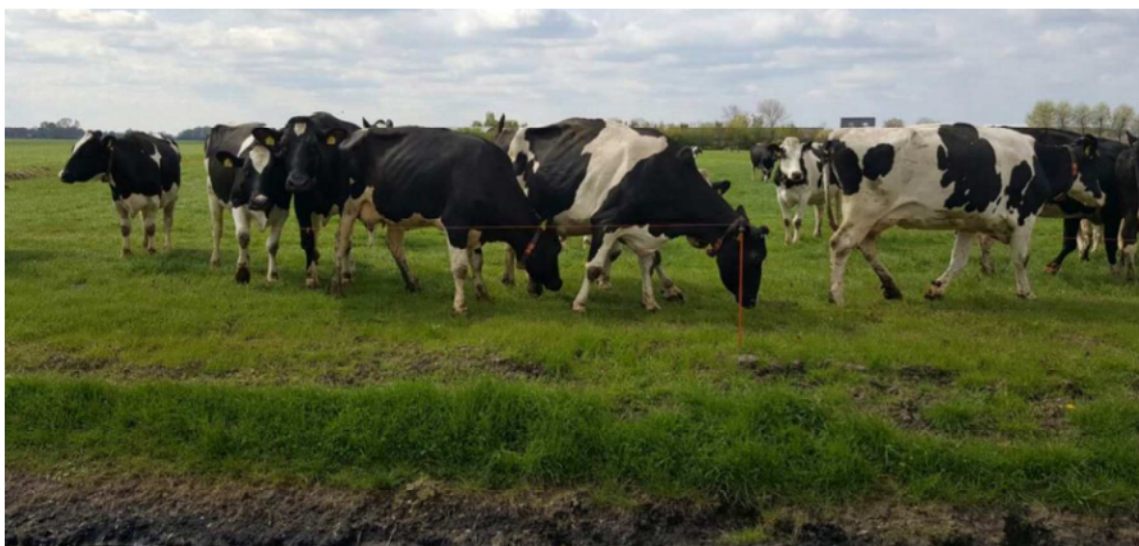




Foto 1: Vee op perceel aangrenzend aan de dijk (foto J. Graafland).


Bij nadere analyse van de waterkwaliteit van dit oppervlaktewater door Waterschap Vallei en Veluwe bleek dat het oppervlaktewater een hoge geleidbaarheid (EGV, elektrisch geleidend vermogen) en hoge sulfaatconcentraties bevatte (970 mg SO₄/l en een EGV van 484 mS/cm, (bron: Waterschap Vallei en Veluwe augustus 2016)). Tevens is er melding gemaakt een stank van rotte eieren in de watergangen door omwonende na de dijkversteviging (mondelijke mededeling Waterschap Vallei en Veluwe). In eerste instantie was de oorsprong hiervan onbekend. Naar aanleiding hiervan heeft Waterschap Vallei en Veluwe de tijdens de dijkversteviging gebruikte thermisch gereinigde grond laten analyseren en uit deze analyses kwam voort dat de thermisch gereinigde grond hoge chloride-, **5**atrium- en zwavelconcentraties bevat en zeer waarschijnlijk de bron is geweest voor de verhoogde concentraties van deze stoffen in het oppervlaktewater. De verhoogde concentraties van deze stoffen uit de thermische gereinigde grond zouden hiermee wellicht ook een van de mogelijke oorzaken kunnen zijn voor de incidenten welke zijn waargenomen na de dijkversteviging. Aangezien de opgebrachte laag met thermisch gereinigde grond een periode van enkele maanden onafgedekt op de dijk heeft gelegen (vanuit wet- en regelgeving is dit normaliter toegestaan in de periode dat het werk niet is opgeleverd) zijn er waarschijnlijk via neerslag water veel makkelijke oplosbare stoffen zoals ionen (waaronder **7**atrium en sulfaat) uit deze laag gespoeld naar het omliggende oppervlaktewater. Vervolgens is in de periode augustus 2016, zoals gepland, de laag met TGG afgedekt met een kleilaag en heeft het Waterschap Vallei en Veluwe de loodrecht op de dijk gelegen sloten afgedamd en de parallel aan het dijklichaam

Page: 6


 Number: 1 Author: [redacted] Subject: Redactiewijziging Date: 15-12-2021 09:19:58 +01'00'

 Number: 2 Author: [redacted]_5 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:04:34
algemeen : Inleiding kan korter

 Number: 3 Author: [redacted]_4 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:04:03

 Number: 4 Author: [redacted] Subject: Notitie Date: 19-6-2017 15:58:05
klopt dit is in eerste instantie niet gemeten

 Number: 5 Author: [redacted]_1 Subject: Markering Date: 19-6-2017 15:58:09

 Number: 6 Author: [redacted]_3 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:01:35
zie eerdere opmerking

 Number: 7 Author: [redacted]_2 Subject: Markering Date: 19-6-2017 15:59:12

aangelegde watergang sneller gaan doorspoelen met oppervlaktewater uit de omgeving. Daarnaast is de waterbodem van de omringende sloten van derden geanalyseerd en waar nodig is deze opgeschoond en afgevoerd. Na deze maatregelen is het elektrisch geleidend vermogen en zijn de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater afgenomen. Ondanks de afname van het elektrisch geleidend vermogen en de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater waren echter de consequenties van de TGG laag in de dijk op de omgeving (aangrenzend oppervlaktewater, percelen, het grondwater) nog maar deels bekend. Tevens was er onzekerheid in hoeverre (vervuilende) elementen uit de TGG laag gemobiliseerd worden en in hoeverre deze de normen overschreiden en in contact konden komen met de onder het dijklichaam aanwezige veenlaag en in hoeverre dit mogelijk de stabiliteit van de dijk zou kunnen beïnvloeden. Om deze onzekerheden te verkleinen en de effecten en risico's van de TGG laag beter in te kunnen schatten is hierom besloten om Onderzoekcentrum B-WARE een onderzoek uit te laten voeren. Het huidige rapport doet verslag van het de resultaten die dit onderzoek.

Doelstelling: *Het doel van het huidige onderzoek was om de chemische samenstelling van en uitspoeling uit de opgebrachte thermisch gereinigde grond vast te stellen en te onderzoeken hoe de uitspoeling van stoffen uit deze laag biogeochemische processen in de omgeving kunnen beïnvloeden en of dit potentiële risico's met zich mee brengt voor de dijkveiligheid.*

Om tot deze doelstelling te komen zijn de onderstaande onderzoeksvragen geformuleerd;

Onderzoeksvragen:


- A. Wat is de chemische samenstelling van het opgebrachte materiaal en de onderliggende bodemlagen?
- B. Welke consequenties heeft de samenstelling van het materiaal op de uitspoeling van zwavel, zouten en zware metalen naar de omgeving?
- C. In welke mate kan de uitspoeling van stoffen uit de thermisch gereinigde grond biogeochemische en ecologische processen in de omgeving beïnvloeden?
- D. In welke mate kan uitspoeling van sulfaat uit de thermisch gereinigde grond afbraakprocessen in de onder het dijklichaam aanwezige veenlaag beïnvloeden en welke potentiële risico's brengt dit met zich mee voor dijkveiligheid.


Om deze onderzoeksvragen te beantwoorden is er op verschillende manieren onderzoek verricht, ten weten; biogeochemisch en hydrologisch onderzoek in het veld en aanvullende experimenten in het laboratorium (zie hoofdstuk 2).


2. Een van de belangrijkste vragen binnen dit onderzoek betroffen de vragen of er uitspoeling van stoffen (zoals sulfaat- en ander ionen) uit de TGG laag plaatsvindt en wat de potentiële consequenties van deze uitspoeling op de omgeving kunnen zijn. Het gaat hier grotendeels om stoffen die van nature in het milieu voorkomen (zoals 4. atrium en sulfaat) in variërende concentraties. De in de watergangen aangetroffen sulfaatconcentraties en elektrisch geleidend vermogen in augustus 2016 waren echter hoger dan de concentraties die van nature worden aangetroffen in een zoet water of zelfs licht brak milieu. Een verhoogd EGV en verhoogde sulfaatconcentraties kunnen verschillende oorzaken hebben (zie ook kader 1). Hierbij kan gedacht worden aan de invloed van brak water, in de landbouw gehanteerde stoffen of zout strooien op de wegen tijdens vorstperiode. Vaak gaat een toename van het elektrisch geleidend vermogen en sulfaat samen omdat sulfaat een vast onderdeel vormt van brakwater en zeewater. Ondanks dat zowel een verhoogd elektrisch geleidend vermogen als een verhoogde sulfaatconcentratie van nature voor kan komen, kunnen verhogingen wel degelijk grote consequenties hebben voor biogeochemische en ecologische processen in de omgeving met mogelijke gevolgen voor de (grond- en oppervlakte-)waterkwaliteit en biodiversiteit.




Page: 7

 Number: 1 Author: [redacted]_9 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:07:12
algemeen ,mis in de hoge pH waarde,dit kwam ook uit eerder onderzoek naar voren

 Number: 2 Author: [redacted]_8 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:06:35

 Number: 3 Author: [redacted]_7 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:06:08
relatie met TGG niet aangetoond ,TGG staat bekend om anionen F,Cl,Br en SO4F

 Number: 4 Author: [redacted]_6 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:05:11

Kader 1. Het element zwavel (S) in het milieu

Zwavel komt van nature in het oppervlaktewater en de bodem voor. Tevens wordt zwavel bijvoorbeeld op verschillende wijze in de landbouw gebruikt en in grote mate toegediend. Zo wordt zwavel op het land gebracht doormiddel van bemesting via dierlijke mest en/of kunstmest en via de toediening van gips. Zwavel is dan ook een belangrijk element voor levende organismen, zo is zwavel een belangrijk onderdeel in vitaminen, eiwitten, enzymen en aminozuren.

Zwavel kan in verschillende vormen en oxidatieve toestanden in het milieu aanwezig zijn, zo kan zwavel in het (grond)water voorkomen als sulfaat (SO_4^{2-}), in de bodem als ijzersulfide (pyriet) (FeS_x) of als calciumsulfaat (gips) (CaSO_4), als gas in de atmosfeer als zwaveloxide (SO_2) of als (opgelost) gas in anaerobe omgeving als sulfide (H_2S). Zwavel kan in de vorm van sulfaat (SO_4^{2-}) gemakkelijk oplossen in de bodem en uitspoelen naar het oppervlaktewater of grondwater. Sulfaat kan verschillende oorsprongen hebben, zoals het oplossen van gips (calciumsulfaat), de afbraak (oxidatie) van organisch materiaal, oxidatie gereduceerd zwavel waaronder pyriet (FeS_x verbindingen), desorptie van aan aluminium en ijzer(hydr)oxides gebonden sulfaat) ofwel door directe toediening via de landbouw (vanuit (kunst)mest, gips etc.). Het merendeel van deze processen kunnen beide kanten op werken en ook leiden tot binding ofwel mobilisatie van zwavel. Eenmaal in het grondwater en of oppervlaktewater kan sulfaat zich gemakkelijk verspreiden. Indien het grond- en of oppervlaktewater waarin sulfaat zich bevindt anaeroob wordt (zoals in dieper grondwater, in waterbodems ofwel tijdens algenbloei in de zomerperiode) kan het microbiologische proces sulfaatreductie plaatsvinden door sulfaat reducerende bacteriën. Hiervoor is ook reactief organisch materiaal nodig in de vorm van bijvoorbeeld DOC (opgelost organisch koolstof).

Sulfaat, veen en redox processen

Onder aerobe omstandigheden domineert zuurstof de afbraakprocessen (oxidatie van organisch materiaal). Indien er echter anaerobe condities ontstaan wordt de afbraak overgenomen door zogenaamde alternatieve elektronenacceptoren waarvan nitraat en vervolgens geoxideerd ijzer de meest krachtige zijn. Indien de gemakkelijker te reduceren verbindingen op raken kan sulfaatreductie plaatsvinden. Bij het proces van sulfaatreductie wordt het toxische sulfide S^- geproduceerd. Sulfide bindt echter gemakkelijk aan gereduceerd ijzer, de zwavelcyclus en ijzercyclus zijn hierom dan ook nauw aan elkaar verbonden in het milieu. Indien er veel vrij ijzer aanwezig is zal dit ijzer binden aan het sulfide waarbij pyrietvormig plaatsvindt. Indien er geen of weinig ijzer aanwezig is kan sulfide in oplossing blijven met potentiële toxische effecten voor soorten en ecosystemen (o.a. Lamers *et al.* 2013). Waterstofsulfide kan dus van nature voorkomen onder anaerobe sulfaatrijke omstandigheden (sulfide ontstaat bijvoorbeeld bij de anaerobe afbraak van eiwitten, welke zwavelrijk zijn). Waterstofsulfide is kleurloos maar ruikt sterk, het is dan ook bekend als de geur die vrij komt bij rotte eieren (de rotting van eiwitten in het ei onder zuurstofloze omstandigheden zorgen voor de vorming van sulfide). Verhoogde sulfaatconcentraties kunnen in het milieu dan ook grote negatieve gevolgen hebben, met name in ecosystemen met veel organisch materiaal en anaerobe omstandigheden (zoals veenbodems).

Zo kunnen verhoogde sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater grote invloed hebben op de ijzer, zwavel en fosfor cycli en decompositieprocessen in de bodem. De als gevolg van verhoogde sulfaatconcentraties toenemende reductie van sulfaat en toenemende sulfideconcentraties kunnen leiden tot de mobilisatie van aan ijzer gebonden fosfaat en hiermee tot (interne-) eutrofiering (Smolders & Roelofs 1993, Smolders *et al.* 2006). Dit proces kan met name in systemen met veenbodems leiden tot algenbloei en een verlaagde biodiversiteit (o.a. Lamers 2000).

In gebieden met veenbodems is met name de drooglegging van de veenbodems verantwoordelijk voor de veenoxidatie. Zuurstof is namelijk een veel sterkere electronenacceptor dan sulfaat. Wanneer er zuurstof bij het anaerobe veen komt, zoals het geval is in de toplaag van de percelen, dan wordt het organische materiaal (veen) onder invloed van zuurstof afgebroken (geoxideerd, figuur 8). Hierbij wordt het organische materiaal deels omgezet in kooldioxide (CO_2). Het overgebleven veen verliest structuur en kan uiteindelijk ook als bagger in de sloten terecht komen. Het gereduceerde zwavel uit de bodems komt na oxidatie vrij als sulfaat. Dit sulfaat is zeer mobiel en kan gemakkelijk uitspoelen uit de bodem. Het gereduceerde ijzer wordt onder invloed van zuurstof geoxideerd tot de geoxideerde vorm van ijzer (Fe^{3+}). Deze ijzervorm is slecht oplosbaar en slaat gemakkelijk neer als ijzeroxide in de bodem. Onder invloed van oxidatieprocessen wordt de toplaag van de bodems, dus steeds armer aan zwavel en organisch materiaal en steeds rijker aan ijzer. Verder komen bij de afbraak van het organische materiaal natuurlijk ook nutriënten vrij, met name in de vorm van fosfor en ammonium.

Het sulfaat dat vrijkomt kan uitspoelen naar diepere anaerobe bodemlagen waar het voor een anaerobe afbraak van veen kan zorgen. Er wordt echter aangenomen dat de bijdrage van sulfaat aan de afbraak van veen gering is. Anaerobe afbraak onder invloed van sulfaat draagt in zwavelrijke veengebieden naar schatting maar voor maximaal 5 % bij aan de veenafbraak (Vermaat *e.a.* 2013). Dit alles is echter relatief en indiceert vooral ook dat de veenafbraak als gevolg van drooglegging enorm is.

2. Materiaal & Methode

Om te achterhalen wat de chemische samenstelling van, en de uitspoeling uit de opgebrachte thermische gereinigde grond laag is op de omgeving is er een combinatie van veld en laboratoriumonderzoek verricht.

Allereerst is er, aanvullend op reeds eerder door andere partijen verricht bodemonderzoek, bodemonderzoek verricht om de chemische samenstelling van de opgebrachte thermisch gereinigde grond en onderliggende bodemlagen te bepalen (onderzoeksvraag A). Vervolgens is er met behulp van analyses, welke langs diepte profielen langs transecten verzameld zijn de uitspoeling van een serie elementen bepaald (onderzoeksvraag B). Vervolgens is er in kaart gebracht of er daadwerkelijk uitspoeling van stoffen uit de TGG laag naar de omgeving plaatsvindt en zo ja in welke mate doormiddel van chemische analyses van het grondwater en op verschillende diepte in combinatie met hydrologisch onderzoek (onderzoeksvragen B & C). Op basis van de kennis uit het chemisch bodem- en grondwateronderzoek op locatie, zijn er twee laboratoriumexperimenten uitgevoerd waarin onder gecontroleerde condities versneld de effecten van uitspoeling van stoffen uit de TGG laag op biogeochemische (afbraak) processen in de onderliggende veenlaag te onderzoeken (onderzoeksvraag C & D).

2.1 Chemische samenstelling van bodem en potentiële uitspoeling naar omgeving

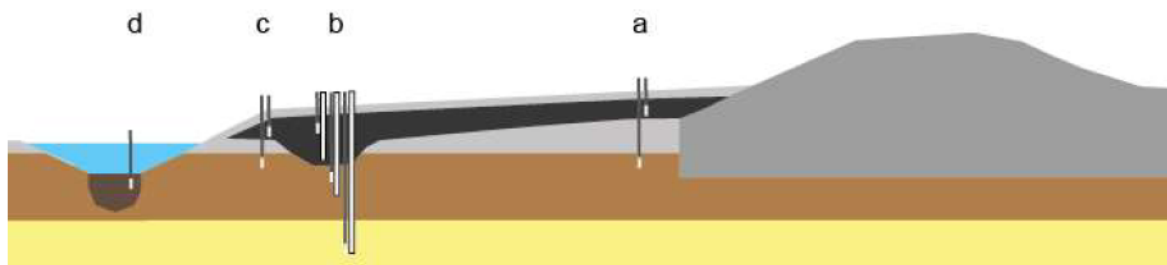
Chemische samentelling bodem en grondwater

Om de chemische samenstelling en kans op van uitspoeling van elementen van de TGG laag en onderliggende bodemlagen te bepalen (onderzoeksvragen A & B) zijn er langs een vijftal transecten loodrecht op het dijklichaam bodemprofielen geboord en bodemonsters verzameld en geanalyseerd. Vier transecten zijn geplaatst in het dijklichaam waar TGG is aangebracht (transect 1 t/m 4, rode vak in figuur 1) en één referentie raai (nummer 5, oranje vak in figuur 1) is geplaatst in een dijklichaam waar geen TGG is aangebracht.



Figuur 1: Schematisch bovenaanzicht met de vier transecten langs de dijk met aangebracht ATM zand (zwarte strepen in rode rechthoek), en het referentie transect (zwarte streep in oranje rechthoek).

In elk transect zijn op vier punten (a t/m d in figuur 1) bodemonsters en grond- en oppervlaktewatermonsters verzameld. Op locaties a t/m c zijn bodemboringen verricht, profielbeschrijvingen (conform NEN5104) gemaakt en bodemonsters verzameld (zie paragraaf 2.3 voor details over de bodemanalyses). Op elke locatie zijn 4 tot 5 bodemonsters verzameld in een diepte gradiënt, waarvan één in de TGG laag zelf, twee in de bodemlaag (veen of klei) direct onder de TGG laag (op twee diepten 0-20cm en 20-40cm onder de TGG laag) en een ofwel twee aanvullende monsters in de onderliggende veen- en/of zandlaag. Van alle verzamelde bodemonsters zijn verschillende analyses verricht om zowel de totale elementconcentraties in de bodem te bepalen als de fractie welke uit kan spoelen (zie paragraaf 2.3 voor bodemanalyses). Na het verrichten van de bodemboringen en profielbeschrijvingen zijn op deze locaties op verschillende diepten peilbuizen en ceramisch cups geplaatst (zie schematische weergave figuur 2) om hiermee over een periode van vier maanden de grondwaterkwaliteit en de grondwaterstand op verschillende locaties en diepten in het dijklichaam te kunnen monitoren. De ceramische cups zijn geplaatst om het mogelijk te maken om zo ongestoord mogelijk een gefilterd grondwatermonster te kunnen verzamelen onder anaerobe condities (dit is niet goed mogelijk in peilbuizen). De locaties van de ceramische cups is vooral gericht om uitspoeling van elementen uit de TGG laag en de effecten op de onderliggende veenlaag, in beeld te brengen. Ceramische cups zijn hierom in de TGG laag zelf en in de onderliggende veenlaag geplaatst, aanvullend hierop is er op één locatie per transect tevens een ceramische cups in de onderliggende zandbodem geplaatst. In bijlage 1 zijn de exacte bemonsteringlocaties, bodemprofielen en dwarsprofielen van de transecten opgenomen. In bijlage 1 zijn de exacte locaties en diepten van de geplaatste ceramische cups en peilbuizen opgenomen.



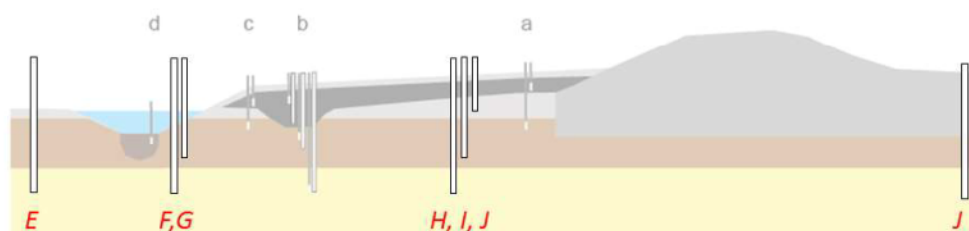
Figuur 2: Schematisch dwarsprofiel van de dijk met bemonsteringstransect (rechts de dijk (noord), links de inlandse zijde van de dijk), met kleilagen in grijs, veenlagen in bruin, zandlagen in geel en de thermisch gereinigde grond (TGG) in zwart. Op locaties a, b, c en d zijn ceramische cups geplaatst, op locatie b zijn ook peilbuizen geplaatst.

Hydrologische analyse (grondwaterstroming en stoftransport) Van dit onderdeel staat hier reeds de methode beschreven, maar worden de resultaten in het eind rapport opgenomen

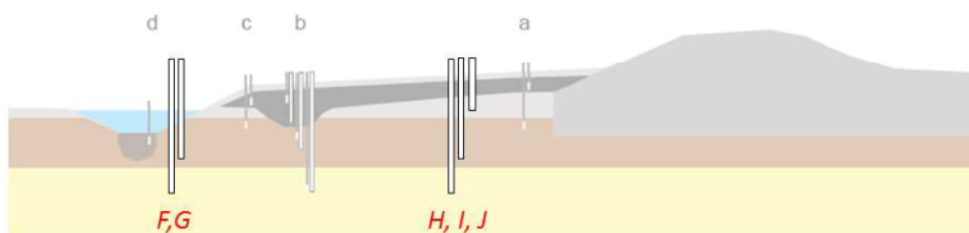
Langs alle vijf de transecten zijn er drie peilbuizen geplaatst in een diepte gradiënt op de locatie waar de voormalige sloot aanwezig was en de TGG laag het dikst is en direct op de onderliggende veenbodem ligt. Om een inschatting te kunnen maken van de effecten van potentiële uitspoeling van stoffen vanuit de TGG laag op de omgeving zijn er in twee transecten (transect 2 en transect 4) aanvullende peilbuizen geplaatst op verschillende afstand en diepte in het dijklichaam (zie figuur 3). In transect 2 zijn zeven aanvullende peilbuizen geplaatst, in transect 4 zijn 5 aanvullende peilbuizen geplaatst. In alle tijdens dit project geplaatste peilbuizen zijn grondwaterstand divers opgehangen om gedurende een periode van vier maanden de grondwaterstand in de peilbuizen te monitoren. Met behulp van de combinatie van chemische analyses van het grondwater in de peilbuizen en de (grond)waterstanden in én in de omgeving van het dijklichaam is via een modelmatige aanpak de potentiële verspreiding van stoffen uit de TGG laag in het dijklichaam naar de omgeving ingeschat. Met behulp van grondwaterstanden en bodemprofielen langs transecten in het dijklichaam wordt het systeem hydrologische beschreven (zowel grondwaterstroming als de grondwaterkwaliteit). Van de twee transecten (transect 2 en transect 4 met aanvullende peilbuizen) is een 2D-dwarsdoorsnedemodel opgesteld (m.b.v. het model MODFLOW). Dit model beschrijft de

gemiddelde stroming door de dijk en in de ondiepe ondergrond en is gekalibreerd op basis van de gemeten grondwaterstanden. Dit model vormt de basis voor het stoftransportmodel. Voor het stoftransportmodel is uitgegaan van een eenvoudig model, waarbij enkele stoffen en eventueel afbraak, retardatie, dispersie en omzetting van stof A naar stof B meegenomen zijn (programma MT3DMS/RT3D). Bij het opstellen van het stoftransportmodel is gebruik gemaakt van de gemeten grondwaterkwaliteit. Op basis van het grondwaterstromings- en stoftransportmodel is een lange termijnverwachting opgesteld (twee toekomstscenario's per transect) op basis van een tweetal (nog nader te definiëren) toekomstscenario's.

Transect 2



Transect 4



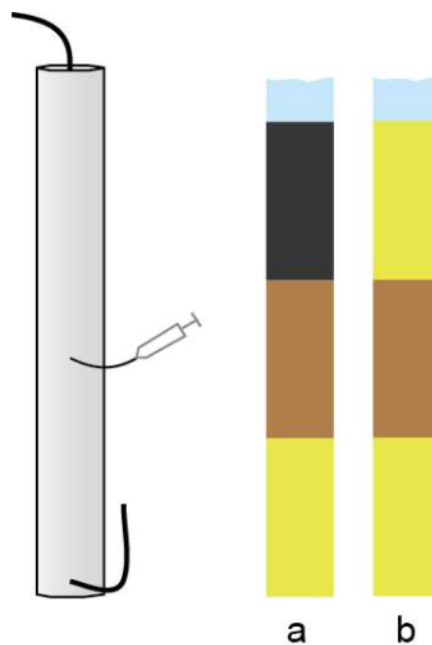
Figuur 3: Schematisch dwarsprofiel van de dijk met bemonsteringstransect (rechts de dijk, links de inlandse zijde van de dijk), met kleilagen in grijs, veenlagen in bruin, zandlagen in geel en de thermisch gereinigde grond (ATM zand) in donker grijs. Met zwarte lijnen zijn de aanvullende peilbuizen weergegeven welke langs transect 2 (bovenin figuur) en transect 4 (onderin figuur) geplaatst zullen worden. Het betreft een aantal peilbuizen met een filter in de onderliggende pleistocene zandlaag (E, F, H, J) en peilbuizen met een filter in de onderliggende veenlaag (G en I) en een aanvullende peilbuis in de opgebrachte kleilaag (J).

2.2 Effecten van uitspoeling uit TGG laag op de onderliggende veenlaag

Aanvullend op de bodem en grondwater analyses langs verschillende transecten op locatie zijn er twee laboratoriumexperimenten uitgevoerd. Met behulp van deze laboratoriumexperimenten zijn onder gecontroleerde condities de effecten van uitspoeling uit de TGG laag op biogeochemische (afbraak) processen in de onderliggende veenlaag onderzocht (onderzoeksvragen C & D). In deze gecontroleerde laboratoriumexperimenten zijn processen in het veld versneld nagebootst en zijn verschillende behandelingen met en zonder TGG onderzocht. Zo is er (1) een kolomexperiment uitgevoerd waarin biogeochemische processen in veenbodems welke wel of niet door uitspoeling uit een TGG laag beïnvloed werden. Daarnaast is er (2) een incubatie-experiment uitgevoerd waarin verschillende afbraakprocessen (doormiddel van het monitoren van de productie van verschillende gassen door de tijd) in veenbodems met verschillende hoeveelheden TGG gevolgd zijn.

Kolomexperiment

Om in detail te onderzoeken wat de effecten zijn van uitspoeling vanuit TGG op de biogeochemische processen in de onderliggende veenbodem zijn is de veldsituatie onder gecontroleerde condities in een kolomexperiment gesimuleerd. Om de veldsituatie zo goed mogelijk te simuleren zijn hiervoor op locatie veenkernen verzameld welke op een laag schoon gespoeld filterzand geplaatst zijn en waar ofwel (a) een laag TGG bovenop is gezet (n=4 replica's) ofwel (b) een laag schoon gespoeld filterzand op is geplaatst (n=4 replica's), zie figuur 4. De hiervoor benodigde TGG is verzameld tijdens de bodemboringen voor de veldtransecten. De kolommen hadden een diameter van 10,5 cm en de bodemlagen een dikte van ongeveer 10 cm. Het experiment is onder gecontroleerde condities uitgevoerd (15 °C en donker). Vervolgens is op deze bodem circa 1,3L (15 cm in de kolom) artificieel (anaeroob, doormiddel van doorborreling met N₂ gas) regenwater gezet (zie bijlage 2 voor regenwatersamenstelling). Om gecontroleerde doorspoeling mogelijk te maken, werd een afvoerslang aan de onderzijde bevestigd. Er was continue een waterlaag van circa 15 cm (1,3 L) boven de bodem aanwezig om zuurstofindringing te verminderen. Gedurende een periode van 10 weken is hier een gecontroleerde verhoogde doorspoeling ingesteld van gemiddeld 0.04 l/dag (komt overeen met een wegzijging van 4 mm/dag) gevolgd door een stagnante periode van 8 weken om hiermee onder beide condities de effecten op biogeochemische processen in de veenbodem te kunnen analyseren. De gemiddelde wegzijging is bewust hoog ingesteld om op deze wijze versneld een resultaat te kunnen zien van de effecten van uitspoeling uit de TGG laag op de onderliggende veenlaag. De biogeochemische processen in de veenlaag zijn vervolgens gemonitord doormiddel van het bemonsteren en monitoren van de chemische samenstelling van het bodemporiewater midden in de veenlaag (met behulp van rhizon poriewaterbemonsteraars (Eijkelpamp)). Op zes tijdstippen over een periode van 18 weken is het bodemporiewater in alle kolommen verzameld en geanalyseerd. De hieruit voortgekomen watermonsters zijn geanalyseerd op dezelfde reeks paramaters als de andere watermonsters binnen dit project (zie paragraaf 2.3).



Figuur 4: Schematische weergave van experiment 1 met kolommen met twee behandelingen, a) met thermisch gereinigde grond en b) zonder thermisch gereinigde grond. Geel is inert filterzand, bruin is veenbodem, zwart is thermisch gereinigde grond.


Incubatie-experiment

Om de effecten van TGG op afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag in te kunnen schatten is er een laboratoriumexperiment uitgevoerd waarin de productie van verschillende gassen onderzocht is. Binnen dit experiment zijn onder gecontroleerde condities (10 °C, anaeroob en donker) veldmonsters van de veenlaag geïncubeerd in afgesloten flessen (0.34 L). Binnen dit experiment zijn drie behandelingen onderzocht, elk met n=4 replica's, met behandeling (a) 100% veen (50 gram), (b) 95 % veen en 5% TGG (47,5 g veen/2.5 g TGG) en (c) 50% veen en 50% TGG (25 g veen/25 g TGG). De flessen werden voor circa 20% gevuld het materiaal, waarna er 25 ml regenwateroplossing werd toegevoegd om er een slurrie van te maken. Na geringe menging werd de gasfase van de fles met stikstof gespoeld om deze anaëroob te maken en vervolgens afgesloten. Vervolgens zijn de concentraties van een selectie van gassen (koolstofdioxide, methaan en sulfide, allen als proxy voor verschillende afbraakprocessen in veen) in de gasfase van de flessen gevolgd over een periode van 7 weken met 10 bemonsteringen. Na iedere bemonstering werd stikstofgas aangevuld in dezelfde hoeveelheid als er onttrokken werd voor de bemonstering. De methode van gasanalyses staat beschreven in paragraaf 2.3. Met behulp van de resultaten uit dit experiment kan een inschatting worden gemaakt van de effecten (verschillende hoeveelheden van) die TGG heeft op verschillende afbraak processen in de veenbodem (kooldioxide productie, methanogenese (methaan productie) en



sulfaatreductie (sulfideproductie)). Aan het einde van het experiment, na 7 weken, zijn aanvullend hierop bodemporiewater monsters verzameld van de bodemslurries in de flessen geanalyseerd (volgens de in paragraaf 2.3 beschreven methode).

2.3 Bemonstering en chemische analyse van bodem en water

Grond- en oppervlaktewateranalyses

- Oppervlaktewatermonsters zijn 10 cm onder het wateroppervlak verzameld en luchtdicht afgesloten in HDPE potten gekoeld getransporteerd naar het laboratorium.
- Grondwatermonsters uit peilbuizen zijn verzameld door de peilbuis leeg te pompen en vervolgens vanaf het moment dat de EGV van het opgepompte water constant is, het vers toestromend grondwater verzameld in luchtdicht afgesloten HDPE potten.
- Grondwater/bodemvocht is anaeroob verzameld (via ceramische cups in het veld en met rhizon bodemvochtbemonsteraars (Eijkelpark Agrisearch Equipment) in de laboratorium experimenten) waaraan vacuüm getrokken 60 ml injectiespuiten zijn verbonden.
- Aanvullend op de bemonsteringen van Onderzoekcentrum B-WARE hebben er tweemaal aanvullende grondwaterbemonsteringen plaatsgevonden waarbij er door een  gecertificeerde partij (Stichting Waterproef) aanvullende grondwatermonsters uit een selectie peilbuizen verzameld is. De hieruit voortkomende monsters zijn vervolgens zowel in laboratoria van Stichting Waterproef als Eurofins Omegam als Onderzoekcentrum B-WARE geanalyseerd.
- Aan alle watermonsters zijn dezelfde parameters bepaald.
 - De pH is gemeten met een standaard Ag/AgCl₂ elektrode verbonden met een radiometer (Copenhagen, type TIM840).
 - De hoeveelheid opgelost anorganisch koolstof (TIC: CO₂ en HCO₃) is bepaald met behulp van infrarood gas analyse (ABB Advance Optima IRGA).
 - De alkaliniteit is bepaald door een deel van het monster te titreren met 0,01 mol l⁻¹ zoutzuur tot pH 4,2. De toegevoegde hoeveelheid equivalenten zuur per liter is hierbij de alkaliniteit.
 - De EGV is bepaald met een HACH EGV-probe verbonden met een HQD-meter. De turbiditeit van de oppervlaktewatermonsters wordt bepaald met een Dentan Turbidimeter (model FN-5).
 - De monsters voor de auto-analyzer zijn bewaard bij een temperatuur van -18 °C tot aan de analyse. De monsters voor de ICP-OES zijn aangezuurd voor analyse en bewaard bij 4 °C.
 - DOC (opgelost organisch koolstof) en DON (opgelost organisch stikstof) is in water gemeten met behulp van een TOC-L CPH/CPN analyser (Shimadzu). Vooraf zijn de monsters in de monsterbuis aangezuurd met een HCl-oplossing, gemengd en vervolgens doorborreld met een inert gas voor verwijdering van TIC (totaal anorganisch koolstof). Via een katalytische oxidatie is alle C en N omgezet in CO₂, NO en NO₂. Deze gassen worden vervolgens gemeten, CO₂ met een Niet Dispersieve Infrarood (NDIR) sensor en NO en NO₂ met een chemiluminiscentie detector (CLD).
 - Extra bodemporiewater monsters zijn verzameld in anaerobe vacuüm glazen buisjes (Labco exetainer®, High Wycimbe, UK) waarin vervolgens de in de gasfase aanwezige methaan- en sulfideconcentraties zijn bepaald met behulp van gaschromatografie (welke vervolgens met behulp van de gasconstante gecorrigeerd zijn naar de concentraties in de poriewaterfase).



 Number: 1 Author: _11 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:09:45
geaccrediteerde



 Number: 2 Author: _10 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:09:01



Foto 2. Machinale bemonstering van bodemonsters langs de transecten

Bodem analyses

De chemische samenstelling van de bodem is geanalyseerd op de totale elementconcentraties als mede op de fracties welke onder invloed van neerslag of grondwater beschikbaar kunnen komen. Hierom zijn destructie-analyses, waterextracties en zoutextracties op de bodems uitgevoerd, welke vervolgens op een brede range van elementen zijn geanalyseerd.

- ***Drooggewicht en organisch stofgehalte***

Om het vochtgehalte van het verse bodemmateriaal te bepalen is het vochtverlies gemeten door bodemmateriaal in duplo af te wegen in aluminiumbakjes. De bakjes zijn precies tot aan de rand afgevuld (volume = 45 ml), zodat de soortelijke massa van de bodem kon worden bepaald. De bodems zijn vervolgens gedurende minimaal 48 uur gedroogd in een stoof bij 60°C. Vervolgens zijn de bakjes met bodemmateriaal opnieuw gewogen en is het vochtverlies berekend. De fractie organisch stof in de bodem is berekend via het gloeiverlies. Hiertoe is gedroogd bodemmateriaal gedurende 4 uur verast in een oven bij 550°C. Na het uitgloeien is het bakje met bodemmateriaal weer gewogen en is het gloeiverlies berekend. Het gloeiverlies komt bij benadering overeen met het gehalte aan organisch materiaal in de bodem. Anvullend hierom zijn voor normtoetsing het organisch stof gehalte en het lutumgehalte volgens NEN voorschrift geanalyseerd bij Eurofins Omegan, zie bijlage 3 voor details.







- ***Concentraties van anionen***

De in de bodem oplosbare anion concentraties van sulfaat, chloride, bromide, fluoride en cyanide (vrij en **2**mplex) zijn volgens NEN voorschrift geanalyseerd door Eurodins Omgeam in bodemonsters welke door Onderzoekcentrum B-WARE bemonsterd zijn, zie bijlage 3 voor details.



- ***Bodem destructie voor totale element concentraties***

 Number: 1 Author: _13 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:10:47
in slib is deze vergeten

 Number: 2 Author: _12 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:10:33

Door de bodemmateriaal te destrueren (ontsluiten) is het mogelijk de totale concentratie van bijna alle elementen in het materiaal te bepalen. Hiervoor is 200 mg fijngemalen bodemmateriaal nauwkeurig afgewogen en in teflon destructievaatjes overgebracht. Aan het bodemmateriaal is 5 ml geconcentreerd salpeterzuur (HNO_3 , 65%) en 2 ml waterstofperoxide (H_2O_2 30%) toegevoegd, waarna de vaatjes in een destructie-magnetron (Milestone microwave type mls 1200 mega) zijn geplaatst. De monsters zijn vervolgens gedestruerd in gesloten teflon vaatjes. Na destructie is het destruaat nauwkeurig overgebracht in 100 ml maatcilinders en aangevuld tot 100 ml met demiwater. De destruaat is bewaard bij 4 °C tot verdere analyse op de ICP-OES.

- *Waterextractie*

Met behulp van een anaerobe waterextractie zijn de vrij in de bodem aanwezige ionen bepaald. Hiervoor is 17,5 gram verse bodem 50 ml demiwater gedurende 2 uur geschud op een schudmachine bij 105 rpm. De pH is gemeten met een HQD pH-electrode. De extracten zijn gefilterd met behulp van rhizons.

- *Strontiumextractie*

Met een strontiumextractie is de concentratie strontium-uitwisselbare ionen bepaald. Hiervoor is vers materiaal ingewogen overeenkomstig met 5 gram droog materiaal (minerale bodems) of 2,5 gram droog materiaal (veenbodems) en met 200 ml strontiumchloride (0,2 mol l⁻¹), geschud op een schudmachine bij 105 rpm. De pH is gemeten met HQD pH-electrode. De extracten zijn gefilterd met behulp van rhizons.

- *Aanvullende serie waterextracten*

Aangezien uit de eerste waterbodemanalyses naar voren kwam dat enkele elementen, waaronder met name zwavel en natrium extreem hoge concentraties lieten zien in het standaard waterextract, is besloten om op een aantal TGG monsters (n=4) achtereenvolgens meerdere waterextracten uit te voeren (in totaal zeven waterextracten). Met behulp van deze methode kan een betere inschatting worden gemaakt van de totale hoeveelheid aan elementen die uit de TGG bodem kan uitspoelen. In een polyethyleen pot werd 25 gram verse TGG gedaan, waaraan 500 ml demiwater werd toegevoegd. Dit werd gedaan voor vier replica's. De potten werden geschud op een schudmachine gedurende 2 uur bij 105 rpm. De pH werd gemeten met een standaard Ag/AgCl₂ elektrode verbonden met een radiometer (Copenhagen, type TIM840). De alkaliniteit werd bepaald door een deel van het monster te titreren met 0,01 mol l⁻¹ zoutzuur tot pH 4,2. De toegevoegde hoeveelheid equivalenten zuur per liter is hierbij de alkaliniteit. De EGV werd bepaald met een HACH EGV-probe verbonden met een HQD-meter. Voor analyse op de ICP-OES werd een deel van het filtraat aangezuurd met salpeterzuur (eindconcentratie 1%) en bewaard bij 4 °C tot verdere analyse. De volgende dag werd het water afgegoten, opnieuw 500 ml demiwater erop gegoten, gemeten en een deel van het filtraat afgenomen voor verdere analyse. In totaal werd dit zeven keer herhaald.

Chemische analyses

Elementenanalyse (ICP en auto-analysers)

De concentraties calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), ijzer (Fe), mangaan (Mn), fosfor (P), zwavel (S; als maat voor sulfaat), silicium (Si) en zink (Zn) zijn bepaald met behulp van een Inductively Coupled Plasma Spectrofotometer (ICP-OES, ICAP 6300, Thermo Fisher Scientific). Er is een aanvullend programma voor zware metalen verricht op de ICP-MS om concentraties van zware metalen te bepalen (o.a.; arseen (As), barium (Ba), cadmium (Cd), cobalt (Co), chroom (Cr), koper (Cu), kwik (Hg), molybdeen (Mo), nikkel (Ni), lood (Pb), antimoon (Sb), tin (Sn), strontium (Sr) en vanadium (V). De concentraties nitraat (NO_3^-), ammonium (NH_4^+) en fosfaat (PO_4^{3-}) zijn colorimetrisch bepaald met een Seal auto-analyser III met behulp van resp. salicylaatreagens,

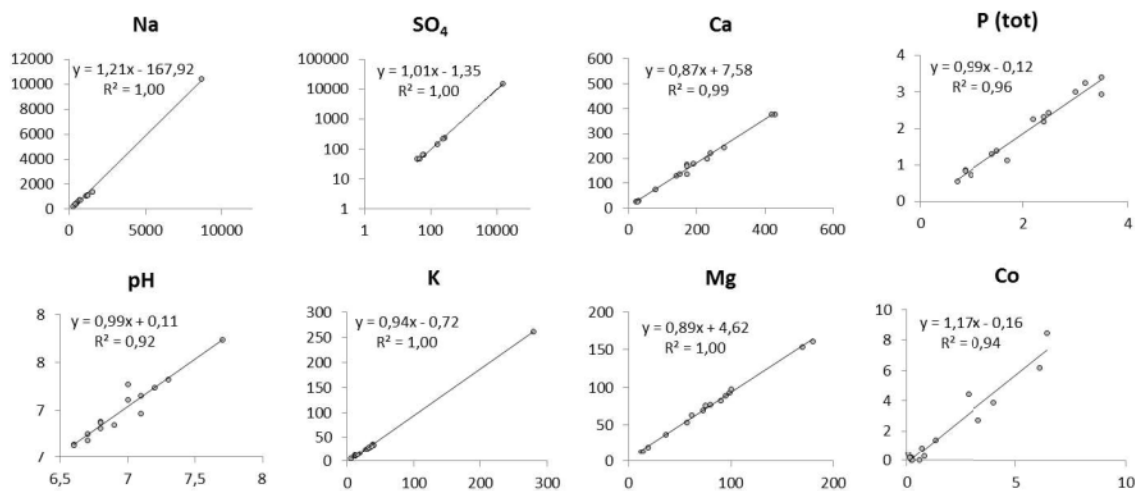
hydrazinesulfaat en ammoniummolybdaat/ascorbinezuur. Chloride (Cl^-) is colorimetrisch bepaald met een Bran+Luebbe auto-analyser III systeem met behulp van mercuritiocyanide. Natrium (Na^+) en kalium (K^+) zijn vlamfotometrisch bepaald met een Sherwood Model 420 Flame Photometer.

Anionen

Aanvullend op de hiervoor beschreven analyses zijn van de bodemonsters een de op 22-24 mei door Stichting Waterproef verzamelde grondwatermonsters concentraties van sulfaat, chloride, bromide, fluoride en cyanide (in de bodem vrij cyanide en complex) bepaald door Eurofins Omegam, zie bijlage 3 voor details.

Certificering

Het laboratorium van Onderzoekcentrum B-WARE en de Radboud Universiteit is niet **EN gecertificeerd**, er wordt gewerkt conform een intern kwaliteitssysteem en er wordt deelgenomen aan ringonderzoeken. Aanvullend op het kwaliteitssysteem wordt een groot aandeel van het onderzoek wat bij Onderzoekcentrum B-WARE verricht gepubliceerd in peer-review wetenschappelijke tijdschriften. Ter extra controle zijn er twee aanvullende bemonsteringen verricht waarbij grondwatermonsters (in totaal 33 monsters) welke uit verschillende peilbuizen verdeeld over de vijf transecten verzameld en geanalyseerd door een NEN-gecertificeerd laboratorium (Waterproef) en Onderzoekcentrum B-WARE en (laboratorium van Waterproef, Edam en laboratorium Eurofins Omegam, Amsterdam). Tijdens deze bemonstering (volgens NEN protocol) zijn door beide partijen gezamenlijk met dezelfde methode in duplo grondwatermonsters verzameld en geanalyseerd (telkens één naar het laboratorium van Onderzoekcentrum B-WARE en één naar het NEN-gecertificeerde laboratorium).





Figuur 5: Vergelijking tussen de analyse resultaten van het NEN gecertificeerde laboratorium van waterproef (op de x-as) vergeleken met de resultaten van het laboratorium van Onderzoekcentrum B-WARE (op de y-as). In deze figuren zijn meerdere elementen weergegeven (in mg/l) van in totaal 15 grondwatermonsters. (Hier worden in definitieve versie nog de resultaten van de volgende reeks van 18 monsters welke op 22 en 23 mei bemonsterd worden aan toegevoegd)

Uit de vergelijking tussen de analyseresultaten van beide laboratoria blijkt dat de resultaten goed vergelijkbaar zijn. Ondanks dat resultaten natuurlijk nooit identiek zijn, blijkt uit de in figuur 5 weergegeven verbanden voor een serie elementen dat de resultaten goed vergelijkbaar zijn. Aanvullend daarop moet vermeld worden dat het merendeel van de binnen dit project verzamelde gegevens, zoals de middels ceramische cups in het veld en middels rhyzons in de laboratorium experimenten verzamelde watermonsters niet volgens NEN-protocol verzameld zijn. Hier is bewust voor gekozen omdat deze wijze van monstereen de beste methode is om de biogeochemische processen te kunnen onderzoeken en voor deze methode is geen NEN protocol.

Toetsing van concentraties aan normen

 Number: 1 Author: _15 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:13:18

zie eerdere opmerking: zoek vervang

 Number: 2 Author: _14 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:12:27

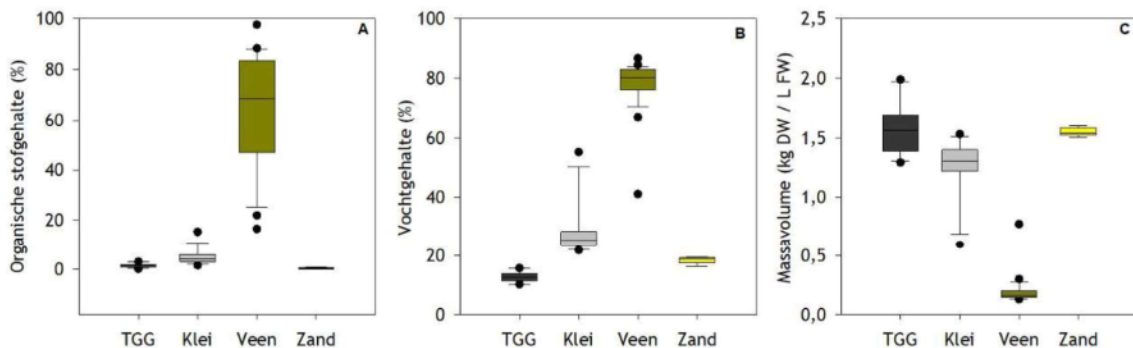
Hier nog aangeven dat totale bodem (door welke laboratoria geanalyseerd) en watermonsters (door welke laboratoria geanalyseerd) zijn getoetst door Rijkswaterstaat.

3. Resultaten

3.1 Wat is de chemische samenstelling van de TGG en de onderliggende bodemlagen?

3.1.1. Wat is de chemische samenstelling van de thermisch gereinigde grond en verschilt deze van de van nature aanwezige bodemlagen?

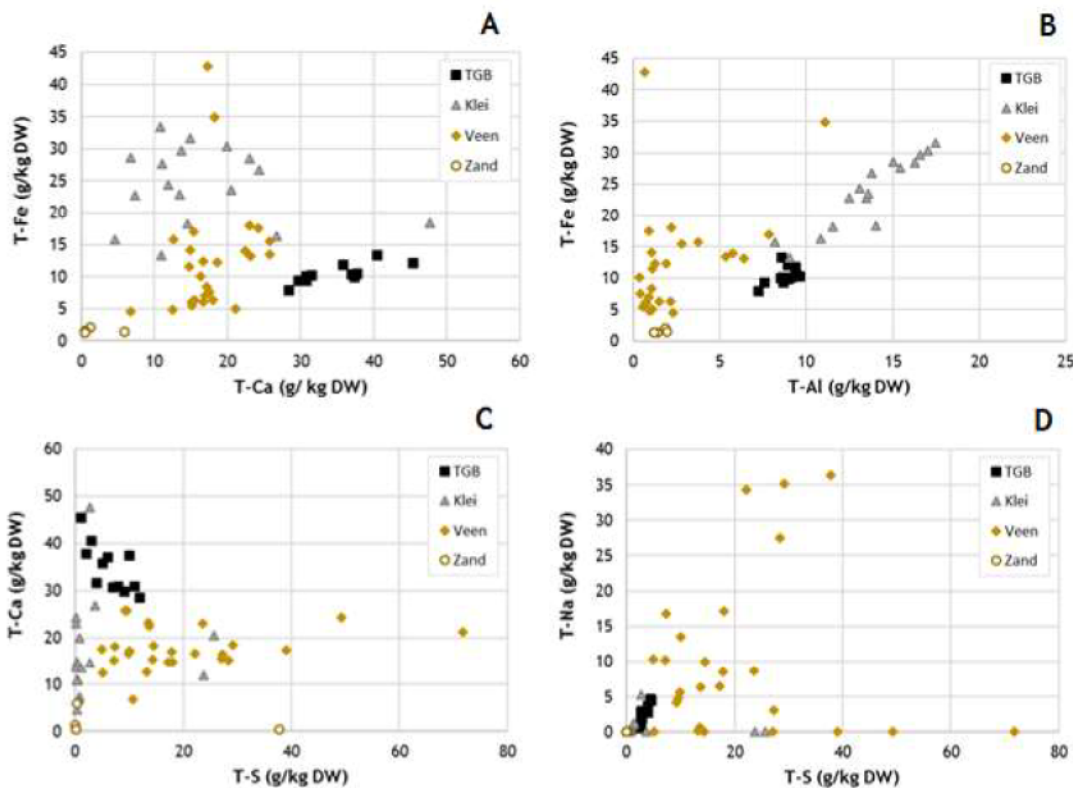
Om te kunnen bepalen of de aanwezigheid van en uitspoeling uit de TGG laag in het dijklichaam consequenties kan hebben voor de omgeving zijn er bodemonsters verzameld en biogeochemische analyses uitgevoerd van alle in het dijklichaam aanwezige bodemtypen op verschillende diepten langs een vijftal transecten. Het gaat hierbij in totaal om klei- (n=17), veen- (n=26) en zandbodems (n=5). Daarnaast is de thermisch gereinigde grond (TGG) zelf onderzocht (n=12). De boxplots in Fig. 6 A, B en C geven respectievelijk de spreiding weer van het organische stofgehalte (%), het vochtgehalte (%) en massavolume (kilogram droog gewicht (DW) per liter verse bodem (FW)).



Figuur 6: A) Organische stofgehalte (%), B) vochtgehalte (%) en C) massavolume (kg DW/l FW) per bodemtype (TGG, Klei, Veer, Zand). De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

De organische stofgehaltes (OS) voor TGG, klei en zand liggen dicht bij elkaar en zijn relatief laag, waarbij OS voor zand het laagst is. Veer heeft gemiddeld een OS van 70% met enkele lagere waarden rond de 20%. Op basis van OS zit de TGG laag tussen klei en zand in. Het vochtgehalte laat grofweg een vergelijkbaar patroon zien als OS, met gemiddeld het hoogste vochtgehalte voor veer. Het vochtgehalte in TGG is het laagst (gemiddeld 13%), waarbij het massavolume (MV) gemiddeld het hoogste is voor TGG en bijna gelijk aan het MV voor zand. Tijdens de bodemboringen bleek de TGG laag een donkergrijs tot zwarte kleur te hebben. De TGG bestaat uit een mengsel van zeer fijne deeltjes, zand en kiezels.

De chemische samenstellingen van de verschillende bodemtype zijn weergegeven in spreidingsdiagrammen (Figuur 7 A, B en C). Van verschillende elementen zijn de totaalconcentraties (g/kg DW) tegen elkaar uitgezet.



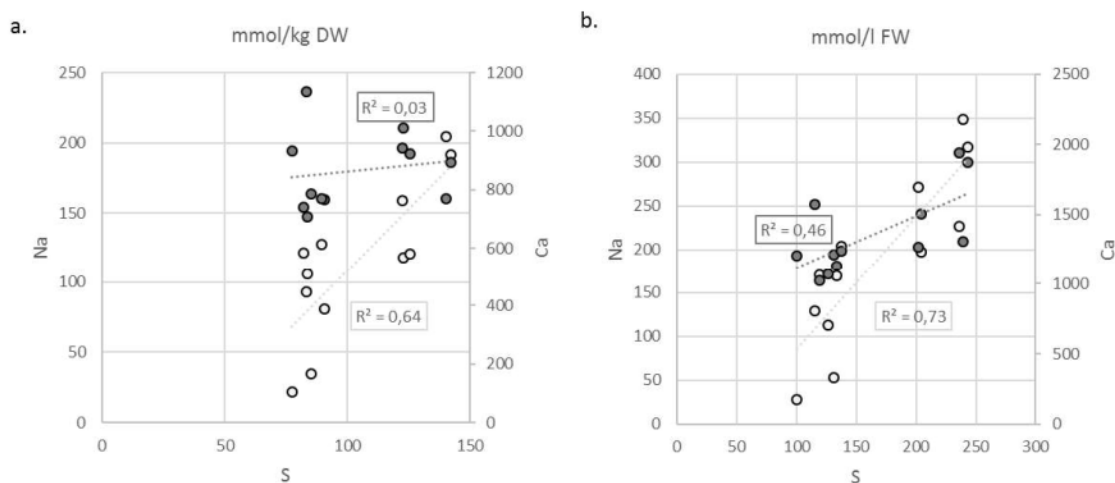
Figuur 7: Correlatie tussen verschillende elementen (g/kg DW) per bodemtype (TGG, Klei, Veen, Zand). A) Totaal-ijzer en totaal-calcium. B) Totaal-ijzer en totaal-aluminium. C) Totaal-calcium en totaal-zwavel.

Uit deze resultaten blijkt dat de vier verschillende bodemtype duidelijk van elkaar verschillen in totale elementconcentraties (Figuur 7). Figuur 7A (linksboven) laat zien dat de TGG hoge concentraties aan calcium (T-Ca) bevat bij relatief lage ijzerconcentraties (T-Fe), terwijl klei- en in mindere mate veenbodems juist lagere T-Ca concentraties bevatten en hogere T-Fe concentraties. Zand heeft zowel lage calcium- als ijzergehaltes (<7 g/kg T-Ca, <3 g/kg T-Fe). De hoogste ijzerconcentraties zijn over het algemeen te zien in kleibodems, op twee veenbodems na (beide in referentieraai).

Tussen ijzer en aluminium (T-Al) is een sterke correlatie te zien voor met name klei ($R^2=0,85$) (Figuur 7 rechtsboven). De T-Al concentratie is een goede proxy voor de hoeveelheid verweerbare lutumdeeltjes in de bodem (lutum bevat veel Al). De TGG-lagen lijken ook op de correlatielijn te liggen, waarbij TGG lagere concentraties heeft dan klei. Veenbodem laat meer spreiding zien met overwegend lagere concentraties aluminium dan klei en TGG, die in dezelfde range liggen als de zandconcentraties. De twee veenbodempunten met de hoogste ijzerconcentraties liggen in de referentieraai en blijken wat ijzerrijker en zwavelrijker veen te betreffen, waarschijnlijk pyrietrijker veen.

De correlatie tussen totaal calcium en totaal zwavel (T-S) is verschillend per bodemtype (Figuur 8 linksonder). De zwavelconcentraties voor veen lopen sterk uiteen in vergelijking met de overige bodemtypes en er zijn relatief hoge zwavelconcentraties te zien in figuur 7C. De TGG bevat lagere zwavelconcentraties bij aanzienlijk hogere calciumconcentraties ten opzichte van veen. Klei bevat per kg droge bodem ook minder totaal zwavel dan veen (op een monster na, referentielocatie), maar wel gelijke calciumwaarden. De T-S concentraties boven 10 g/kg behoren tot de referentieraai (locatie A en B) en tot raai 3 (locatie C). Per liter bodemvolume bevatten de veenbodems in verband met de veel lagere bodemdichtheid, echter veel minder Ca en zwavel dan de minerale bodems. Als er naar de TGG gekeken wordt blijkt er een betere correlatie te bestaan tussen de

totaal zwavel concentratie met de totaal natrium concentratie dan tussen de totaal zwavelconcentratie met de totaal calciumconcentratie (figuur 8), dit kan een aanwijzing zijn dat het hier meer om natriumsulfaat verbindingen gaat als om calciumsulfaat verbindingen.



Figuur 8: De correlatie tussen Totaal-Zwavel in (a. mmol/kg DW en b. mmol/l FW) voor de TGG bodems uitgezet tegen de totaal-natrium concentratie op de linker as en de totaal-calcium contractie op de rechter as.

3.1.2. Is de samenstelling van TGG anders als de omgeving en voldoet deze aan de normen?

(De resultaten van de normtoetsing worden later toegevoegd)

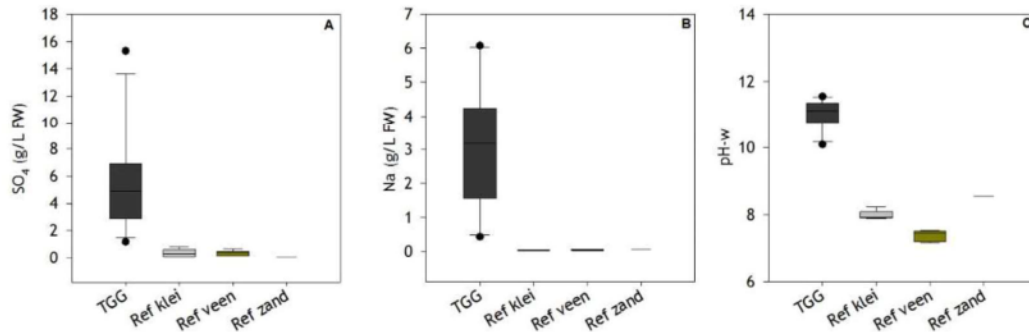
Om een inschatting te krijgen of de TGG laag verhoogde zware metalen, zouten en zwavel concentraties bevat ten opzichte van de in de omgeving aanwezige bodemlagen ² in hoeverre deze de normen overschrijden zijn zowel totaalconcentraties als via water uitspoelbare fracties geanalyseerd. ³verbindingen als PAK's (Polycyclische koolwaterstoffen) en PCB's (Polychloorbifenylen) zijn niet in het huidige onderzoek meegenomen. Uit bodemanalyses verricht in opdracht van Vallei en Veluwe (bron) voorgeand aan dit onderzoek bleek dat de totale PAK's concentraties norm voor klasse wonen overschreed, en de totale concentratie PCB's de norm voor klasse industrie overschreed (in de omliggende kleibodems overschreden deze stoffen niet de norm). Tevens bleek uit uitloogtesten van de TGG dat bromide, chloride en sulfaat de emissie waarde overschrijden. Totaalconcentraties van Nikkel, Chroom, kwik en zink overschrijden in enkele monsters van TGG de achtergrondwaarde voor de klasse industrie en arseen, cadmium en cobalt overschreden in enkele monsters van TGG de achtergrond waarde voor de klasse wonen.

⁵ figuur 9 zijn de resultaten van de via water beschikbare sulfaatconcentratie en natriumconcentratie (als indicator voor zouten) in boxplots weergegeven voor de TGG laag (n=12) naast de bodems in de referentieraai. Op deze wijze kan de TGG vergeleken worden met referentie bodem en wordt voorkomen dat de bodems waarmee vergeleken wordt zijn beïnvloed door mogelijke uitgespoelde elementen uit de TGG laag (Ref klei: n=6, Ref veen: n=6 en Ref zand: n=1). Zie figuur 9 voor de mobiele concentraties sulfaat en natrium en de pH.

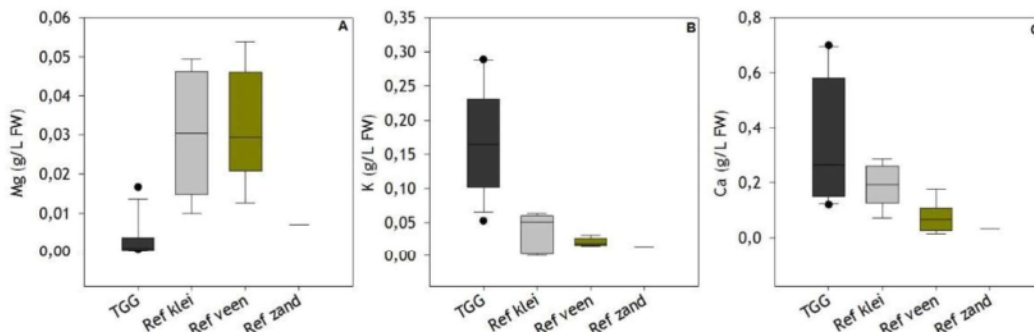


Page: 21

-
-  Number: 1 Author: [redacted]_19 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:22:37
mis grondwater
-
-  Number: 2 Author: [redacted]_18 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:22:00
-
-  Number: 3 Author: [redacted]_16 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:20:45
-
-  Number: 4 Author: [redacted]_17 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:21:55
verwijderen , hier niet relevant en niet juist beschreven
-
-  Number: 5 Author: [redacted]_20 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:22:58
-
-  Number: 6 Author: [redacted]_21 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:25:08
mis toch Tgg parameters: ook bromide , chloride en fluoride .deze zijn sterk verhoogd en dit moet worden opgenomen



Figuur 9: A) Sulfaatconcentratie (g/l FW), B) natriumconcentratie (g/l FW) en C) pH van de waterextractie voor TGG en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.



Figuur 10: A) Magnesiumconcentratie (g/l FW), B) kaliumconcentratie (g/l FW) en C) de calciumconcentratie (g/l FW) van de waterextractie voor TGG en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

Figuur 9A laat zien dat de concentraties uitspoelbare sulfaat in de TGG in de meeste gevallen (gemiddeld 5,9 g/l) aanzienlijk hoger ligt dan in de referentieraa (zowel klei als veen en zand). Wel is er een grote spreiding waar te nemen in de verschillende concentraties van de TGG. De sulfaatconcentraties in de referentiebodems komen voor klei, veen en zand overeen en liggen allen lager dan 200 mg/l. Voor natrium is eenzelfde patroon te zien. Andere kationen zoals kalium en calcium zijn ook verhoogd in de TGG laag, voor magnesium is dit niet het geval (figuur 10). TGG bevat ruimschoots meer uitwisselbaar natrium dan de concentraties in de referentieraa voor zowel klei als veen en zand. De concentraties in de referentieraa zijn voor de drie bodemtypes vergelijkbaar (rond 0,2 mg/l). De in de TGG laag aangetroffen S, Na en Ca concentraties zijn erg hoog in vergelijking met de van nature in bodems aanwezige concentraties. Ook de pH is voor TGG het hoogst (een onnatuurlijk hoog gemiddelde van 11,0) in vergelijking met de referentiebodems met een pH rond de 7-8 (Figuur 9C). In de referentiebodems zijn er echter ook verschillen te zien tussen klei, veen en zand. De veenbodems hebben de laagste pH (gemiddeld 7,4) en de zandbodem heeft een pH van 8,5. De calciumconcentratie is gemiddeld het hoogste voor TGG (0,4 g/l FW). De calciumconcentratie in de referentieraa ligt gemiddeld op 0,2 g/l FW voor klei, voor veen is dit 0,1 en voor zand 0,06 g/l. Deze zijn daarmee aanzienlijk lager dan de gemeten waarden in de TGG.

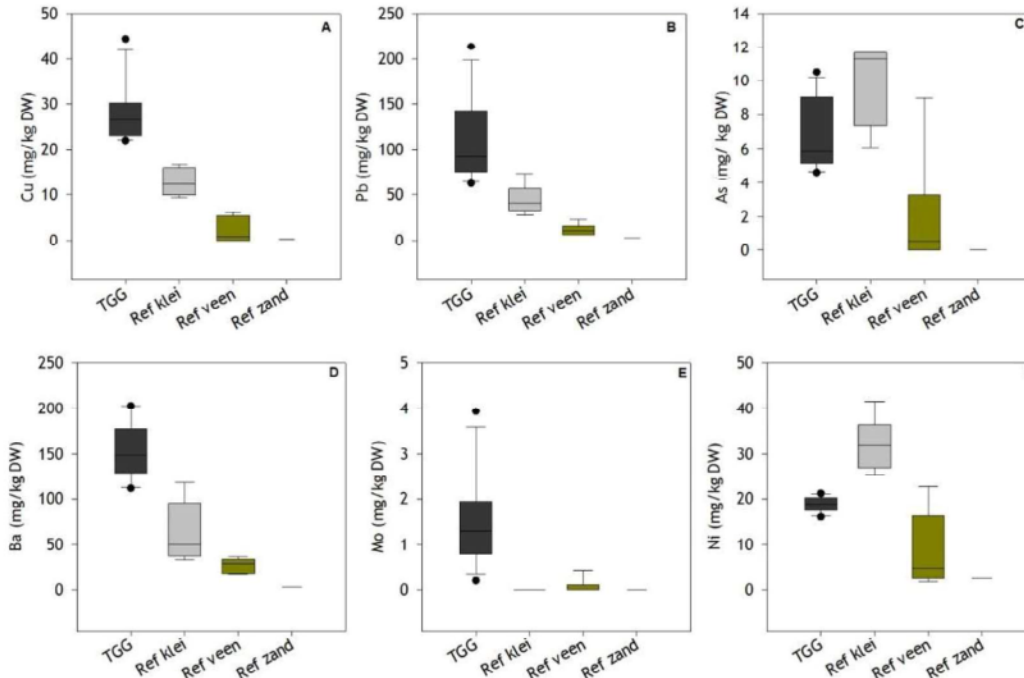
De bodems zijn tevens geanalyseerd op concentraties **2** **ware metalen**. In figuur 11 zijn van de elementen koper (Cu), lood (Pb), arseen (As), barium (Ba), molybdeen (Mo) en nikkel (Ni) de totale concentraties weergegeven (in mg/kg DW).



Number: 1 Author: [redacted]_23 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:29:21

noemen plaatjes op basis van meetwaarden (niet gestandaardiseerde waarde)noemen welke metalen en en uitbreiden
plaatjes met relevante zoals vanadium op basis van de toetsing(incl op basis van de grondwater overschrijdingen)

Number: 2 Author: [redacted]_22 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:25:52



Figuur 11: Totaalconcentraties koper (A), lood (B), arseen (C), barium (D), molybdeen (E) en nikkel (F) (mg/kg DW) voor TGG en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer

TGG bevat voor zowel koper, barium, molybdeen als lood bevat TGG de hoogste hoeveelheid per kilogram drooggewicht (Figuur 11 A-F). De gemiddelde concentraties in de TGG laag zijn 30 mg Cu/kg DW, 115 mg Pb/kg DW, 7,3 mg As/kg DW, zie figuur 11 en tabel 12. Voor een paar zware metalen zijn de totale concentraties gemiddeld het hoogst in de TGG laag i.v.m. de omliggende bodemlagen, dit geldt voor Ba, Cd, Cu, Mo, Pb, Sn, Sr en Zn (zie tabel 12). Voor de omliggende bodemlagen is de trend dat de totale zware metalen concentraties per kg droge stof het hoogst zijn in de kleibodem, wat lager in de veenbodem en het laagst in de zandbodem (met uitzondering voor Si) (zie tabel 12 en bijlage 4). Dit geldt echter niet voor alle zware metalen zo is de gemiddelde totale concentratie van arseen bijvoorbeeld lager in de TGG laag (gemiddeld 7,3 mg/kg DW) dan klei (gemiddeld 9,9 mg/kg DW), zie tabel 12 en figuur 11. De arseenconcentraties in veen en zand zijn wel beduidend lager (Figuur 11C).

Tabel 12: Gemiddelde totale concentraties van zware metalen (in mg/kg DW), in de TGG laag, en de referentiebodems voor de bodemtype veen, klei en zand (als referentie lagen zijn hier de diepere bodemmonsters en de monsters van referentietransect 5 gehanteerd).

	As	B	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	Sb	Sn	Sr	V	Zn
TGG	7,3	26,7	152,3	1,2	6,1	32,5	29,2	0,2	349,4	1,6	18,9	115,1	2,0	2,4	96,1	50,2	166,5
Veen	1,7	94,0	28,8	0,3	2,3	14,4	1,8	0,2	689,8	0,0	6,8	10,4	2,5	0,2	87,7	18,1	18,2
Klei	9,9	45,5	61,6	0,5	11,0	47,9	12,6	0,7	886,5	0,0	31,4	42,7	1,3	0,1	53,3	57,2	91,7
Zand	0,0	4,7	5,2	0,1	0,8	5,5	1,1	0,1	23,3	0,1	2,9	3,4	1,4	0,2	2,9	6,6	7,1

Uit de toetsing aan de normen komt blijkt dat xxx XXX. In bijlage 8 zijn de resultaten van een reeks elementen opgenomen, welke niet allemaal in deze tekst beschreven zijn.

Kader 2. Wat is de bron van de hoge zwavel- en natriumconcentraties in de TGG*

De thermische gereinigde grond die bij de dijkversteving van het huidige project gebruikt is, is afkomstig van ATM in Moerdijk. TGG bestaat uit een mengsel van vervuilde bodem, olie- en asfaltresten welke bij een hoge temperatuur verbrand zijn (850°C). De oorsprong van de hoge zwavel- en natriumconcentraties in de TGG is echter onzeker. De auteurs van het huidige rapport hebben geen contact opgenomen met het bedrijf ATM in Moerdijk of met andere TGG producerende bedrijven. Er zijn meerdere potentiële bronnen welke de hoge natrium- en zwavelconcentraties in de TGG kunnen verklaren. (1) het thermische gereinigde materiaal (mengsel van vervuilde bodem, olie- en asfaltresten) (2) het potentieel blussen met brakwater of zeewater ofwel (3) andere stappen in het reinigingsproces (zoals bijvoorbeeld de zuivering van tijdens de verbranding vrijgekomen zwaveloxide met kalk waarbij gipsvorming ontstaat). Over de oorsprong en oorzaak van de verhoogde zwavel- en natriumconcentraties in de TGG laag kunnen op basis van de binnen dit project verzamelde gegevens dan ook enkel speculaties gedaan worden, aanvullend onderzoek zal uitgevoerd moeten worden om hier meer kennis over beschikbaar te krijgen.



**) De binnen dit kader beschreven informatie is afkomstig van enkele via internet beschikbare beschrijvende bronnen over het proces van thermische reiniging*



Conclusies:

- De in het dijklichaam aanwezige bodemlagen vertonen sterke verschillen in organisch stof gehalte en vochtgehalte, de eigenschappen van de TGG laag zijn het meest vergelijkbaar met zand. De TGG bestaat uit een mengsel van fijne deeltjes, zand en kiezels.
- Er zijn sterke verschillen in de chemische samenstelling van de aanwezige bodemtype. Er zijn correlaties tussen T-Fe en T-Al concentraties. De TGG bodems bevatten in vergelijking met andere bodemtype hoge T-Ca concentraties.
- Uit de vergelijking tussen de TGG bodem en lokale referentie- klei, veen en zandbodems blijkt dat de TGG laag significant hogere uitwisselbaar zwavel-, natrium-, en calciumconcentraties bevat. Deze stoffen kunnen gemakkelijk uitspoelen indien de TGG laag in contact komt met water. De in de TGG laag aangetroffen S, Na en Ca concentraties zijn erg hoog in vergelijking met van nature aanwezige concentraties in bodemtype in, onder en nabij de dijk. Ook de pH in de TGG bodems is onnatuurlijk hoog (pH 10,0-11,5).
- Totaalconcentraties van Nikkel, Chroom, kwik en zink overschrijden in enkele monsters van TGG de achtergrondwaarde voor de klasse industrie en arseen, cadmium en kobalt overschrijden in enkele monsters van TGG de achtergrond waarde voor de klasse wonen.
- Zware metalenconcentraties van koper, lood, barium en molybdeen zijn hoger als de omliggende bodemtype in het onderzoeksgebied.
- **RESULTATEN NORM TOETSING ANALYSE RESULTATEN HUIDIGE PROJECT**
- Over de oorsprong en oorzaak van de verhoogde zwavel en zoutconcentraties in de TGG laag kunnen op basis van de binnen dit project verzamelde gegevens enkel speculaties gedaan worden, aanvullend onderzoek zal uitgevoerd moeten worden om hier meer kennis over beschikbaar te krijgen. Op basis van totale element analyses bestaat er een betere correlatie tussen **2** en Na dan tussen S en Ca wat duidt op natriumsulfate verbindingen.



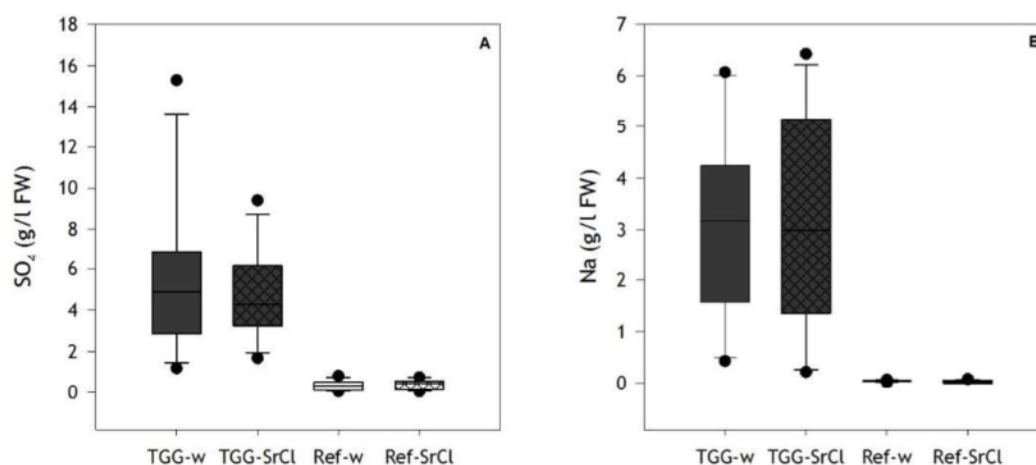
3.2 Heeft de thermisch gereinigde grond een effect op de omgeving?

 Number: 1 Author: _25 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:31:35
deel tekst ontbreekt en ook lage S gehalten bij hoge Na zie data .dus relatie nogmaals bekijken

 Number: 2 Author: _24 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:30:52

3.2.1. **2** er kans op uitspoeling van vervuiling uit de TGG

Om een inschatting te maken van potentiële effecten van de aanwezigheid van de TGG laag in het dijklichaam op de omgeving zijn verschillende bodemanalyses uitgevoerd op de TGG laag en vergeleken met lokale referentie bodems. Op deze wijze is ingeschat in hoeverre er elementen uit de TGG uit kunnen spoelen naar de omgeving. Door middel van waterextracties (w) zijn de makkelijk beschikbare element fracties bepaald en doormiddel van strontiumchloride-extracties (SrCl) zijn de potentieel kation-uitwisselbare fracties bepaald (middels kationuitwisseling van het kationadsorptiecomplex van de bodem). In figuur 13 zijn deze fracties weergegeven voor sulfaat (A) en natrium (B), zowel voor de TGG-laag (links in de figuren) en alle bodems (combinatie van veen, klei en zand) van de referentieraai gezamenlijk (rechts in de figuren).







Figuur 13: Concentratie A) zwavel en B) natrium (g/l FW) bij waterextractie (w) en strontiumextractie (SrCl) voor TGG-laag en de referentieraai. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

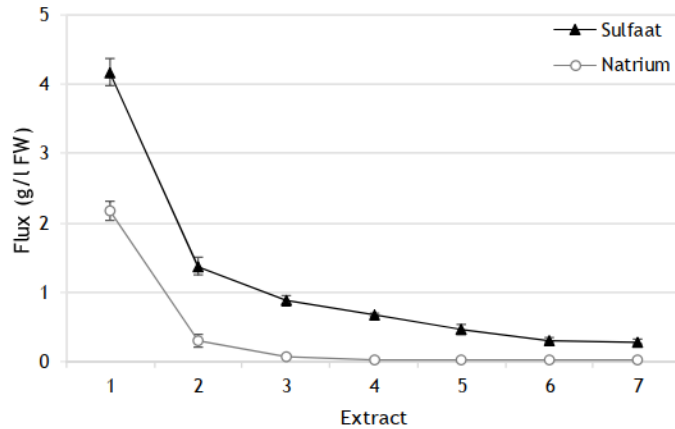
In figuur 13A is te zien dat zowel de makkelijk uitwisselbare als de potentieel uitwisselbare fractie van sulfaat in de TGG aanzienlijk hoger zijn dan in de bodemtype in de referentieraai. De resultaten in de referentieraai bevatten alle bodemtypen (klei, veen en zand). De medianen van zowel de water- als SrCl-extraheerbare fractie van sulfaat en natrium in TGG liggen dicht bij elkaar. Gemiddeld liggen de sulfaat fracties in de TGG meer dan twaalf keer hoger dan de referenties. Gemiddeld is de natriumconcentratie van de waterextractie in TGG circa 68 keer zo hoog als de referentie en circa 100 keer zo hoog in de SrCl-extractie. Ondanks dat totale elementconcentraties van zwavel en natrium in de TGG niet hoger zijn als de omliggende bodems, blijkt dus zowel de water- als SrCl-extraheerbare fractie beduidend veel hoger in de TGG, er is hier dus een beduidend hogere kans op uitspoeling van deze elementen.

Inschatting van totale flux van sulfaat en natrium vanuit TGG

Uit de analyses van de eerste waterextracten van TGG monsters bleek dat deze o.a. veel wateroplosbaar sulfaat en natrium bevatten. De kans bestond hierom dat een standaard waterextract en onderschatting geeft van de totale beschikbare elementconcentraties. Om dit beter in beeld te brengen zijn er met dezelfde TGG monsters achtereenvolgens zeven waterextracten uitgevoerd waarmee een inschatting is gemaakt van de totale uitspoelbare fractie in gram per liter bodem (zie materiaal en methode voor details). In figuur 14 zijn de resultaten weergegeven van de reeks waterextracten voor sulfaat en natrium. Uit de resultaten blijkt dat gedurende het eerste waterextract grofweg 70% van al het sulfaat en natrium uitspoelt, maar dit betekent ook dat bij dit soort hoge concentraties het eerste waterextract een 30% onderschatting kan zijn. In totaal leidt dit tot een totale flux van gemiddelde ongeveer 8,2 gram sulfaat per liter TGG en 2,6 gram natrium per liter TGG.

 Number: 1 Author: _27 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:33:39
ook hoge S in veen en hoge sulfaat ?? of zijn de veenmonsters ook TGG of net onder TGG?

 Number: 2 Author: _26 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:32:55



Figuur 14: Verloop van sulfaat- en natriumflux over serie extracten waaruit vervolgens de totale flux in berekend.

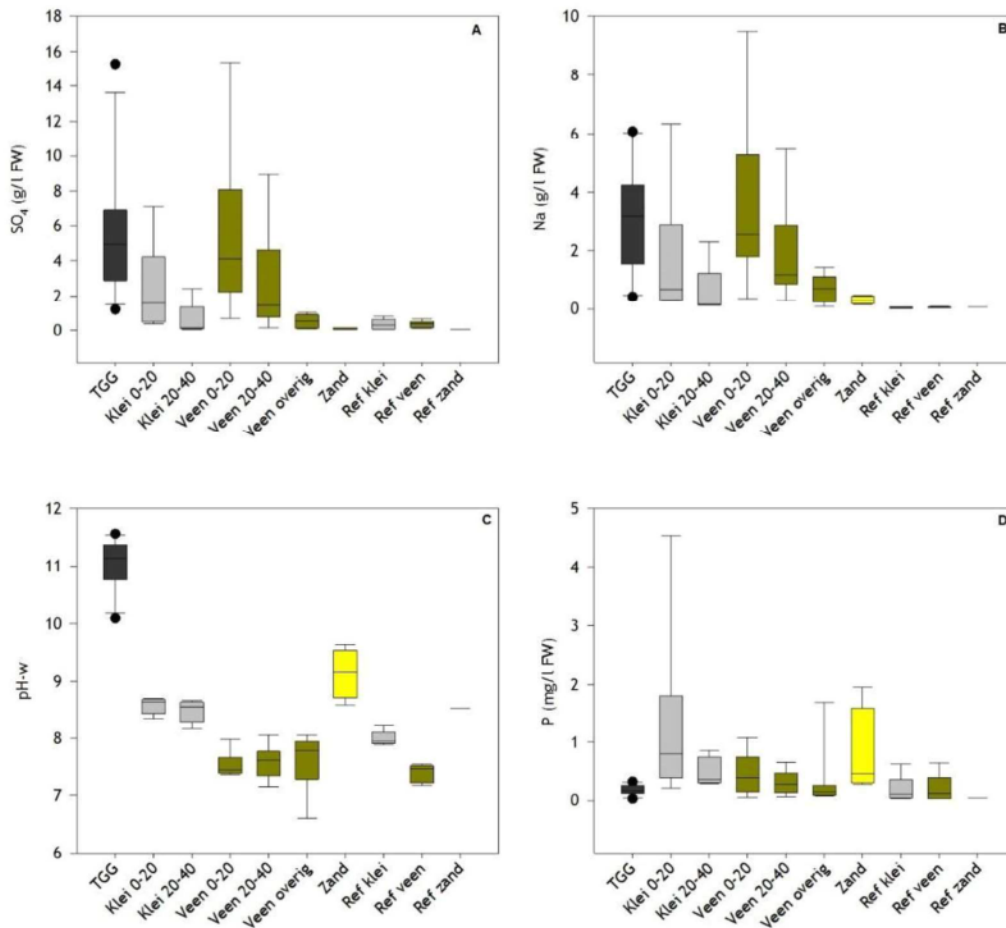
Hierbij moet tevens rekening gehouden worden met het feit dat er binnen dit onderzoek TGG van locatie is gebruikt voor chemische analyses, welke reeds een periode door neerslag beïnvloed is en hiermee potentieel een onderschatting geeft van de totale potentiële uitspoeling bij verse TGG.

3.2.2. Zijn er in het veld effecten op onderliggende bodemlagen?

In het onderzoek zijn de aanwezige klei- en veenlagen op diverse dieptes geanalyseerd onder de TGG-laag. De klei- en veenlagen zijn bemonsterd op 0 tot 20 cm onder de TGG-laag (klei 0-20, n=6; veen 0-20, n=6) en op 20-40 cm onder de TGG-laag (klei 20-40, n=5; veen 20-40, n=6). Ook is veen bemonsterd dieper dan 40 cm onder TGG (veen overig, n=8). De boxplots in Fig. 15 A, B, C en D geven respectievelijk de spreiding weer van de) sulfaatconcentratie (g/l FW), B) natriumconcentratie (g/l FW), C) pH en D) fosforconcentratie (mg/l FW), van de waterextracties (makkelijk beschikbare en tevens uitspoelbare fractie).



Foto 3. Een voorbeeld van een van de transecten met peilbuizen en ceramische cups langs de dijk.



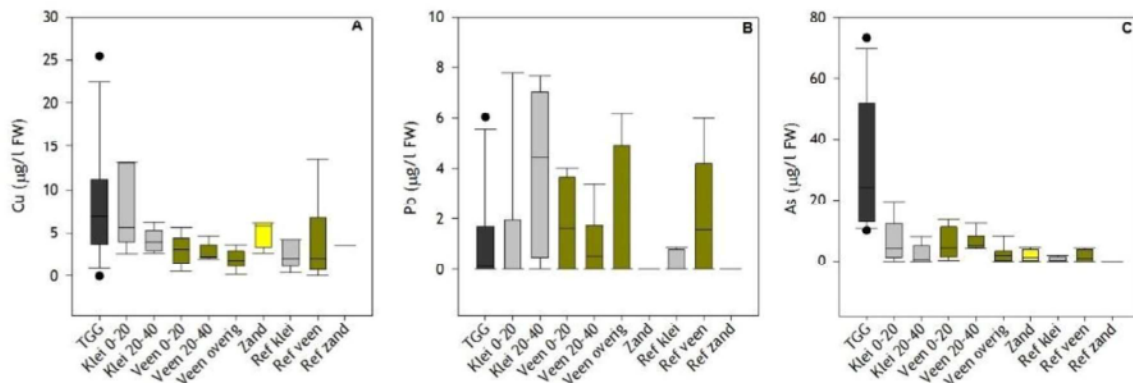
Figuur 15: A) Sulfaatconcentratie (g/l FW), B) natriumconcentratie (g/l FW), C) pH en D) fosforconcentratie (mg/l FW) van de waterextractie voor TGG, onderliggende bodemlagen en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

Figuur 15A geeft de sulfaatconcentratie weer (g/l) en laat zien dat er veel spreiding is in de concentratie van TGG en de onderliggende lagen. De mediaan en het gemiddelde (5,9 g/l) liggen voor TGG het hoogst. Voor zowel de klei- als veenbodems direct onder de TGG laag zijn de concentraties gemiddeld hoger dan de referentiebodems en neemt de concentratie zwavel af in de diepte. Dit duidt er dus op dat de bodemlagen direct onder de TGG verhoogde sulfaat- en natriumconcentraties bevatten, dit geldt in hogere mate voor de veenbodem als voor de kleibodem. De concentraties in de diepere veenlaag in het dijklichaam (ver onder de TGG) (“veen overig” in figuur 15), gemiddeld 0,54 g/l, zijn vergelijkbaar met de referentie monsters van veen.

Voor natrium is een vergelijkbaar patroon waar te nemen als voor sulfaat (figuur 15B). De spreiding in de concentraties voor TGG is kleiner dan voor Veen 0-20. De mediane waarde is het hoogst voor TGG, waar het gemiddelde iets lager ligt (3 g/l ten opzichte van 3,4 g/l voor veen 0-20). Voor zowel klei als veen is een afnemende trend te zien in concentratie in de diepte. De referentieconcentraties liggen allen tussen 36 en 66 mg/l. De pH in de TGG bodem is onnatuurlijk

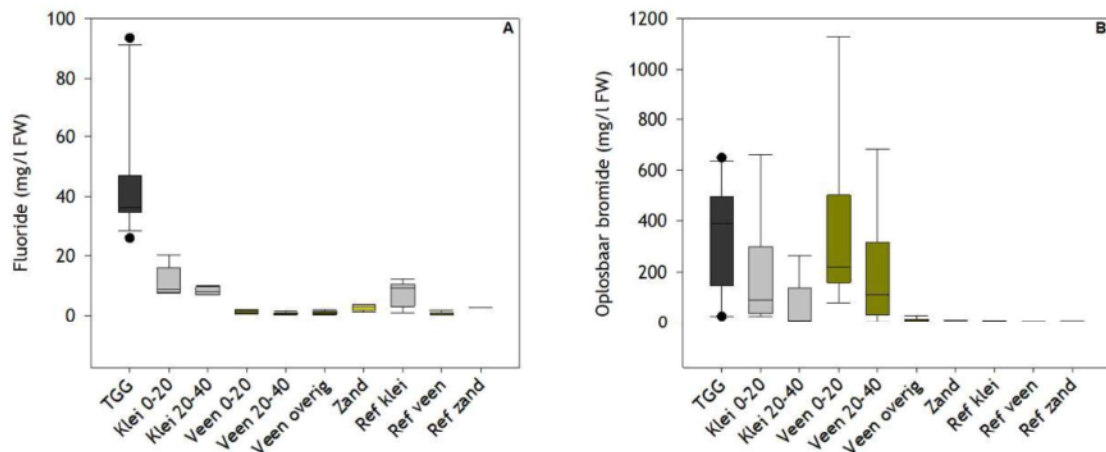
hoog met een gemiddelde pH van rond de 11. De pH in de bodems op verschillende dieptes onder de TGG laat weinig verschil zien tussen de verschillende dieptes (0-20-, 20-40 en overig) en weinig verschil met de referentie (Figuur 15C). Gemiddeld ligt de pH iets hoger in de kleilagen (8,5 en 8,6) ten opzichte van de referentie (8,0). Ook de pH voor zand (9,1) in de raaien ligt gemiddeld wel hoger dan de referentieraaai (8,5). Voor veen is de zuurgraad vergelijkbaar met de waarden in de referentieraaai. De fosforconcentraties zijn relatief laag in TGG (Figuur 15D) ten opzichte van de onderliggende klei-, veen- en zandlagen. De hoogste fosforconcentraties zijn gemeten in de kleilaag op 0-20 cm onder de TGG-laag. Ook in de zandlaag onder de TGG zijn relatief hoge concentraties gevonden. In de klei- en veenlagen is er een tendens van lagere concentraties in de diepere lagen.



De mobiele fracties van enkele zware metalen (koper, lood en arseen) in de bodem zijn weergegeven ² **Figuur 16.**





Figuur 16: Mobiele concentraties koper (A), lood (B) en arseen ($\mu\text{g/l}$ bodem) voor TGG, de onderliggende bodemlagen en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

Wat opvalt is dat enkele zware metalen welke in totaal elementconcentraties verhoogd zijn in de TGG laag t.o.v. de omliggende bodemlagen (paragraaf 3.1.2) dit niet hoeft te gelden voor de mobiele fracties van deze stoffen. Voor enkele zware metalen worden echter wel verhoogde mobiele concentraties aangetroffen in de TGG laag, zoals As, Cu, Cd, Cr, Mo en Sr. In figuur 17 zijn de concentraties van fluoride en oplosbaar bromide weergegeven (in mg/liter bodem), ook voor deze elementen blijkt dat de TGG laag verhoogde concentraties bevat t.o.v. de omliggende bodems. Voor de oplosbaar bromide concentraties blijkt ook dat de bodemlagen direct onder de TGG laag (zowel klei als veen) verhoogde bromideconcentraties bevatten i.v.m. de diepere veenlaag en referentie locaties. Uit de bodem analyses van cyanide en vrij cyanide is gebleken dat de cyanide concentraties in alle bodems beneden de detectielimiet waren.



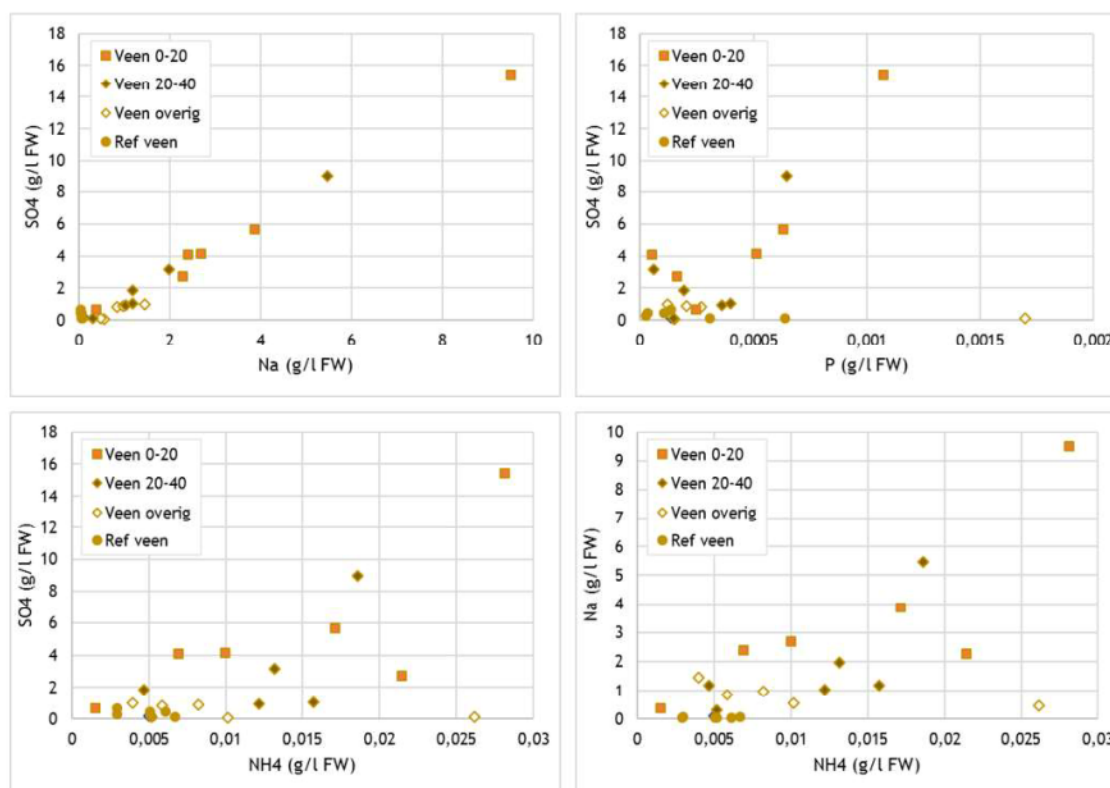
 Number: 1 Author: _29 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:36:26
aanpassen aan ook relevante paramters uit de toetsing zoals Mo en V

 Number: 2 Author: _28 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:35:28

Figuur 17: A) Fluoride (mg/l), B) Oplosbaar bromide (mg/l) voor TGG, de onderliggende bodemlagen en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

VERGELIJKING VAN RESULTATEN WATEREXTRACTEN AAN DE NORM.

Effecten van uitspoeling uit de TGG laag op verhoogde concentraties in de onderliggende veenlaag
 Om een beter beeld te krijgen in hoeverre uitspoeling uit de TGG laag de chemische samenstelling van de onderliggende veenlaag heeft beïnvloed zijn alle veenbodems nog even apart bekeken. In figuur 18 zijn de mobiele concentraties van sulfaat uitgezet tegen A) natrium, B) fosfor en C) ammonium (NH₄) (g/l FW), voor de verschillende veenlagen onder de TGG en in de referentieraai.



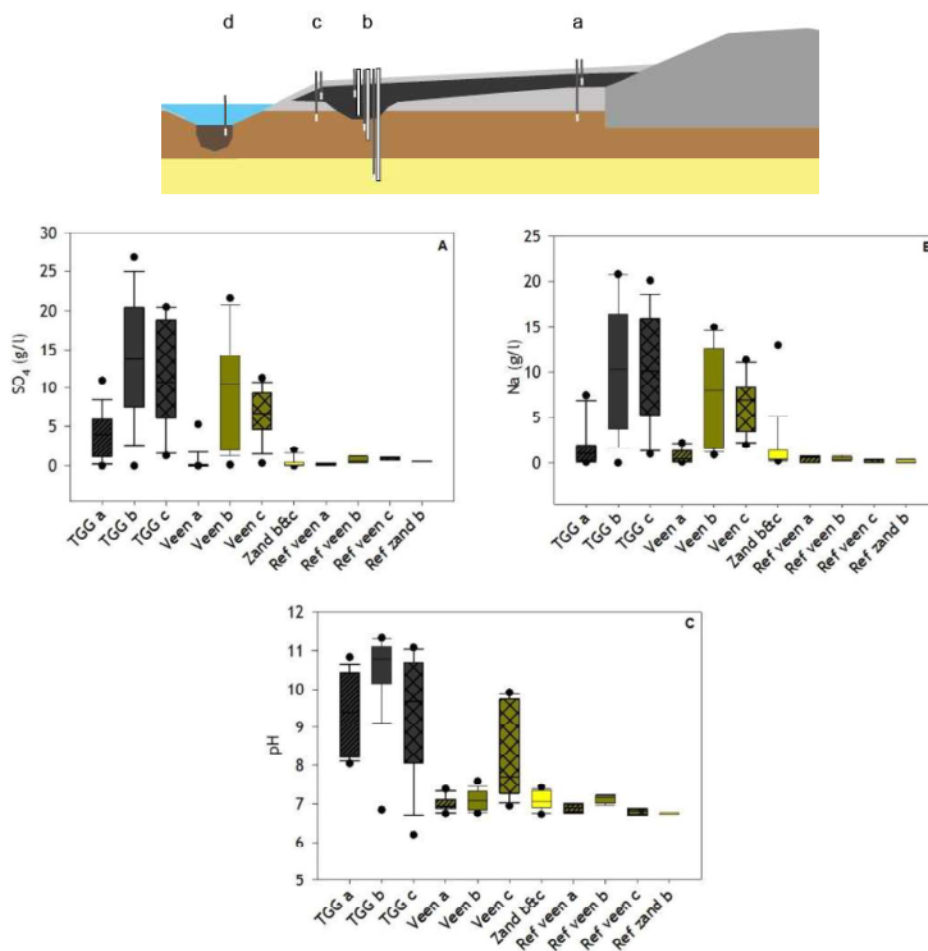
Figuur 18: Correlatie tussen verschillende mobiele vormen van elementen (g/l FW) per veenlaag. A) Sulfaat en natrium. B) sulfaat en fosfor. C) sulfaat en ammonium (NH₄). D) sulfaat en natrium.

De mobiele (water-extraheerbare) natriumconcentraties correleren sterk positief met de (water-extraheerbare) sulfaatconcentraties ($R^2=0,97$) (zie Figuur 18A). Deze correlatie en de aangetroffen concentraties voor natrium- en sulfaat zijn het sterkst en hoogst in de veenbodems onder de TGG (veen 0-20 en 20-40 cm onder de TGG laag). In de referenties zijn de laagste waarden voor zowel natrium als sulfaat. Tussen sulfaat en fosfor is voor de gehele dataset geen duidelijke correlatie waar te nemen, maar zijn er wel enkele veenbodems (onder de TGG laag) waarin er een correlatie lijkt te zijn tussen water-extraheerbare fractie van sulfaat en fosfor (B). Tussen ammonium en sulfaat én ammonium en natrium is een correlatie aanwezig (C & D). Deze correlaties duiden erop dat de chemische samenstelling van de veenlaag onder TGG beïnvloedt wordt door uitspoeling

vanuit de TGG en dat de uitspoeling van natrium en sulfaat in de onderliggende veenlaag tot de mobilisatie van fosfor en ammonium kan leiden.

3.2.3. Zijn er in het veld effecten op het grondwater?

Om te kunnen bepalen of er verspreiding van stoffen plaatsvindt uit de TGG laag naar de omgeving en tot op welke diepte en in welke bodemlagen het grondwater hierdoor beïnvloed wordt zijn er in het veld ceramische cups en peilbuizen geplaatst. In deze paragraaf worden de resultaten van de grondwaterconcentraties van zowel de ceramische cups als de peilbuizen behandeld. Aangezien er meer ceramische cups geplaatst zijn i.v.m. peilbuizen worden (indien niet anders vermeld) resultaten van de ceramische cups behandeld. In figuur 19 zijn de zuurgraad, sulfaat- en natriumconcentratie weergegeven van het poriewater in g/l. De data van raai 1 tot en met 4 is samengevoegd en weergegeven per bodemsoort (TGG, veen en zand) en locatie (a, b, c) (linker zijde van boxplots). Het betreft hier telkens drie locaties langs een transect loodrecht op de dijk, locatie "a" hoog op de dijk, locatie "b" lager op de dijk waar de oude sloot aanwezig was en locatie "c" aan de rand van de dijk, bovenaan het sloottalut (zie ook de schematische weergave bovenaan figuur 19). Daarnaast zijn in de boxplots ook de gegevens van de referentieraai weergegeven (rechter zijde van de boxplots met "ref" ervoor, voor locaties a-c geldt hier hetzelfde).

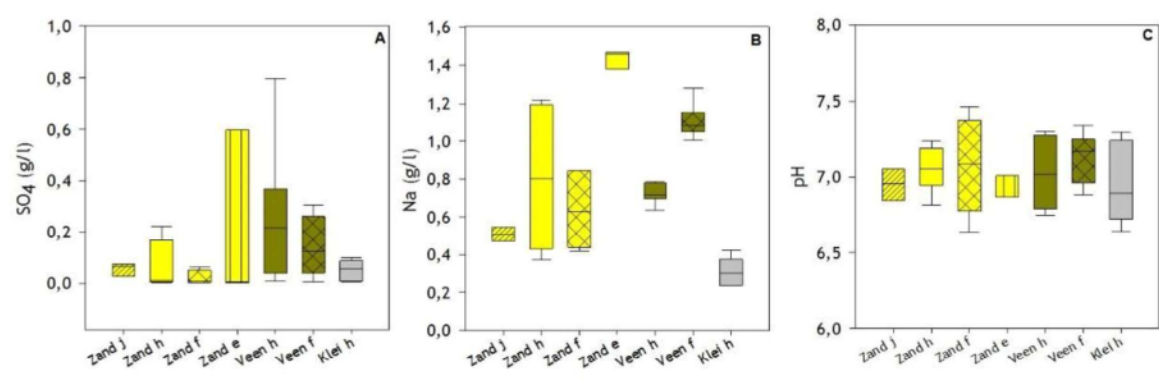


Figuur 19: A) Sulfaatconcentratie (g/l), B) natriumconcentratie (g/l) en C) pH van het poriewater in de TGG-, veen- en zandbodem per locatie (a, b, c) op de raaien en referentieraai. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale

Number: 1 Author: [redacted]_30 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:38:39
svp bromide kalium en Cl F ook opnemen

streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer. Boven het figuur is een schematische dwarsdoorsnede weergegeven met de locaties waar de ceramische cups zijn geplaatst.

Voor zowel sulfaat als natrium zijn de concentraties voor het poriewater van TGG het laagst op locatie A (bovenaan de dijk). Dit is ook het geval voor de veenlaag (Figuur 19 A en B). Locatie A ligt het dichtst bij de weg (hoger op de dijk) en de TGG ligt hoger ten opzichte van NAP, vergeleken met locatie B en C. Tussen de veenlaag op locatie A en de TGG ligt een kleilaag. Het veen op locatie B ligt direct onder de TGG-laag, wat ook het geval is op locatie C in drie van de vier raaien. De concentraties zijn voor beide stoffen op locatie B en C verhoogd t.o.v. diepere veenlagen en liggen grotendeels in dezelfde range, waarbij voor locatie B meer spreiding is in de gemeten concentraties. Deze metingen duiden dus op uitspoeling van sulfaat en natrium naar het grondwater in de onderliggende veenlaag op locaties B en C. Hogerop de dijk (waar er een kleilaag tussen zit) blijkt dit niet het geval. En de concentraties in de onderliggende zandlaag blijken niet verhoogd. De zuurgraad is op elke locatie hoog in het TGG-poriewater (meestal > 8). Opvallend is dat de pH in de veenlaag op locatie C ook relatief hoog is ten opzichte van veen A en B, en referentie-veenlaag C.







Figuur 20: A) Sulfaatconcentratie (g/l), B) natriumconcentratie (g/l) en C) pH van het grondwater in de veen- en zandbodem per locatie (E, F, H en J) op raai 2 en 4. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

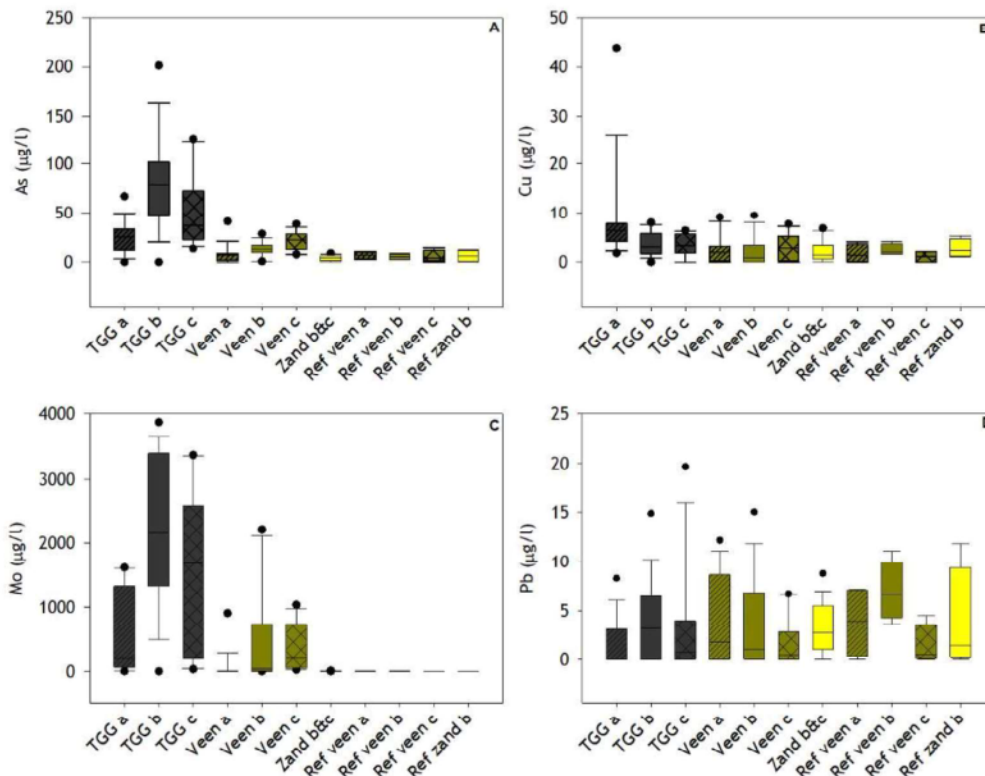
Langs transecten 2 en 4 zijn aanvullende peilbuizen geplaatst in de omgeving en diepte (zie materiaal en methode). De hierin aangetroffen sulfaat en natriumconcentraties en pH blijken vergelijkbaar met de referentie monsters welke in alle transecten verzameld zijn. In figuur 20 is te zien dat de zwavelconcentratie in het grondwater het hoogste is voor zand (locatie e) en veen locatie h). Er is echter wel relatief veel spreiding. Natrium is het laagste in de kleibodem. Tussen de zand- en veenlocaties is veel spreiding, waarbij het hoogste natriumgehalte is gemeten in de zandbodem op locatie e. De zuurgraad ligt bij alle locaties ongeveer rond de 7,0.

In het grondwater zijn ook de zware metalenconcentraties geanalyseerd. Zo zijn in **2**guur 21 is de arseen-, nikkelconcentratie en molybdeenconcentraties in het grondwater weergegeven.



 Number: 1 Author: _31 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:40:09
aanpassen aan relevnte parmeters

 Number: 2 Author: _32 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:40:12







Figuur 21: A) arseen- ($\mu\text{g/l}$), B) koper- ($\mu\text{g/l}$), C) molybdeen- en D) loodconcentratie ($\mu\text{g/l}$) in het poriewater van de TGG-, veen- en zandbodempers per locatie (a, b, c) op de raaien en referentieraai. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

In figuur 21A te zien dat de arseenconcentraties in het grondwater van TGG doorgaans hoger liggen dan in de overige bodemtypen. Locatie TGG-b heeft de hoogste concentraties, maar er is wel meer spreiding in de gemeten waarden. In de veenlaag onder de TGG is ook een lichte verhoging te zien in de arseenconcentraties in vergelijking met de referentie locaties. Voor de concentraties van molybdeen zijn de effecten nog veel sterker zichtbaar. Zo is de molybdeenconcentratie in de TGG laag hoger t.o.v. de omliggende bodemlagen. Tevens is hier duidelijk te zien dat de molybdeenconcentraties in het grondwater in de veenbodempers onder de TGG duidelijk verhoogd zijn. Andere zware metalen welke verhoogde totaalconcentraties laten zien in TGG worden niet of in kleine mate teruggevonden in het grondwater. Grondwater koperconcentraties lijken wel wat verhoogd in de veenlaag onder de TGG i.v.m. de referentie locaties maar blijken weinig mobiel (zie figuur 21). Totale loodconcentraties waren echter sterk verhoogd in de TGG i.v.m. de andere bodemtype maar blijkt weinig tot niet mobiel, hier worden dan ook geen verhoogde concentraties van aangetroffen in het grondwater in en onder de TGG laag.

2nd mei is er een aanvullende monitoringsronde uitgevoerd waarin uit een selectie van 18 peilbuizen (zie materiaal en methode voor details) bemonsteringen van het grondwater zijn verricht waarin naast zware metalen ook concentraties van bromide, fluoride en cyanide geanalyseerd zijn. Ook uit deze aanvullende grondwateranalyses uit peilbuizen is naar voren gekomen dat in de peilbuizen in de veenbodempers direct de TGG verhoogde concentraties van sulfaat en natrium aangetroffen zijn, terwijl dit in de omliggende peilbuizen niet is gevonden, dit sluit dus goed aan bij de analyses uit de ceramische cups. Juist in de peilbuizen in de veenbodempers onder de TGG zijn ook verhoogde concentraties van bromide (400-1400 mg Br/l) en fluoride (0,72-1,4 mg F/l) aangetroffen. Op een van deze locaties is ook een verhoogde cyanideconcentratie aangetroffen (20 $\mu\text{g/l}$). Ook de met de ceramische cups in het grondwater waargenomen verhoogde concentraties van enkele zware metalen als arseen, barium, cadmium en molybdeen zijn verhoogd op deze locaties. In tabel 22 zijn de resultaten van een selectie van parameters weergegeven in alle tijdens deze bemonsteringsronde bemonsterde peilbuizen. Links in tabel 22 staan de peilbuis codes en de dieptes en in hoeverre er bij deze peilbuis TGG in het bodemprofiel aanwezig is en of de peilbuis geplaatst is in een bodemlaag welke direct grenst onder een TGG laag. Vervolgens zijn alle cellen per rij (per



 Number: 1 Author: _34 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:41:51
mis ergens de hoge pH >12

 Number: 2 Author: _33 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:41:26

element) gekleurd op basis van de concentratie (van laag (wit) naar hoog (donker groen)). In deze tabel valt direct op dat voor veel elementen de hoogste concentraties zijn aangetroffen op locaties waar grondwater bemonsterd in een bodemlaag direct onder de TGG laag.



Tabel 22 selectie van analyse resultaten in een serie peilbuizen in de veld transecten (zie materiaal en methode voor peilbuis locaties)

peilbuis	diepte -m.v.	bodem	TGG in profiel	TGG direct erboven	pH	As	Ba	Hg	Mo	Sb	V	Na	Cl	SO ₄	Br	CN	F
						ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	mg/l	mg/l
1 B	450-500	veen	ja	ja	7,8	9	110	0,39	1200	0,6	4,4	9373	4600	11359	1000	< 3	0,7
2 J	460-560	zand	nee	nee	7,6	0,5	23	< 0,01	2,5	< 0,2	1,2	470	900	149	3,9	< 3	0,3
2 H	350-450	veen	nee	nee	7,8	1,8	39	0,02	1,9	< 0,2	0,9	429	270	100	4,6	< 3	0,3
2 H	600-700	zand	nee	nee	8,3	0,4	66	< 0,01	0,3	< 0,2	3,6	1086	1900	4	5,2	< 3	0,4
2 B	500-600	zand	ja	nee	7,6	1,1	67	< 0,01	2	< 0,2	1,9	483	540	91	7,7	< 3	0,3
2 C	300-400	veen	ja	ja	8,3	16	140	0,02	50	< 0,2	5,1	3994	4200	3921	410	< 3	1,2
2 F	80-180	veen	nee	nee	7,1	6,3	210	0,02	0,2	< 0,2	0,6	1255	2100	211	13	< 3	0,2
2 F	300-400	zand	nee	nee	7,2	0,5	90	< 0,01	0,2	< 0,2	2,1	602	760	5	5,3	< 3	0,1
3 B	320-400	veen	ja	ja	12	100	91	0,49	3200	2,6	830	12790	7500	20381	1400	< 3	1,4
4 H	450-550	veen	ja	nee	7,6	7,3	83	0,02	17	< 0,2	6,7	975	860	212	16	< 3	0,4
4 H	700-800	zand	ja	nee	8	0,7	29	< 0,01	0,2	< 0,2	12	385	180	29	1,7	< 3	0,4
4 B	390-470	veen	ja	ja	7,9	57	130	0,11	120	1,3	3,9	14360	5100	22693	1200	20	1,0
4 C	550-650	zand	ja	nee	7,4	0,8	22	< 0,01	0,2	< 0,2	17	579	310	44	2,2	< 3	0,3
4 F	130-230	veen	nee	nee	7,4	7,6	190	< 0,01	3,9	< 0,2	2,4	1132	1400	628	32	< 3	0,2
4 F	400-500	zand	nee	nee	7,3	0,9	17	< 0,01	0,2	< 0,2	18	418	290	10	2,2	< 3	0,3
5 B	250-350	veen	nee	nee	7	3,2	54	< 0,01	0,5	< 0,2	1,1	90	24	222	2,7	< 3	0,4
5 B	550-650	zand	nee	nee	6,8	0,5	84	< 0,01	0,2	< 0,2	0,3	149	97	386	1,2	< 3	0,1

Veel van de in tabel 22 groen gekleurde cellen betreffen vaak ook norm overschrijdende concentraties (zie bijlage 7). Zoals uit tabel 22 en in eerdere paragrafen beschreven bodemanalyses is er een duidelijk verband tussen TGG en verhoogde concentraties van o.a. de stoffen sulfaat, natrium, chloride, molybdeen, bromide en fluoride. Deze elementen zijn dan ook beduidend lager op locaties waar geen TGG in het bodemprofiel aanwezig is en langs het referentie transect (nummer 5 in tabel 22). Hierbij moet wel vermeld worden dat de concentraties van enkele andere stoffen ook de normen overschrijden maar geen relatie met uitspoeling uit TGG vertonen zoals bijvoorbeeld barium en **4**kkel. Daarnaast moet ook niet uit het oog verloren worden dat bijvoorbeeld het wat diepere grondwater van nature ook rijker is aan chloride, natrium en sulfaat. Met name voor sulfaat en natrium de in de uitspoeling uit de TGG aangetroffen concentraties echter wel beduidend hoger als de van nature in de regio in het grondwater aanwezige concentraties. **In bijlage 8 is aangegeven voor welke elementen de aangetroffen contracties in de bodem en het grondwater de normen overschrijdingen.**



In figuur 23 is de methaanconcentratie (µmol/l) en de concentratie (in ppm) aan opgelost organisch koolstof (DOC) in het poriewater (bemonsterd met ceramische cups) weergegeven. De data van raai 1 tot en met 4 is samengevoegd en weergegeven per bodemsoort (TGG, veen en zand) en locatie (a, b, c). Zo ook zijn de gegevens van de referentieraai weergegeven. Voor methaan is rechts van figuur 23A een ingezoomde weergave te zien.

Page: 33

Number: 1 Author: [redacted]_36 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:44:29

Kalium ook opneen p relvante paramters

Number: 2 Author: [redacted]_35 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:42:02

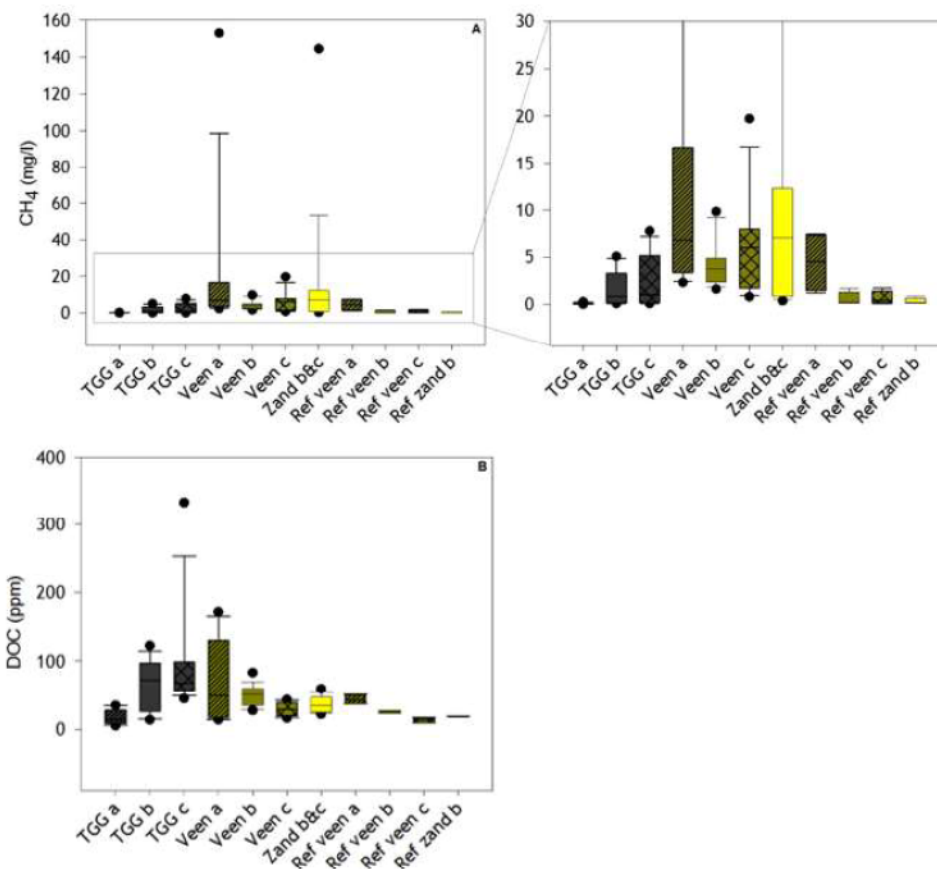
Number: 3 Author: [redacted]_38 Subject: Notitie Date: 19-6-2017 16:49:20

nikkel zit met name hoog in referentie ??

Barium is wel een TGG stof

uitspoeling metalen door hoge redox ?en Cl . bodem is laag dus voldoet aan GBT , normaltier spoelen metalen geheel niet uit bij een hoge pH van 12 nog even aanpassen dus

Number: 4 Author: [redacted]_37 Subject: Markering Date: 19-6-2017 16:44:51



Figuur 23: A) Methaanconcentratie ($\mu\text{mol/l}$) en B) opgelost organisch koolstof (ppm) in het poriewater van de TGG-, veen- en zandbodem per locatie (a, b, c) op de raaien en referentieraai. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

Figuur 23A laat zien dat er in de metingen van het veen in de raaien op locatie a en van zand (locatie b&c) relatief veel spreiding is. Hier komen twee uitschieters voor die hoger zijn dan 9000 $\mu\text{mol/l}$, beide gemeten in februari (voor veen in raai 4 en voor zand in raai 2). Gemiddeld liggen de methaanconcentraties in het poriewater van het veen ruimschoots hoger in de raaien 1-4 dan in de referentie. Ook in het zand zijn gemeten concentraties doorgaans hoger. Methaan in het poriewater van TGG is relatief laag (met name locatie a) ten opzichte van de andere locaties in de raaien 1-4.

Ook voor DOC in het poriewater is er relatief veel spreiding in veen op locatie a, hoewel voor TGG op locatie a het minste spreiding is ten opzichte van TGG-b en c 9 (Figuur 20B). Het veen in de raaien 1-4 op locaties b en c hebben doorgaans lagere concentraties dan a. De medianen en gemiddeldes van DOC in het veen-poriewater zijn hoger in de raaien dan in de referentie.

3.2.4. Effecten op oppervlaktewater

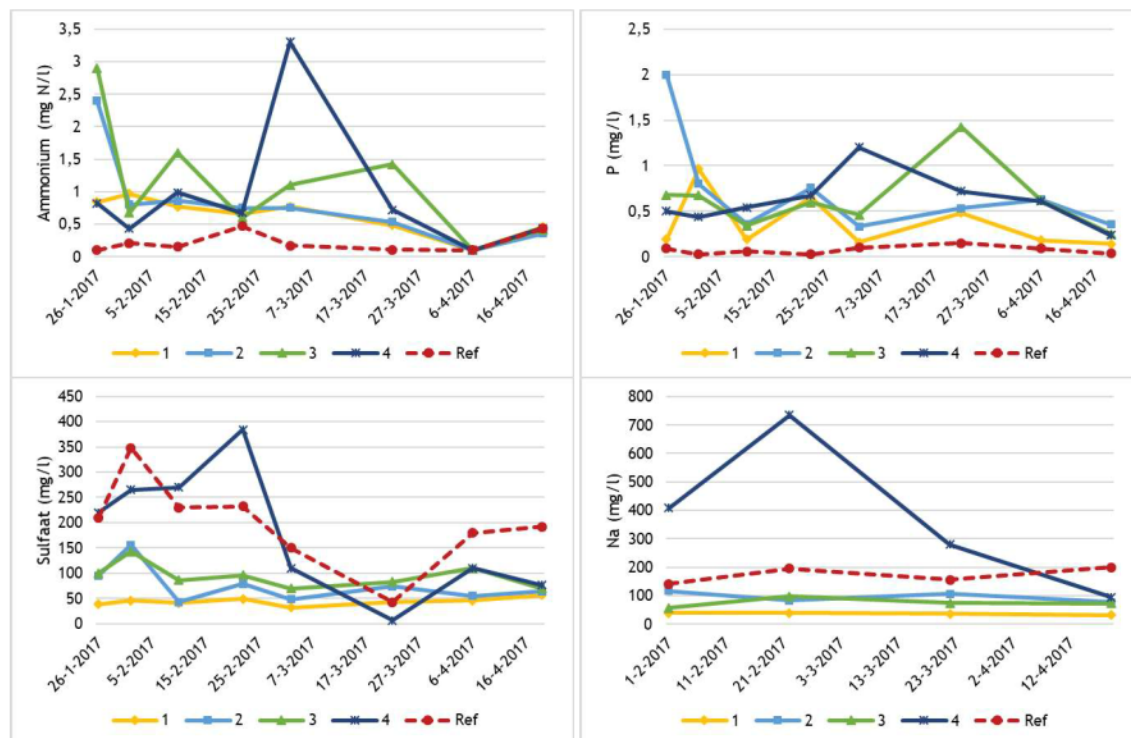
In tabel 24 zijn verschillende karakteristieken weergegeven van de slibbodem in de sloot parallel gelegen aan de dijk. De gemakkelijk beschikbare (mobiele) en potentieel mobiliseerbare fracties van natrium (middels kationuitwisseling), zwavel en ammonium zijn weergegeven evenals het totaal aan natrium, zwavel, koper, lood en arseen in de bodem.

Tabel 24: Karakteristieken van de slibbodem per raai. Gemiddeldes per raai van organische stof (%), zuurgraad van waterextractie (pH), natrium, zwavel, ammonium (mobiel en potentieel mobiliseerbaar) en totaalconcentraties van natrium, zwavel, koper, lood en arseen.

Raai	OS (%)	pH	Mobiel (mg/l FW)			Mobiliseerbaar (mg/l FW)			Totaal (g/kg DW)		Totaal (mg/kg DW)		
			Na	SO4	NH4	Na	SO4	NH4	Na	S	Cu	Pb	As
1	16,9	7,8	148	244	1,1	154	285	3,9	0,1	24,2	12,1	26,2	7,7
2	28,3	7,4	827	1131	0,3	773	413	5,5	6,9	35,7	10,8	35,9	3,3
3	44,6	7,9	384	612	3,5	321	338	5,5	3,3	31,2	9,0	19,4	2,0
4	38,6	8,0	725	166	0,4	687	194	6,5	5,7	18,5	24,9	74,9	7,9
Referentie	17,1	7,7	216	446	0,3	172	313	2,9	0,3	31,7	10,6	41,2	4,9

Het organische stofgehalte (OS) is in raai 1 gelijk aan die in de referentieraai. In raai 3 is het hoogste OS gemeten. De zuurgraad is het hoogste in raai 4 (pH van 8,0). De concentraties voor het mobiele, potentieel mobiliseerbare en totaal natrium zijn het laagst in raai 1 en de referentieraai, en het hoogst voor raai 2. Raai 2 heeft tevens de hoogste mobiele sulfaatconcentratie (1131 mg/l), potentieel mobiliseerbaar sulfaat (413 mg/l) en totaal-zwavel (35,7 g/kg). Raai 3 en de referentieraai hebben ook totaal-zwavelconcentraties hoger dan 30 g/kg. Raai 4 bevat de hoogste totaalconcentraties voor koper, lood alsmede arseen.

Het oppervlaktewater is gemeten op diverse variabelen op meerdere tijdstippen. De concentraties fosfor (P) (links in mg/l) en ammonium (rechts in mg N/l) zijn weergegeven in Figuur 21. Hierin zijn de metingen van dit onderzoek verwerkt alsmede de standaard metingen van het waterschap op punten dichtbij de raaien.



Figuur 25: Linksonder) totaal fosfor (mg/l), rechtsboven) ammonium (mg N/l), linksonder) sulfaat (mg/l) en rechtsonder) natriumconcentratie (mg/l) in het oppervlaktewater langs de transecten. Data van 26-1, 10-2, 3-3 en 6-4 2017 zijn gemeten door het Waterschap.

Voor zowel voor totaal-fosfor als voor ammonium zijn de concentraties het laagst op de referentieraai, voor P <0,1 mg/l en voor ammonium <0,5 mg N/l (Figuur 25). De raaien laten relatief meer schommelingen zien in de metingen. De P-concentraties laten geen duidelijke stijging dan wel daling zien in de tijd, waarbij de NH₄-concentraties in de raaien doorgaans een lichte

dalende trend laten zien. De waarden zijn bijna gelijk aan elkaar in april ($< 0,1$ mg N/l). Ook in het poriewater van de sloot zijn de P en NH_4 -concentraties het laagst in de referentieraaai ten opzichte van de raaien 1 tot en met 4.

In Tabel 26 zijn enkele gegevens van het oppervlaktewater (sloot) weergegeven per raai, namelijk de zuurgraad, de concentraties (in $\mu\text{g/l}$) van koper (Cu), lood (Pb) en arseen (As). Ook zijn de zwavelconcentraties weergegeven van het oppervlaktewater (S) en het poriewater van de slibbodem (S-porie). De waarden zijn gemiddelden van de tijdreeksen (vanaf januari tot en met maart).

Tabel 26: Gemiddelde zuurgraad, koper-, lood- en arseenconcentratie in $\mu\text{g/l}$ en zwavel (mg/l) van het oppervlaktewater. Zwavelconcentratie is ook weergegeven voor het poriewater in de waterbodem.

Raai	pH	Cu ($\mu\text{g/l}$)	Pb ($\mu\text{g/l}$)	As ($\mu\text{g/l}$)	SO4 (mg/l)	SO4-porie (mg/l)
1	7,6	4,9	0,1	2,9	49	4919
2	7,5	8,0	2,0	3,6	93	101
3	7,4	5,7	5,8	4,4	98	113
4	7,8	4,3	4,0	4,2	183	105
Referentie	7,8	3,0	1,1	1,1	204	335

In tabel 26 is te zien dat de zuurgraad niet veel verschilt tussen de raaien. Ook is de zuurgraad gemeten door het waterschap. Deze resultaten komen nagenoeg overeen. De koperconcentratie relatief opvallend hoog bij raai 2 ($8 \mu\text{g/l}$) en het laagst bij de referentieraaai. De loodconcentratie is het laagst in de sloot bij raai 1. Voor arseen heeft de referentiesloot de laagste concentratie. De zwavelconcentratie is in de sloot van de referentie het hoogst en het laagste voor de sloot bij raai 1. Opvallend is dat raai 1 wel een zeer hoog sulfaatconcentratie in het poriewater heeft (4.9 g/l). De gemiddelde sulfaatmetingen van het waterschap in de sloten nabij de raaien laten een vergelijkbare trend zien als de zwavelmetingen in het slootwater, waarbij van raai 1 tot de referentie de sulfaatconcentraties stijgen. Sinds de incidenten zich voorgedaan hebben in het waterschap de watergang parallel aan de dijk actiever gaan doorspoelen om de uitspoelende elementen te verdunnen met oppervlaktewater uit de omgeving. Om deze reden wordt er in de huidige rapportage niet diep ingegaan op de oppervlaktewater samenstelling. Ondanks het doorspoelen blijven de sulfaatconcentraties relatief hoog, zowel op locaties met en zonder toepassing van TGG. Dit duidt erop dat het oppervlaktewater in deze regio reeds relatief sulfaatrijk oppervlaktewater bevat. Uit aanvullende metingen in de regio van de afgelopen jaren van Waterschap Vallei en Veluwe blijkt tevens dat deze regio reeds sulfaatrijk oppervlaktewater bevat (zie bijlage 9). De potentiële sulfaatinvloed vanuit het dijklichaam komt dus bovenop deze reeds relatief hoge sulfaatconcentratie die reeds in dit gebied aanwezig is. Aan de zoutkristallen langs het sloottalud is te zien dat er nog steeds met zouten aangereikt water uit de dijk sijpelt richting de sloot (zie foto 4).



Foto 4: Uitspoeling van grondwater uit het dijklichaam onder aan de dijk in het sloot talud, wat leidt tot kristallisatie en neerslag van zouten bij verdamping (foto J. Graafland).

Conclusies:

- Uit bodemonderzoek met uitloogtesten van TGG wat in opdracht van Waterschap Vallei en Veluwe is uitgevoerd alvorens de uitvoering van het huidige onderzoek is reeds gebleken dat bromide, chloride en sulfaat de emissie waarde overschrijden.
- De TGG laag blijkt, in vergelijking met omliggende referentie bodems, sterk verrijkt met zouten (grotendeels natrium) en zwavel welke beide ook makkelijk uitspoelen (in de vorm van natrium en sulfaat) indien ze in contact komen met water. Gemiddeld liggen de makkelijk uitspoelbare zwavel-fracties in de TGG meer dan twaalf keer zo hoog als de gemiddelde concentraties in de bodems van het referentie transect (veen, klei en zand), de makkelijk uitspoelbare natrium-fracties zijn ongeveer zeventig keer zo hoog.
- Uit bodemanalyses komt na voren dat enkele zware metalen concentraties in de TGG laag hoger zijn i.v.m. de omliggend bodemlagen in het dijklichaam. XXX elementen de noremen overschreiden. Voor xxx en xxx
- Uit een serie achtereenvolgende bodemextracties is gebleken dat de totale mobiele fracties van sulfaat en natrium in het binnen dit onderzoek op locatie verzamelde TGG ongeveer 8,2 gram sulfaat per liter TGG en 2,6 gram natrium per liter TGG.
- Uit bodemanalyse in diepte profielen langs meerdere transecten loodrecht op de dijk is gebleken dat zowel de klei- als de veenbodem op 0-20 en 20-40 cm onder de TGG laag verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties bevatten. Tevens lijkt hier ook een correlatie aanwezig tussen zwavel en natrium met fosfor en ammoniumconcentraties; uitspoeling uit de TGG laag lijkt dus reeds geleid te hebben tot verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties in onderliggende bodemlagen en te kunnen leiden tot nutriëntmobilisatie in de onderliggende veenlaag.
- Uit grondwateranalyses op verschillende diepten en locaties onder in en onder de TGG laag is ook gebleken dat de veenlaag onder de TGG laag, lager op de dijk (locaties b en c, waar de voormalige sloot aanwezig was en de TGG direct op het onderliggende veen ligt) verhoogde zwavel- en natriumconcentraties laat zien. Er vindt dus uitspoeling plaats van natrium en sulfaat naar de onderliggende veenbodem. Hier blijkt op enkele locaties ook de pH reeds verhoogd. Hogerop de dijk (locatie a waar een dikke kleilaag tussen de TGG en de veenlaag aanwezig is) en in de referentielocaties zijn de zwavel- en natriumconcentraties in het grondwater niet verhoogd.
- Naast verhoogde sulfaat- en natriumconcentraties zijn in het grondwater in de onderliggende veenbodem onder de TGG laag ook verhoogde concentraties van chloride, molybdeen, arseen, bromide en fluoride aangetroffen. Juist van al deze elementen zijn ook sterk verhoogde concentraties aangetroffen in de TGG, het is hiermee dus zeer aannemelijk dat deze stoffen uit de TGG uitspoelen in de onderliggende veenlaag. Het grondwater in de regio van de onderzoekslocatie bevat reeds wat verhoogde chloride, natrium en sulfaat concentraties, maar de tijdens dit onderzoek aangetroffen natrium en sulfaat concentraties welke uit de TGG spoelen zijn beduidend hoger.
- Enkele stoffen waarvan ook verhoogde (norm overschrijdende) concentraties zijn aangetroffen in het grondwater zoals barium en nikkel lijken niet te correleren met aanwezigheid van TGG.
- Doordat tijdens de uitvoering van het huidige onderzoek de watergang parallel aan de dijk werd doorgespoeld is niet goed te bepalen in hoeverre de concentraties in het oppervlaktewater verhoogd zijn. Wel blijkt uit metingen van Waterschap Vallei en Veluwe dat het oppervlaktewater in de regio reeds van nature relatief rijk is aan sulfaat.

3.3 Hoe functioneert de dijk hydrologisch en in welk mate kan vervuiling uit de TGG laag zich in de omgeving verplaatsen?

Dit onderdeel is nog in uitvoering, de uit de hydrologische modelering voortkomende resultaten kunnen dus niet in deze tussenrapportage opgenomen worden. Deze resultaten worden in de eindrapportage opgenomen.

In bijlage 10 (*Deze wordt dus nog toegevoegd in definitieve versie*) is de onderzoeksnotitie over de hydrologische modeleren in zijn geheel opgenomen.

Conclusies:

- *Dit onderdeel is nog in uitvoering, de uit de hydrologische modelering voortkomende resultaten kunnen dus niet in deze tussenrapportage opgenomen worden. Deze resultaten worden in de eindrapportage opgenomen.*

3.4 Effecten van uitspoeling van sulfaat en zouten uit de thermisch gereinigde grond op biogeochemische processen en afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag?

Op basis van bodem- en grondwateranalyses langs diepteprofielen in het dijklichaam is gebleken dat er uitspoeling van met name sulfaat en zouten vanuit de TGG laag plaatsvindt naar de omgeving, zo ook op de onderliggende veenlaag. Om onder gecontroleerde condities de effecten van uitspoelende elementen uit de TGG laag op biogeochemische processen (kolomexperiment) en afbraakprocessen (incubatie-experiment) in de onderliggende veenlaag te onderzoeken zijn er twee laboratoriumexperiment uitgevoerd.

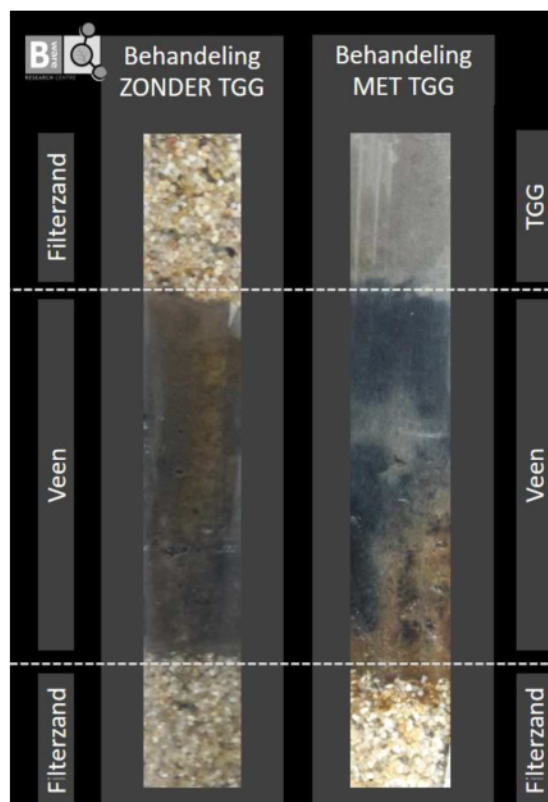
3.4.1. Uitspoeling vanuit TGG laag en de consequenties voor de onderliggende veenlaag

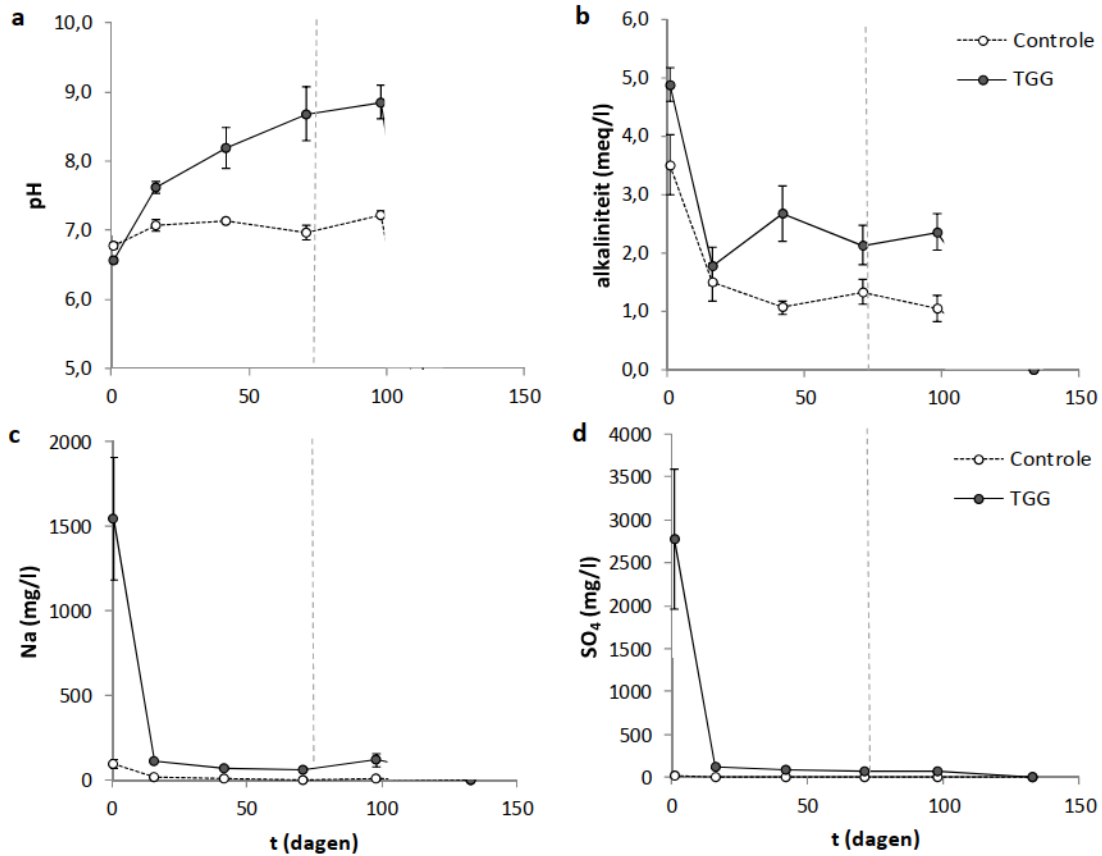
Om de effecten van uitspoeling uit de TGG laag op de onderliggende veenlaag in detail te onderzoeken is er een kolomexperiment uitgevoerd waarin onder controleerde condities de veldsituatie op laboratoriumschaal is nagebootst. In dit experiment zijn een reeks kolommen met veenbodem (4 met TGG erboven en 4 zonder TGG) versneld doorgespoeld met artificieel regenwater waarna de verschillen. Zoals verwacht blijkt ook uit het kolomexperiment dat er veel natrium en zwavel uit de TGG laag uitspoelt wat vervolgens in de onderliggende veenlaag terecht komt (zie figuur 27 en 28). De resultaten uit het kolomexperiment duiden op een hoge beschikbaarheid en snelle uitspoeling van natrium en zwavel vanuit de TGG laag naar de onderliggende veenlaag (let op de y-as in de twee onderste figuren van figuur 27 staan op logaritmische schaal). Al tussen het moment van de opzet van het experiment en de eerste meting blijkt al veel natrium en zwavel te zijn uitgespoeld (al op het eerste tijdstip zijn er grote verschillen tussen de behandelingen). Vanaf het eerste tijdstip dalen de natrium- en zwavelconcentraties door de tijd, maar blijven significant verhoogd in de veenlaag onder de invloed van TGG. Ook de pH in de veenlaag onder TGG behandeling stijgt significant terwijl deze in de controle veenbodem stabiel blijft. Vanaf het moment dat de doorspoeling met regenwater is gestopt (tien weken, grijze stippellijn in figuur 27) blijven de concentraties van elementen als natrium en zwavel verhoogd (*Dit wordt nog verder aangevuld indien alle resultaten van de experimenten geanalyseerd zijn*). Naast de sterk verhoogde

natrium en zwavelconcentraties is ook te zien dan andere kationen zoals calcium, kalium, magnesium, silicium en in mindere mate mangaan en ijzer tijdelijk sterk verhoogd zijn in de veenbodems onder de TGG t.o.v. de controle behandeling (zie bijlage 11 voor details), wat duidt op kationmobilisatie.

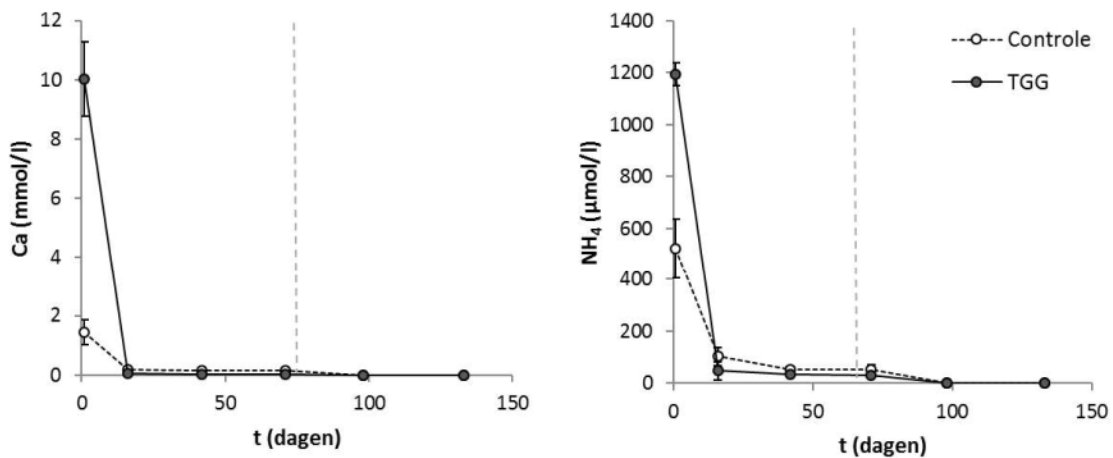
Figuur 27: Detail foto's van één voorbeeld van beide behandelingen van het kolomexperiment, met telkens van boven naar beneden eerst filterzand ofwel TGG, dan de veenlaag en daaronder filterzand. Links is een voorbeeld weergegeven van een kolom zonder TGG erboven, rechts een kolom met TGG erboven.

Ook op basis van kleurveranderingen in de veenlaag is te zien dat uitspoeling vanuit de TGG laag van bovenaf langzaam de veenlaag intrekt en hier de biogeochemische processen beïnvloed (zie figuur 27). Zo is te zien dat de van nature roodbruine veenlaag geheel zwart kleurt op plekken waar het beïnvloedt wordt door water wat in contact is geweest met de TGG laag. Op wat langere termijn blijkt dat de op korte termijn verhoogde concentraties van de kationen juist dalen beneden het niveau van de controle behandeling op de langere termijn, zie de calciumconcentratie in figuur 28 en de overige elementen in de bijlage 11, wat tevens duidt op kationmobilisatie en uitspoeling van kationen uit de veenlaag. Wat betreft de nutriënten beschikbaarheid blijkt de ammoniumconcentratie op de korte termijn (tijdelijk) sterk toe te nemen in de behandeling met TGG, zie figuur 29. Voor nitraat is op de lange termijn een lichte stijging te zien. De fosforconcentratie in de veenlaag wordt niet significant beïnvloed door de TGG.



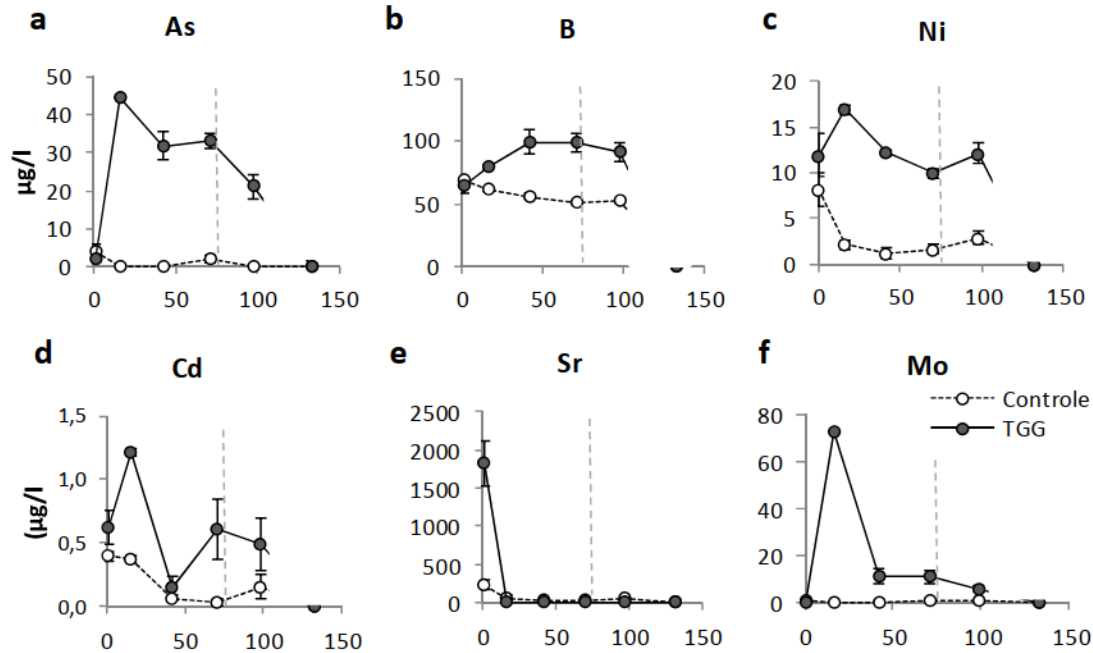


Figuur 28: gemiddelde poriewaterconcentraties van (A. de pH, B. de alkaliniteit, C. de natriumconcentratie en D. de zwavelconcentratie) in het kolomexperiment door de tijd in de controle veenbodern (open cirkels) en de veenbodern onder TGG (grijs gevulde cirkels) (\pm S.E.M.). xxx nog aanvullen als alle tijdstippen geanalyseerd zijn xxx



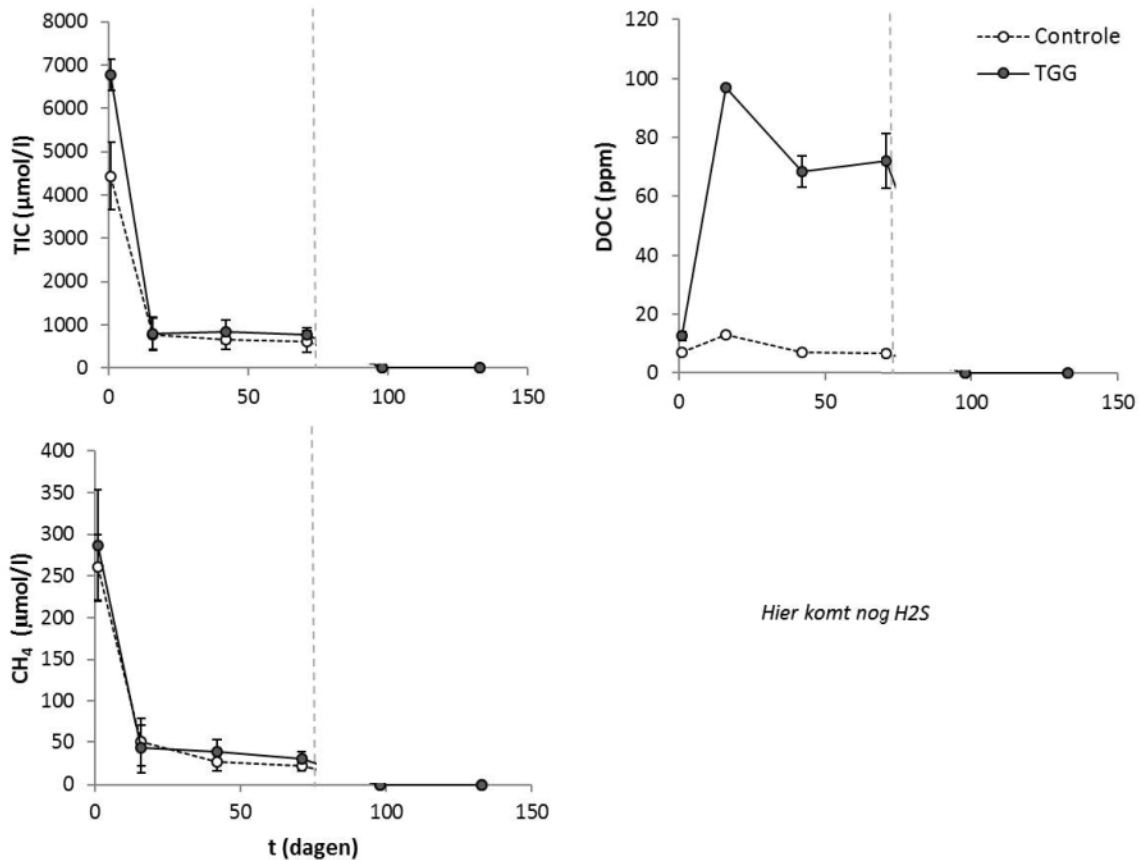
Figuur 29: gemiddelde poriewaterconcentraties van (A. de calciumconcentratie en B. de ammoniumconcentratie) in het kolomexperiment door de tijd in de controle veenbodern (open cirkels) en de veenbodern onder TGG (grijs gevulde cirkels) (\pm S.E.M.). xxx nog aanvullen als alle tijdstippen geanalyseerd zijn xxx

Uit de resultaten van het kolomexperiment komt naar voren dat de opgeloste zware metalen (arsen, barium, nikkel en strontium) concentraties in de veenlaag onder TGG behandeling significant verhoogd zijn t.o.v. de controle behandeling. Overige geanalyseerde zware metalen verschilden niet tussen beide behandelingen of lagen beneden de detectielimiet.



Figuur 30: gemiddelde poriewaterconcentraties van (A. arseen, B. barium, C. nikkel en D. cadmium, E strontium en F molybdeen in het kolomexperiment door de tijd in de controle veenbodem (open cirkels) en de veenbodem onder invloed van TGG (grijs gevulde cirkels) (\pm S.E.M.)). xxx nog aanvullen als alle tijdstippen geanalyseerd zijn xxx

Met betrekking tot afbraakprocessen blijkt dat poriewater bicarbonaat-, waterstofsulfide- en methaanconcentraties in de eerste periode van het experiment (tijdens wegzijging) sterk beïnvloed worden door de wegzijging en dat er geen significante verschillen werden gevonden tussen de twee behandelingen (zie figuur 30). Na een periode van stilstand aan het einde van het experiment blijkt xxx nog aanvullen als alle tijdstippen geanalyseerd zijn xxx. De opgeloste organische koolstof concentraties (DOC) in het bodem poriewater blijkt gemiddeld echter juist toe te nemen in de veenbodem onder invloed van TGG (zie figuur 31).



Figuur 31: gemiddelde poriewaterconcentraties van A.) de TIC (totaal anorganisch koolstof) concentratie en B.) de opgelost organisch koolstof (DOC) concentratie, C.) de methaan concentratie en D. de sulfideconcentratie in het kolomexperiment door de tijd in de controle veenbodem (open cirkels) en de veenbodem onder TGG (grijs gevulde cirkels) (\pm S.E.M.). xxx nog aanvullen als alle tijdstippen geanalyseerd zijn xxx

3.4.2. Effecten van TGG op afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag

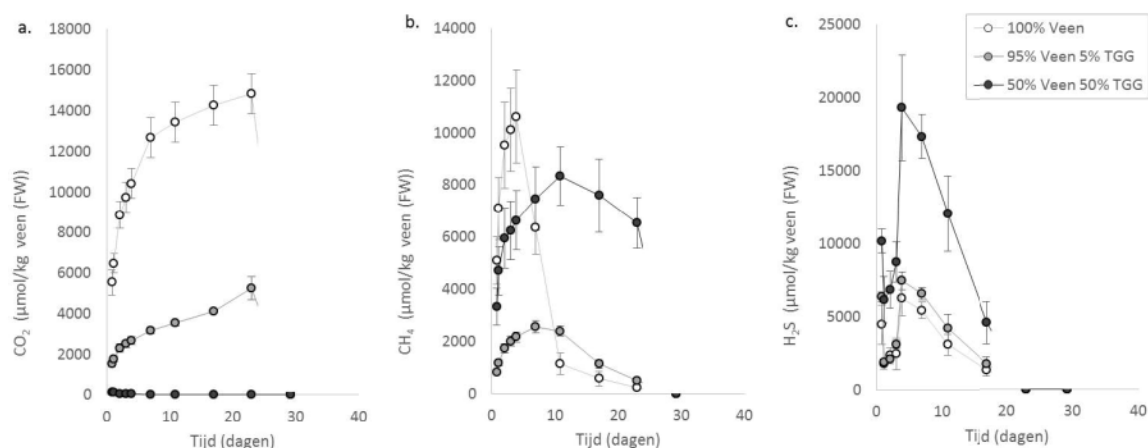
Uit de grondwatergegevens uit de transecten in het veld en de resultaten uit het kolomexperiment is gebleken dat de uitspoeling van stoffen uit de TGG laag biogeochemische processen in de onderliggende veenlaag beïnvloedt, dit zou ook potentiële consequenties kunnen hebben voor anaërobe afbraak gerelateerde processen in de veenlaag. Om meer inzicht te krijgen in wat de effecten kunnen zijn van TGG op afbraakprocessen in de veenbodem is er onder gecontroleerde omstandigheden een incubatie-experiment uitgevoerd in het laboratorium waarin de productie van anorganisch koolstof en DOC (opgelost organisch koolstof), in de veenbodem werd gemeten onder verschillende behandelingen (veen met 0%, 5% en 50% TGG). Dit gebeurde door het monitoren van de productie van veenafbraak gerelateerde gassen (CO_2 , CH_4 en H_2S), in de headspace (gasfase boven de bodem) en de concentratie TIC (totaal anorganisch koolstof) en DOC in het poriewater aan het einde van het incubatie experiment. De uiteindelijke concentraties in de gasfase zijn de netto resultante van een interactie van verschillende microbiële en biogeochemische processen in de bodem.

Uit het incubatie-experiment blijkt dat de koolstofcyclus in de veenbodem in hoge mate wordt beïnvloedt door de TGG laag. Uit het incubatie-experiment komt naar voren dat de CO_2 concentraties in de headspace in beide behandelingen met TGG sterk verlaagd zijn t.o.v. de controle behandeling, in de 50% veen 50% TGG behandeling wordt zelfs amper CO_2 productie waargenomen. Uit de poriewater analyses aan het einde van het experiment blijkt dat hoe groter de

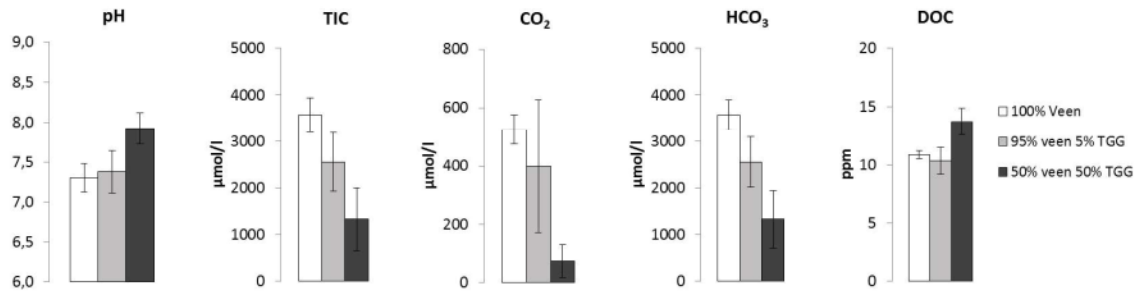
TGG invloed hoe hoger de pH. Daarnaast blijkt ook de totaal anorganische koolstof concentratie (TIC) (combinatie opgelost CO_2 als HCO_3^-) verlaagd te zijn in de veenbodems met TGG. Een verlaging van de CO_2 concentratie (welke deels te verklaren is door verhoogde pH waardoor een deel van het CO_2 omgezet wordt in HCO_3^-) in combinatie met een verlaagde TIC concentratie lijkt te duiden op een verlaagde CO_2 productie in de veenbodem bij verhoogde invloed van TGG. Ook blijkt dat de concentratie van DOC (reactief organisch materiaal) aan het einde van het experiment iets verhoogd is in de veenbodems onder invloed van TGG.

XXX dit moet nog blijken op basis van metingen aan einde van experiment xxx

De toevoeging van TGG blijkt de methaanconcentratie (wordt gevormd door methanogenese) op korte termijn te verlagen, hieruit kan geconcludeerd worden dat op korte termijn de methaanproductie wordt geremd in beide behandelingen met TGG (figuur 32). Op langere termijn (na de eerste vier dagen) blijkt echter dat de methaanproductie in de controle behandeling omslaat van methaanproductie naar netto methaanconsumptie. Het is niet helemaal duidelijk hoe dit proces verklaard kan worden maar waarschijnlijk speelt het proces van anaërobe methaanoxidatie hierbij een rol. Methaan kan worden geoxideerd tot kooldioxide door bijvoorbeeld driewaardig ijzer maar ook door sulfaat. We zien opvallende genoeg dat er een stijging (gevolgd door een afname) is van de sulfideconcentratie vanaf het moment dat de methaanconcentratie in de headspace afneemt. In de twee behandelingen van veen met TGG is te zien dat de methaanconcentratie gedurende de eerste dagen langzaam stijgt (in de 50%-50% behandeling sneller) en vervolgens na ruim een week ook beide gaan afnemen, zei het veel geleidelijker dan in de controle veenbehandeling. Voor de waterstofsulfideconcentratie blijkt dat gedurende de eerste dagen er geen verschillen te zijn tussen de 0% en 5% behandeling. Voor de 50% behandeling is de waterstofsulfideconcentratie vanaf het begin hoger. Vanaf dag vier in het experiment zien we een sterke stijging in alle behandelingen. De stijging is echter het sterkst in de 50% behandeling. Vanaf dag vier tot dag 4 blijft de waterstofsulfideconcentratie hoger in de behandelingen van veen met TGG, in vergelijking met enkel veenbodem, maar dalen de concentraties vervolgens in de daaropvolgende dagen. TGG blijkt dus de sulfaatreductie in de veenbodem op korte termijn te stimuleren (mogelijk door een combinatie van de stijging van de sulfaatconcentratie en DOC mobilisatie). Deze stimulatie blijkt echter van korte duur in alle behandelingen. De geleidelijke afname van de sulfideconcentratie na dag vier laat zien dat het sulfide dat wordt gevormd ook weer wordt vastgelegd in de bodem (waarschijnlijk door precipitatie met ijzer of andere metalen en/of adsorptie aan bodemdeeltjes).



Figuur 32: Het verloop van enkele (aan veenafbraak gerelateerde) gasconcentraties in het incubatie-experiment, a. de koolstofdioxide concentratie (CO_2), b. de methaanconcentratie (CH_4), c. de waterstofsulfideconcentratie (H_2S), alles weergegeven in $\mu\text{mol/kg}$ veen (FW) (\pm S.E.M.). xxx nog aanvullen als alle tijdstippen geanalyseerd zijn xxx



Figuur 33: De pH en een aantal in water opgeloste koolstof gerelateerde parameters (v.l.n.r. de totaal anorganische koolstofconcentratie (TIC), de koolstofdioxideconcentratie, de bicarbonaatconcentratie, de opgelost organisch koolstof concentratie (DOC)) in het bodemporiewater van de bodems van het incubatie-experiment aan het einde van het experiment (\pm S.E.M.).

De resultaten laten zien dat de interacties tussen de sulfaat en de koolstofcyclus complex zijn. Er kan in de bodem tegelijkertijd sulfaatreductie en methaanproductie plaatsvinden. Dit duidt erop dat de methanogenen en de sulfaatreducerende bacteriën in het sediment verschillende substraten gebruiken. Sulfide dat hierbij wordt gevormd wordt vastgelegd in de bodems. Methaan neemt na een aanvankelijke toename weer af hetgeen duidt op anaërobe oxidatie van methaan en/of een afname van de methaanproductie. De resultante van deze processen is dat er netto (na 20 dagen) veel meer methaan en veel minder kooldioxide (TIC) wordt geproduceerd in de 50 % behandeling. Voor de 5 % behandeling geldt dat er veel minder TIC wordt geproduceerd per kg veen. Een geringe aanrijking van de veenlaag met TGG lijkt dus op korte termijn eerder te leiden tot een remming van de mineralisatie van het veen en de mineralisatie in ieder geval niet te verhogen. Door de complexiteit en de combinatie van verschillende processen en interacties hiertussen kan hier geen directe verklaring voor gegeven worden.

Conclusies:

- Uit het kolomexperiment komt (net als uit de resultaten op locatie) naar voren dat de veenlaag onder de TGG behandeling op korte termijn sterk verhoogde natrium- en zwavelconcentraties bevat.
- Deze sterk verhoogde natriumconcentratie leidt tot de mobilisatie van andere kationen van het bodemadsorptiecomplex wat leidt tot (tijdelijk) sterk verhoogde kationconcentraties (bijvoorbeeld Ca, Mg, K, Mn etc.)
- Ook andere processen als een verhoogde alkaliniteit en sterk verhoogde pH, welke op locatie waargenomen zijn, komen ook uit het kolomexperiment naar voren. De pH in de veenlaag onder de TGG laag stijgt sterk en lijkt in het kolomexperiment sterker beïnvloed als in het veld.
- Uit het kolomexperiment blijkt dat de concentraties van opgelost arseen, barium, nikkel en strontium verhoogd zijn in de veenbodems onder TGG t.o.v. de controle behandeling.
- De uit het incubatie-experiment blijkt dat de koolstofcyclus in de veenbodem in hoge mate beïnvloed wordt door de aanwezigheid van TGG. TGG lijkt de productie van CO₂ in de veenbodem te verlagen, bij de 50% veen 50% TGG behandeling blijkt deze zelfs geheel stil gelegd. De productie van methaan wordt op korte termijn verlaagd in de veenbodems onder invloed van TGG. Op iets langere termijn is echter het proces van anaerobe methaanoxidatie opgetreden in alle behandelingen wat het lastig maakt de lange termijn effecten van TGG op de methaanproductie te voorspellen. De sulfaatreductie wordt op korte termijn gestimuleerd door TGG (vermoedelijk de toename van sulfaat in combinatie met de mobilisatie van DOC). Op langere termijn neemt het proces van sulfaatreductie weer af in alle behandelingen. Samengevat lijkt de toevoeging van TGG de afbraakprocessen op korte termijn niet te verhogen, er kunnen echter geen conclusies getrokken worden over de effecten op lange termijn.
- Gezien de complexiteit en interacties tussen verschillende biogeochemische processen als gevolg van invloed van TGG op afbraakprocessen in veenbodem zal aanvullend onderzoek nodig zijn de effecten op langere termijn te kunnen bepalen.

4. Discussie

4.1 Eigenschappen van TGG

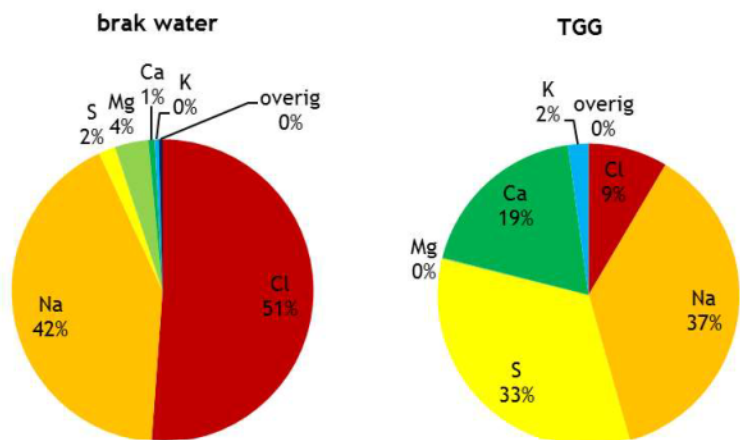
4.1.1 Samenstelling van TGG in relatie tot de omgeving en het milieu

Uit het huidige onderzoek en de voor het huidige onderzoek uitgevoerde bodemanalyses blijkt dat de TGG bestaat uit een mengsel van zeer grof (kiezels) en zeer fijn materiaal. Er wordt in deze discussie niet verder in detail ingegaan op wat de potentiële redenen zijn voor de chemische samenstelling van de TGG is, dit was niet het doel van ons onderzoek. In vergelijking met andere bodemtypes in het dijklichaam en de omgeving blijkt dat de TGG een zeer hoge dichtheid heeft en erg weinig organisch stof. De TGG bevat relatief hoge totaal calcium-, natrium- en zwavelconcentraties. Er blijken duidelijke relaties te bestaan tussen de totale concentraties van ijzer, aluminium en calcium welke kenmerkend zijn voor de verschillende bodemtypen (klei, veen en zand). Uitgedrukt in grammen element per kilogram droge bodem bevat TGG het meeste calcium. Het veen heeft de hoogste totaal concentraties natrium en zwavel per kilogram droge bodem, welke tevens hoger zijn dan de TGG, hierbij moet wel worden opgemerkt dat de dichtheid van TGG ook vele malen hoger is dan de dichtheid van veen (in een m³ TGG zit dus veel meer massa dan in een m³ veen). De twee veenbodempunten met de hoogste ijzerconcentraties liggen in de referentieraaï en blijken wat niet alleen ijzerrijker maar ook zwavelrijker te zijn, waarschijnlijk betreft dit pyrietrijker veen. Deze venen zijn tijdens hun ontstaansgeschiedenis beïnvloedt geweest door de voormalige Zuiderzee. Dit betekent dat de veenbodem en het oppervlaktewater in de regio reeds rijk aan zwavel en sulfaat kan zijn. Op basis van oppervlaktewater analyses komt dan ook naar voren dat zowel op de locaties met als zonder TGG het oppervlaktewater relatief sulfaat rijk is.

Naast natrium en sulfaat zijn er ook stoffen welke in hogere concentraties in de TGG laag voorkomen in vergelijking met de omgeving zoals enkele zware metalen en anionen waarvan de concentraties van xxx en xxx de normen overschrijden, zie ook bijlagen 4, 5 en 8. In de volgende paragraaf (4.1.2) wordt verder ingegaan op in hoeverre deze stoffen mobiel zijn en in het grondwater en omgeving terecht kunnen komen.

4.1.2 Uitspoeling van natrium en sulfaat uit de TGG laag

Ondanks dat de totaalconcentraties van natrium en zwavel per kg droge bodem in de TGG lager zijn dan in de veenbodem en vergelijkbaar zijn met de kleibodem zijn de via water uitspoelbare concentraties van natrium en sulfaat juist veel hoger in de TGG laag, wat grote consequenties kan hebben voor de uitspoeling van sulfaat en natrium naar de omgeving. Naast natrium en sulfaat, blijken ook andere elementen in verhoogde concentraties in de TGG laag aanwezig te zijn en uit te kunnen spoelen naar de omgeving. Verhoudingsgewijs bestaat echter het overgrote deel van de uitspoeling uit de TGG laag uit de ionen natrium en sulfaat. De concentraties die uit de TGG laag spoelen vallen qua zoutgehalte binnen de categorie sterk brak water (gebaseerd op de gemiddelde verdeling van Na en Cl in brak water en zeewater (de grenzen voor de categorie sterk brak water is 3 - 17 g Cl/l)). De gemiddelde verhouding van ionen in brak water blijkt echter sterk te verschillen met de gemiddelde verhouding van ionen welke uit de TGG laag spoelen (op basis van gemiddelde resultaten uit de waterextracten). Het water dat uit TGG spoelt heeft een hoger aandeel aan natrium, zwavel en calcium terwijl het water naar verhouding veel minder chloride en magnesium bevat dan brak water (zie figuur 34). Het is niet duidelijk wat de oorzaak is van deze verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties in de TGG. Mogelijk blijft het achter uit het verbrande asfalt en gaat het om een stof die aan het asfalt wordt toegevoegd (toeslagstof).



Figuur 34: Een vergelijking waarin de gemiddelde samentelling (procentuele verhouding van enkele elementen) van sterk brak water vergeleken kan worden met de samenstelling van het water wat uit de TGG laag spoelt.

Uit zowel de voor het huidige onderzoek in opdracht van Waterschap Vallei en Veluwe verrichte bodemanalyses en uitloogtesten als de binnen het huidige onderzoek verrichte bodemanalyses, grondwatermonsters en het kolomexperiment komt naar voren dat er veel natrium en sulfaat uit de TGG naar de omgeving uitspoelt. De concentraties van natrium- en met name sulfaat in het water dat uit de TGG laag kan spoelen zijn extreem hoog en overschrijden de normen (Nog nader specificeren welke normen na norm toetsing). De sulfaatconcentraties in het grondwater in de TGG laag en in de veenlaag direct onder de TGG laag zijn sterk verhoogd t.o.v. de sulfaatconcentraties die op referentielocaties in de omgeving worden aangetroffen en concentraties die van nature in grondwater en oppervlaktewater voorkomen (o.a. rapportages RIVM). De aangetroffen sulfaat-, natrium en chloride concentraties in het grondwater van de TGG laag en de veenlaag direct onder de TGG laag overschrijden dan ook de normen voor grond- en oppervlaktewater. Uit de binnen dit onderzoek uitgevoerde serie waterextracten is naar voren gekomen dat er naar schatting in totaal ongeveer 8,2 kg sulfaat en 2,6 kg natrium per m³ TGG uit kan spoelen naar de omgeving. Hierbij moet tevens vermeld worden dat dit een onderschatting is van wat er uit vers TGG kan uitspoelen, aangezien alle binnen het huidige onderzoek verzamelde bodems afkomstig zijn van de Eemdijk, waar de TGG reeds enkele maanden blootgesteld was aan doorspoeling met neerslag alvorens deze bemonsterd is voor het huidige onderzoek. Op basis van de binnen dit onderzoek verzamelde resultaten kunnen daarom geen harde conclusies getrokken worden over de totale uitspoeling van elementen uit vers toegepaste TGG. Gedurende de eerste maanden na plaatsing van de TGG (toen de TGG laag nog niet afgedekt was met een kleilaag) is hier direct neerslag water doorheen gespoeld, wat waarschijnlijk geleid heeft tot de sterk verhoogde sulfaat- en natriumconcentraties in het oppervlaktewater. Na afdekking van de TGG laag met een laag klei is de directe uitspoeling vanuit de TGG laag naar de omgeving vermoedelijk sterk verminderd. Uit veldobservaties blijkt echter dat er langs het sloottalud aan de binnenzijde van het dijklichaam waar TGG is toegepast nog steeds natriumrijk water uit het dijklichaam sijpelt, wat ook blijkt uit de hier ontstane zoutkristallen op de bodem (zie foto 5). Opvallend is dat op deze locatie er ook geen gras groeit.



Foto 5: Uitspoeling van grondwater uit het dijklichaam onder aan de dijk in het sloot talud, wat leidt tot kristallisatie en neerslag van zouten bij verdamping (foto J. Graafland).

Naast direct uitspoeling van water uit het dijklichaam via uittreding langs het sloottalud is er indringing van grondwater in de onderliggende veenlaag in het dijklichaam op de locatie van de voormalige sloot. Aangezien onderaan het dijklichaam de TGG laag direct ligt op de onderliggende veenlaag (op de locatie van de voormalige sloot en soms ook verder richting de sloot doordat de bodem nog enigszins is gaan schuiven sinds plaatsing) is hier indringing van o.a. sulfaat in de onderliggende veenlaag mogelijk. Hogerop in het dijklichaam is er een kleilaag (1 tot ruim 2 meter) aanwezig tussen de TGG laag en de veenlaag, wat beïnvloeding van uitspoeling vanuit de TGG laag op de onderliggende veenlaag op die locaties praktisch uitsluit. Dit betekent wel dat de stoffen die hoger in het dijklichaam uitspoelen uit de TGG naar het laagste deel zullen stromen en hier zullen ophopen. Bodemanalyses van en grondwateranalyses in de TGG op verschillende locaties langs de transecten laten dan ook zien dat de sulfaat- en natriumconcentraties onderaan het dijklichaam het hoogst zijn (locaties b en c van de transecten). De veenlaag onder de TGG onderaan het dijklichaam (locaties b en c in transecten) blijkt tot op 40cm diepte reeds verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties te bevatten t.o.v. het omliggende veen. Stoffen die uit de TGG laag spoelen trekken dus ook de onderliggende veenlaag in.

Hier wordt in definitieve versie nog in gegaan in hoeverre uitspoeling uit de TGG ook andere bodemlagen beïnvloed of kan gaan beïnvloeden in combinatie met hydrologische model analyse

In latere alinea's in de discussie wordt in meer detail ingegaan op de potentiële effecten van verhoogde uitspoeling van stoffen uit de TGG.

4.1.3 Uitspoeling van zware metalen en anionen uit de TGG laag en normoverschrijding

Uit de binnen dit onderzoek verrichte bodemanalyses is naar voren gekomen dat de TGG laag verhoogde concentraties heeft van enkele zware metalen (o.a. koper, lood, barium en molybdeen) en enkele anionen (bromide en fluoride). Tevens is uit waterextracties van bodemonsters en grondwateranalyses gebleken dat enkele van deze stoffen ook mobiel zijn en vanuit de TGG naar de omgeving kunnen spoelen. Zo zijn er in het grondwater in de veenlaag onder de TGG (sterk) verhoogde concentraties van o.a. bromide, molybdeen en arseen, aangetroffen. Norm overschreiding??. In bijlage 8 is aangegeven voor welke elementen de aangetroffen contracties in de bodem en het grondwater de normen overschrijdingen. Ook uit het kolomexperiment komt naar voren dat een aantal zware metalen uit de TGG laag gemobiliseerd kunnen worden en in de onderliggende veenbodem kunnen dringen. De resultaten laten zien dat deze elementen in verhoogde concentraties in de TGG aanwezig zijn en dat deze bovendien ook reeds in verhoogde opgeloste concentraties in het grondwater in het dijklichaam aangetroffen zijn en dat hiermee de kans bestaat dat deze stoffen zich verder kunnen verspreiden naar de omgeving.

4.2 Biogeochemische en ecologische effecten van uitspoeling van natrium en sulfaat uit de TGG laag naar de omgeving

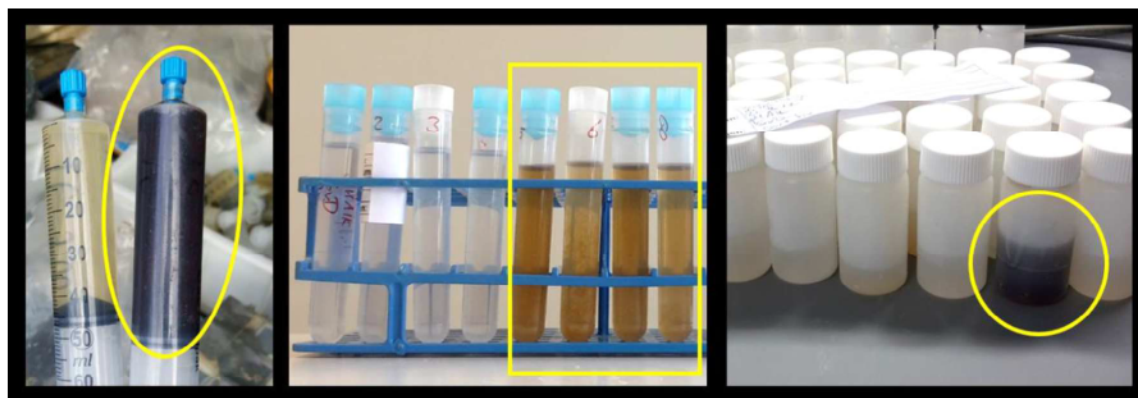
De uitspoeling van hoge natrium- en sulfaat concentraties uit de TGG laag in de onderliggende veenlaag en het grond- en oppervlaktewater kan allerlei gevolgen hebben. Verhoogde natrium- en sulfaat concentraties kunnen leiden tot zowel biogeochemische, fysische en ecologische effecten.

4.2.1 Kation-mobilisatie

Sterk verhoogde natriumconcentraties leiden tot een plotselinge sterke verhoging van positief geladen kationen in de bodem (Na^+) kunnen leiden tot de verdringing wat kan leiden tot mobilisatie van aan het kation adsorptiecomplex van de bodem gebonden andere kationen. Zo blijkt uit meerdere studies dat bij verhoogde natriumconcentraties andere kationen gemobiliseerd worden, hierbij moet dan gedacht worden aan bijvoorbeeld calcium, magnesium, kalium en andere kationen maar ook ammonium bijvoorbeeld (Rysgaard et al. 1999, Weston et al. 2006, 2010). De mate van kationmobilisatie is afhankelijk van de hoeveelheid kationen die aan het kation adsorptiecomplex van de bodem gebonden zijn. Zo zijn er in kleibodems over het algemeen meer kationen gebonden dan in inin veenbodems (Van Dijk et al. 2015). Ook in het huidige onderzoek zijn er aanwijzingen dat dit proces een rol speelt. Zo is uit het kolomexperiment gebleken dat de calcium- en ammoniumconcentraties in de veenbodem op korte termijn sterk verhoogd zijn onder invloed van de uitspoeling van natrium uit de TGG. Deze uitspoeling leidt er toe deze dat de concentraties van deze ionen op de langere termijn juist verlaagd zijn, t.o.v. de controle veenbodem. Er is dus sprake van kationmobilisatie en een verhoogde beschikbaarheid op de korte termijn wat weer leidt tot uitspoeling en een verlaagde beschikbaarheid op langere termijn.

4.2.2 Verhoogde pH & mobilisatie van reactief organisch materiaal

Naast verhoogde kationconcentraties leidt uitspoeling uit TGG ook tot een sterk verhoogde pH. De sterk verhoogde pH in de bodem kan potentieel ook leiden tot verhoogde mobilisatie van DOC (reactief organisch materiaal) en de hieraan gebonden metalen (Dijkstra et al. 2009). Hierdoor wordt waarschijnlijk ook de verhoogde DOC concentratie en de hiermee samenhangende kleuring van de monsters verklaart. Uit de resultaten uit het kolomexperiment komt dan ook een verband tussen de mobilisatie van DOC en arseen, wat erop zou kunnen duiden dat dit proces speelt (zie figuur 35). Dit effect is zowel waargenomen in de veenlaag van het kolomexperiment onder invloed van TGG, als in het bodemporiewater in de veenlaag direct onder de TGG in de veldtransecten en uit de waterextracten van veenbodems onder de TGG laag (zie figuur 30). Deze observaties worden ondersteund met het resultaat van verhoogde DOC concentraties in de veenbodems welke beïnvloed zijn door TGG (humuszuren is een van de componenten van DOC).



Figuur 35: Kleuring van het grondwater in de veenbodem onder invloed van uitspoeling van TGG, in alle drie de foto's zijn foto's weergegeven van grondwatermonsters uit de veenbodem welke wel (de donkere) of niet (de heldere) beïnvloed zijn door uitspoeling uit TGG. Foto's G. van Dijk en J. Graafland.

4.2.3 Beschikbaarheid van nutriënten in de bodem

De combinatie van verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties in bodems kan de beschikbaarheid van nutriëntconcentraties in de bodem sterk beïnvloeden. Zo kan de stikstof cyclus direct beïnvloed worden en kunnen verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties processen zoals nitrificatie (Rysgaard et al. 1999, Magalhães et al. 2005, Noe et al. 2013) en denitrificatie (Giblin et al. 2010, Marks et al. 2016) beïnvloeden. Daarnaast kan de fosfor cyclus in nog veel grotere mate beïnvloed worden door verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties via de interactie met bijvoorbeeld ijzer en calcium wat afhankelijk van de lokale condities kan leiden tot een stijging van de fosforconcentratie (Portnoy & Giblin 1997, Lamers et al. 2002, Weston et al. 2006) ofwel een daling van de fosforconcentratie (Baldwin et al. 2006, Van Diggelen et al. 2014, Van Dijk et al. 2015) in de bodem. Omdat de nutriëntconcentraties in het dijklichaam zelf geen belangrijk onderdeel van dit onderzoek vormen, wordt hier niet in meer detail op ingegaan, wel worden de potentiële consequenties van natrium en sulfaat op het oppervlaktewater in detail besproken in alinea 4.2.4.

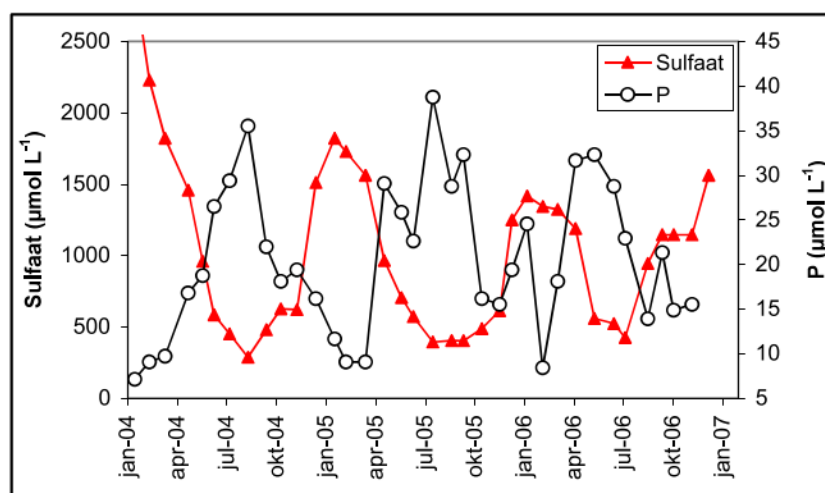
4.2.4. Consequenties van verhoogde sulfaat uitspoeling en hieruit volgende sulfaatbelasting op oppervlaktewater

De hoge sulfaatbelasting van het oppervlakte water die het gevolg kan zijn van de uitspoeling van sulfaat uit het dijklichaam kan tot een ernstige verslechtering leiden van de waterkwaliteit in ontvangende sloten. Dit heeft deels te maken met de hogere ligging van de dijk ten opzichte van de omgeving. In veenweide sloten vindt normaal gesproken een verhoogde uitspoeling van sulfaat plaats in de nazomer en de winter. Sulfaat komt in de percelen vrij als gevolg van veenoxidatie waarbij gereduceerd zwavel dieper in het veen wordt geoxideerd tot sulfaat (Vermaat e.a., 2013; Smolders e.a., 2013). Wanneer in de nazomer het waterpeil in de percelen stijgt en hoger komt dan het waterpeil in de sloten, spoelt sulfaat uit naar het oppervlaktewater.

Sulfaatreductie is een microbieel proces en wordt sterk beïnvloed door de watertemperatuur (Smolders e.a., 1995). In het voorjaar stijgen de temperaturen en wordt sulfaat in het oppervlaktewater in de anaerobe onderwaterbodem gereduceerd tot sulfide. Sulfaat functioneert hierbij als alternatieve electronenacceptor voor de afbraak van organisch materiaal en bij deze afbraak komt in de onderwaterbodem ammonium, fosfor en sulfide vrij. Sulfide kan direct de beschikbaarheid van fosfor verhogen omdat het interacteert met ijzer en fosfaat. Zo bindt sulfide sterk aan ijzer waardoor fosfaat minder goed aan ijzer(hydr)oxiden kan worden geadsorbeerd en het beschikbaar komt in de onderwaterbodem. We zien dan ook dat in de zomermaanden de sulfaatconcentratie van het oppervlaktewater afneemt (sulfaatreductie en minder uitspoeling) en de fosforconcentratie van het oppervlaktewater toeneemt (fosfaatmobilisatie uit het sediment, samenhangend met sulfaatreductie). Omdat de sulfaatconcentratie in het oppervlaktewater over het algemeen in de zomer afneemt neemt uiteindelijk ook de sulfaatreductie in het sediment af omdat de sulfaatbeschikbaarheid beperkend wordt (zie figuur 36). Uitspoeling van sulfaat vanuit het dijklichaam kan er toe leiden dat de sulfaatbeschikbaarheid in het oppervlaktewater hoog blijft in de zomer. Hierdoor kan er in het sediment veel meer sulfaat worden gereduceerd tot sulfide waardoor ook meer ammonium, fosfor en sulfide wordt vrijgemaakt in de onderwaterbodems. Via nalevering komt fosfor en ammonium in de waterlaag terecht waardoor de groei van algen en kroos verder kan toenemen. Sulfide is giftig voor veel wortelende waterplanten waardoor deze slecht kunnen groeien (Lamers et al. 2013). Wanneer sulfide in de waterlaag terecht komt wordt het geoxideerd tot sulfaat waarbij zuurstof wordt geconsumeerd. Samen met de excessieve groei van algen en/of kroos kan dit leiden tot anaerobie van de waterlaag. Hierdoor kan ook ammonium ophopen in de waterlaag waarbij bij een hoge pH ook het zeer giftige ammoniak kan worden gevormd. Als gevolg van sulfaatreductie neemt ook de pH en alkaliniteit van het water meestal sterk toe waardoor de kans op ammoniakvorming groter wordt. Tevens is uit de bodem analyses en de resultaten van het kolomexperiment gebleken dat uitspoeling van water uit de TGG laag de pH kan verhogen, wat potentieel de pH van het oppervlaktewater en hiermee de kans op ammoniak

vorming nog verder zou kunnen vergroten. Als gevolg van de combinatie van sulfide- en ammoniaktoxiciteit en lage zuurstofconcentraties kunnen veel organismen in de sloten sterven.

Voor sulfaatreductie is niet alleen sulfaat nodig maar ook reactief organische materiaal. Een (toename van) de groei van algen en kroos in het water kunnen hiervoor zorgen. Uit de resultaten van het huidige onderzoek blijkt dat de hoge pH van het uitspoelend water uit de TGG laag ook kan leiden tot uitspoeling van DOC (opgelost organisch koolstof) het dijklichaam. Deze uitspoeling van DOC kan de beschikbaarheid van reactief organisch materiaal en hiermee sulfaatreductie verhogen.



Figuur 36: Sulfaat- en fosfaatconcentraties voor de Tiendwegwetering (nabij de Hoenkoopsebuurtweg), gemonitord door HDSR over verschillende jaren (januari 2004-november 2006) (uit van Diggelen e.a., 2007).

Een verhoogde belasting van het oppervlaktewater met sulfaat door uitspoeling vanuit het dijklichaam kan dus leiden tot aanzienlijke waterkwaliteitsproblemen. Het afvangen en afvoeren van het water dat uitspoelt uit de dijk kan een oplossing zijn om deze problemen te voorkomen/mitigeren. Voor sulfaat bestaan geen duidelijke grenswaarde, maar uit de literatuur blijkt dat boven een zomerwaarde van 30-50 mg/l (300-500 µmol/l) veel bijzondere soorten waterplanten verdwijnen en dat bij zomergemiddelde sulfaatconcentratie 100 mg/l er een zeer sterke afname is van de soortenrijkdom. In het onderzoeksgebied zijn de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater al hoog (200 mg/l in maart!), ook in de referentiesloot, dus zonder dat er sprake is van uitloging van sulfaat vanuit de dijk. Hierdoor kunnen de gevolgen van de verhoogde sulfaatuitspoeling mogelijk meevallen, immers de waterkwaliteit is al niet best, zeker wanneer er doorgespoeld wordt om het uit de dijk lekkende sulfaat af te voeren. De uitspoeling van sulfaat zou tot een veel sterkere versterking van de waterkwaliteit en dus het aquatische ecosysteem kunnen leiden, Indien een soortelijk dijklichaam in een sulfaatarmere omgeving zou leggen.

4.2.5 Consequenties van verhoogde natrium uitspoeling en hieruit volgende natriumbelasting op oppervlaktewater

Net als sulfaat is natrium een element dat van nature ook in oppervlaktewater voorkomt. Verhoogde natriumconcentraties worden van nature in brak en zout grond- en oppervlaktewater aangetroffen. Zoet grond- en oppervlaktewater bevat in de regel maximaal maar 120 mg Na/l. De in het huidige onderzoek aangetroffen concentraties in het oppervlaktewater en met name in het grondwater dat uit de TGG laag komt bevat veel hogere natriumconcentraties (tot wel 4 tot bijna 10 g Na/l), dit komt overeen met sterk brak water. Sterk verhoogde zoutconcentraties kunnen tot fysiologische stress leiden bij organismen die leven in het oppervlaktewater en in de waterbodem. De tolerantie van waterplanten voor (verhoogde) zoutconcentraties verschilt per soort. Het element natrium speelt een essentiële rol bij allerlei fysiologische processen in organismen en is daarmee in lage concentraties van essentieel belang voor organismen. In natuurlijke omstandigheden zal de

natriumconcentratie echter zelden limiterend zijn, eerder juist te hoog, met fysiologische stress als gevolg. Natrium- ofwel zouttolerantie is soort specifiek. De voornaamste aanpassing van waterplanten bijvoorbeeld, tegen aan te zout water zijn het reguleren van de interne osmotische druk. Juist sterk schommelende natriumconcentraties (zowel in absolute concentraties als de fluctuaties in deze ionconcentraties door de tijd), zoals in het geval van periodieke uitspoeling uit het dijklichaam na regenval ofwel in brakwater milieus, zijn voor veel planten een probleem en slechts een beperkte groep organismen heeft zich hieraan kunnen aanpassen. Hoofdzakelijk zijn er twee problemen waar planten onder verhoogde en/of fluctuerende natriumconcentraties mee te maken krijgen: osmotische stress en ion-specifieke stress, bij hogere concentraties overheerst de osmotische stress t.o.v. de ion-specifieke stress (Munns et al., 2008; Rengasamy et al., 2010). De biodiversiteit in brakke milieus is dan ook beduidend lager dan in zoete of zoute milieus (Remane, 1958). Naast deze directe effecten op organismen kan een verhoogde natriumconcentratie in het oppervlaktewater leiden tot mobilisatie van aan het kationadsorptiecomplex gebonden kationen in de venige slootbodem, waaronder ook ammonium (Van Dijk et al. 2015). Deze door kationen gemobiliseerde ammonium fractie kan, zeker in combinatie met een pH stijging, leiden tot anaerobie en mogelijk ammoniakvorming (zie alinea 4.2.3 en 4.2.4).

4.3 Effecten van uitspoeling uit TGG op afbraakprocessen en structuur in de onderliggende veenlaag

4.3.1 Effecten van uitspoeling uit TGG op afbraakprocessen in de veenlaag

Uit alle verschillende onderdelen van het huidige onderzoek, de bodemanalyses en grondwateranalyses van de veldtransecten en de resultaten uit het kolomexperiment komt naar voren dat er uitspoeling van o.a. zouten en sulfaat uit de TGG plaatsvindt naar de onderliggende veenlaag. De uitspoeling van deze stoffen naar de veenlaag kan biogeochemische processen en de afbraak van organisch materiaal in de veenlaag beïnvloeden. Op basis van eerder onderzoek is ook te verwachten dat een combinatie van sterk verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties gevolgen heeft op de biogeochemische processen en de mineralisatie van veenbodems. Los van de effecten van verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties op de mobilisatie en beschikbaarheid van nutriënten (welke in meer detail besproken wordt in paragraaf 4.2.3) kunnen deze ook directe consequenties hebben op afbraakprocessen in veenbodems.

Een verhoogde natrium- en chlorideconcentratie kan fysiologische effecten hebben op de micro-organismen die voor de veenafbraak verantwoordelijk zijn. En ook sulfaat kan, als alternatieve electronenacceptor, grote effecten hebben op afbraak gerelateerde processen via sulfaatreductie. Uit het huidige onderzoek komt dan ook naar voren dat de sulfaat uitspoeling uit de TGG laag de sulfaatreductie in de veenlaag (in ieder geval op korte termijn) stimuleert. Ondanks dat uit bodemanalyses is gebleken dat het onderliggende veen van nature al relatief rijk is aan zwavel, blijkt de verhoging van sulfaat door uitspoeling uit de TGG toch de sulfaatreductie op korte termijn te verhogen. Uit het incubatie experiment blijkt dat de toevoeging van TGG in de veenbodem leidt tot een toename van de sulfaatreductie en de hieruit voortkomende stijging van de sulfideconcentratie. Tevens blijkt uit het huidige onderzoek dat de interacties tussen de sulfaat en de koolstofcyclus als gevolg van de uitspoeling uit de TGG laag complex zijn. Er zijn vele studies in de literatuur die aantonen dat een verhoogde sulfaatconcentratie de sulfaatreductie verhoogd en de methaanproductie kan verlagen. Zo kan een verhoogde sulfaatconcentratie de methanogenese verlagen (o.a. Weston et al. 2006) door (1) sulfaatreductie energetisch gunstiger is dan methanogenese (Segers, 1998) waardoor de sulfaatreducerders een competitief voordeel hebben op de consumptie van organische verbindingen zoals acetaat (Lamers et al. 1998, Smolders et al. 2002) en (2) een verhoogde sulfaatconcentratie via sulfaatreductie leidt tot verhoogde concentraties van het toxische sulfide wat weer fysiologische gevolgen kan hebben voor de

methanogenen (Chambers et al. 2011; Lamers et al. 2013). Een verhoogde sulfaatconcentratie staat erom bekend de mineralisatie in veenbodems en daarmee de kooldioxideproductie, te verhogen (Weston et al. 2006, Craft et al. 2009, Chambers et al. 2011, Weston et al. 2011, Marton et al. 2012). Uit de literatuur blijkt echter ook dat processen vaak interacteren en dat het combinatie effect van een verhoogde sulfaat- en natriumconcentratie lastig te voorspellen is. Sommige studies melden dan ook een verhoogde afbraak en koolstofemissies terwijl andere juist een verlaging waarnemen (Bartlett et al. 1987, Poffenbarger et al. 2011, Weston et al. 2014, Vizza et al. 2017). Kortom, de effecten van een combinatie van verhoogde sulfaat- en natriumconcentraties zijn op basis van literatuur lastig te voorspellen en ook afhankelijk van de lokale condities. Zo moet ook binnen de huidige studie niet vergeten worden dat het hier gaat om een reeds oudere veenbodem, welke reeds vele jaren is blootgesteld aan anaerobe afbraakprocessen en waar dus nu voornamelijk nog de relatief slecht afbreekbare verbindingen in aanwezig zijn. Daarnaast betreft het ook een veenbodem welke reeds relatief zwavel- en ijzerrijk is. De experimenten tonen aan dat de sulfaatreductie hoger wordt indien het veen door meer TGG beïnvloedt wordt. De in alle behandelingen waargenomen daling van de sulfideconcentratie op wat langere termijn zou deels verklaard kunnen worden door een verlaagde productie in combinatie met neerslag met ijzer deeltjes (Lamers et al., 2002b; Smolders et al. 2006, Reddy and DeLaune 2008).

Uit de resultaten van dit experiment kwam al snel naar voren dat er sprake is van een complexe interactie van de microbiële en chemische processen. Door de invloed van TGG wordt een combinatie van factoren sterk beïnvloedt, zo stijgt de pH, stijgt de beschikbaarheid van verscheidende elektrodenacceptoren, stijgen enkele ionen met mogelijk osmotische effecten en wordt er reactief organisch materiaal gemobiliseerd. Omdat er binnen de in het huidige onderzoek verrichten veldmetingen en het incubatie-experiment enkel de uiteindelijke netto resultante van de interactie van al de verschillende processen gemeten wordt kunnen de achterliggende deelprocessen maar ten dele achterhaald worden. Samenvattend lijkt TGG en/of grondwater afkomstig uit TGG op korte termijn niet te leiden tot een versterking van de veenafbraak. Door de complexiteit van de microbiële en chemische processen en de interacties hiertussen is het verrichte onderzoek niet mogelijk de consequenties van TGG op de afbraakprocessen in de veenbodem op de langere termijn in te schatten. Een extrapolatie van de binnen het huidige onderzoek verkregen resultaten naar effecten op de lange termijn en potentiële risico's voor de dijkstabiliteit zijn dan ook niet te maken. Afbraakprocessen hebben vaak ook een interactie met fysisch processen, deze worden in paragraaf 4.3.2 nader toegelicht.

4.3.2 Fysische effecten van uitspoeling uit TGG op de veenlaag i.r.t. de bodemstructuur

Veenbodems staan bekend om de eigenschap dat ze zeer heterogeen kunnen zijn. Door de combinatie van een verschillende ontstaansgeschiedenis, de plantensamenstelling tijdens de vorming van het veen en de verschillende mate van veenafbraak in de eeuwen erna, kan een veenbodem in de diepte sterke verschillen vertonen in fysische eigenschappen zoals bijvoorbeeld poriegrootte, dichtheid, structuur en doorlatendheid (o.a. Boelter, 1969, Chason & Siegel, 1986, Stofberg et al. 2016). Het is bekend dat verhoogde zout- en sulfaatconcentraties afbraakprocessen in veenbodems kunnen beïnvloeden (zie alinea 4.3.1 in het huidige hoofdstuk), deze processen kunnen echter ook weer potentiële gevolgen hebben op de fysische eigenschappen van de veenbodem zoals bijvoorbeeld de poriegrootte en waterdoorlatendheid (Baird et al. 2003, Strack et al. 2005).

Daarmee kunnen sterke stijgingen in ionconcentraties ook fysische processen en grondwaterstroming beïnvloeden, zoals de poriegrootte in de veenbodem, de dichtheid van het grondwater (zouter water is zwaarder) en de flocculatie van zwevende deeltjes, zoals humuszuren (Mehnert & Jennings 1985, Ours et al. 1997, Comas & Slater 2004, Kettridge & Binley 2010)). De effecten van deze combinatie van fysische en biogeochemische processen is locatie specifiek en hiermee lastig te voorspellen, duidelijk is echter wel dat sterk verhoogde ion- en sulfaatconcentraties tot biogeochemische en fysische effecten kan leiden met mogelijke

consequenties voor de hydrologie en structuur en stabiliteit van de veenbodem op de langere termijn. Zo is uit recent onderzoek gebleken dat verhoogde zoutconcentraties in anaerobe veenbodems op langere termijn door een combinatie van fysische en biogeochemische processen de waterdoorlatendheid kan verhogen (Van Dijk et al. 2017). Binnen het huidige onderzoek is er geen specifiek onderzoek verricht naar de fysische gesteldheid en structuur van de veenbodem en de mogelijke consequenties van uitspoeling uit TGG hierop, en kunnen hier dus ook geen uitspraken over worden gedaan. Op basis van foto's en biogeochemische metingen blijkt echter wel dat de veenlaag in het kolomexperiment onder de TGG sterk beïnvloedt wordt en het lijkt (op basis van foto's) dat er fijne bodemdeeltjes uit de TGG laag in de veenbodem spoelen. Inspoeling van fijne bodemdeeltjes uit de TGG zou mogelijk tot verkitting van bodemporiën in de veenbodem kunnen leiden met als gevolg een verlaagde waterdoorlatendheid. Dit proces zou in theorie, een door de verhoogde natrium- en sulfaatconcentraties verhoogde waterdoorlatendheid, mogelijk te niet kunnen doen. In een vervolgonderzoek zou er eventueel in meer detail gekeken kunnen worden naar de effecten van de combinatie van uitspoeling van natrium en sulfaat en fijne bodemdeeltjes op de waterdoorlatendheid en fysische eigenschappen van de veenbodem, in combinatie met onderzoek aan fysische eigenschappen van de veenlaag onder het dijklichaam op locatie, met en zonder invloed van TGG.

5. Conclusies & Aanbevelingen

DIT BETREFFEN DE CONCLUSIES EN AANBEVELEINGEN VAN DE TUSSENTIJDSE RESULTATEN, DEZE KUNNEN MOGELIJK VERANDEREN ALS ALLE GEGEVENS VERWERK ZIJN DE GEHELE DATA ANALYSE VERRICHT IS

In dit hoofdstuk zijn kort per onderzoeksvraag de uit het onderzoek voortkomende resultaten beschreven. Voor meer detail wordt verwezen naar de conclusie kaders onderaan elke paragraaf van hoofdstuk 3. Na het overzicht van de conclusies worden enkele aanbevelingen gegeven.

5.1 Conclusies

De doelstelling van het onderzoek betrof:

Het doel van het huidige onderzoek was om de chemische samenstelling van en uitspoeling uit de opgebrachte thermisch gereinigde grond vast te stellen en te onderzoeken hoe de uitspoeling van stoffen uit deze laag biogeochemische processen in de omgeving kan beïnvloeden en of dit potentiële risico's met zich meebrengt voor de dijkveiligheid.

Op basis van deze doelstelling zijn de onderstaande onderzoeksvragen en onderzoeksresultaten voort gekomen;

- A. ***Wat is de chemische samenstelling van het opgebrachte materiaal en de onderliggende bodemlagen?***

Het in het dijklichaam opgebrachte TGG blijkt qua (chemische) samenstelling sterk te verschillen van de reeds aanwezige bodemtypen (klei, veen en zand). De TGG heeft een hoge dichtheid en bestaat uit een mengsel van zeer grove kiezels tot erg fijn materiaal. TGG wordt in vergelijking met andere bodemtypes in de omgeving van het dijklichaam gekenmerkt door hoge totale concentraties van calcium, koper, lood, barium en molybdeen. Daarnaast bevat TGG zeer hoge concentraties van gemakkelijk uitspoelbaar sulfaat en natrium (en in mindere mate chloride en calcium). Tevens blijken de oplosbare concentraties van o.a. chloride, bromide, fluoride, molybdeen en arseen verhoogd. Totale concentraties van **xxx overschrijden** de norm in het bemonsterde grondwater. Daarnaast is de pH van het uit de TGG spoelende water onnatuurlijk hoog, deze kan oplopen tot boven de 11,5. Op basis van het huidige onderzoek kan niet verklaard worden wat de oorzaak is van de verhoging van de hiervoor genoemde stoffen in TGG.

- B. ***Welke consequenties heeft de samenstelling van het materiaal op de uitspoeling van zwavel, zouten en zware metalen naar de omgeving?***

Uit het huidige onderzoek blijkt zowel uit de bodem- en grondwateranalyses langs de transecten in het veld als uit de laboratoriumexperimenten dat TGG leidt tot een (forse) uitspoeling van met name natrium en sulfaat naar de omgeving. Andere elementen welke ook uit de TGG spoelen betreffen o.a. chloride, calcium, kalium, molybdeen, arseen, bromide en fluoride. **Voor xxx en xxx** overschrijden de in het grondwater in de veenlaag onder de TGG aangetroffen concentraties dan ook de normen. Zowel uit de resultaten van de veldmetingen als de kolomexperimenten blijken de

hiervoor genoemde stoffen op korte termijn gemakkelijk te mobiliseren uit de TGG laag en kunnen zich vervolgens verspreiden in het milieu. Op korte termijn zijn binnen het huidige onderzoek dan ook al verhoogde (norm overschrijdende) concentraties aangetroffen in de veenlaag onder de TGG op een locatie waar een voormalige sloot gelegen heeft en de TGG direct ligt op de veenbodem (op andere locaties waar er een dikke kleilaag tussen de TGG en de veenlaag aanwezig is lijkt dit niet het geval). **Op basis hydrologische modellering blijkt dat xxx (inschatting van verspreiding van stoffen via grondwater op langere termijn op basis van model).** Verhoudingsgewijs blijkt dat met name natrium en sulfaat gemakkelijk en in hoge concentraties uit de TGG uitspoelen. Dit leidt ertoe dat de plaatsing van TGG in het dijklichaam lokaal kan leiden tot een hoge belasting met natrium en sulfaat van de omgeving (richting het oppervlaktewater en richting diepere bodemlagen en het grondwater). Totaal is de uitspoelbare fractie in TGG ongeveer 8,2 kg sulfaat per m³ TGG en 2,6 kg natrium per m³ TGG. Hierbij moet in acht genomen worden dat het binnen dit onderzoek gebruikte TGG reeds enkele maanden aan regenwater blootgesteld heeft en dat het dus waarschijnlijk om een onderschatting gaat van de potentiële uitspoeling uit verse TGG. De hoge sulfaatbelasting kan de ijzer/zwavel/fosfor kringlopen in het oppervlaktewater en de waterbodem sterk beïnvloeden en leiden tot (1) de vorming van het toxisch sulfide, (2) nutriënt-mobilisatie en (3) anaërobie, die alle drie en zeker in combinatie kunnen leiden tot een sterke verslechtering van de waterkwaliteit met negatieve gevolgen voor de biodiversiteit. Daarnaast kan een combinatie van de sterke natrium-belasting en pH verhoging leiden tot fysiologische stress voor zoetwater organismen en leiden tot stikstofmobilisatie en mogelijke ammoniaktoxiciteit.

C. *In welke mate kan de uitspoeling van stoffen uit de thermisch gereinigde grond biogeochemische en ecologische processen in de omgeving beïnvloeden?*

De hoge mate van uitspoeling van natrium en sulfaat in combinatie met een hoge pH kan verscheidene consequenties hebben voor de omgeving. Ten eerste leidt dit logischerwijs tot een hoge natrium- en sulfaatbelasting van het oppervlaktewater en de onderliggende veenbodem (waar de kleilaag tussen de TGG en veenlaag ontbreekt). Deze belasting kan lokaal leiden tot erg hoge natrium en met name sulfaatconcentraties, wat een negatief kan hebben op de kwaliteit van het ontvangende oppervlaktewater. Het betreft hier echter wel een regio met veen- en kleibodems welke van nature al relatief rijk aan zwavel zijn door de voormalige invloed van de Zuiderzee. Andere elementen welke uitspoelen uit de TGG zoals bijvoorbeeld bromide, fluoride en zware metalen als molybdeen en arseen kunnen mogelijk ook toxische effecten hebben op organismen in de omgeving.

D. *In welke mate kan uitspoeling van sulfaat (en andere elementen) uit de thermisch gereinigde grond afbraakprocessen in de onder het dijklichaam aanwezige veenlaag beïnvloeden en welke potentiële risico's brengt dit met zich mee voor dijkveiligheid.*

Uit de resultaten van de veldtransecten en de laboratoriumexperimenten blijkt dat uitspoeling uit de TGG laag de biogeochemische processen in de onderliggende veenlaag in hoge mate beïnvloedt. Uitspoeling uit de TGG laag beïnvloedt een heel complex van biogeochemische processen (microbiologisch en chemisch) welke ook onderlinge interactie vertonen. Zo wordt zowel de koolstofcyclus (mineralisatie, koolstofdioxide- en methanogenese) en de sulfaatreductie beïnvloedt en wordt er reactief organisch materiaal gemobiliseerd in combinatie met een pH verhoging en verhoging van ionconcentraties met mogelijke osmotische effecten op (micro-)organismen. Maar tegelijkertijd kan het tijdens de methanogenese gevormde methaan weer geoxideerd worden en het tijdens de sulfaatreductie geproduceerde sulfide weer gebonden worden in de bodem. Al deze processen blijken tegelijkertijd plaats te vinden en beïnvloeden elkaar. Het netto effect van TGG op afbraak processen is door de combinatie van al deze processen hierom complex en lastig te voorspellen. Samengevat lijkt een geringe aanrijking van de veenlaag met TGG de mineralisatie van

het de korte termijn niet te verhogen. Tevens komen er uit dit onderzoek indicaties naar voren dat uitspoeling vanuit TGG ook fysische effecten kan hebben op de onderliggende veenlaag en hier bijvoorbeeld de waterdoorlatendheid zou kunnen beïnvloeden. Door de complexe interacties tussen processen is een extrapolatie van de effecten van uitspoeling uit TGG op de veenafbraak op de langere termijn met de huidige resultaten niet mogelijk. Samengevat blijkt uitspoeling uit TGG op korte termijn grote effecten te hebben op biogeochemische processen, mineralisatie en fysische eigenschappen van de onderliggende veenlaag. In hoeverre dit op langere termijn potentiële risico's met zich mee brengt voor de dijkveiligheid is blijkt lastig te voorspellen op basis van de kortdurende experimenten die zijn uitgevoerd.

5.2 Aanbevelingen

Op basis van de huidige onderzoeksresultaten blijkt dat de aanwezigheid, en met name uitspoeling van natrium en sulfaat (en andere elementen) uit de TGG laag grote effecten kan hebben op biogeochemische processen in het grondwater en de onderliggende veenbodem en potentieel op biogeochemische en ecologische processen in het omringende oppervlaktewater. Op basis van de resultaten en conclusies van het huidige onderzoek zijn tevens enkele aanbevelingen voortgekomen te weten (1) hoe om te gaan met de huidige onderzoekslocatie, (2) hoe om te gaan met de productie van de toekomstige toepassing van TGG en (3) mogelijk vervolgonderzoek.

5.2.1 Hoe om te gaan met de huidige onderzoek locatie

Uit het huidige onderzoek komen duidelijke effecten naar voren van de uitspoeling uit de TGG laag op biogeochemische processen en mineralisatie in de onderliggende veenlaag en de uitspoeling van elementen naar het grondwater en het omringende oppervlaktewater.

Ondanks dat er duidelijke effecten van uitspoeling uit de TGG laag op de onderliggende veenlaag naar voren komen (verhoogde concentraties van o.a. sulfaat, natrium en enkele zware metalen en anionen, verstoring koolstofcyclus, DOC mobilisatie en sulfaatreductie), is het uiteindelijke netto effect van de interacties tussen al deze processen op lange termijn zeer complex. In hoeverre de uitspoeling uit TGG uiteindelijk potentiële risico's met zich mee brengt voor de dijkveiligheid is hierom op basis van de binnen het huidige onderzoek verzamelde gegevens niet te voorspellen. Om het zekere voor het onzekere te nemen zou (in het kader van de veiligheid van het dijklichaam) de onderliggende veenlaag van de invloed van TGG geïsoleerd kunnen worden. Op deze manier wordt verdere uitspoeling van stoffen uit de TGG laag naar de onderliggende veenlaag en het grondwater vermindert. Tevens worden hiermee potentiële negatieve effecten op langere termijn (en hiermee de dijkveiligheid) vermindert. Hiervoor zijn meerdere opties zoals een kleilaag aanleggen tussen de TGG laag en de onderliggende veenlaag op de locatie van de voormalige watergang, ofwel de hele TGG laag in zijn geheel verwijderen.

De uitspoeling van natrium en sulfaat vanuit het dijklichaam op het omringende oppervlaktewater kan gemitigeerd worden door de doorspoeling in deze sloten hoog te houden en te zorgen dat dit water niet in smallere en stilstaande organisch rijke watergangen in de achterliggende polder terecht komt. Tevens kan door regelmatig kroos en algen uit de sloten te verwijderen organische stof (en tevens nutriënten) uit het systeem worden verwijderd. Hierdoor kan de beschikbaarheid van reactief organisch stof in de bodems worden verlaagd waardoor er ook minder sulfaatreductie kan plaatsvinden bij een hoge sulfaatbeschikbaarheid en er minder sulfide en ammonium wordt gevormd in de onderwaterbodems van de sloten. Dit kan een belangrijke mitigerende maatregel zijn.

5.2.2 Productie van en toekomstige toepassing van TGG

Op basis van de in het huidige onderzoek verkregen resultaten blijkt het gebruik van TGG te kunnen leiden tot een grote belasting van de omgeving (oppervlaktewater en grondwater) met met name natrium en sulfaat en in mindere mate ook o.a. chloride, bromide, fluoride, molybdeen en arseen. Gezien (1) de grote potentiële negatieve (ecologische) effecten van met name sterk verhoogde sulfaatconcentraties en (2) de effecten uitspoeling uit TGG op verhoogde (normoverschrijdende) concentraties van o.a. natrium, chloride, bromide, fluoride, arseen en molybdeen, wordt dan ook aangeraden om TGG (indien TGG niet eerst nog verder gereinigd wordt) in de toekomst niet toe te passen op locaties waar dit tot grote problemen kan leiden, zoals 'van nature' sulfaatarme wateren of gebieden waar deze stoffen zich gemakkelijk via grondwater of oppervlaktewater in het milieu kunnen verspreiden. Een optie kan zijn om in de toekomst ervoor te zorgen dat de gemakkelijk uitspoelbare fractie van stoffen verlaagd worden alvorens de TGG toe te passen. Alle stoffen waarvan in het huidige onderzoek verhoogde concentraties in het grondwater onder de TGG zijn aangetroffen blijken dus stoffen te zijn welke gemakkelijk uit de TGG te mobiliseren zijn. Dit is gunstig omdat doormiddel van het toevoegen van een extra reinigungsstap (in de vorm van spoelen) in het productieproces van TGG mogelijk een groot deel van deze stoffen reeds sterk verlaagd of zelfs geheel verwijderd zouden kunnen worden.

5.2.3 aanbevelingen voor vervolgonderzoek

Ondanks dat het huidige onderzoek vele vragen heeft kunnen beantwoorden en effecten van toepassing van TGG in het milieu heeft kunnen aantonen zijn er nog enkele onzekerheden welke met mogelijk vervolgonderzoek verkleind zouden kunnen worden.

- Er wordt aangeraden de lange termijn effecten van de uitspeling uit de TGG laag in het dijklichaam op te volgen. Dit kan gedaan worden door op aanvullende tijdstippen bemonsteringen te verrichten van de reeds geplaatste ceramische cups, peilbuizen en het aangrenzend oppervlaktewater (bijvoorbeeld in eerste instantie in augustus, oktober en december). Op basis van de hieruit voortkomende resultaten kan bekeken worden of hier veranderingen in de tijd plaatsvinden. Op deze wijze kan ook gemonitord blijven of en zo ja welke effecten er in de biogeochemische samenstelling van het grondwater in de onderliggende bodemlagen plaatsvinden. Tevens wordt aangeraden de grondwaterstanden in de reeds geplaatste peilbuizen gedurende deze gehele monitoringsperiode te blijven monitoren.
- Er wordt aangeraden om op locatie aanvullend onderzoek te verrichten naar in welke mate uitspoeling vanuit TGG fysische en biogeochemische processen in de onderliggende veenbodem beïnvloedt en welke consequenties dit kan hebben voor de dijkstabiliteit en dijkveiligheid op langere termijn. Op basis van de binnen het huidige onderzoek verkregen gegevens kan aanvullend civieltechnisch onderzoek verricht worden naar fysische eigenschappen (bijvoorbeeld schuif sterkte en doorlatendheid) in de onderliggende veenlaag op locaties waar deze wel door uitspeling uit de TGG beïnvloedt is en op locaties waar deze niet beïnvloedt is door uitspoeling uit de TGG laag.
- Aanvullend op het huidige onderzoek zou, om in het veld een gedetailleerder beeld te verkrijgen van de effecten van uitspoeling uit TGG op de onderliggende bodemlagen, er op een selectie van locaties in meer detail in diepte profielen (met stappen van 5 cm bijvoorbeeld) onderzoek gedaan kunnen worden aan biogeochemische processen. Hiermee zou aanvullend op de binnen het huidige rapport beschikbare gegevens en modellering in meer detail bestudeerd en gemonitord kunnen worden hoe de uitspoeling van TGG zich in het milieu beweegt. Deze gegevens kunnen vervolgens ook gebruikt worden om een betere inschatting te kunnen maken van de effecten van TGG op langere termijn.
- M.b.t. de productie van TGG zou onderzocht kunnen worden wat oorzaak is van de hoge gemakkelijk uitspoelbare concentraties van o.a. sulfaat, natrium, chloride, bromide, arseen, fluoride en molybdeen. Tevens zou in dit onderzoek onderzocht kunnen worden of

en zo ja hoe het productieproces van TGG aangepast kan worden zodat de uitspoeling van deze stoffen naar het milieu niet meer plaats kan vinden.

- Het is aan te raden om op andere locaties waar TGG toegepast is nader te onderzoeken of en in welke mate hier ook dezelfde processen en uitspoeling van stoffen naar de omgeving plaatsvinden en of en op welke wijze dit te verminderen/stoppen is. Dit geldt met name voor locaties waar uitspoeling van deze elementen tot grote problemen zou kunnen leiden, zoals 'van nature' sulfaatarme wateren of gebieden waar deze stoffen zich gemakkelijk via grondwater of oppervlaktewater in het milieu kunnen verspreiden.

6. Literatuur

Smolders A.J.P., Nijboer R.C. & Roelofs J.G.M., 1995. Prevention of sulphide accumulation and phosphate mobilization by the addition of iron(II) chloride to a reduced sediment: an enclosure experiment. *Freshwater Biology* 34: 559-568.

Vermaat J.E., Harmsen J., Hellmann F.A., Van der Geest H.G., de Klein J.J.M., Kosten S., Smolders A.J.P., Verhoeven J.T.A., Mes R.G. & Ouboter M. 2016. Annual sulfate budgets for Dutch lowland peat polders: The soil is a major sulfate source through peat and pyrite oxidation. *Journal of Hydrology* 533: 515-522.

Smolders A.J.P., Van Diggelen J.H.M., Geurts J.J.M., Poelen M.D.M., Roelofs J.G.M., Lucassen E.C.H.E.T. & Lamers L.P.M. 2013. Waterkwaliteit in het veenweidegebied; De complexe interacties tussen oever, waterbodembodem en oppervlaktewater. *Landschap* 30(3): 145-153.

Van Diggelen J., Geurts J.J.M., Smolders A.J.P. & Lamers L.P.M. (2007). "Onderzoek Veenweidegebied HDSR" Hoogheemraadschap Stichtse Rijnlanden. Onderzoekcentrum B-WARE rapport 2007-08.

Lamers L.P.M., Goverts L.L., Janssen I.C.J.M., Geurts J.J.M., Van der Welle M.E.W., van Katwijk M.M., Van der Heide T., Roelofs J.G.M. & Smolders A.J.P. 2013. Sulfide as a soil phytotoxin - a review. *Frontiers in Plant Physiology* 4:268. doi: 10.3389/fpls. 2013.00268.

Vermaat J, Harmsen J., Hellman F., Van der Geest H., de Klein J., Kosten S., Smolders A., Verhoeven J., Mes, R. & Ouboter M. 2013. Sulfaatbronnen in het Hollandse veenlandschap. *Landschap* 30(1): 5-13.

Wordt nog verder aangevuld

Bijlage

- Bijlage 1 Bodemprofielen bodemboringen en locaties peilbuizen en ceramische cups in veldtransecten.
- Bijlage 2 Regenwatersamenstelling
- Bijlage 3 Analyse resultaten en methode eurofins omegam en stichting waterproef
- Bijlage 4 Analyse resultaten bodem
- Bijlage 5 Analyse resultaten waterextracten
- Bijlage 6 Analyse resultaten grondwater ceramische cups
- Bijlage 7 Analyses resultaten grondwater peilbuizen
- Bijlage 8 Toetsing concentraties in bodem en grondwater aan de normen
- Bijlage 9 Waterkwaliteit in de omgeving van het onderzoeksgebied
- Bijlage 10 Notitie hydrologische analyse
- Bijlage 11 Resultaten kolomexperiment