



# Effecten van het gebruik van thermisch gereinigde grond als dijkversteviging

- een effectstudie aan omgevingseffecten en veenafbraak -



**Titel rapport:**

*Effecten van het gebruik van thermisch gereinigde grond als dijkversteving. Een effectstudie aan omgevingseffecten en veenafbraak*

**Auteurs:**

[Redacted]

**Opdrachtgever:**

[Redacted] (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

Formatted: German (Germany)

## Samenvatting

De dijk langs het Eemmeer tussen Bunschoten-Spakenburg en Eemdijk is in 2016 aan de landinwaartse zijde verbreed ~~verstevigd~~. Bij deze dijkversteving is thermisch gereinigde grond (TGG) gebruikt. Nadat ~~een-deze grond is aangebracht deel van de werkzaamheden uitgevoerd waren~~ werd geconstateerd dat concentraties van sulfaat, natrium en chloride in het oppervlaktewater van nabijgelegen watergangen sterk gestegen waren. Uit bodemanalyses van de TGG bleek dat hieruit veel sulfaat en andere ionen kunnen uitspoelen.

Deze rapportage doet verslag van (1) een onderzoek naar de chemische samenstelling van en de mate van uitspoeling uit de opgebrachte TGG en van (2) onderzoek of de uitspoeling van stoffen uit de TGG de biogeochemische processen in de onderliggende bodemlagen en de omgeving kunnen beïnvloeden en of dit potentiële risico's met zich mee brengt voor de dijkveiligheid (bijvoorbeeld via veenafbraak). Het onderzoek ~~is-dat is~~ verricht omvatte bodem- en grondwater analyses op verschillende dieptes langs enkele transecten loodrecht op het dijklichaam en twee laboratoriumexperimenten.

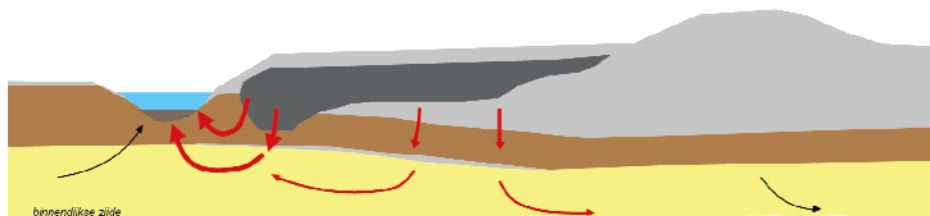
TGG heeft een hoge dichtheid, vergelijkbaar met die van klei en zand en bestaat uit een mengsel van fijne deeltjes, zand en kiezels en is donker grijs kleurig. De TGG verschilt sterk in chemische samenstelling van de reeds op locatie aanwezige bodems. TGG bevat hogere uitwisselbare sulfaat-, natrium-, kalium-, chloride-, bromide- en calciumconcentraties. Daarnaast is de pH in de TGG bodems - in vergelijking met wat doorgaans in Nederlandse bodemtypen wordt aangetroffen - opvallend hoog (pH 10,0-11,5) en zijn er verhoogde totale gehalten aangetroffen van (zware) metalen waaronder cadmium, koper, lood, barium, molybdeen, nikkel, vanadium, tin en zink. De binnen dit onderzoek bemonsterde TGG monsters vallen op basis van toetsing aan de normen voor deze metalen in de klasse industrie (op basis van Cd, Cr, Hg, Cu, Ni, V, en Zn) en bij 5 van de 12 TGG monsters is er een overschrijding van de emissietoetswaarde voor de elementen V, Pb, Zn. Met name de uitspoelbare fracties van sulfaat, natrium en in mindere mate chloride, calcium, kalium en bromide zijn erg hoog. De uitspoelbare sulfaat-fracties in de TGG zijn meer dan twaalf keer hogerdan 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 (totaal kan er ongeveer 8,2 gram sulfaat, 2,6 gram natrium, 0,4 gram kalium, 4,9 gram calcium en 0,9 gram chloride per liter TGG uitspoelen). Op basis van de ~~naar-schatting ruim 72.000 m<sup>3</sup> opgegeven 124.575 ton~~ aangebrachte TGG tijdens de dijkversteving, worden de totale potentiële uitspoelbare fracties geschat op ~~590,8 ton sulfaat, 190,4 ton natrium, 65,6 ton chloride, 355,4 ton calcium, 29,3 ton kalium~~. Voor enkele zware metalen komt dit totaal op 143,4 kg arseen, 516,5 kg boor, 105,9 kg chroom, 62 kg molybdeen, 113,1 kg nikkel, 92,3 kg lood en 1127 kg strontium.

Uit grondwateranalyses in het dijklichaam en uit het in het laboratorium uitgevoerde kolomexperiment is gebleken dat de bodemlagen en het grondwater onder de TGG laag beïnvloed zijn door uitspoeling uit de TGG en sterk verhoogde sulfaat-, natrium-, chloride-, kalium-, fluoride-, en bromide concentraties en soms een sterk verhoogde pH laten zien. Kortom, er vindt dus aantoonbaar uitspoeling van elementen uit de TGG naar de onderliggende bodemlagen en het grondwater plaats. Naast sterk verhoogde concentraties van anionen en kationen zijn ook verhoogde concentraties van molybdeen, arseen en vanadium in het grondwater aangetroffen. Voor de elementen molybdeen (overschrijding van circa 10 X de interventiewaarde), arseen en vanadium wordt de interventiewaarde in het grondwater overschreden. Deze overschrijding van de interventiewaarde wordt enkel aangetroffen in grondwater in bodemlagen die onder invloed staan van het aanwezige TGG. Het grondwater in de regio van de onderzoekslocatie bevat licht verhoogde chloride, natrium en sulfaat concentraties (historische invloed van de Zuiderzee), maar de tijdens dit onderzoek aangetroffen concentraties die uit de TGG spoelen zijn beduidend hoger. Voor overige metalen zoals barium, cadmium, chroom, kwik, nikkel, antimoon en tin overschrijden de

**Commented [VJ1]:** Herberekenen vrachten. We hebben tonnage doorgerekend, geen m<sup>3</sup>'s

concentraties in het grondwater de streefwaarde voor ondiep of diep grondwater (circulaire bodemsanering). Nikkel overschrijdt ook de interventiewaarde maar een relatie met TGG is niet duidelijk aanwezig. Hiernaast overschrijdt ook cyanide een enkele keer de streefwaarde. Ook de resultaten van de hydrologische modellering (op basis van sulfaat, chloride en natrium) duidt op de uitspoeling van elementen uit de TGG laag via de onderliggende bodem naar de watergang ten zuiden van de Eemdijk waar het water opkwelt. Een kleiner deel kan zich naar mogelijk naar dieper grondwater in de zandlaag onder de dijk en in noordelijke richting verspreiden, op deze locaties zijn overigens in de praktijk nu nog geen significante afwijkingen gemeten. Tevens betreft het hier geen grondlagen waaruit drinkwaterwinning plaatsvindt. De concentraties nemen in de tijd af. Uit de modelering blijkt de modellering bevestigt het beeld dat dus dat er (variërend naar de bodemopbouw van het dijklichaam) rekening gehouden moet worden met een belasting van elementen welke uit de TGG spoelen naar de omgeving (oppervlaktewater en grondwater), Deze uitspoeling zal vermoedelijk de eerste jaren het intensiefst zijn en zal in een tijdperiode van 25 - 50 jaar langzaam afnemen en uiteindelijk ophouden. Binnen de korte monitoring van het huidige project (januari tot mei 2017) zijn er nog geen duidelijk stijgende dan wel dalende trends van elementconcentraties waargenomen in de veenbodem onder de TGG.

Het goed voorspellen van de mate van uitspoeling van stoffen uit de TGG en de potentiële effecten hiervan op de omgeving is complex. Bij de uitspoeling van elementen uit TGG naar onderliggende bodemlagen, grondwater en/of oppervlaktewater kunnen allerlei (biogeochemische) interacties optreden. Zo leidt de uitspoeling van natrium tot mobilisatie van aan het bodemadsorptiecomplex van de veenbodems gebonden kationen en kan er ook een sterk verhoogde pH optreden als gevolg van de hoge pH waarde van het TGG. De combinatie van kationmobilisatie, en pH kan weer leiden tot de mobilisatie van DOC (opgelost organisch koolstof) met daaraan gebonden metalen. Door de combinatie van deze factoren en processen is het complex de biogeochemische effecten van uitspoeling uit TGG in onderliggende bodemlagen en/of naar grondwater en of oppervlaktewater te voorspellen. Voor sulfaat is wel bekend dat het een sterk negatief effect heeft op de oppervlaktewaterkwaliteit vanwege de productie van giftig sulfide in de onderwaterbodem en de hiermee gepaard gaande verstoring van de binding van fosfaat in de bodem.



Schematische weergave van het dijklichaam met hierin met pijlen de grondwaterstroming (rode en zwarte pijlen) en beweging van uit de TGG gemobiliseerde (vervuilende) stoffen (met rode pijlen). De grootste effecten bevinden zich in de veenlaag die direct in contact staat met de TGG en in de aangrenzende teensloot (dikke pijlen).

Uit het incubatie-experiment (opgezet om effecten van TGG op veenafbraak in te schatten) blijkt dat de koolstofcyclus in de veenbodem in hoge mate wordt beïnvloed door TGG. De koolstofdioxide- en methaanproductie worden op korte termijn geremd, de sulfideproductie (sulfaatreductie) wordt op korte termijn juist gestimuleerd. Samenvattend lijkt invloed van TGG de afbraakprocessen op korte termijn niet te verhogen. De effecten op langere termijn zijn echter erg complex (door o.a. de combinatie van verhoogde pH en redoxpotentiaal, sterk verhoogde zoutconcentraties, mobilisatie van DOC en gestimuleerde sulfaatreductie) en aanvullend onderzoek danwel monitoring zal nodig zijn om deze de lange termijn effecten en de invloed hiervan op de dijkveiligheid te kunnen bepalen.

**Commented [V2]:** Doorzetten naar rapport, klopt toch? Of ben ik te optimistisch. Zo ja, dan ipv geen significante afwijkingen, beperkte afwijkingen van referentiemetingen in de buurt. Je moet het even wat nuanceren en mensen dwingen naar je data te kijken, anders gaat dit een eigen leven leiden (VITENS)  
Doorzetten naar je rapport

**Commented [EV3]:** Niet geheel eens met deze aanpassing van want diep grondwater is formeel 10 m -MV en daar zijn geen gegevens van



~~Uit de resultaten van het huidige project komt naar voren dat de toepassing van TGG kan leiden tot sterke verontreiniging/vuiling van de bodem en het grond- en/of oppervlaktewater in de omgeving waar TGG wordt toegepast. Dit kan grote negatieve effecten op het milieu teweeg brengen. Om dit in de toekomst te voorkomen wordt aanbevolen zal dergelijke TGG dan ook beter gereinigd moetente reinigen worden voordat het toegepast kan worden en is het bovendien verstandig de toepassing van TGG in de buurt van kwetsbare gebieden te mijden. Aanvullend onderzoek zal uit moeten wijzen wat de lange termijn effecten van de toepassing van TGG op het milieu en de waterveiligheid (kwantiteit en kwaliteit) zijn.~~

Uit de resultaten van het onderzoek naar effecten dat de hier toegepaste TGG grond heeft geleid tot verontreiniging van de bodem en het grond- en/of oppervlaktewater en in de omgeving waar de TGG is toegepast. Voor het bepalen van de effecten op langere termijn, gelet op de aantasting van de onderliggende veenlaag is aanvullend onderzoek nodig

**Commented [VJ4]:** Let op: dit wordt letterlijk geciteerd in het NOS Journaal. Dus houd het feitelijk en voorkom het verwijt dat je een tendieus rapport maakt.

**Commented [VJ5]:** Nee, duidelijke resultaten, eruit, dat bekijken ze landelijk maar en gaan wij niet over adviseren in de samenvatting

## Inhoudsopgave

Samenvatting .....	3
1. Inleiding .....	87
2. Materiaal & Methode .....	1140
2.1 Chemische samenstelling van bodem en potentiële uitspoeling naar omgeving .....	1140
2.2 Effecten van uitspoeling uit TGG laag op de onderliggende veenlaag.....	1342
2.3 Bemonstering en chemische analyse van bodem en water .....	1544
3. Resultaten .....	2049
3.1 Wat is de chemische samenstelling van de TGG en de onderliggende bodemlagen? .....	2049
3.1.1. <i>Wat is de chemische samenstelling van de thermisch gereinigde grond en verschilt deze van de van nature aanwezige bodemlagen?</i> .....	2049
3.1.2. <i>Is de samenstelling van TGG anders als de omgeving en voldoet deze aan de normen?</i> .....	2224
3.2 Heeft de thermisch gereinigde grond een effect op de omgeving? .....	2625
3.2.1. <i>Is er kans op uitspoeling van vervuiling uit de TGG.....</i>	2625
3.2.2. <i>Zijn er in het veld effecten op onderliggende bodemlagen?</i> .....	2827
3.2.3. <i>Zijn er in het veld effecten op het grondwater?</i> .....	3234
3.2.4. <i>Effecten op oppervlaktewater</i> .....	3938
3.3 Hoe functioneert de dijk hydrologisch en in welk mate kan vervuiling uit de TGG laag zich in de omgeving verplaatsen? .....	4342
3.3.1 <i>Hydrologische modellering van grondwaterstanden en stofstroming.....</i>	4342
3.3.2 <i>Tijdreeks analyse grondwater</i> .....	4443
3.4 Effecten van uitspoeling van sulfaat en zouten uit de thermisch gereinigde grond op biogeochemische processen en afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag? .....	4443
3.4.1. <i>Uitspoeling vanuit de TGG laag en consequenties voor de onderliggende veenlaag .</i> .....	4443
3.4.2. <i>Effecten van TGG op afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag</i> .....	4847
4. Discussie.....	5254
4.1 Eigenschappen van TGG .....	5254
4.1.1 <i>Samenstelling van TGG in relatie tot de omgeving en het milieu</i> .....	5254
4.1.2 <i>Uitspoeling van natrium en sulfaat uit de TGG laag</i> .....	5254
4.1.3 <i>Uitspoeling van zware metalen en anionen uit de TGG laag en normoverschrijding</i> ..	5453
4.2 Beïnvloeding van (biogeochemische) processen op de mobiliteit van stoffen en biogeochemische en ecologische effecten van uitspoeling van natrium en sulfaat .....	5554
4.2.1 <i>Kation-mobilisatie</i> .....	5554
4.2.2 <i>Verhoogde pH, redoxpotentiaal en de mobilisatie van reactief organisch materiaal en zware metalen</i> .....	5554
4.2.3 <i>Beschikbaarheid van nutriënten in de bodem</i> .....	5655

4.2.4. Consequenties van verhoogde sulfaat uitspoeling en hieruit volgende sulfaatbelasting op oppervlaktewater.....	5655
4.2.5 Consequenties van verhoogde natrium uitspoeling en hieruit volgende natriumbelasting op oppervlaktewater.....	5857
4.3 Effecten van uitspoeling uit TGG op afbraakprocessen en structuur in de onderliggende veenlaag.....	5958
4.3.1 Effecten van uitspoeling uit TGG op afbraakprocessen in de veenlaag .....	5958
4.3.2 Fysische effecten van uitspoeling uit TGG op de veenlaag i.r.t. de bodemstructuur..	6059
5. Conclusies & Aanbevelingen.....	6264
5.1 Conclusies .....	6264
5.2 Aanbevelingen .....	6463
5.2.1 Hoe om te gaan met de huidige onderzoek locatie .....	6463
5.2.2 Productie van en toekomstige toepassing van TGG .....	6564
5.2.3 aanbevelingen voor vervolgonderzoek .....	6564
6. Literatuur .....	6766

## 1. Inleiding

De dijk langs het Eemmeer tussen Bunschoten-Spakenburg en Eemdijk is in 2016 aan de landinwaartse zijde verbreed versterkt. 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 versterking van de dijk is thermisch gereinigde grond (TGG) toegepast. Nadat een deel van de werkzaamheden 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. In de media werd een verband gelegd tussen de veranderde waterkwaliteit en de gezondheid c.q. sterfte van kalveren op een nabijgelegen agrarisch bedrijf, met percelen die grenzen aan de nieuw gegraven sloot.



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

Naar aanleiding van dit bericht stelde Waterschap Vallei en Veluwe een onderzoek in. Uit onderzoek aan de betreffende watergang bleek dat in het oppervlaktewater sprake was van een hoge geleidbaarheid (EGV, elektrisch geleidend vermogen) en hoge sulfaatconcentraties (970 mg  $\text{SO}_4/\text{l}$  en een EGV van 484 mS/cm, (bron: Waterschap Vallei en Veluwe augustus 2016)). Tevens werd er na de dijkversterking door omwonenden melding gedaan van een typerende rotte eieren stank in de watergangen (mondelijke mededeling Waterschap Vallei en Veluwe). Naar aanleiding hiervan heeft Waterschap Vallei en Veluwe de ter plekke toegepaste thermisch gereinigde grond laten analyseren. Uit deze analyses kwam naar voren dat de thermisch gereinigde grond o.a. hoge chloride- en zwavelconcentraties en een hoge pH vertoonde en hiermee als vermoedelijke bron van de verhoogde concentraties van deze stoffen in het oppervlaktewater kon worden aangewezen. 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~~) was het eerste vermoeden dat, waarschijnlijk via neerslag, veel makkelijk oplosbare stoffen (waaronder zouten en sulfaat) uit deze laag uitgespoeld zijn naar het omliggende oppervlaktewater.

Vervolgens is in de periode augustus 2016, zoals gepland, de laag met TGG afgedekt met een kleilaag en heeft Waterschap Vallei en Veluwe als maatregel de sloten afgedamd en is de parallel aan het dijklichaam aangelegde watergang sneller gaan doorspoelen met oppervlaktewater uit de omgeving. Daarnaast is de waterbodem van de omringende sloten van derden geanalyseerd en waar

nodig werden deze opgeschoond waarbij de bagger werd afgevoerd. Na deze maatregelen namen het elektrisch geleidend vermogen en de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater af. Ondanks de afname van het elektrisch geleidend vermogen en de sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater waren de effecten 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 zich verspreid hadden en wat de milieueffecten hiervan waren. Ook was het onduidelijk of dit effect zou hebben op de onder het dijklichaam aanwezige veenlaag en of dit mogelijk de stabiliteit van de dijk zou kunnen beïnvloeden. Om hier meer inzicht in te verkrijgen en om de effecten en risico's van de TGG laag beter in te kunnen schatten werd besloten om Onderzoekcentrum B-WARE een gericht onderzoek uit te laten voeren. Het huidige rapport doet verslag van de resultaten van 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 kan beïnvloeden en of dit potentiële risico's met zich mee brengt voor de veiligheid van de dijk.*

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 werden er verschillende biogeochemische en hydrologische onderzoeken in zowel het veld als in het laboratorium uitgevoerd.

Een van de belangrijkste vragen binnen dit onderzoek betrof de vraag of er uitspoeling van stoffen (zoals sulfaat-, ionen en een verhoogde pH) uit de TGG laag plaatsvindt en wat de potentiële consequenties hiervan op de omgeving zijn. Het gaat hier voor een belangrijk deel om stoffen die ook van nature in wisselende concentraties in het milieu voorkomen (zoals natrium en sulfaat). Hierdoor zou het bepalen van mogelijke uitspoeling lastig kunnen worden. Echter, de in de watergangen aangetroffen sulfaatconcentraties en het EGV (d.d. augustus 2016), waren beduidend hoger dan de concentraties die van nature worden aangetroffen in zoete watersystemen of licht brakke milieus. Een verhoogd EGV en verhoogde sulfaatconcentraties kan door verschillende factoren veroorzaakt worden (zie ook kader 1). Hierbij kan gedacht worden aan de invloed van brak water, middelen die in de landbouw gebruikt worden of (zout)strooien op wegen. Vaak gaat een toename van het elektrisch geleidend vermogen en sulfaat samen omdat (geladen) sulfaat onderdeel vormt van brakwater en zeewater. Ondanks dat zowel een verhoogd EGV als een verhoogde sulfaatconcentratie van nature voor kunnen komen, kunnen verhogingen wel degelijk grote consequenties hebben voor biogeochemische en ecologische processen in de omgeving. Naast elementen als sulfaat en zouten was er ook kans dat TGG milieuvreemde stoffen zou bevatten die ook tot negatieve effecten in de omgeving zouden kunnen leiden. Daarom werden er in deze studie ook analyses verricht aan milieuvreemde stoffen zoals zware metalen en diverse anionen.



### 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 (vorm van bekalking). 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 ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), in de bodem als ijzersulfide (pyriet) ( $\text{FeS}_x$ ) of als calciumsulfaat (gips) ( $\text{CaSO}_4$ ), als gas in de atmosfeer als zwaveloxide ( $\text{SO}_2$ ) of als (opgelost) gas in anaerobe omgeving als sulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Zwavel kan in de vorm van sulfaat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) 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 ( $\text{FeS}_x$  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 van zwavel. Eenmaal in het grondwater en/of oppervlaktewater kan sulfaat zich gemakkelijk en snel 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 van sulfaatreductie plaatsvinden door sulfaat reducerende bacteriën. Voor de sulfaatreductie is niet alleen sulfaat, maar 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 gemakkelijkere te reduceren verbindingen op raken kan sulfaatreductie plaatsvinden. Bij het proces van sulfaatreductie wordt het **toxische sulfide S<sup>-</sup>** geproduceerd. Sulfide bindt echter gemakkelijk aan gereduceerd ijzer. De zwavelcyclus en ijzercyclus zijn dan ook nauw met elkaar verbonden. Indien er veel vrij ijzer aanwezig is, zal dit ijzer binden aan het sulfide waarbij pyrietvormig ( $\text{FeS}_x$ ) plaatsvindt. Indien er geen of weinig ijzer aanwezig is kan sulfide in oplossing blijven met potentiële toxische effecten op organismen (o.a. Lamers *et al.* 2013). Waterstofsulfide kan dus ook van nature voorkomen onder anaerobe sulfaatrijke omstandigheden. 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 negatieve gevolgen hebben. Met name in ecosystemen met veel organisch materiaal en anaerobe omstandigheden (zoals veenbodems). Zo hebben verhoogde sulfaatconcentraties in het oppervlaktewater grote invloed op de ijzer-, zwavel- en fosforcycli 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-) eutrofiëring (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 elektronenacceptor 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). Hierbij wordt het organische materiaal deels omgezet in kooldioxide ( $\text{CO}_2$ ). 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 ( $\text{Fe}^{3+}$ ). 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 *et al.*, 2013). Dit alles is echter relatief en indiceert vooral ook dat de veenafbraak als gevolg van drooglegging enorm is.

## 2. Materiaal & Methode

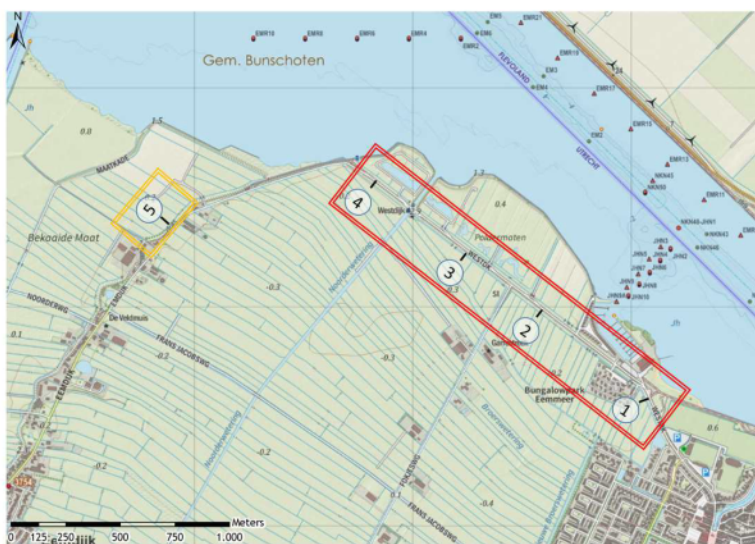
Om te achterhalen wat de chemische samenstelling van de opgebrachte thermische gereinigde grond (TGG) laag is en de uitspoeling van elementen uit deze laag naar de omgeving is er een combinatie van veld- en laboratoriumonderzoek verricht.

Allereerst is er, aanvullend op reeds 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 diepteprofielen 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, door middel van chemische analyses van het grondwater op verschillende dieptes in combinatie met hydrologisch onderzoek (onderzoeksvragen B & C). Op basis van de kennis uit het chemisch bodem- en grondwateronderzoek, zijn er twee laboratoriumexperimenten uitgevoerd. Hierin werden, onder gecontroleerde condities, de effecten van uitspoeling van stoffen uit de TGG laag op biogeochemische (afbraak)processen in de onderliggende veentaag onderzocht (onderzoeksvraag C & D).

### 2.1 Chemische samenstelling van bodem en potentiële uitspoeling naar omgeving

#### *Chemische samenstelling bodem en grondwater*

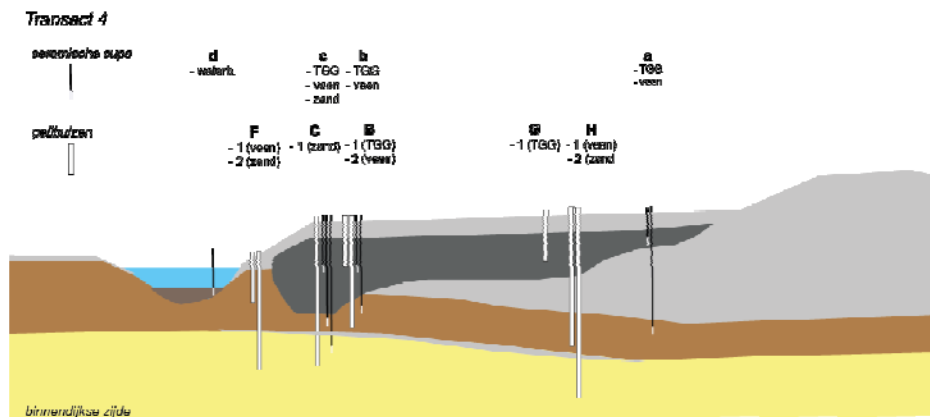
Om de chemische samenstelling van de TGG en de uitspoeling van elementen uit de TGG laag en onderliggende bodemlagen te bepalen (onderzoeksvragen A & B) zijn er langs een vijftal transecten loodrecht op het dijklichaam bodemprofielen geboord en werden bodemonsters verzameld en geanalyseerd. Vier transecten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



Figuur 1: Schematisch bovenaanzicht met de vier transecten langs de dijk met aangebracht TGG (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 2) 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 dieptegradiënt, 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.

Op 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 ceramische 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 bemonsteringsstrategie met de ceramische cups was gericht op het in beeld brengen van de mogelijke uitspoeling van elementen uit de TGG laag en om zodoende de mogelijke effecten op de onderliggende veenlaag in beeld te kunnen brengen. Ceramische cups werden daarom in de TGG laag zelf en in de onderliggende veenlaag geplaatst. Aanvullend hierop werd 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.



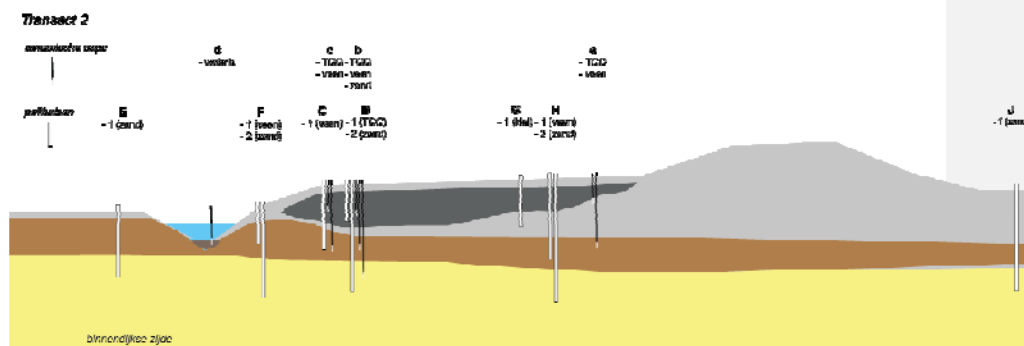
**Figuur 2:** Schematisch dwarsprofiel van de dijk met bemonsteringstransect (in dit geval als voorbeeld transect 4) (rechts de dijk (noord), links de inlandse zijde van de dijk), met kleilagen in grijs, veenlagen in bruin, zandlagen in geel en de thermisch gereinigde grond (TGG) in donkergrijs. Langs alle transecten zijn op locaties a, b, c en d zijn ceramische cups geplaatst (kleine letters), op een selectie van de transecten zijn peilbuizen geplaatst (grote letters), (in bijlage 1 en 2 zijn de exacte bemonsteringlocaties en -dieptes (van bodems, ceramische cups en peilbuizen), bodemprofielen en dwarsprofielen van de transecten opgenomen).

#### Hydrologische analyse (grondwaterstroming en stoftransport)

Langs alle vijf transecten werden drie peilbuizen geplaatst in een dieptegradiënt op de locatie waar de voormalige sloot aanwezig was, de TGG laag het dikst is en deze 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) aanvullend 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 vijf aanvullende peilbuizen geplaatst (zie figuur 2 en 3). Binnen dit project werden in alle geplaatste peilbuizen

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 het dijklichaam en de omgeving is door Witteveen + Bos grondwaterstroming en potentiële verspreiding van sulfaat, natrium en chloride uit de TGG laag in het dijklichaam naar de omgeving ingeschat. Met behulp van grondwaterstanden en bodemprofielen langs transecten in het dijklichaam is het systeem hydrologische beschreven (zowel grondwaterstroming als de grondwaterkwaliteit). Van de twee transecten (transect 2 en transect 4 met aanvullende peilbuizen) zijn 2D-dwarsdoorsnedemodellen 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, retentie, 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 en is de verspreiding van deze stoffen over 10, 25 en 50 jaar berekend, voor details over de voor de modellering gehanteerde methode wordt verwezen naar bijlage 10.



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 (TGG) in donker grijs. Langs alle transecten zijn op locaties a, b, c en d zijn ceramische cups geplaatst (kleine letters), op een selectie van de transecten zijn peilbuizen geplaatst (grote letters), (in bijlage 1 en 2 zijn de exacte bemonsteringlocaties en -dieptes (van bodems, ceramische cups en peilbuizen), bodemprofielen en dwarsprofielen van de transecten opgenomen). In de transecten 2 en 4 zijn aanvullende peilbuizen geplaatst (zie ook bijlage 1 en 2), deze transecten zijn vervolgens ook gebruikt voor hydrologische modellering.

## 2.2 Effecten van uitspoeling uit TGG laag op de onderliggende veenlaag

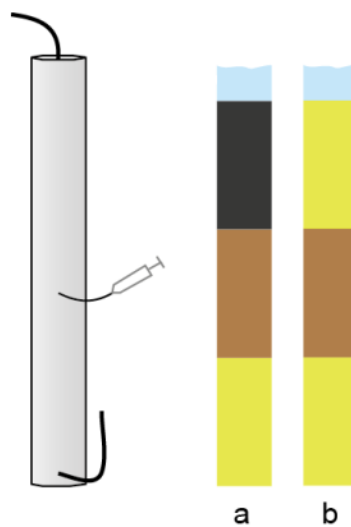
Aanvullend op de bodem- en grondwateranalyses langs verschillende transecten op locatie zijn er twee laboratoriumexperimenten uitgevoerd. Met behulp van deze laboratoriumexperimenten zijn onder gecontroleerde condities de effecten van uitspoeling uit de TGG laag op biogeochemische (afbraak)processen in de onderliggende veenlaag onderzocht (onderzoeksvragen C & D). In deze gecontroleerde laboratoriumexperimenten kunnen processen die in het veld plaatsvinden worden nagebootst en versneld. In de laboratoriumexperimenten werden verschillende behandelingen met en zonder TGG onderzocht. Zo is er (1) een kolomexperiment uitgevoerd waarin biogeochemische processen in veenbodems gemonitord werden, een serie kolommen werd door uitspoeling uit TGG beïnvloedt een serie andere niet. Daarnaast werd 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, werd 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 werd geplaatst (n=4 replica's) (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 (10 °C en donker). Vervolgens is op deze bodem circa 1,3 L (15 cm in de kolom) kunstmatig (anaeroob, doormiddel van doorborreling met N<sub>2</sub> (stikstofgas) regenwater gezet. Om gecontroleerde doorspoeling mogelijk te maken, werd een afvoerslang aan de onderzijde bevestigd. Er was continu 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 gecontroleerd 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 door het periodiek bemonsteren van de chemische samenstelling van het bodemporiewater midden in de veenlaag (met behulp van rhizon poriewaterbemonsteraars (Eijkkelkamp)). 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 parameters 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 stikstofgas gespoeld om deze anaëroob te maken. Daarna werden de flessen luchtdicht 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 die (verschillende hoeveelheden van) 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 en 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 werd, het vers toestromend grondwater te verzamelen in luchtdicht afgesloten HDPE potten.
- Grondwater/bodemvocht is anaeroob verzameld via ceramische cups in het veld en met rhizon bodemvochtbemonsteraars (Eijkelkamp Agrisearch Equipment) in de laboratorium experimenten, waaraan vacuüm getrokken 60 ml injectiespuiten zijn verbonden.
- Aanvullend op de bemonsteringen van Onderzoekcentrum B-WARE hebben er tweemaalig grondwaterbemonsteringen plaatsgevonden waarbij er door een geaccrediteerde partij (Stichting Waterproef) grondwatermonsters uit een selectie peilbuizen verzameld is. Deze monsters zijn vervolgens zowel in laboratoria van Stichting Waterproef als Eurofins Omegam als Onderzoekcentrum B-WARE geanalyseerd.
- Alle watermonsters zijn in het laboratorium van Onderzoekcentrum B-WARE telkens onderzocht op dezelfde parameters.
  - De pH is gemeten met een standaard Ag/AgCl<sub>2</sub> elektrode verbonden met een radiometer (Copenhagen, type TIM840).
  - De hoeveelheid opgelost anorganisch koolstof (TIC: CO<sub>2</sub> en HCO<sub>3</sub>) 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<sup>-1</sup> 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 CO<sub>2</sub>, NO en NO<sub>2</sub>. Deze gassen worden vervolgens gemeten, CO<sub>2</sub> met een Niet Dispersieve Infrarood (NDIR) sensor en NO en NO<sub>2</sub> 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).



Foto 2. Machinale bemonstering van bodemonsters langs de transecten

### **Bodem analyses**

De chemische samenstelling van de bodem is geanalyseerd op de totale elementconcentraties als ook op de fracties die onder invloed van neerslag of grondwater beschikbaar kunnen komen. Hiervoor werden destructie-analyses, waterextracties en zoutextracties op de bodemonsters uitgevoerd, die 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 is bepaald middels 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. Aanvullend is voor toetsing aan de normen 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 complex) zijn door de hiervoor geaccrediteerde Eurofins Omgeam geanalyseerd in bodemmonsters welke door Onderzoekcentrum B-WARE bemonsterd zijn, zie bijlage 3 voor details.

- **Bodem destructie voor totale element concentraties**  
Door het 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 ( $\text{HNO}_3$ , 65%) en 2 ml waterstofperoxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$  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 (elementen)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<sup>-1</sup>), 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/AgCl<sub>2</sub> 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<sup>-1</sup> 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

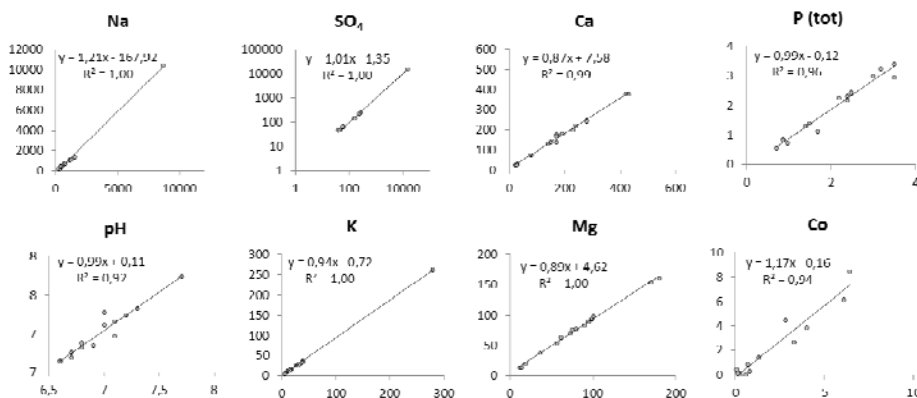
een aanvullend programma voor zware metalen verricht op de ICP-MS om concentraties van zware metalen te bepalen (o.a.; arseen (As), barium (Ba), cadmium (Cd), kobalt (Co), chroom (Cr), koper (Cu), kwik (Hg), molybdeen (Mo), nikkel (Ni), lood (Pb), antimoon (Sb), tin (Sn), strontium (Sr) en vanadium (V). De concentraties nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) en fosfaat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) zijn colorimetrisch bepaald met een Seal auto-analyser III met behulp van resp. salicylaatreagens, hydrazinesulfaat en ammoniummolybdaat/ascorbinezuur. Chloride ( $\text{Cl}^-$ ) is colorimetrisch bepaald met een Bran+Luebbe auto-analyser III systeem met behulp van mercuritiocyanide. Natrium ( $\text{Na}^+$ ) en kalium ( $\text{K}^+$ ) 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 geaccrediteerd. 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) uit verschillende peilbuizen verdeeld over de vijf transecten zijn verzameld en geanalyseerd door een geaccrediteerd laboratorium (Waterproef) en (en laboratorium Eurofins Omegam, Amsterdam). Tijdens deze bemonstering 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 geaccrediteerde 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.

Uit de vergelijking tussen de analysesresultaten van beide laboratoria blijkt dat de resultaten zeer goed vergelijkbaar zijn. Hierbij dient wel vermeld te worden dat het verzamelen van monsters via ceramische cups en rhyzons niet conform een NEN of BRL -protocol worden uitgevoerd. Voor deze (wetenschappelijk beproefde) methode is bewust gekozen omdat deze wijze van bemonsteren de beste methode is om biogeochemische processen te kunnen onderzoeken. Echter, er is voor deze methode (nog) geen NEN protocol beschikbaar.



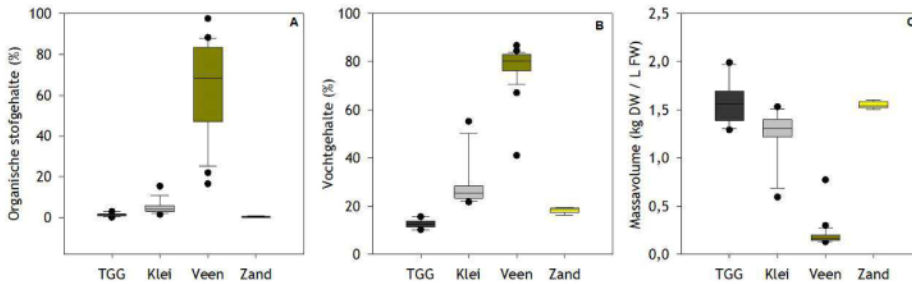


### 3. Resultaten

#### 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?

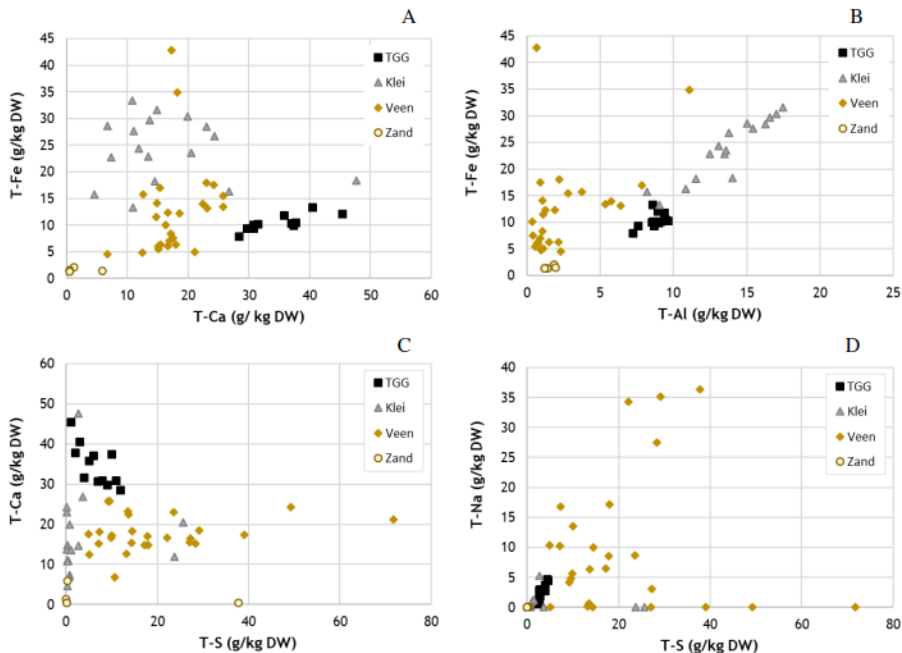
Om te kunnen bepalen of de aanwezigheid van en uitspoeling uit de TGG laag in het dijklichaam consequenties kan hebben voor de omgeving zijn er bodemonsters verzameld en werden er biogeochemische analyses uitgevoerd van alle in het dijklichaam aanwezige bodemtypen, op verschillende diepten en langs een 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, Veen, 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 stofgehaltenes (OS) voor TGG, klei en zand liggen dicht bij elkaar en zijn relatief laag, waarbij OS voor zand het laagst is. Veen 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 veen. 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, C en D). Van verschillende elementen zijn de totaalconcentraties (g/kg DW) tegen elkaar uitgezet.



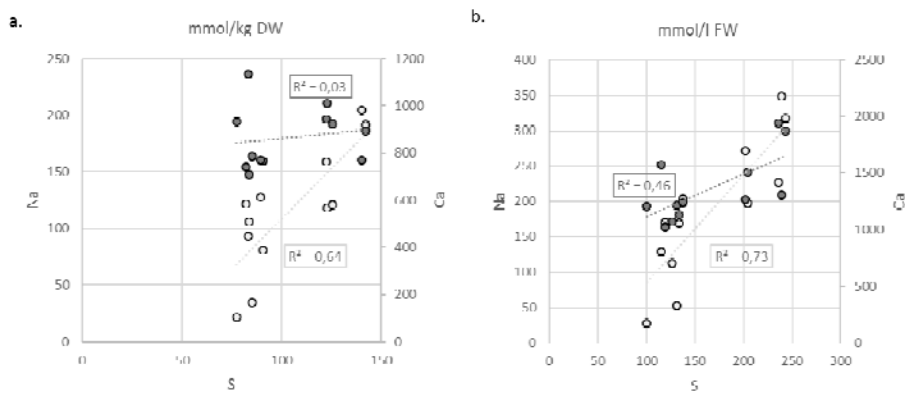
**Figuur 7: Correlatie tussen verschillende elementen (g/kg DW) per bodemtype (TGG, Klei, Veen, Zand). A) Totaal-ijzer en totaal-calcium. B) Totaal-ijzer en totaal-aluminium. C) Totaal-calcium en totaal-zwavel. D) Totaal-natrium en totaal-zwavel.**

Uit deze resultaten blijkt dat de vier verschillende bodemtypen 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 ijzergehalten (<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 referentietransect).

Tussen ijzer en aluminium (T-Al) is een sterke correlatie te zien voor met name klei ( $R^2=0,85$ ) (Figuur 7B 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. De veenbodem laat meer spreiding zien met overwegend lagere concentraties aluminium dan de kleibodem en de 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 7C 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 zwavelconcentratie 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 dan om calciumsulfaat verbindingen. De bemonsterde veenbodems hebben doorgaans hoge zwavel- natriumconcentraties. Echter, enkele veenbodems hebben bij relatief hoge zwavelconcentraties, lage natriumconcentraties (figuur 7D).

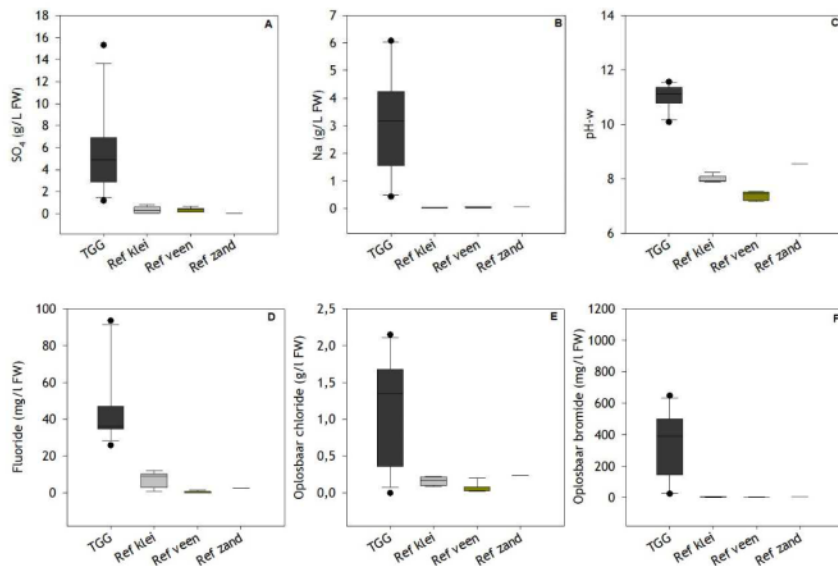


**Figuur 8:** De correlatie tussen totaal-zwavelconcentratie in (a. mmol/kg DW en b. mmol/l FW) voor de TGG bodems uitgezet tegen de totaal-natriumconcentratie (open cirkels) op de linker as en de totaal-calcium contractie (grijs gevulde cirkels) op de rechter as.

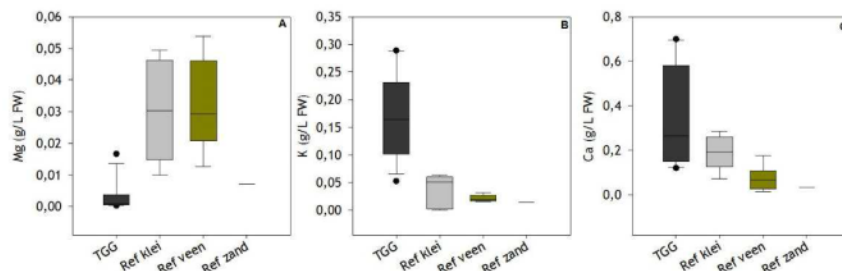
### 3.1.2. Is de samenstelling van TGG anders als de omgeving en voldoet deze aan de normen?

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 en in hoeverre deze de normen overschrijden zijn zowel totaalconcentraties als via water uitspoelbare fracties geanalyseerd. Organische verbindingen zijn in dit onderzoek niet meegenomen.

In figuur 9 zijn de resultaten van de via water beschikbare sulfaatconcentratie, natrium en chlorideconcentratie (als indicatoren voor zouten) in boxplots weergegeven voor de TGG laag (n=12) naast de bodems in de referentieraai (Ref klei: n=6, Ref veen: n=6 en Ref zand: n=1). 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. Daarnaast zijn hier ook de mobiele concentraties van bromide en fluoride weergegeven en de pH.



**Figuur 9:** A) sulfaatconcentratie (g/l FW), B) natriumconcentratie (g/l FW), C) pH van de waterextractie, D) de fluorideconcentratie (mg/l FW), E) de oplosbare chlorideconcentratie (g/l FW) en F) de oplosbare bromideconcentratie (mg/l FW) 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.

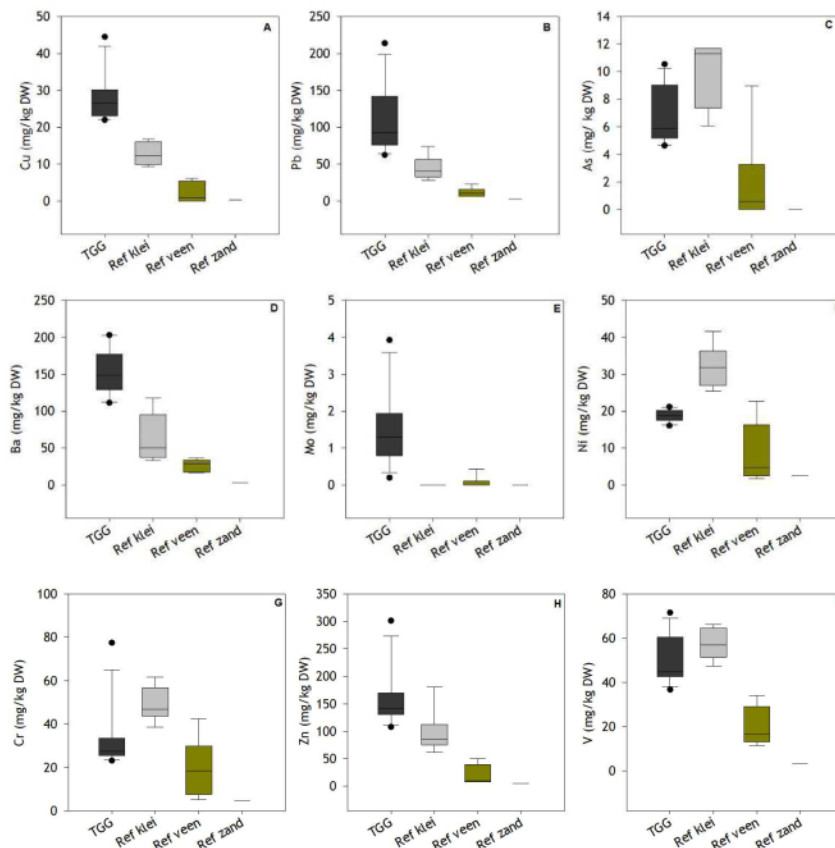


**Figuur 10:** A) Magnesiumconcentratie (g/l FW), B) kaliumconcentratie (g/l FW) en C) de calciumconcentratie (g/l FW) van de waterextractie voor TGG en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen 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 liggen dan in de referentieraaï (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 chloride en natrium is een vergelijkbaar patroon te zien. Andere uitspoelbare kationconcentraties 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 chloride en natrium dan in de referentieraaï voor zowel klei als veen en zand worden aangetroffen. De concentraties in de referentieraaï zijn voor de drie bodemtypes echter vergelijkbaar. De in de TGG laag aangetroffen S, Na en Ca concentraties zijn ook erg hoog in vergelijking met de concentraties die doorgaans in bodems worden aangetroffen. Ook de pH is voor TGG het hoogst (met een pH 11,0

uitzonderlijk hoog) in vergelijking met de referentiebodems met een pH van 7-8 (Figuur 9C). In de referentiebodems zijn er echter wel 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 oplosbaar 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. Ook de oplosbaar kaliumconcentratie is het hoogst in TGG (0,05-0,3 g/l) terwijl deze concentratie in alle referentiebodems beneden de 0,05 g/l liggen. Zowel kalium als calcium zijn daarmee, in vergelijking met de omgeving, aanzienlijk hoger in TGG. Uit de resultaten komt ook naar voren dat de oplosbare concentraties van bromide en fluoride beduidend hoger zijn in TGG in vergelijking met de referentiebodems. Alle fluorideconcentraties in TGG zijn hoger als de concentraties in alle referentiebodems (figuur 9D). Voor bromide is dit nog sterker het geval en variëren de oplosbaar bromideconcentraties in de TGG van enkele milligrammen tot wel 700 mg/l bodem, terwijl er in de referentiebodems waarden worden aangetroffen van minder dan 10 mg/l.

De bodems zijn tevens geanalyseerd op concentraties zware metalen. In figuur 11 zijn van de elementen koper (Cu), lood (Pb), arseen (As), barium (Ba), molybdeen (Mo), nikkel (Ni), zink (Zn), vanadium (V) en chroom (Cr) de totaal gemeten concentraties weergegeven (in mg/kg DW).



**Figuur 11:** Totaal concentraties koper (A), lood (B), arseen (C), barium (D), molybdeen (E), nikkel (F), chroom (Cr), zink (Zn) en vanadium (V) (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



Voor zowel koper, barium, molybdeen, zink als lood bevat TGG de hoogste gemeten gehalten (ongecorrigeerd voor lutum en organische stof) per kilogram drooggewicht (Figuur 11 A-I). De gemiddelde concentraties in de TGG laag zijn 30 mg Cu/kg DW, 115 mg Pb/kg DW, 7,3 mg As/kg DW, 152,3 mg Ba/kg DW, 1,6 mg Mo/kg DW, 18,9 mg Ni/kg DW, 32,5 mg Cr/kg DW, 166,5 mg Zn/kg DW en 50,2 mg V/kg DW zie figuur 11 en tabel 12. Voor verschillende zware metalen zijn de totale concentraties gemiddeld het hoogst in de TGG laag in relatie tot 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 in de kleibodems (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 bodemtypen veen, klei en zand (als referentie lagen zijn hier de diepere bodemmonsters en de monsters van referentietranssect 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

Commented [EV6]: Nogmaals verwijderen voegt niets toe en leidt tot verwarring

Uit toetsing aan de normen - op basis van correctie naar standaard bodem - blijkt dat de in dit onderzoek bemonsterde TGG monsters op basis van de aangetroffen concentraties metalen onder de klasse industrie worden ondergebracht. Bij vijf van de twaalf monsters is sprake van een overschrijding van de emissietoetswaarde. De TGG valt onder de klasse industrie door de verhoogde gehalten van Cd, Cr, Hg, Cu, Ni, V, en Zn. De overschrijding van de emissietoetswaarde is aangetroffen voor de elementen V, Pb, Zn. In bijlage 8 zijn deze en meer resultaten opgenomen, welke niet allemaal in deze tekst beschreven omdat deze in mindere mate door uitspoeling vanuit TGG beïnvloedt zijn.

Kader 2. Wat is de bron van de hoge sulfaat-, bromide-, kalium-, chloride- 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 natrium, kalium bromide en chloride concentraties in de TGG is onduidelijk. De auteurs van het huidige rapport hebben geen contact opgenomen met de producent van de bij de dijkversteving van Eemdijk geproduceerde TGG 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 anionen en kationen 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 inzicht in te krijgen.

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

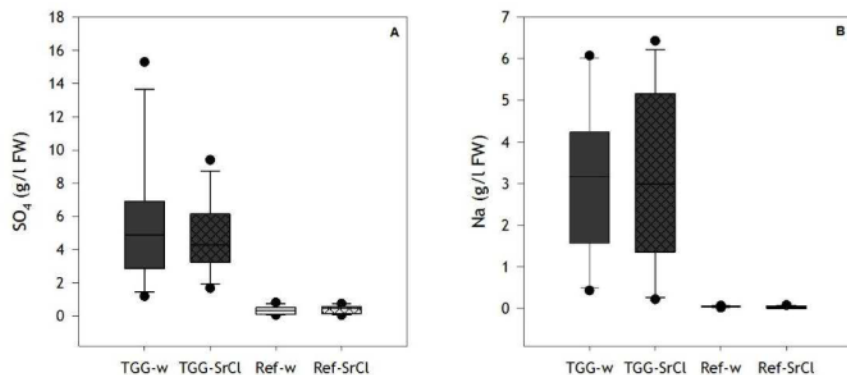
### **Conclusies: Chemische samenstelling van de TGG en de onderliggende bodemlagen**

- De in het dijklichaam aanwezige bodemlagen vertonen sterke verschillen in organische 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 grote verschillen in de chemische samenstelling van de aanwezige bodemtypen. Uit de vergelijking tussen de TGG bodem en lokale referentie- klei, veen en zandbodems blijkt dat de TGG laag beduidend hogere uitwisselbaar sulfaat-, natrium-, kalium-, chloride-, bromide-, fluoride- en calciumconcentraties bevat. Deze stoffen kunnen gemakkelijk uitspoelen indien de TGG laag in contact komt met water. De in de TGG laag aangetroffen sulfaat, natrium, kalium, chloride, bromide, fluoride en calcium concentraties zijn erg hoog in vergelijking met van nature aanwezige concentraties in bodemtypen in, onder en nabij de dijk. Ook de pH in de TGG bodems is erg hoog (pH 10,0-11,5).
- Totale zware metalenconcentraties van koper, lood, barium, molybdeen en zink in TGG zijn hoger dan de concentraties in de omliggende bodemtype in het onderzoeksgebied.
- Het merendeel van de binnen dit onderzoek bemonsterde TGG monsters vallen op basis van normtoetsing in de klasse industrie (op basis van Cd, Cr, Hg, Cu, Ni, V, en Zn). Bij vijf van de twaalf monsters is er sprake van een overschrijding van de emissietoetswaarde voor de elementen V, Pb, Zn.
- 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.

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

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

Om een inschatting te maken van potentiële effecten van de TGG laag in het dijklichaam op de omgeving, zijn verschillende bodemanalyses uitgevoerd. Hierbij werden de resultaten van de analyses van de TGG laag vergeleken met lokale referentiebodems. 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 door middel 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).

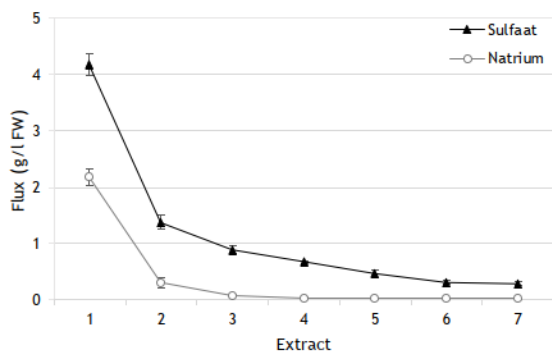


**Figuur 12.13:** Concentratie A) sulfaat en B) natrium (g/l FW) bij waterextractie (w) en strontiumextractie (SrCl) voor TGG-laag en de referentieraai. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (verticale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De 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 is 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 dan 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. Hierdoor ontstond de situatie 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, 2,6 gram natrium, 0,4 gram kalium, 0,9 gram chloride en 4,91 g calcium per liter TGG.



Figuur 1314: Verloop van sulfaat- en natriumflux over serie extracten waaruit vervolgens de totale flux in berekend.

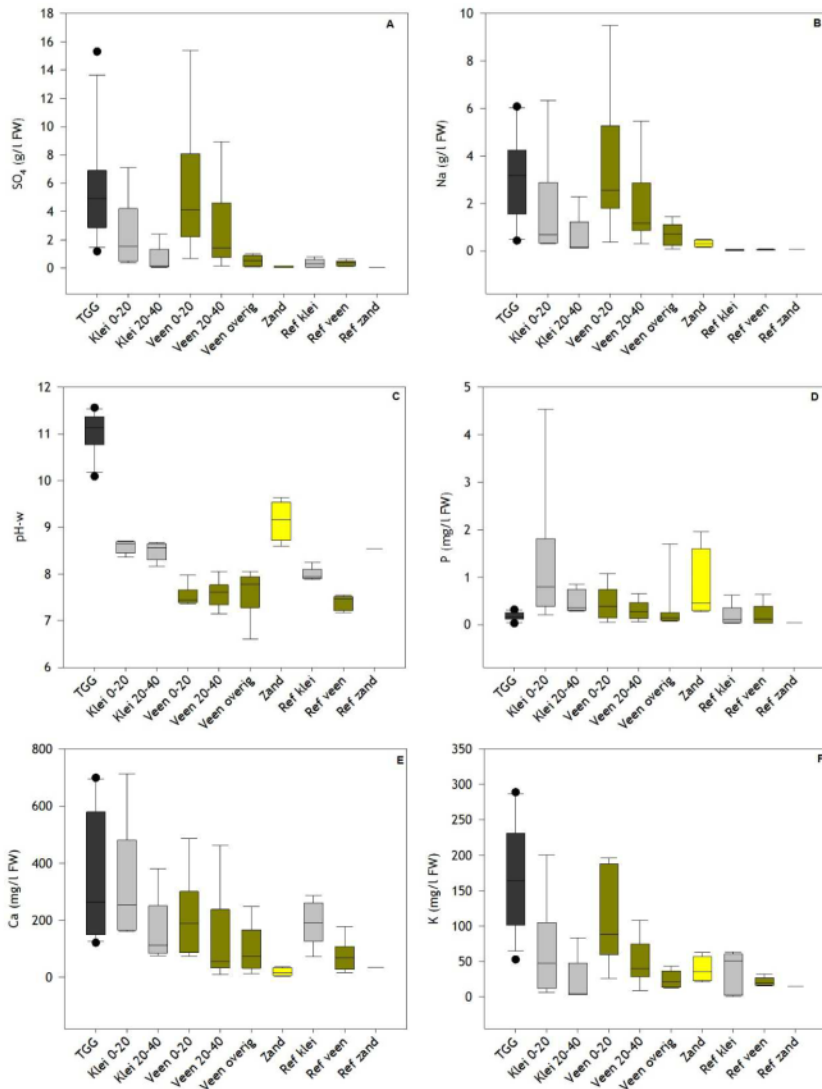
Conform de melding besluit bodemkwaliteit (gedaan op: 31-03-2016, ter beschikking gesteld door Waterschap Vallei en Veluwe) is er bij de huidige dijkverstevinging bij de Eemdijk 72.429 m<sup>3</sup> TGG toegepast. Dit zou naar schatting betekenen dat er (op basis van de hierboven besproken reeks waterextracten) in totaal naar schatting ongeveer 590,8 ton uitspoelbaar sulfaat en 190,4 ton uitspoelbaar natrium is aangebracht. Voor andere elementen komt dit neer op 65,6 ton chloride, 355,4 ton calcium, 29,3 ton kalium. Voor enkele zware metalen komt dit totaal op 143,4 kg arseen, 516,5 kg boor, 105,9 kg chroom, 62 kg molybdeen, 113,1 kg nikkel, 92,3 kg lood en 1127 kg strontium (de elementen bromide, fluoride en cyanide zijn niet in deze waterextract reeksen bepaald en hiervan kunnen dus ook geen totaal fluxen berekend worden). 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. Dit kan tot een onderschatting leiden van de totale potentiële uitspoeling bij recent geproduceerde en aangebrachte 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 veenbodem bemonsterd op een diepte van meer 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 A) 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 1415:** A) sulfaatconcentratie (g/l FW), B) natriumconcentratie (g/l FW), C) pH, D) fosforconcentratie (mg/l FW), E) de calciumconcentratie (g/l FW) en F) kaliumconcentratie (g/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 (verticale 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 meerdere mate voor de veenbodem dan voor de

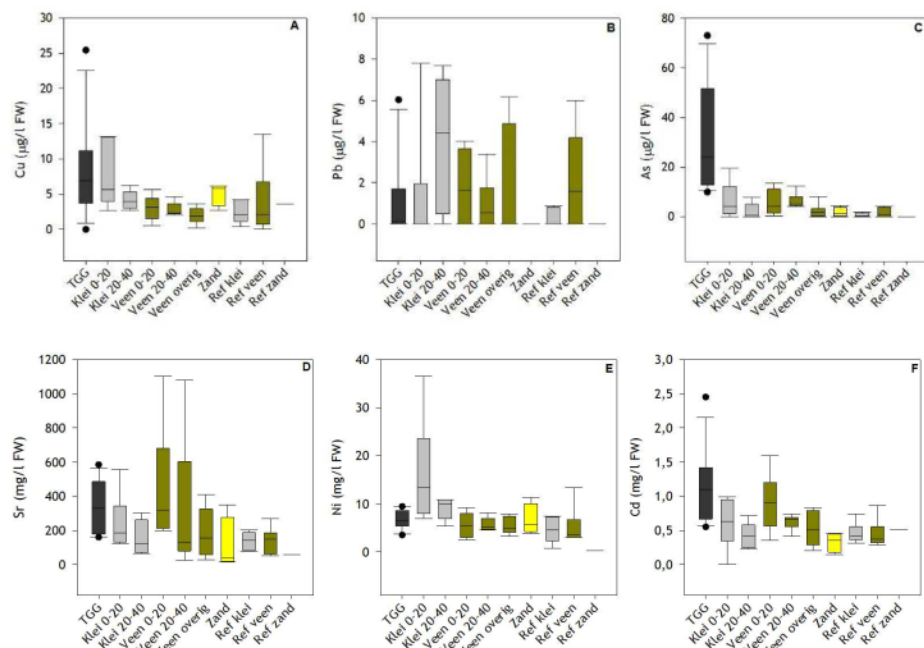


kleibodem. De concentraties in de diepere veenlaag in het dijklichaam (ver onder de TGG) (“veen overig” in figuur 15), gemiddeld 0,54 g/l, zijn vergelijkbaar met de referentie monsters van de veenbodems.

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 de concentratie bij toenemende diepte. De referentieconcentraties liggen allen tussen 36 en 66 mg/l. De pH in de TGG bodem is - in vergelijking met wat doorgaans in Nederlandse bodemtypen wordt aangetroffen - opvallend 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 onder de TGG (8,5 en 8,6) ten opzichte van de referentie (8,0). Ook de pH voor zand (9,1) in de raaien ligt gemiddeld hoger dan de referentieraai (8,5). Voor veen is de zuurgraad vergelijkbaar met de waarden in de referentieraai. 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 aan enkele zware metalen (koper, lood, arseen, strontium, nikkel en cadmium) in de bodem zijn weergegeven in Figuur 16.

Commented [EV7]: Mis nog steeds Mo en V

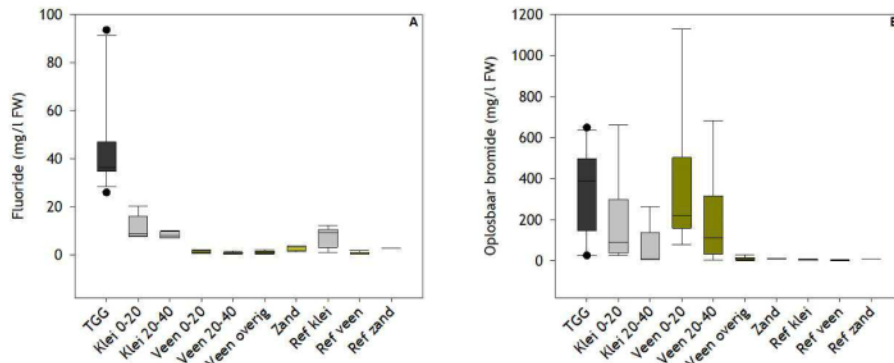


**Figuur 1516:** Mobiele concentraties koper (A), lood (B) en arseen ( $\mu\text{g/l}$  bodem) voor TGG, de onderliggende bodemlagen en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (verticale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

Wat opvalt is dat enkele zware metalen, waarvan de totaal elementconcentraties verhoogd zijn, in de TGG lager zijn t.o.v. de omliggende bodemlagen (paragraaf 3.1.2); hoewel dit niet hoeft te gelden voor de mobiele fracties van deze stoffen. Voor enkele zware metalen worden echter wel

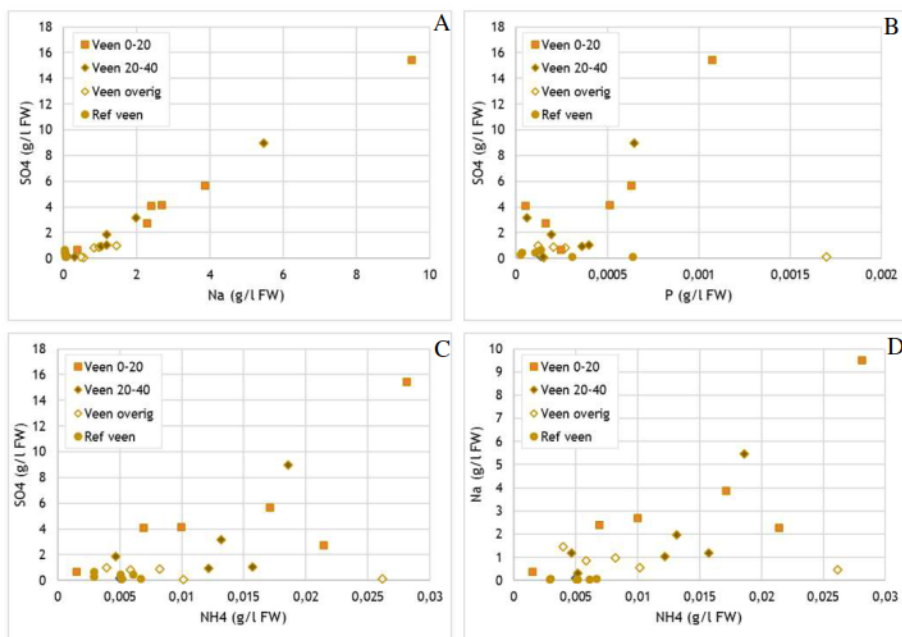
verhoogde mobiele concentraties aangetroffen in de TGG laag, zoals As, Cu, Cd, Cr, Mo en Sr. In figuur 17 zijn de concentraties van fluoride en oplosbaar bromide weergegeven (in mg/liter bodem), ook voor deze elementen blijkt dat de TGG laag verhoogde concentraties bevat ten opzichte van de omliggende bodems. Voor de oplosbaar bromide concentraties blijkt ook dat de bodemlagen direct onder de TGG laag (zowel klei als veen) verhoogde bromideconcentraties bevatten in tegenstelling tot 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.

Commented [EV8]: vanadium



**Figuur 16.17:** A) Fluoride (mg/l FW), B) Oplosbaar bromide (mg/l FW) voor TGG, de onderliggende bodemlagen en de referentie per bodemtype. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (verticale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

**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 apart onderzocht. In figuur 18 zijn de mobiele concentraties van sulfaat uitgezet tegen A) natrium, B) fosfor en C) ammonium (NH<sub>4</sub>) (g/l FW), voor de verschillende veenlagen onder de TGG en in de referentieraai.



**Figuur 1718:** Correlatie tussen verschillende mobiele vormen van elementen (g/l FW) per veenlaag. A) Sulfaat en natrium. B) sulfaat en fosfor. C) sulfaat en ammonium (NH<sub>4</sub>). D) sulfaat en natrium.

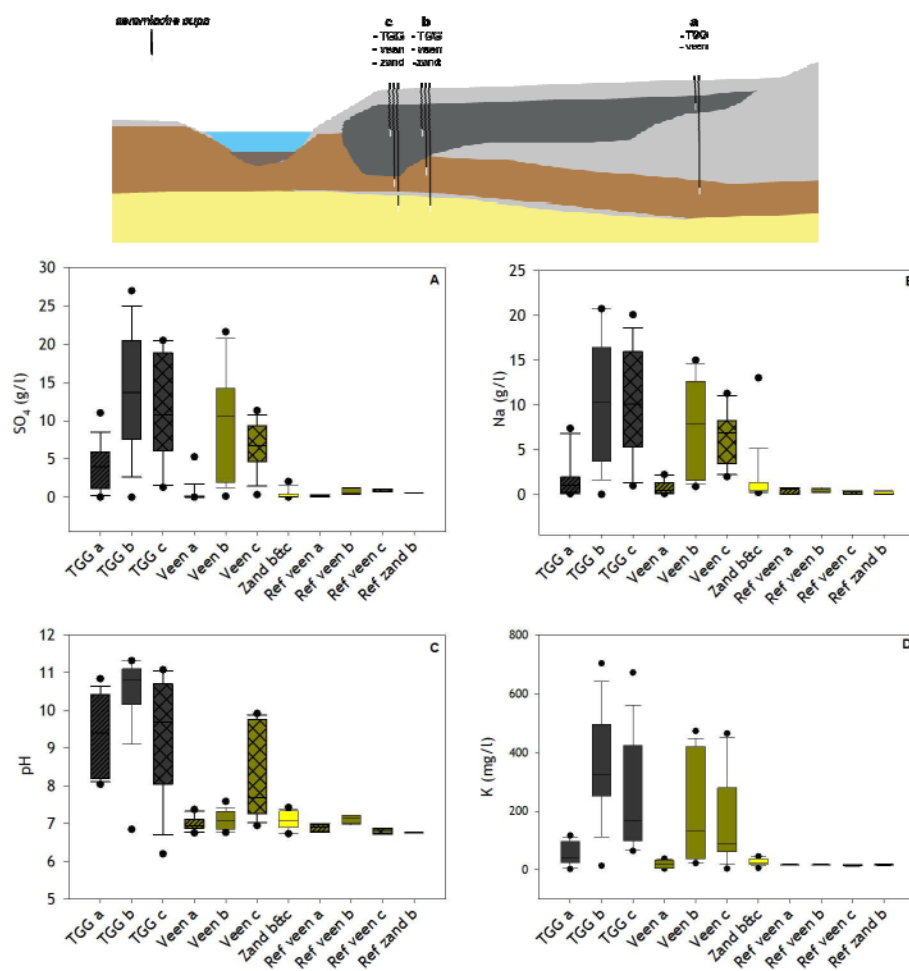
De mobiele (water-extraheerbare) natriumconcentraties correleren sterk positief met de (water-extraheerbare) sulfaatconcentraties ( $R^2=0,97$ ) (zie Figuur 18A). Deze correlatie en de aangetroffen concentraties voor natrium- en sulfaat zijn het sterkst en hoogst in de veenbodems onder de TGG (veen 0-20 en 20-40 cm onder de TGG laag). In de referenties worden de laagste waarden voor zowel natrium als sulfaat aangetroffen. Tussen sulfaat en fosfor is voor de gehele dataset geen duidelijke correlatie aanwezig, 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 beïnvloed 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.

Zowel op basis van totale elementconcentraties als de wateruitspoelbare fracties van elementen blijken de bodems onder de TGG laag (0-20 en 20-40 cm onder de TGG) vaak verhoogde concentraties te bevatten van elementen die tevens verhoogd zijn in de TGG. Zodoende valt soms ook de kleibodem die onder de TGG aanwezig is, op basis van totaalconcentraties van chroom, vanadium, zink, nikkel en kwik in de klasse industrie. Daarnaast zijn, met name in de veenbodem onder de TGG, de concentraties van makkelijk uitspoelbare elementen als sulfaat, natrium, chloride, kalium en bromide verhoogd.

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

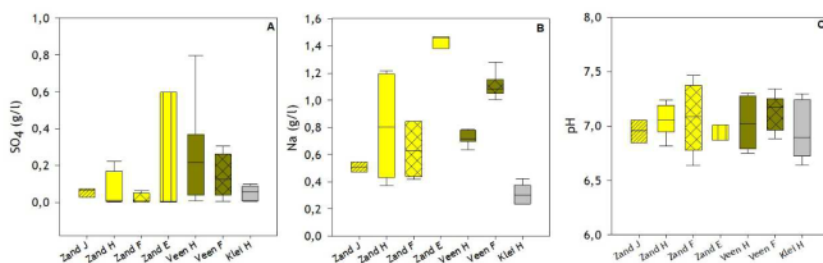
Om te kunnen bepalen of er verspreiding van stoffen plaatsvindt uit de TGG laag naar de omgeving en tot op welke diepte en in welke bodemlagen het grondwater hierdoor beïnvloed wordt zijn er in het veld ceramische cups en peilbuizen geplaatst. In deze paragraaf worden de resultaten van de grondwaterconcentraties van zowel de ceramische cups als de peilbuizen behandeld. Aangezien er

meer ceramische cups geplaatst zijn dan peilbuizen worden (indien niet anders vermeld) resultaten van de ceramische cups behandeld. In figuur 19 zijn de zuurgraad, sulfaat-, kalium- 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 data van vier bemonsterde tijdstippen op 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 sloottalud (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 1819:** A) Sulfaatconcentratie (g/l), B) natriumconcentratie (g/l), C) pH van het poriewater en D) de kaliumconcentratie (mg/l) 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 (verticale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale 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, kalium 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. de 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. 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.



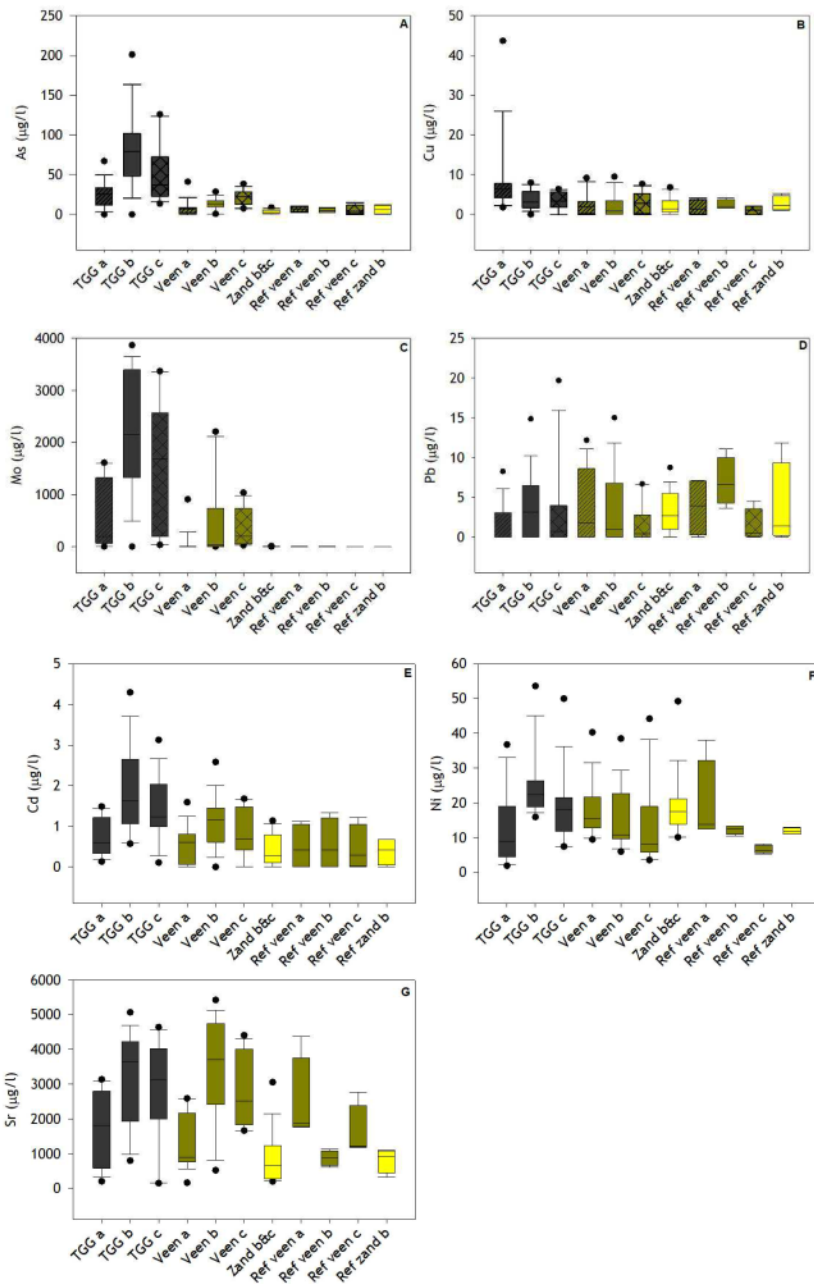
**Figuur 1920:** A) Sulfaatconcentratie (g/l), B) natriumconcentratie (g/l) en C) pH van het grondwater in de veen- en zandbodem per locatie (E, F, H en J) op raai 2 en 4. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (horizontale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

Langs transecten 2 en 4 zijn extra peilbuizen geplaatst in de omgeving en in de diepte (zie figuur 2 en 3 in de materiaal en methode en bijlage 1). 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 laagst in de kleibodem. Tussen de zand- en veenlocaties is veel spreiding, waarbij het hoogste natriumgehalte is gemeten in de zandbodem op locatie e. De pH ligt bij alle locaties ongeveer rond de 7,0.

In het grondwater zijn ook de zware metalenconcentraties geanalyseerd. Zo zijn in figuur 21 is de arsen-, nikkelconcentratie en molybdeenconcentraties in het grondwater weergegeven.

Commented [EV9]: vanadium ontbreekt





**Figuur 2024:** 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 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 (verticale 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 is 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 veenbodem 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. De koperconcentraties in het grondwater lijken wel wat verhoogd in de veenlaag onder de TGG ten opzichte van de referentie locaties, maar blijken weinig mobiel (zie figuur 21B). Totale loodconcentraties waren echter sterk verhoogd in de TGG in tegenstelling tot de andere bodemtypen maar blijkt weinig tot niet mobiel. Hier worden dan ook geen verhoogde concentraties van aangetroffen in het grondwater in en onder de TGG laag.

Eind 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 veenbodem 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 veenbodem 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 één van deze locaties is ook een verhoogde cyanideconcentratie aangetroffen (20 µg/l). Ook in de met ceramische cups verzamelde grondwatermonsters is sprake van verhoogde concentraties van arseen, barium, cadmium, molybdeen en vanadium. 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 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 2122 Selectie van analyse resultaten in een serie peilbuizen in de veld transecten (zie materiaal en methode voor peilbuis locaties).

Commented [VJ10]:

Commented [VJ11R10]: Even goed uitlijnen

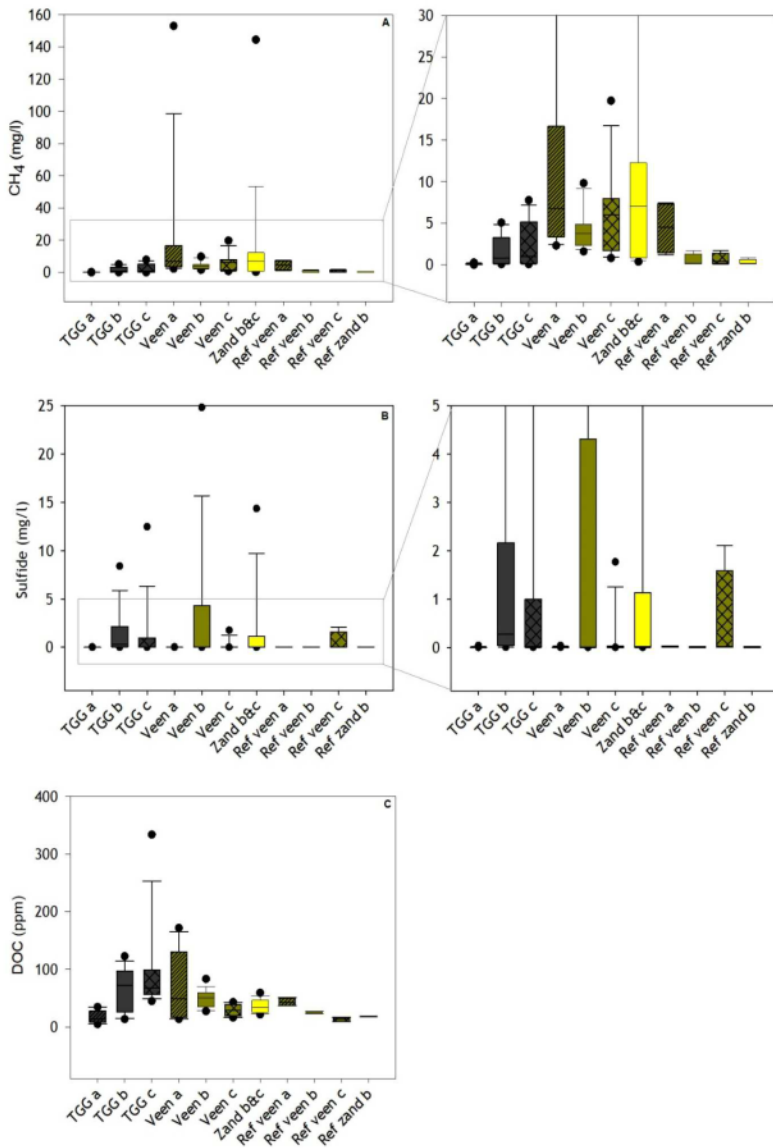
peilbuis	diepte m.v. bodem	TGG in profiel	TGG direct erboven	pH	As	Ba	Hg	Mo	Sb	V	Na	K	Cl	SO <sub>4</sub>	Br	CN	F	
					ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	ug/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1 B2	450-500	veen	ja	ja	7,8	9	110	0,39	1200	0,6	4,4	9373	460	4600	11359	1000	< 3	0,7
2 J1	460-560	zand	nee	nee	7,6	0,5	23	< 0,01	2,5	< 0,2	1,2	470	30	900	149	3,9	< 3	0,3
2 H1	350-450	veen	nee	nee	7,8	1,8	39	0,02	1,9	< 0,2	0,9	429	17	270	100	4,6	< 3	0,3
2 H2	600-700	zand	nee	nee	8,3	0,4	66	< 0,01	0,3	< 0,2	3,6	1086	42	1900	4	5,2	< 3	0,4
2 B2	500-600	zand	ja	nee	7,6	1,1	67	< 0,01	2	< 0,2	1,9	483	40	540	91	7,7	< 3	0,3
2 C1	300-400	veen	ja	ja	8,3	16	140	0,02	50	< 0,2	5,1	3994	79	4200	3921	410	< 3	1,2
2 F1	80-180	veen	nee	nee	7,1	6,3	210	0,02	0,2	< 0,2	0,6	1255	35	2100	211	13	< 3	0,2
2 F2	300-400	zand	nee	nee	7,2	0,5	90	< 0,01	0,2	< 0,2	2,1	602	32	760	5	5,3	< 3	0,1
3 B2	320-400	veen	ja	ja	12	100	91	0,49	3200	2,6	830	12790	470	7500	20381	1400	< 3	1,4
4 H1	450-550	veen	ja	nee	7,6	7,3	83	0,02	17	< 0,2	6,7	975	22	860	212	16	< 3	0,4
4 H2	700-800	zand	ja	nee	8	0,7	29	< 0,01	0,2	< 0,2	1,2	385	13	180	29	1,7	< 3	0,4
4 B2	390-470	veen	ja	ja	7,9	57	130	0,11	120	1,3	3,9	14360	500	5100	22693	1200	20	1,0
4 C1	550-650	zand	ja	nee	7,4	0,8	22	< 0,01	0,2	< 0,2	1,7	579	17	310	44	2,2	< 3	0,3
4 F1	130-230	veen	nee	nee	7,4	7,6	190	< 0,01	3,9	< 0,2	2,4	1132	33	1400	628	32	< 3	0,2
4 F2	400-500	zand	nee	nee	7,3	0,9	17	< 0,01	0,2	< 0,2	1,8	418	14	290	10	2,2	< 3	0,3
5 B1	250-350	veen	nee	nee	7	3,2	54	< 0,01	0,5	< 0,2	1,1	90	19	24	222	2,7	< 3	0,4
5 B2	550-650	zand	nee	nee	6,8	0,5	84	< 0,01	0,2	< 0,2	0,3	149	16	97	386	1,2	< 3	0,1

Veel van de in tabel 22 groen gekleurde cellen betreffen vaak ook norm overschrijdende concentraties (zie bijlage 8). 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. De concentraties van deze elementen zijn dan ook beduidend lager op locaties waar geen TGG in het bodemprofiel aanwezig is, langs het referentie transect (nummer 5 in tabel 22) en in diepere bodemlagen. Voor de elementen arseen, molybdeen en vanadium wordt de interventiewaarde in het grondwater overschreden. Dit betreffen alle drie elementen die in verhoogde concentraties aanwezig bleken in de geanalyseerde TGG monsters. De overschrijding van de interventiewaarde wordt enkel aangetroffen in grondwater in bodemlagen die onder invloed staan van TGG. Voor meerdere elementen, zoals arseen, barium, cadmium, chloride, chroom, kwik, molybdeen, nikkel, antimoon, tin en vanadium overschrijden de concentraties in het grondwater de streefwaarde voor ondiep grondwater (circulaire bodemsanering). In bijlage 8 is aangegeven voor welke elementen de aangetroffen contracties in de bodem en het grondwater de normen overschrijdingen.

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 nikkel. 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 zijn de in TGG aangetroffen uitspoelbare 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 ( $\mu\text{mol/l}$ ) 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. 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.



**Figuur 2223:** A) methaanconcentratie (mg/l), B) sulfideconcentratie (mg/l) en C) opgelost organisch koolstof (ppm) in het poriewater van de TGG-, veen- en zandbodem per locatie (a, b, c) op de raaien en referentieraai. Aan de rechterzijde van het figuur zijn nog uitsneden weergegeven van de grafieken met de methaan- en sulfideconcentratie van het onderste bereik van de y-as. De Box geeft het bereik tussen het 25e en 75e percentiel weer. De Whiskers (verticale lijnen) geven het bereik tussen het 10e en 90e percentiel. De horizontale streep in de box geeft de mediane waarde van de metingen weer.

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 (Figuur 23C). 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 1-4 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.

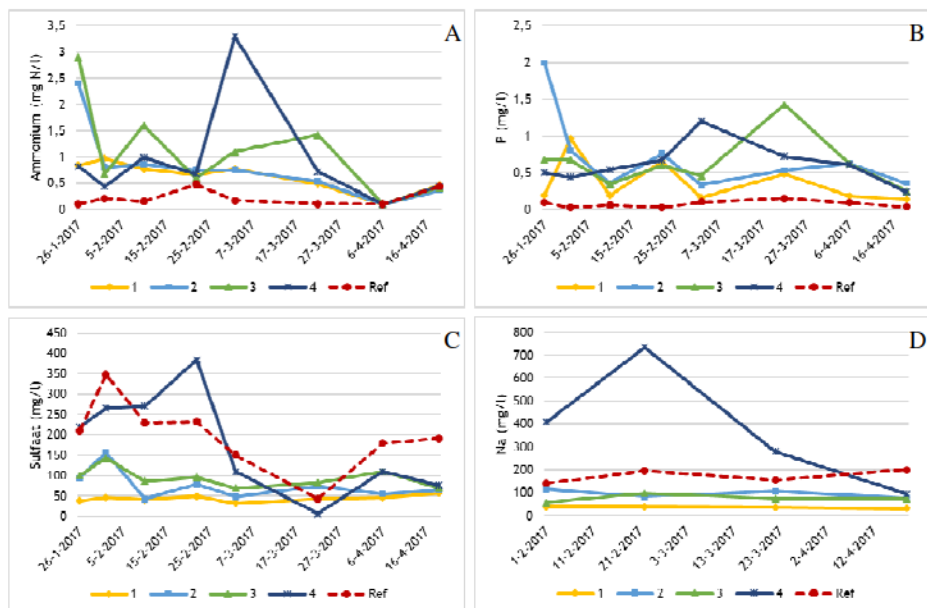
**Tabel 2324: Karakteristieken van de slibbodem per raai. Gemiddeldes per raai van organische stof (%), zuurgraad van waterextractie (pH), natrium, zwavel, ammonium (mobiel en potentieel mobiliseerbaar, mg/l FW) en gemeten concentraties van natrium, zwavel, koper, lood en arseen ((metalen niet gecorrigeerd voor org stof. en lutum) in (m)g/kg DW.**

Raai			Mobiel (mg/l FW)			Mobiliseerbaar (mg/l FW)			Totaal (g/kg DW)		Totaal (mg/kg DW)		
	OS (%)	pH	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 FW), potentieel mobiliseerbaar sulfaat (413 mg/l FW) en totaal-zwavel (35,7 g/kg DW). 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) (in mg/l), ammonium (mg N/l), ), sulfaat (mg/l) en natrium (mg/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 2425: A) ammonium (mg N/l), B) fosfor (mg/l), C) sulfaat (mg/l) en D) 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 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  $\text{NH}_4$ -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  $\text{NH}_4$ -concentraties het laagst in de referentieraai 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 ongefilterde concentraties (totaal water) (in  $\mu\text{g/l}$ ) van koper (Cu), lood (Pb) en arseen (As). Ook zijn de sulfaatconcentraties weergegeven van het oppervlaktewater ( $\text{SO}_4$ ) en het poriewater van de slibbodem ( $\text{SO}_4$ -porie). De waarden zijn gemiddelden van de tijdreeksen (vanaf januari tot en met april).

Tabel 2526: 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 ( $\mu\text{g/l}$ )	$\text{SO}_4$ (mg/l)	$\text{SO}_4$ -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 is relatief opvallend hoog bij raai 2 (8  $\mu\text{g/l}$ ) en het laagst bij de referentieraai. De loodconcentratie is

het laagst in de sloot bij raai 1. Voor arseen heeft de referentiesloot de laagste concentratie. De sulfaatconcentratie 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, is 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 oppervlaktewatersamenstelling. 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 al sulfaatrijk oppervlaktewater bevat (zie bijlage 9). De potentiële sulfaatinvloed vanuit het dijklichaam komt dus bovenop deze reeds relatief hoge sulfaatconcentratie die 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 4).**

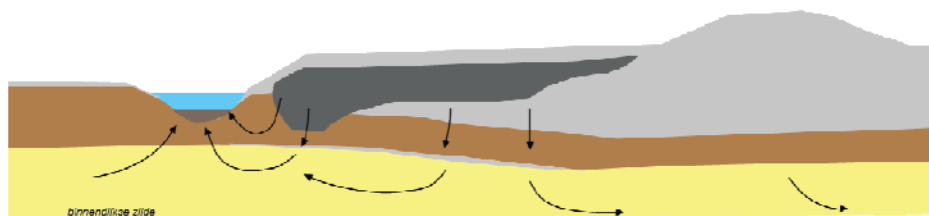
### **Conclusies: Uitspoeling uit TGG op de omgeving (grond- en oppervlaktewater)?**

- De TGG laag blijkt, in vergelijking met omliggende referentie bodems, sterk verrijkt met zouten, ionen (grotendeels natrium, chloride) en zwavel welke gemakkelijk oplossen en ook uitspoelen (in de vorm van natrium, chloride 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 een serie opeenvolgende bodemextracties is gebleken dat de totale mobiele fracties van sulfaat en natrium in de TGG ongeveer 8,2 gram sulfaat per liter TGG en 2,6 gram natrium per liter TGG bevat.
- Uit bodemanalyses in diepteprofielen 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 sulfaat-, chloride-, kalium-, fluoride-, en bromideconcentraties bevatten.
- Zowel op basis van totale elementconcentraties als de wateruitspoelbare fracties van elementen blijken de bodems onder de TGG laag (0-20 en 20-40 cm onder de TGG) vaak verhoogde concentraties te bevatten van elementen welke tevens verhoogd zijn in de TGG. Op basis van de normtoetsing valt de kleibodem onder de TGG soms ook onder de klasse industrie, vanwege verhoogde concentraties van chroom, vanadium, zink, nikkel en kwik. Daarnaast zijn, met name in de onder de TGG gelegen veenbodem, de concentraties van makkelijk uitspoelbare elementen als sulfaat, natrium, chloride, kalium en bromide sterk verhoogd.
- 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 de onderliggende bodemlagen en te leiden tot nutriëntmobilisatie in de onderliggende veenlaag.
- Uit grondwateranalyses op verschillende diepten en locaties 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 geregeld direct op het onderliggende veen ligt) verhoogde concentraties van elementen bevat waaronder sulfaat, natrium, chloride, kalium, bromide en enkele zware metalen. Er vindt dus uitspoeling plaats van elementen naar de onderliggende veenbodem en het grondwater. 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 elementconcentraties in het grondwater en in de veenlaag niet verhoogd.
- Naast sterk verhoogde concentraties anionen en kationen zijn ook verhoogde concentraties van molybdeen, arseen en vanadium in het grondwater aangetroffen. Voor de elementen arseen, molybdeen (overschrijding van circa 10 X de interventiewaarde) en vanadium wordt de interventiewaarde in het grondwater overschreden. Deze overschrijding van de interventiewaarde wordt enkel aangetroffen in grondwater in bodemlagen die onder invloed staan van het aanwezige TGG. Het grondwater in de regio van de onderzoekslocatie bevat licht verhoogde chloride, natrium en sulfaat concentraties (historische invloed van de Zuiderzee), maar de tijdens dit onderzoek aangetroffen concentraties kationen en anionen, welke uit de TGG spoelen zijn beduidend hoger.
- Enkele stoffen waarvan ook verhoogde (norm overschrijdende) concentraties zijn aangetroffen in het grondwater, zoals nikkel, lijken niet te correleren met de aanwezigheid van TGG.
- Omdat de watergang parallel aan de dijk tijdens de uitvoering van het onderzoek 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 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?

#### 3.3.1 Hydrologische modellering van grondwaterstanden en stofstroming

Op basis van de binnen dit onderzoek verzamelde gegevens van grondwaterstanden in peilbuizen en de chemische samenstelling van het grondwater op verschillende diepten is er voor de transecten 2 en 4 door Witteveen + Bos middels een modelmatige aanpak een inschatting gemaakt van grondwaterstroming in het dijklichaam en de omgeving en stofstroming vanuit de TGG. In bijlage 10 is de rapportage van Witteveen + Bos met de modelmatige aanpak opgenomen, voor details wordt verwezen naar bijlage 10. Uit het model komt naar voren dat, met de hierin ingebouwde aannames, dat sulfaat, natrium en chloride vanuit de aangebrachte TGG infiltreren naar het onderliggende klei- veen- en zandpakket (figuur 27). Vanuit dit zandpakket stroomt het verontreinigde grondwater voor het grootste deel naar de watergang ten zuiden van de Eemdijk en kwelt daar op. Een deel van de verontreinigingen stroomt direct vanuit de TGG naar de watergang. Er zitten wel verschillen tussen de verschillende elementen, zo is de aanname gedaan dat een deel van het sulfaat zal reduceren in de onderliggende veenlaag terwijl dit niet het geval is voor natrium en chloride. De gemeten chloridengehalten laten zien dat er mogelijk al uitloging is van het dunnere hogere deel van de TGG naar het lager op de dijk gelegen dikkere deel. Sulfaat in de TGG is hoog, maar in het veenpakket wordt vermoedelijk een deel van het sulfaat afgebroken. In de onderliggende zandlaag wordt dan ook tot op heden nauwelijks sulfaat gemeten.



Figuur 2627: Schematische dwarsdoorsnede van het projectgebied met hierin indicatieve pijlen waarmee de grondwaterstroming weergegeven is.

In de huidige situatie zijn hoge gehalten aan chloride, sulfaat en natrium in de bodemlagen en grondwater onder de TGG laag gemeten. In transect 4 is dit meer het geval als bij transect 2, vermoedelijk doordat er bij transect 2 nog een kleilaag tussen de TGG en het onderliggende veen aanwezig is. Op basis van de modelresultaten wordt verwacht dat de TGG na een periode van maximaal 10 jaar voor meer dan 95% is uitgeloozd. Op dat moment worden de hoogste gehalten gevonden in het klei/veenpakket onder de TGG en in de daar onderliggende tussenzandlaag. Uit het model komt naar voren dat na een periode van 25 jaar worden vrijwel geen verhoogde gehalten van de drie elementen meer voorkomengemeten, met uitzondering van chloride en natrium bij transect 4 (na 50 jaar zijn deze ook (vrijwel) verdwenen). De modelresultaten duiden dus op dat er veel uitspoeling van stoffen uit de TGG laag naar zowel de aangrenzende oppervlaktewater en het diepere grondwater kan stromen richting het noorden (oorzaak is drooglegging van zuidelijk Flevoland). Naar schatting zal dit ertoe leiden dat er in een periode van heden tot over 25-50 jaar (dit kan variëren langs het dijklichaam op basis van de bodemopbouw) de verhoogde sulfaat-, natrium- en chloride- uit de TGG gespoeld zullen zijn en via het aangrenzende oppervlaktewater en het diepere grondwater afgevoerd zijn (zie bijlage 10 voor details). Er kan dus rekening mee worden gehouden dat er de komende 25 tot 50 jaar een belasting van sulfaat, natrium en chloride vanuit de TGG naar de omgeving plaats zal vinden. Op basis van de huidige modellering van sulfaat, natrium en chloride ~~kan~~ geen kwalitatieve uitspraak gedaan worden over de verspreiding van andere elementen welke uit de TGG uitlogen zoals zware metalen en andere anionen.

Commented [VJ12]: Grondwater in de onderliggende zandlaag.



### 3.3.2 Tijdsreeks analyse grondwater

Binnen het huidige onderzoek zijn de ceramische cups in januari geplaatst en vervolgens maandelijks bemonsterd tot april. Ondanks dat dit een relatief korte monitoringsperiode betreft is in bijlage 11 een beschrijving opgenomen van de in deze periode aangetroffen trends. Samenvattend kan hieruit geconcludeerd worden dat, ondanks de trends op verschillende locaties en diepten in het dijklichaam als gevolg van lokale bodemopbouw verschillen, er geen duidelijk stijgende dan wel dalende trend waar is genomen, zie bijlage 11 voor details.

#### *Conclusies: Hydrologische modellering en stofstroming*

- Uit het hydrologische model komt, met de hierin ingebouwde aannames, naar voren dat er verontreinigingen vanuit de aangebrachte TGG infiltreren naar het onderliggende klei- veen- en zandpakket. Vanuit dit zandpakket stroomt het verontreinigde grondwater voor het grootste deel naar de watergang ten zuiden van de Eemdijk en kwelt daar op een kleiner deel kan zich naar dieper grondwater en in noordelijke richting verspreiden. Een deel van de verontreinigingen stroomt direct vanuit de TGG naar de watergang.
- Op basis van de modelresultaten wordt verwacht dat de TGG na een periode van maximaal 10 jaar voor meer dan 95% is uitgeloozd en zich naar de omgeving (oppervlaktewater en grondwater heeft verplaatst). Op dat moment worden de hoogste gehalten gevonden in het klei/veenpakket onder de TGG en in de daar onderliggende tussenzandlaag. Na een periode van 25 - 50 jaar worden op basis van de modelresultaten vrijwel geen verhoogde gehalten meer gemeten.
- Uit de modelering blijkt dus dat er rekening gehouden moet worden met een belasting van elementen welke uit de TGG spoelen naar de omgeving (oppervlaktewater en grondwater), dit zal vermoedelijk de jaren het intensiefst zijn en zal in een tijdperiode van 25 - 50 jaar verdwenen zijn.
- Binnen de monitoring van het huidige project (jan-mei) zijn er nog geen duidelijk stijgende dan wel dalende trend van elementconcentraties waargenomen in de veenbodem onder de TGG.

### 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 en ook naar de onderliggende veenlaag. Om onder gecontroleerde condities de effecten van uitspoeling van elementen uit de TGG laag op biogeochemische processen en afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag te onderzoeken, zijn er twee laboratoriumexperiment uitgevoerd:

1. een kolomexperiment om effecten op biogeochemische processen te onderzoeken
2. een incubatie-experiment om effecten op afbraakprocessen te onderzoeken.

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

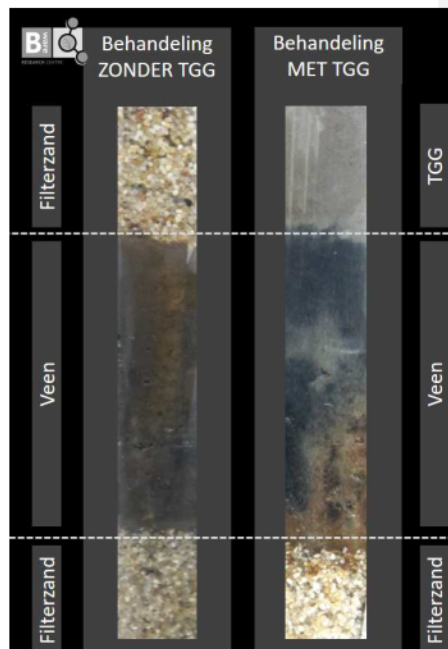
Om de effecten van uitspoeling uit de TGG laag op de onderliggende veenlaag in meer detail te onderzoeken is een kolomexperiment uitgevoerd, waarin onder gecontroleerde condities de veldsituatie op laboratoriumschaal is nagebootst. In dit experiment zijn een reeks kolommen met

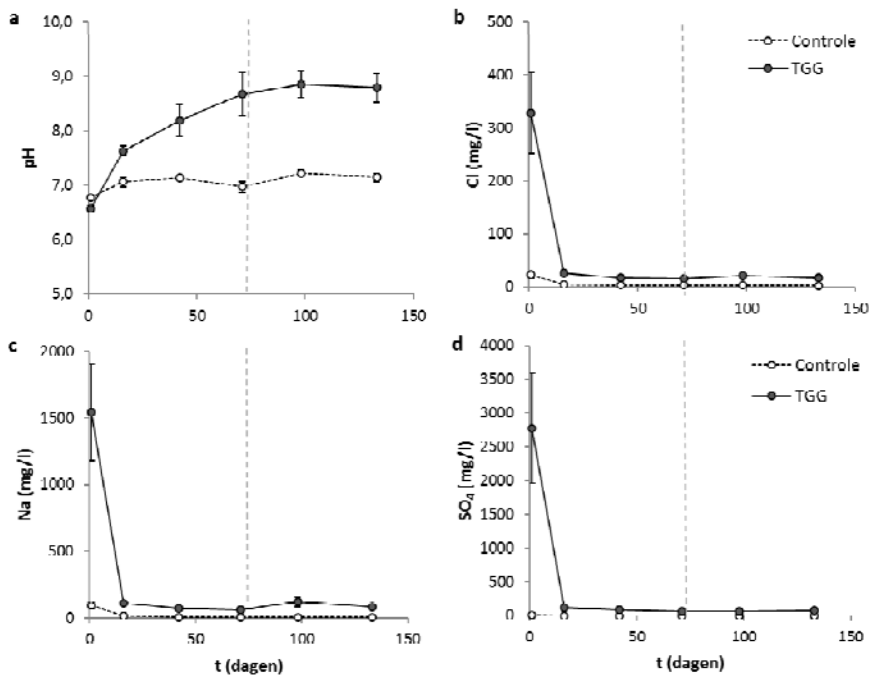


veenbodem (vier mét TGG erboven én vier zonder TGG erboven) versneld doorgespoeld met artificieel (kunstmatig samengesteld) regenwater, waarna de verschillen in biogeochemische processen in de veenbodem zijn gemonitord. Zoals verwacht blijkt ook uit het kolomexperiment dat er veel natrium en sulfaat uit de TGG laag uitspoelt wat vervolgens in de onderliggende veenlaag terecht komt (zie figuur 28, 29 en 30). De resultaten uit het kolomexperiment duiden op een hoge beschikbaarheid, mobilisatie en snelle uitspoeling van o.a. sulfaat en natrium vanuit de TGG laag naar de onderliggende veenlaag. Al tussen het moment van de opzet van het experiment en de eerste meting blijkt veel natrium en sulfaat te zijn uitgespoeld; reeds tijdens de eerste bemonstering zijn er grote verschillen tussen de behandelingen. Vanaf het eerste tijdstip dalen de natrium- en sulfaatconcentraties met de tijd, maar blijven verhoogd in de veenlaag door uitspoeling uit de TGG. Ook de pH in de veenlaag onder de 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 29), blijven de concentraties van elementen als natrium en zwavel verhoogd. Naast de sterk verhoogde natrium en zwavelconcentraties is ook te zien dat 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. Dat duidt op een combinatie van uitspoeling uit de TGG en kationmobilisatie (hier wordt in de discussie in meer detail op ingegaan).

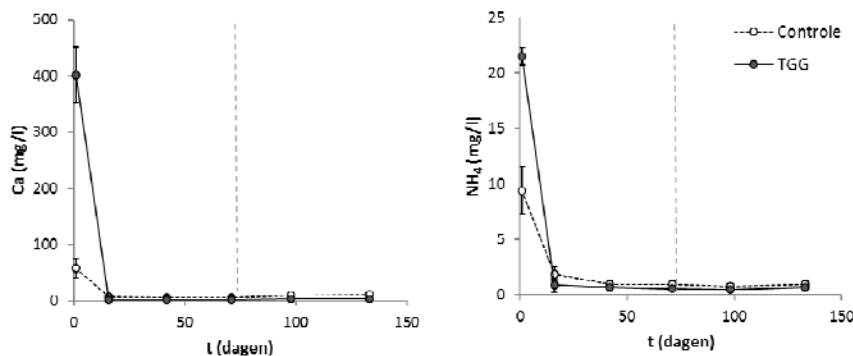
**Figuur 2728:** Detailfoto's van één voorbeeld van beide behandelingen van het kolomexperiment, met telkens van boven naar beneden eerst filterzand ofwel TGG, dan de veenlaag en daaronder het filterzand. Links is een voorbeeld weergegeven van een kolom zonder TGG erboven, rechts een kolom met TGG erboven.

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 beïnvloedt (zie figuur 28). Zo is te zien dat de van nature roodbruine veenlaag geheel zwart kleurt op plekken waar het beïnvloedt wordt door water dat uit de TGG laag is gespoeld. Op wat langere termijn blijkt dat de aanvankelijk verhoogde concentraties van kationen juist dalen beneden het niveau van de controle behandeling (b.v. de calciumconcentratie in figuur 29). Dit duidt op kationmobilisatie en uitspoeling van kationen uit de veenlaag. Wat betreft de nutriëntenbeschikbaarheid blijkt de ammoniumconcentratie op de korte termijn (tijdelijk) sterk toe te nemen in de behandeling met TGG (vermoedelijk door kationmobilisatie) (figuur 30). Voor nitraat is op de lange termijn een lichte stijging te zien. De fosforconcentratie in de veenlaag wordt niet significant beïnvloed door de TGG.





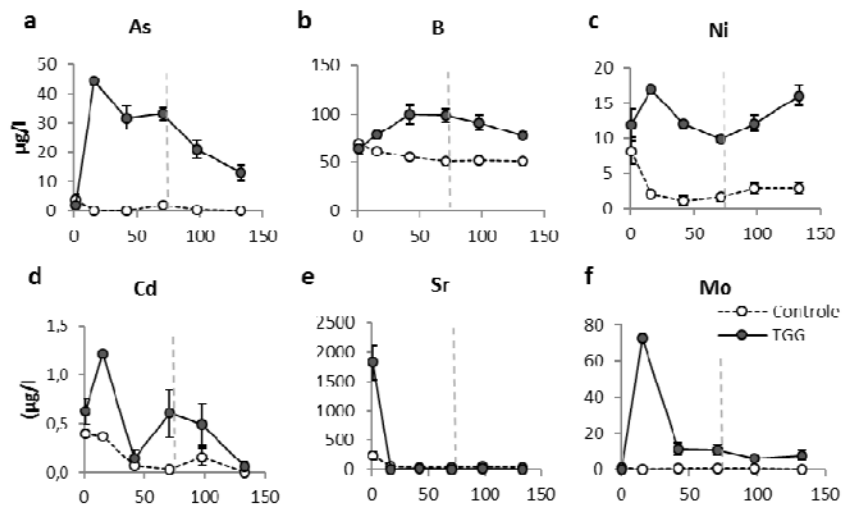
**Figuur 2829:** gemiddelde poriewaterconcentraties van A. de pH, B. chloride, C. natrium en D. sulfaat in het kolomexperiment door de tijd in de controle veenbodem (open cirkels) en de veenbodem onder TGG (grijs gevulde cirkels) ( $\pm$  S.E.M.).



**Figuur 2930:** gemiddelde poriewaterconcentraties van A. calcium en B. ammonium in het kolomexperiment door de tijd in de controle veenbodem (open cirkels) en de veenbodem onder TGG (grijs gevulde cirkels) ( $\pm$  S.E.M.).

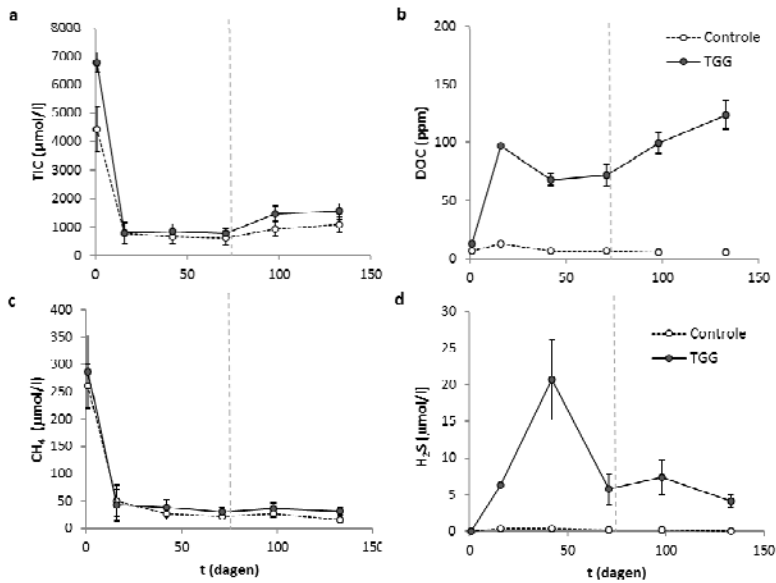
Uit de resultaten van het kolomexperiment komt naar voren dat de concentraties opgeloste zware metalen (arsen, barium, molybdeen, nikkel en strontium) in de veenlaag onder TGG behandeling verhoogd zijn t.o.v. de controle behandeling (figuur 31). Overige geanalyseerde zware metalen verschillen niet tussen beide behandelingen of lagen beneden de detectielimiet. Tevens valt op dat stoffen als sulfaat, natrium, chloride en calcium erg snel uit de TGG spoelen. Andere elementen zoals zware metalen zijn ook verhoogd in de veenbodem onder de TGG, in vergelijking met de controle veenbodem, maar laten vaak een ander verloop zien. Zo blijken concentraties van de

zware metalen arseen, molybdeen, boor en nikkel verhoogd in de veenlaag welke beïnvloedt wordt door de TGG, maar zijn deze minder mobiel dan stoffen zoals sulfaat en natrium. Door de lagere mobiliteit blijven deze elementen dan ook over langere periode verhoogd in de veenlaag die onder invloed van de TGG staat. Strontium vormt hierop een uitzondering en vertoont een vergelijkbaar patroon als sulfaat en natrium en is dan vermoedelijk ook gemobiliseerd via kationmobilisatie door de sterk verhoogde kationconcentratie (figuur 31e).



Figuur 3034: 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.)).

Met betrekking tot afbraakprocessen blijkt dat bicarbonaat-, waterstofsulfide- en methaanconcentraties in het poriewater in de eerste periode van het experiment (tijdens wegzijging) sterk beïnvloed worden door de wegzijging en dat er geen verschillen werden gevonden tussen de twee behandelingen (figuur 32). Na een periode van stilstand aan het einde van het experiment blijkt dat zowel de methaanconcentratie als de TIC-concentratie onder invloed van TGG in de veenbodem toenemen, maar dit levert geen grote verschillen op. De concentratie van opgelost organische koolstof (DOC) in het poriewater blijkt gemiddeld juist toe te nemen in de veenbodem onder invloed van de TGG. In de periode van stilstand stijgt de concentratie DOC extra in de veenbodem onder invloed van TGG (zie figuur 32b). De concentratie waterstofsulfide in het poriewater blijkt verhoogd in de veenbodem onder invloed van TGG. Dit duidt op verhoogde sulfaatreductie.



**Figuur 31.32:** 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.).

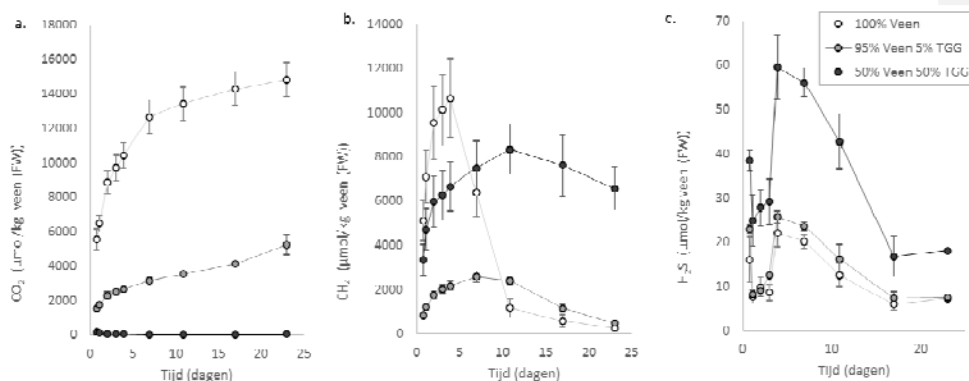
### 3.4.2. Effecten van TGG op afbraakprocessen in de onderliggende veenlaag

Uit de grondwatergegevens van 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 anaerobe afbraak processen. 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. Hierin werd de productie van anorganisch koolstof en waterstofsulfide vanuit in de veenbodem gemeten in verschillende behandelingen (veen met 0%, 5% en 50% TGG). Dit gebeurde door gassen ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  en  $\text{H}_2\text{S}$ ) die bij veenafbraak vrij kunnen komen te monitoren. Deze gassen verzamelen zich in de loop van de tijd in de headspace (gasfase boven de bodem). Door deze processen te monitoren kan een inschatting worden gemaakt van toe- en/of afname van verschillende afbraakprocessen en ook de snelheid hiervan. De uiteindelijke concentraties in de gasfase zijn de netto resultante van een interactie van verschillende afbraakprocessen (combinatie van microbiële en biogeochemische processen) in de bodem. Aan het einde van het incubatie-experiment zijn de concentraties van TIC (totaal anorganisch koolstof) en DOC (opgelost organisch koolstof) in het poriewater bepaald.

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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  productie waargenomen. Uit de poriewater analyses aan het einde van het experiment blijkt dat hoe groter de TGG invloed hoe hoger de pH (figuur 34). Daarnaast blijkt ook de totaal anorganische koolstof concentratie (TIC) (combinatie opgelost  $\text{CO}_2$  als  $\text{HCO}_3^-$ ) lager te zijn in de veenbodems met TGG. Een verlaging van de  $\text{CO}_2$  concentratie (welke deels te verklaren is door verhoogde pH waardoor een

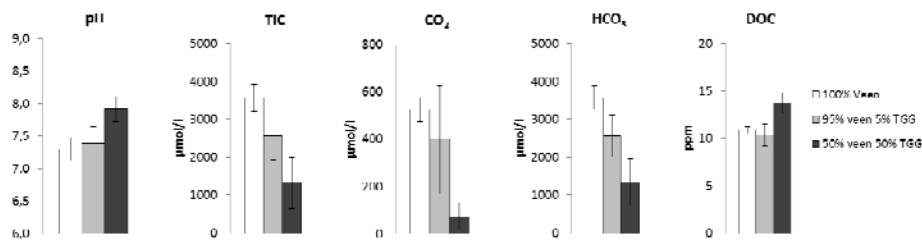
deel van het CO<sub>2</sub> omgezet wordt in HCO<sub>3</sub>) in combinatie met een daling van de TIC concentratie in het poriewater lijkt te duiden op een verlaagde CO<sub>2</sub> productie in de veenbodem bij verhoogde invloed van TGG. In tegenstelling tot de CO<sub>2</sub> en TIC concentraties in het poriewater blijkt de DOC concentratie juist verhoogd in de veenbodems onder invloed van TGG. Dit bleek ook uit het kolomexperiment en het onderzoek in de veldtransecten).

De toevoeging van TGG blijkt de methaanconcentratie (wordt gevormd door methanogenese) in de veenbodem op korte termijn te verlagen. Hieruit kan geconcludeerd worden dat op korte termijn de methaanproductie wordt geremd in beide behandelingen met TGG (figuur 33). Op langere termijn (na de eerste vier dagen) blijkt echter dat de methaanproductie in de controle behandeling omslaat van netto methaanproductie naar netto methaanconsumptie. Het is niet helemaal duidelijk hoe dit proces verklaard kan worden, maar waarschijnlijk speelt het proces van anaërobie methaanoxidatie hierbij een rol. Methaan kan worden geoxideerd tot kooldioxide door bijvoorbeeld driewaardig ijzer maar ook door sulfaat. We zien opvallend genoeg dat er een stijging (gevolgd door een afname) is van de sulfideconcentratie vanaf het moment dat de methaanconcentratie in de headspace afneemt. In beide behandelingen van veenbodem 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 in beide gaat afnemen (hetzij veel geleidelijker dan in de controle veenbehandeling). Voor de waterstofsulfideconcentratie blijkt dat gedurende de eerste dagen er geen verschillen zijn tussen de 0% en 5% behandeling. Voor de 50% behandeling is de waterstofsulfideconcentratie vanaf het begin echter verhoogd. Vanaf dag vier in het experiment zien we een sterke stijging in de sulfideconcentratie in alle behandelingen. De stijging is echter het sterkst in de 50% behandeling. Vanaf dag vier 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 komt dit door precipitatie met ijzer of andere metalen en/of adsorptie aan bodemdeeltjes.



**Figuur 3233:** Het verloop van enkele (aan veenafbraak gerelateerde) gasconcentraties in de headspace boven de bodem in het incubatie-experiment, a. de koolstofdioxide concentratie (CO<sub>2</sub>), b. de methaanconcentratie (CH<sub>4</sub>), c. de waterstofsulfideconcentratie (H<sub>2</sub>S), alles weergegeven in µmol/kg veen (FW) (± S.E.M.).





**Figuur 3334:** 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 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: Laboratorium experimenten*

- Uit het kolomexperiment komt (net als uit de resultaten van veldonderzoek 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 zoals een verhoogde alkaliniteit en sterk verhoogde pH, welke op de onderzoekslocatie waargenomen zijn, komen ook uit het kolomexperiment naar voren. De pH in de veenlaag onder de TGG laag stijgt sterk.
- Uit het kolomexperiment komt ook naar voren dat uitspoeling uit TGG de concentraties van opgelost arseen, barium, nikkel, molybdeen en strontium in de veenbodems verhoogd.
- 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 CO<sub>2</sub> 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 zien we duidelijk effecten van TGG op afbraakprocessen in de veenbodem, maar op dit moment kan niet worden geduid hoe de processen precies beïnvloed worden en wat de gevolgen hiervan zijn (met name op de 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 om de effecten van TGG op veenafbraak 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 de binnen dit onderzoek uitgevoerde bodemanalyses blijkt dat de thermisch gereinigde grond (TGG) bestaat uit een mengsel van zeer grof (kiezels) en zeer fijn materiaal. In vergelijking met andere bodemtypen in het dijklichaam en de omgeving blijkt dat de TGG een zeer hoge dichtheid heeft en erg weinig organisch stof (TGG wordt tijdens reiniging zeer sterk verhit). 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 m<sup>3</sup> TGG zit dus veel meer massa dan in een m<sup>3</sup> veen). Aangezien het verschil in dichtheid zo groot is kan indien er naar contracties per kilogram droge bodem wordt gekeken een scheef beeld verkregen worden. Indien deze concentraties worden omgerekend naar gram element per liter verse bodem blijkt dat voor vaal van de eerder genoemde elementen juist de TGG de hoogste concentraties blijkt te bevatten. De twee veenbodempunten met de hoogste ijzerconcentraties liggen in de referentieraai en blijken niet alleen rijker aan ijzer, maar ook aan zwavel te zijn. Waarschijnlijk betreft dit dan ook pyrietrijk veen. Deze venen zijn tijdens hun ontstaansgeschiedenis beïnvloedt geweest door de voormalige Zuiderzee. Dit betekent dat de veenbodem en het oppervlaktewater in de regio nog steeds rijk aan zwavel en sulfaat kunnen zijn. Uit de analyses van het aanwezige oppervlaktewater komt dan ook naar voren dat zowel op de locaties met als zonder TGG het oppervlaktewater relatief sulfaatrijk is.

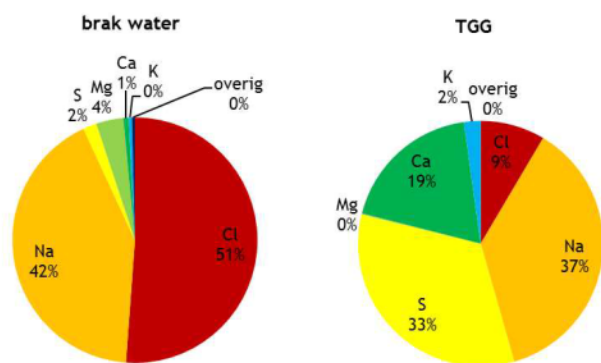
TGG bevat hogere uitwisselbare sulfaat-, natrium-, kalium-, chloride-, bromide- en calciumconcentraties en tevens een zeer hoge pH in vergelijking met de omgeving. Daarnaast zijn er verhoogde totaalgehalten aangetroffen van de zware metalen waaronder cadmium, koper, lood, barium, molybdeen, nikkel, vanadium, tin en zink. De TGG monsters vallen op basis van toetsing aan de normen voor deze metalen dan ook in de klasse industrie (op basis van Cd, Cr, Hg, Cu, Ni, V, en Zn) en bij een aantal van deze metalen is er een overschrijding van de emissietoetswaarde voor de elementen, zie ook bijlagen 4, 5 en 8.

Er wordt in de discussie van de deze rapportage niet verder ingegaan op de vraag hoe de chemische samenstelling van de TGG tot stand is gekomen en met name wat de oorzaak is van de hoge concentraties aan potentieel schadelijke stoffen. Dit was niet het doel van ons onderzoek. Wel wordt er bediscussieerd welke biogeochemische processen de mobilisatie van deze elementen naar de omgeving kunnen beïnvloeden en in welke mate dit mogelijk invloed kan hebben op de omgeving.

#### 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. Dit kan grote consequenties hebben voor de uitspoeling van sulfaat en natrium naar de omgeving. Zeker met het grote verschil in dichtheid tussen TGG en veen, is het verstandig te kijken naar concentraties uitspoelbare fracties

in (m)g per liter verse bodem in plaats van in (mg)g per kilogram droge bodem. Naast natrium en sulfaat, blijken ook andere elementen zoals kalium, bromide en enkele zware metalen 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).



**Figuur 3435:** Een vergelijking waarin de gemiddelde samentelling (procentuele verhouding van enkele elementen) van sterk brak water (links) welke vergeleken kan worden met de samenstelling van het water wat uit de TGG laag spoelt (rechts).

Uit zowel de eerder, door derden, uitgevoerde onderzoeken als het hier beschreven onderzoek komt naar voren dat er veel natrium en sulfaat uit de TGG naar de omgeving uitspoelt. De concentraties van natrium, chloride, kalium, bromide en met name sulfaat in het water dat uit de TGG laag kan spoelen zijn erg hoog. Zo zijn de sulfaatconcentraties en de pH in het grondwater in de TGG laag en in de veenlaag direct onder de TGG laag 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. Fraters & De Goffau 2014). Een aantal anion-, kation- en metalenconcentraties in het grondwater van de TGG laag en de veenlaag direct onder de TGG laag overschrijden dan ook de interventiewaarde 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 m<sup>3</sup> TGG uit kan spoelen naar de omgeving. Het is hierbij wel belangrijk te vermelden dat dit een onderschatting is van wat er mogelijk uit recent geproduceerd en afgeleverd TGG kan uitspoelen. Alle binnen het huidige onderzoek verzamelde TGG monsters zijn namelijk afkomstig van de dijkversteving van de Eemdijk. Hier is echter alle TGG reeds enkele maanden blootgesteld aan neerslag, waardoor uitloging op kan treden, alvorens deze bemonsterd is voor het huidige onderzoek. Op basis van de resultaten van dit onderzoek 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. Uit het huidige onderzoek is naar voren gekomen dat een groot deel van de elementen die gemobiliseerd worden vanuit de TGG, zoals sulfaat, natrium, chloride en kalium erg gemakkelijk en snel uit kunnen spoelen. Dit is een extra indicatie dat de inschattingen van totale

uitspoelbare fracties een onderschatting zijn van de oorspronkelijk uitspoelbare fracties van TGG. 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 5).

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 op de onderliggende veenlaag ligt (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 opgetreden. 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. Naast dat er reeds verhoogde concentraties van een aantal aan TGG gerelateerde elementen in de onderliggende bodem en grondwater zijn aangetroffen duidt ook de hydrologische modellering er op dat elementen zich via de onderliggende veen klei en zandbodem zich verspreiden naar de naastgelegen watergang en het diepere grondwater. Deze modellering is opgezet voor de elementen sulfaat, chloride en natrium. Hier kunnen dus geen inschatting gedaan worden over de verspreiding van andere elementen welke uit de TGG uitlogen zoals zware metalen en bromide en fluoride. In latere alinea's in de discussie wordt in meer detail ingegaan op de potentiële effecten van verhoogde uitspoeling van sulfaat en natrium 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 bodemmonsters en grondwateranalyses gebleken dat enkele van deze elementen 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 [en vanadium](#), aangetroffen en worden hier voor enkele elementen de interventiewaarde overschreden. 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. Ook is te zien dat deze metalen en anionen andere patronen van uitspoeling laten zien, wat een indicatie is dat er verschillende processen spelen welke de uitspoeling van deze stoffen beïnvloeden.

#### **4.2 Beïnvloeding van (biogeochemische) processen op de mobiliteit van stoffen en biogeochemische en ecologische effecten van uitspoeling van natrium en sulfaat**

In deze paragraaf worden een aantal mogelijke processen behandeld welke de mobiliteit van elementen in de TGG laag beïnvloeden. Vervolgens wordt behandeld welke gevolgen de uitspoeling van hoge sulfaat- en natrium concentraties uit de TGG laag naar de onderliggende veenlaag en het grond- en oppervlaktewater kan hebben. Er wordt in deze discussie niet verder ingegaan welke ecologische gevolgen de mobilisatie van andere meer milieuvreemde stoffen als enkele zware metalen en anionen als bromide, fluoride en cyanide kunnen hebben op de omgeving, hiervoor wordt verwezen naar andere studies.

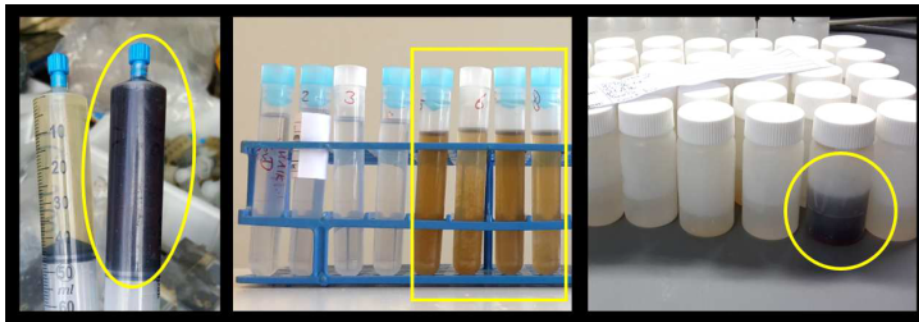
##### **4.2.1 Kation-mobilisatie**

Sterk verhoogde kationconcentraties kunnen tot een plotselinge sterke verhoging van andere positief geladen kationen in de bodem leiden door verdringing van reeds aan het bodemabsorptiecomplex gebonden kationen waaronder ook zware metalen. Zo blijkt uit meerdere studies dat bij verhoogde natriumconcentraties andere kationen gemobiliseerd worden, hierbij moet dan gedacht worden aan bijvoorbeeld calcium, magnesium, kalium, zware metalen (zoals strontium), ammonium en andere kationen (Rysgaard et al. 1999, Weston et al. 2006, 2010, Stekete 2007). De mate van kationmobilisatie is afhankelijk van de hoeveelheid kationen die aan het kation adsorptiecomplex van de bodem gebonden zijn en de hoeveelheid van kationen die uit de TGG spoelen. Zo zijn er in kleibodems over het algemeen meer kationen gebonden dan in 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 in combinatie met kationmobilisatie leidt er toe dat de concentraties van deze ionen op de langere termijn juist verlaagd zijn in veenbodem onder invloed van TGG 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. Voor de praktijk betekent dit dat kationen en zware metalen welke eerst aan de bodem gebonden waren, plotseling door een sterk verhoogde kationconcentratie uit de TGG gemobiliseerd kunnen worden, m.a.w. het oplossen van natrium en andere kationen uit de TGG kan andere elementen (waaronder zware metalen) uit de TGG zelf en onderliggende bodemlagen mobiliseren.

##### **4.2.2 Verhoogde pH, redoxpotential en de mobilisatie van reactief organisch materiaal en zware metalen**

Naast verhoogde kationconcentraties leidt uitspoeling uit TGG ook tot een sterk verhoogde pH en verhoogde kation- en anionconcentraties met als gevolg een verhoogde redoxpotentiaal. De combinatie van sterk verhoogde pH en redoxpotential in de bodem kan leiden tot verhoogde mobilisatie van DOC (reactief organisch materiaal) en de hieraan gebonden metalen (Dijkstra et al. 2009). Hiermee kan waarschijnlijk ook de verhoogde DOC concentratie en de hiermee

samenhangende kleuring van de monsters worden verklaard. Uit de resultaten uit het kolomexperiment komt dan ook een verband tussen de mobilisatie van DOC en enkele zware metalen, wat erop zou kunnen duiden dat dit proces speelt (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 (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). Uit de literatuur is ook bekend dat factoren als een sterk verhoogde pH en een verhoogde redoxpotentiaal processen in gang kunnen zetten welke zware metalen kunnen mobiliseren (o.a. Stekete 2007). Hierdoor kunnen concentraties van metalen welke uitspoelen op lange termijn hoger zijn dan wat op basis van bodemanalyses verwacht wordt. Veel van de effecten van processen die de mobiliteit van zware metalen beïnvloeden (kationmobilisatie, verhoogde pH, mobilisatie van DOC, verhoogde redoxpotentiaal, sulfaatreductie etc.) kunnen sterk verschillen per metaal. De effecten van uitspoeling vanuit TGG, wat telkens een combinatie is van al deze processen, op de mobiliteit van zware metalen is hierom moeilijk in te schatten. De binnen dit onderzoek verrichte analyses in het grondwater later echter het uiteindelijke netto resultaat zien.



Figuur 3536: 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 [ ] en [ ].

#### 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 stikstofcyclus 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.

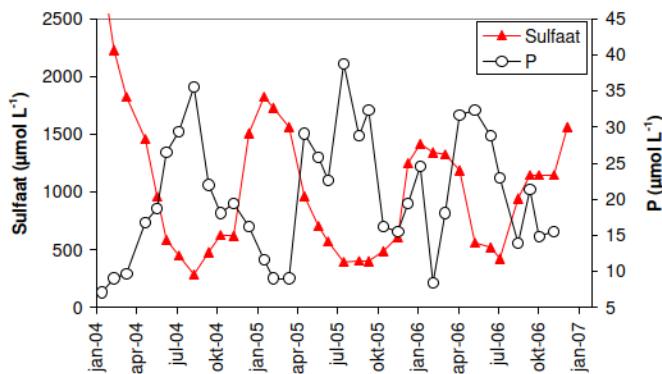
#### 4.2.4. Consequenties van verhoogde sulfaat uitspoeling en hieruit volgende sulfaatbelasting op oppervlaktewater

De hoge sulfaatbelasting van het oppervlaktewater 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 et al., 2013; Smolders et al., 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 microbiële proces en wordt sterk beïnvloed door de watertemperatuur (Smolders et al., 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 komen fosfor en ammonium in de waterlaag terecht waardoor de groei van algen en kroos verder kunnen 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 anaërobie 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 bodemanalyses 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 ammoniakvorming 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 organisch 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 3637:** Sulfaat- en fosfaatconcentraties voor de Tiendwegwetering (nabij de Hoenkoopsebuurtweg), gemonitord door HDSR over verschillende jaren (januari 2004-november 2006) (uit van Diggelen et al., 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 voor ecologie mogelijk meevallen, immers de waterkwaliteit is al niet best. Bovendien wordt zeker wanneer er doorgespoeld wordt om het uit de dijk lekkende sulfaat af te voeren. De uitspoeling van sulfaat zou tot een veel sterkere verstoring van de waterkwaliteit en dus het aquatische ecosysteem kunnen leiden, indien een soortgelijk dijklichaam in een sulfaatarmere omgeving zou liggen.

Desalnietemin is er wel (op basis van de grondwatermetingen en het stofstroommodel) een verslechtering van de waterkwaliteit te verwachten door onder andere sulfaat, zeker op het moment de tijdelijk ingestelde doorspoelmaatregelen zouden worden gestaakt.

#### 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 soortspecifiek. De voornaamste aanpassing van waterplanten bijvoorbeeld, tegen zout water is 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

**Commented [VJ13]:** Graag in samenvatting opnemen



bepaalde 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, 1934). 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 anaërobie 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 voorliggende onderzoek, de bodemanalyses en grondwateranalyses van de veldtransecten en de resultaten uit het kolomexperiment, komt naar voren dat er uitspoeling van kationen, anionen en zware metalen uit de TGG plaatsvindt naar de onderliggende veenlaag en het grondwater. 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. Ook andere meer milieuvreemde stoffen welke uit TGG spoelen zouden potentieel fysiologische effecten kunnen hebben op de micro-organismen. 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 verhoogt en de methaanproductie kan verlagen. Zo kan een verhoogde sulfaatconcentratie de methanogenese verlagen (o.a. Weston et al. 2006) doordat (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., 2002; 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 verrichtte veldmetingen en het incubatie-experiment enkel de netto resultante van de interactie van alle verschillende processen gemeten wordt, kunnen de achterliggende deelprocessen niet meer goed 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 langeretermijn 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.

#### **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 vaak zeer heterogeen 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 doortatendheid (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 waterdoortatendheid (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

In dit hoofdstuk zijn kort per onderzoeksvraag de uit het onderzoek voortkomende resultaten beschreven. Voor meer details wordt verwezen naar de hoofdstukken 3 en 4 en 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 mee brengt voor de veiligheid van de dijk.***

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

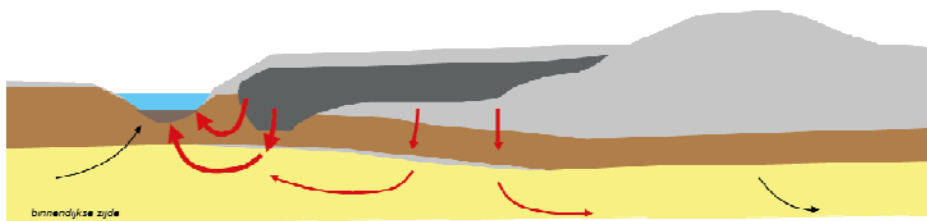
**A. *Wat is de chemische samenstelling van het opgebrachte materiaal en de onderliggende bodemlagen?***

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 bodemtypen in de omgeving van het dijklichaam gekenmerkt door hoge totaal concentraties van calcium, koper, lood, barium, molybdeen en zink. Daarnaast bevat TGG zeer hoge concentraties van gemakkelijk uitspoelbaar sulfaat, en natrium (en in mindere mate chloride, kalium en calcium). Tevens blijken de totaal en/of oplosbare concentraties van o.a. chloride, bromide, fluoride, molybdeen, [vanadium](#) en arseen verhoogd. Het merendeel van TGG monsters valt op basis van norm toetsing in de klasse industrie (op basis van cadmium, chroom, kwik, koper, nikkel, vanadium en zink) en er is bij 5 van de 12 monsters een overschrijding van de emissietoetswaarde voor de elementen vanadium, lood en zink. Daarnaast is de pH van het uit de TGG spoelende water - in vergelijking met wat doorgaans in Nederlandse bodemtypen wordt aangetroffen - opvallend hoog, deze kan oplopen tot boven de pH 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 de TGG zelf.

**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 zijn o.a. chloride, calcium, kalium, molybdeen, arseen, vanadium, bromide en fluoride. 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). In het grondwater en in de bodem onder de TGG zijn naast verhoogde sulfaat-, natrium- en chlorideconcentraties ook verhoogde concentraties van 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 naar de onderliggende veenlaag. Voor de elementen arseen, molybdeen en vanadium (elementen waarin uit het bodemonderzoek gebleken is dat hier een relatie is met TGG) wordt de interventiewaarde in het grondwater overschreden. Deze overschrijding van de interventiewaarde wordt enkel aangetroffen in grondwater in bodemlagen onder invloed van TGG. Verhoudingsgewijs blijkt dat met name natrium en sulfaat gemakkelijk en in hoge concentraties uit de TGG uitspoelen. Dit leidt ertoe dat het gebruik 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). Ook de resultaten van de hydrologische modellering (op basis van sulfaat, chloride en natrium) duidt op uitspoeling van elementen uit de TGG laag via de onderliggende bodem naar de watergang ten zuiden van de Eemdijk waar het opkwelt. Een kleiner deel kan zich naar dieper grondwater en in noordelijke richting verspreiden. Uit de modelering blijkt dus dat er (variërend naar de bodemopbouw van het dijklichaam) rekening gehouden moet worden met een belasting van elementen welke uit de TGG spoelen naar de omgeving (oppervlaktewater en grondwater), dit zal vermoedelijk de eerste jaren het intensiefst zijn en zal in een tijdperiode van 25 - 50 jaar langzaam afnemen en uiteindelijk stoppen. Binnen de kortlopende monitoring van het huidige project zijn er nog geen duidelijk stijgende dan wel dalende trend van elementconcentraties waargenomen in de veenbodem onder de TGG.



Totaal is de uitspoelbare fractie in TGG ongeveer 8,2 kg sulfaat  $m^3$  TGG en 2,6 kg natrium per  $m^3$  TGG, dit betekend voor het huidige project bij de Eemdijk (waarbij 72429  $m^3$  TGG is toegepast) in totaal naar schatting ongeveer 590,8 ton uitspoelbaar sulfaat en 190,4 ton uitspoelbaar natrium. Hierbij moet in acht genomen worden dat het binnen dit onderzoek gebruikte TGG reeds enkele maanden aan regenwater blootgesteld is geweest 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 ionenbelasting 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 biochemische 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

Commented [EV14]: Zie samenvatting 124 xxx ton

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 die van nature al relatief rijk aan zwavel zijn door de voormalige invloed van de voormalige Zuiderzee. Andere elementen welke uitspoelen uit de TGG zoals bijvoorbeeld bromide, fluoride en zware metalen als molybdeen, arseen en vanadium en verhoogde pH 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 worden zowel de koolstofcyclus (mineralisatie, koolstofdioxide- en methanogenese) als 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 op 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 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 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.



Terwijl 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. De uitspoeling uit TGG brengt uiteindelijk potentiële risico's met zich mee en deze zijn op basis van de binnen het huidige onderzoek verzamelde gegevens niet te voorspellen. Als er gedacht wordt aan herstelmaatregelen om de oorspronkelijke situatie te herstellen zal minimaal-zoveel mogelijk voorkomen moeten worden dat er uitspoeling plaatsvindt naar de veenlaag, het grondwater en het oppervlaktewater.

### 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 de sterk verhoogde sulfaatconcentraties en (2) de effecten van 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 uitspoelen. Dit is gunstig omdat door middel 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 zeer sterk verlaagd of zelfs geheel verwijderd zouden kunnen worden. Daarnaast zijn er mogelijk ook aanpassingen mogelijk in het huidige productieproces welke er toe leiden dat deze gemakkelijk uitspoelbare stoffen niet in de TGG terecht komen.

### 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 uitspoeling uit de TGG laag in het dijklichaam te monitoren. Dit kan gedaan worden door op extra tijdstippen bemonsteringen te verrichten van de reeds geplaatste ceramische cups, peilbuizen en het aangrenzend oppervlaktewater (bijvoorbeeld in eerste instantie in augustus, oktober en december) en deze te analyseren op de reeds binnen het huidige onderzoek aangetroffen aan TGG gerelateerde stoffen. Op basis van de hieruit voortkomende resultaten kan bekeken worden of hier op langere termijn veranderingen in de tijd plaatsvinden. Op deze wijze kan ook gemonitord worden 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. Hiermee kunnen vervolgens de reeds opgestelde hydrologische modellen worden verbeterd zodat er op basis van een langere monitoringsreeks een betere inschatting kan worden gemaakt van de invloed van stoffen welke uitlogten uit de TGG op de omgeving en de duur van deze invloed.

Commented [VJ15]:

Commented [VJ16R15]: Bij nader inzien beter. Deze aanbeveling moet wel in lijn zijn met de rest van je nuances, stond te hard (dank)

- Er wordt aangeraden om op locatie aanvullend onderzoek te verrichten naar de mate waarin 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 schuifspanning en doorlatendheid) in de onderliggende veenlaag op locaties waar deze wel door uitspoeling 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

- Baird AJ, Waldron S. 2003. Shallow horizontal groundwater flow in peatlands is reduced by bacteriogenic gas production. *Geophysical Research Letters* **30**: 2043.
- Baldwin DS, Rees GN, Mitchell AM, Watson G, Williams J. 2006. The short-term effects of salinization on anaerobic nutrient cycling and microbial community structure in sediment from a freshwater wetland. *Wetlands* **26**: 455-464.
- Barlett KB, Bartlett DS, Hariss RC, Sebacher DI. 1987. Methane emissions along a salt marsh salinity gradient. *Biogeochemistry* **4**: 3. 183-202.
- Boelter DH. 1969. Physical Properties of Peat as Related to Degree of Decomposition. *Soil Science Society of America* **33**: 606-609.
- Chambers LG, Reddy KR, Osborne TZ. 2011. Short-Term Response of Carbon Cycling to Salinity Pulses in a Freshwater Wetland, *Soil Science Society of America Journal* **75**: 2000-2007
- Chason DB, Siegel DI. 1986. Hydraulic conductivity and related physical properties of peat, Lost River Peatland, northern Minnesota. *Soil Science* **142**: 91-99.
- Comas X, Slater L. 2004. Low-frequency electrical properties of peat. *Water Resources Research* **40**: W12414.
- Craft C, Clough J, Ehman J, Joye S, Park R, Pennings S, Guo H, Machmuller M (2009) Forecasting the effects of accelerated sea-level rise on tidal marsh ecosystem services. *Front Ecol Environ* **7**:73-78
- Dijkstra, J.J., Meeussen, J.C.L., Comans, R.N.J., 2009. Evaluation of a generic multisurface sorption model for inorganic soil contaminants. *Environmental Science and Technology* **43**, 6196-6201.
- Giblin AE, Weston NB, Banta GT, Tucker J, Hopkinson CS (2010) The effects of salinity on nitrogen losses from an oligohaline estuarine sediment. *Estuaries and Coasts* **33**:1054-1068.
- Kettridge N, Binley A. 2010. Evaluating the effect of using artificial pore water on the quality of laboratory hydraulic conductivity measurements of peat. *Hydrological Processes* **24**, 2629-2640.
- Lamers LPM, van Roozendaal SME, Roelofs JGM (1998) Acidification of freshwater wetlands: combined effects of non-airborne sulfur pollution and desiccation. *Water Air Soil Pollut* **105**:95-106
- Lamers LPM, Falla SJ, Samborska EM, Van Dulken LAR, Van Hengstum G, Roelofs JGM. 2002. Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands. *Limnology and Oceanography* **47**: 585-593.
- 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.
- Magalhaes CM, Joye SB, Moreira RM, Wiebe WJ, Borlado AA (2005). Effect of salinity and inorganic nitrogen concentrations on nitrification and denitrification rates in intertidal sediments and rocky biofilms of the Douro River estuary, Portugal. *Water Research* **39**: 1783-1794. doi:10.1016/j. watres.2005.03.008.
- Marks BM, Chambers L, White JR (2016) Effect of fluctuating salinity on potential denitrification in coastal wetland soil and sediments. *Soil Science Society of America Journal*. Doi:10.2136/sssaj2015.07.0265
- Marton JM, Herbert ER, Craft CB (2012) Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from laboratory-incubated tidal forest soils. *Wetlands* **32**:347- 357 Mishra SR, Pattnaik P, Sethunathana N, Adhyaa TK (2003) Anion-mediated salinity affecting methane production in a flooded alluvial soil. *Geomicrobiol J* **20**(6):579-586
- Mehnert E, Jennings AA. 1985. The effect of salinity dependent hydraulic conductivity on saltwater intrusion episodes. *Journal of Hydrology* **80**: 283-297.
- Munns R, Tester M (2008) Mechanisms of Salinity Tolerance. *Annual Reviews of Plant Biology*, **59**, 651-681.

Formatted: English (United States)

- Noe G, Krauss K, Lockaby BG, Conner W, Hupp C (2013) The effect of increasing salinity and forest mortality on soil nitrogen and phosphorus mineralization in tidal freshwater forested wetlands. *Biogeochemistry* 114: 225-244.
- Ours DP, Siegel DI, Glaser PH. 1997. Chemical dilation and the dual porosity of humified bog peat. *Journal of Hydrology* 196: 348-360.
- Poffenbarger HJ, Needelman BA, Megonigal JP (2011) Salinity influence on methane emissions from tidal marshes. *Wetlands* 31:831-842
- Portnoy J, Giblin A (1997) Effects of historic tidal restrictions on salt marsh sediment chemistry. *Biogeochemistry* 36, 275-303.
- Fraters & De Goffau (2014) Sulfaat in grondwater en oppervlaktewater in Nederland Overzicht van meetresultaten van nationale meetnetten, RIVM, RIVM Briefrapport 2014-0120, Bilthoven
- Reddy KR, Delaune RD (2008) *The Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications*. CRC Press, Boca Raton, Florida. pp. 774.
- Remane A (1934) Die Brackwasserfauna. *Verhandlungen der Deutsche Zoologische Gesellschaft* 36:34- 74.
- Rengasamy P. (2010) Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Australian Journal of Soil Research*. 37:613-620.
- Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, Bondo Christensen P, Sloth NP (1999) Effects of salinity on NH<sub>4</sub><sup>+</sup> adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments. *Estuaries* 22(1):21-30
- Segers R. 1998. Methane production and methane consumption: a review of processes underlying wetland methane fluxes. *Biogeochemistry* 41: 23-51.
- Smolders AJP & Roelofs JGM (1993) Sulphate-mediated iron limitation and eutrophication in aquatic ecosystems. *Aquat. Bot.* 46: 247-253
- 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.
- 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, waterbodem en oppervlaktewater. *Landschap* 30(3): 145-153.
- Smolders AJP, Tomassen HBM, Lamers LPM, Lomans BP, Roelofs JGM (2002) Peat bog restoration by floating raft formation: the effects of groundwater and peat quality. *J Appl Ecol* 39:391-401
- Smolders AJP, Lamers LPM, Lucassen ECHET, van der Velde G, Roelofs JGM (2006) Internal eutrophication: how it works and what to do about it—a review. *Chem Ecol* 22:93-111
- Steketee (2007) SKB Cahier Zware Metalen, Quantes, Rijswijk
- Strack M, Kellner E, Waddington JM. 2005. Dynamics of biogenic gas bubbles in peat and their effects on peatland biogeochemistry, *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB1003, doi:10.1029/2004GB002330.
- Stofberg SF, Van Engelen J, Witte JPM, Van der Zee SEATM. 2016. Effects of root mat buoyancy and heterogeneity on floating fen hydrology, *Ecohydrology*. DOI: 10.1002/eco.1720
- Van Diggelen JMH, Lamers LPM, Van Dijk G, Schaafsma MJ, Roelofs JGM, Smolders AJP (2014) New insights into phosphorus mobilisation from sulphur-rich sediments: time-dependent effects of salinisation. *PLoS One* 9:e111106
- 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.
- Van Dijk G, Smolders AJP, Loeb R, Bout A, Roelofs JGM, Lamers LPM. 2015. Effects of salinization on nitrogen, phosphorus and carbon biogeochemistry of coastal freshwater wetlands; constant versus fluctuating salinity levels. *Biogeochemistry* 126: 71-84
- Van Dijk G, Nijp JJ, Metselaar K, Lamers LPM, Smolders AJP (2017) Salinity-induced increase of the hydraulic conductivity in the hyporheic zone of coastal wetlands, *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.11068

Formatted: German (Germany)

Formatted: English (United States)

Formatted: Dutch (Netherlands)

- 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.
- 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.
- Vizza, C, West WE, Jones SE, Hart, JA, Lamberti GA (2017) Regulators of coastal wetland methane production and responses to simulated global change. *Biogeosciences*, 14, 431-446
- Weston NB, Giblin AE, Banta GT, Hopkinson CS, Tucker J (2010) The effects of varying salinity on ammonium exchange in estuarine sediments of the Parker River, Massachusetts. *Estuar Coasts* 33:985-1003
- Weston NB, Dixon RE, Joye SB. 2006. Ramifications of increased salinity in tidal freshwater sediments: Geochemistry and microbial pathways of organic matter mineralization. *Journal of Geophysical Research* 111: G0100. doi:10.1029/2005JG000071.
- Weston NB, Vile MA, Neubauer SC, Velinsky DJ (2011) Accelerated microbial organic matter mineralization following salt-water intrusion into tidal freshwater marsh soils. *Biogeochemistry* 102:135-151
- Weston NB, Neubauer SC, Velinsky DJ, Vile MA (2014) Net ecosystem carbon exchange and the greenhouse gas balance of tidal marshes along an estuarine salinity gradient. *Biogeochemistry* 120: 163-189.



## Bijlagen

- **Bijlage 1** Bodemprofielen bodemboringen en locaties peilbuizen en ceramische cups in transecten.
- **Bijlage 2** Schematische dwarsdoorsnede van bemonsterde transecten
- **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** Analyse 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 door W+B
- **Bijlage 11** Tijdreeks analyse chemische concentraties in ceramische cups