

## Literatuurstudie naar de toepassing van zilt slib en zouttoevoeging op veen

Jeroen Pijlman, Joost Sleiderink, Joachim Deru, Maaïke van Agtmaal



Deze literatuurstudie is gefinancierd door:  
**provinsje fryslân**  
**provincie fryslân** 

© 2021 Louis Bolk Instituut

Literatuurstudie naar zilt slib en zouttoevoeging op veen.

Jeroen Pijlman, Joost W.M. Sleiderink, Joachim G.C. Deru,  
Maaike van Agtmaal

Publicatienummer 2021-016 LbD

25 pagina's

Deze publicatie is beschikbaar via

[www.louisbolk.nl/publicaties](http://www.louisbolk.nl/publicaties)

[www.louisbolk.nl](http://www.louisbolk.nl)

[info@louisbolk.nl](mailto:info@louisbolk.nl)

T 0343 523 860

Kosterijland 3-5

3981 AJ Bunnik

 @LouisBolk

Louis Bolk Instituut: Onderzoek en advies ter bevordering van  
duurzame landbouw, voeding en gezondheid

# Inhoud

<b>Inleiding</b>	<b>5</b>
<b>1 Wat is er bekend over uitspoeling van zout in veenbodems?</b>	<b>9</b>
<b>2 Hoe snel gaat het proces van zoutuitspoeling?</b>	<b>10</b>
<b>3 Wat is bekend over binding en uitwisseling tussen zouten en silt en lutumdeeltjes?</b>	<b>11</b>
<b>4 Heeft zoutstress invloed op de anaerobe microbiële gemeenschap?</b>	<b>12</b>
<b>5 Wat is bekend over effect van zout op afbraak in de anaerobe veenlaag?</b>	<b>12</b>
<b>6 Interfereert dit met de fenoloxidase?</b>	<b>13</b>
<b>7 Kan sulfaatreductie leiden tot een grotere afbraak van veen?</b>	<b>14</b>
<b>8 Wat is er bekend van het effect van zout op grasgroei?</b>	<b>15</b>
<b>9 Wat zijn eventuele negatieve effecten van magnesium en natrium op bodemstructuur</b>	<b>16</b>
<b>Conclusies</b>	<b>19</b>
<b>Referenties</b>	<b>22</b>



## Inleiding

In Nederland zijn grote gebieden met veengrond gedraineerd ten behoeve van landbouw. Door een verlaagd grondwaterpeil breekt langzaam de organische stof uit het veen in de bovengrond af en hebben we te maken met bodemdaling en CO<sub>2</sub>-emissie. Tot nu toe werden oplossingen vooral gezocht in (grond)waterpeilverhogingen en drainagemaatregelen. Een nieuwe onderzoeksrichting kijkt naar mogelijke bodemaanpassingen. Eén van deze mogelijke maatregelen is het verrijken van veen met een kleine hoeveelheid klei om zo de afbraak te remmen. Met deze maatregel ontstaat mogelijk een nieuw perspectief dat niet rechtstreeks aan (grond)waterbeheer is gekoppeld.

Eerste resultaten van laboratoriumproeven laten zien dat kleitoepassing op veen voor vermindering van veenafbraak hoopvol is: alle geteste kleisoorten geven verminderde afbraak en een deel van de kleisoorten geeft zelfs meer dan 50% minder veenafbraak. Echter, voordat er kan worden overgegaan tot grootschalige toepassing, moeten er nog een aantal vragen worden beantwoord over de werking van de afname in veenafbraak door klei: kunnen we de werkzaamheid voorspellen? Hoe lang houdt het remmende effect aan? Maar ook praktische vragen over veldtoepassing en logistiek spelen nog: Welke kleibronnen zijn beschikbaar? Zijn deze geschikt?

Een mogelijke bron van kleihoudend materiaal wat met name voor het Friese veenweidegebied relevant is, is slib uit de Waddenzee. Bij het gebruik van dit type slib is er niet alleen een effect te verwachten van de kleideeltjes maar ook van het (zee)zout (zie box 1) dat in het slib zit. Dit zout bestaat voornamelijk uit NaCl (+/- 70%), MgCl<sub>2</sub> (+/- 14%) en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (+/- 12%). Omdat deze stoffen invloed hebben op het bodemleven zouden deze zouten de werking van klei door de aanwezige zouten kunnen versterken of juist verzwakken.

### Definitie en samenstelling zilt slib

Het woord "slib" wordt door van Dale omschreven als "door water afgezette vaste stoffen" en wordt in verschillende betekenissen gebruikt: het kan zowel rioolslib als waterbodemslib betekenen. In dit onderzoek wordt met slib afgezet waterbodemmateriaal (sediment) uit de Waddenzee bedoeld.

Tabel 1: gegevens zilte slib en kleimonsters (op basis van droge stof)

herkomst	lutumgehalte	siltgehalte	zoutgehalte (kg/ha)	OS	pH
Harlingen vak VIII	44%	onbekend	onbekend	10,9	onbekend
Lauwersoog vak 1-3 boring 5	25%	onbekend	onbekend	9,3	onbekend
Lauwersoog bemestingswijzer	8%	39%	28469	6,1	8,1
Blankenburg traject	24%	38%	3535	4,4%	7,3

Van verschillende bronnen zijn de gegevens over zilt slib bij elkaar gezet; van waterbodemonderzoek in Harlingen en Lauwersoog als ook van een zilte kleiafzetting vanuit het Blankenburg traject. De lutumconcentratie wisselt per monstervak. In Harlingen is hoogste gehalte 44% en in Lauwersoog 25% . De organische stof zit bij beide locaties rond de 10%. De zoutconcentratie loopt sterk uiteen van 3,5 tot 9 g per kilo - .

### **Box 1. Oorsprong en samenstelling zout**

Er zijn twee typen zout te onderscheiden, zeezout en steenzout. Deze verschillen in hoe het wordt gewonnen, in samenstelling en in gebruik. Zeezout wordt gewonnen door indamping van zeewater en bevat naast NaCl (+/- 70%) ook andere zouten zoals MgCl<sub>2</sub> (+/- 14%) en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (+/- 12%). Zeezout is daarmee minder puur in NaCl dan steenzout en wordt meer voor voedingstoepassingen gebruikt. Steenzout, ook haliet of evaporiet genoemd, is gesteente gevormd door indamping. Deze zoutafzettingen zijn lang geleden gevormd. Steenzout bestaat voor >99% uit NaCl. Het verschil in samenstelling met zeezout komt door het vormingsproces: de zouten in zeewater verschillen in oplosbaarheid en slaan op een ander moment neer wanneer de zoutconcentratie toeneemt. Steenzout, ook wel vacuümzout genoemd door het winningsproces, wordt in Nederland op verschillende plekken gewonnen, onder andere in Overijssel en Friesland. Het wordt gebruikt voor de industrie, voor levensmiddelen en als strooizout.

### **Invloed van zout op bodemprocessen**

Zout heeft invloed op de bodem doordat het impact heeft op verschillende nutriënten cycli in de bodem, zoals de koolstof en de stikstofkringloop en op de activiteit en de samenstelling van de microbiële gemeenschap in de veenbodem. Over het algemeen remt verzilting de afbraak van de bodem, de aerobe afbraak nam bijvoorbeeld met ongeveer 50% af (Brouns et al., 2014). Dit effect was meetbaar onafhankelijk van o.a. bodem/veensoort en zoutgehalte (Brouns et al., 2014, Ardon, 2016, Liu 2019).

De remming van koolstofafbraak kan veroorzaakt worden door verschillende processen die zowel biologisch als chemisch van aard kunnen zijn of door een combinatie van beiden. Verzilting heeft naast een effect op de koolstofafbraak ook direct of indirect invloed op een heel breed scala aan processen die in de bodem spelen en die elk op zichzelf ook van invloed kunnen zijn op de nutriëntencyclus, bodemdaling en de emissie van broeikasgassen. Zo is er onderzoek gedaan naar de methaan emissie (lager bij hoger zoutgehalte (Brouns et al., 2014)), nitrificatie (mogelijke accumulatie van nitraat en ammoniak; Zhou et al., 2017) en de fosforcyclus (verhoogde fosforconcentraties). Door de veelheid aan processen die beïnvloed wordt door het zoutgehalte en de daarbij samenhangende chemische en fysische processen zoals een hogere ionen concentratie en uitwisseling, het chemisch evenwicht, aggregatie en adsorptie zijn lokale omstandigheden belangrijk voor het effect van de verzilting.

## Geschatte zoutaanvoer

Op dit moment lijkt een toepassing van ca. 2 cm verse droge stof kleibagger een hoeveelheid die significante effecten op veenoxidatie kan hebben. Bij de aanname dat het vochtgehalte 50% is, en het zoutgehalte van deze kleibagger of zilt slib gelijk is aan de gemiddelde concentratie van zeewater in de Waddenzee (ca. 30 g/kg) (van der Heide et al. 2006), is de zoutaanvoer per hectare te schatten (Tabel 2). Belangrijke vraag blijft echter hoe snel zout uit het slib in de bodem infiltreert, en hoe lang het in een bepaalde bodemlaag blijft zitten. Bij de inschatting van de bodemzoutconcentraties (gemaakt in Tabel 2) is de aanname gedaan dat het zout op een zeker moment grotendeels in de bovenste 20 cm van de bodem aanwezig is. Het is aannemelijk dat het zout vanuit het slib de bodem inspoelt als gevolg van neerslag, en langzaam verder diffundeert wanneer het lagen van bodemvocht bereikt. Wel kunnen zoutionen deels binden aan andere bodemdeeltjes. De mate en snelheid van zoutverspreiding in de bodem zullen hoogstwaarschijnlijk vooral worden beïnvloed door de concentratie van het zout, en door bodem- en weersomstandigheden.

Tabel 2. Geschatte aangebrachte hoeveelheid zout na het in één keer aanbrengen van 1 cm droge stof kleibagger per hectare met een zoutconcentratie van 30 g/kg, en theoretische bodemconcentraties bij de aanname dat al het zout voor een (korte) periode in de bovenste 20 cm van de bodem blijft.

Parameter	Eenheid	Waarde	Aannames	Molmassa, g/mol
lengte	m	100		
breedte	m	100		
Hoogte vers	cm	2	27% droge stof en 73% zeewater	
Hoogte na rijpen en indrogen	cm	0.43 – 0.86	dichtheid gerijpte klei 1700 kg / m <sup>3</sup> afhankelijk van vochtgehalte	
Hoeveelheid	m <sup>3</sup>	200		
Hoeveelheid	L	200000		
Waarvan zeewater	L	146000		
Totaal zout	kg	4380	30 g/L zeezout	
NaCl	kg	3066	70% massa van totaal zout	58.44
MgCl <sub>2</sub>	kg	613	14% massa van totaal zout	95.211
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	kg	526	12% massa van totaal zout	142.04
SO <sub>4</sub>	kg	355		96.06
S	kg	119		32.065
Cl	kg	2317		35.453
Hoogte teeltlaag	m	0.2		
Inhoud teeltlaag	m <sup>3</sup>	2000		
Totaal zout	g/L	2.2		
SO <sub>4</sub>	g/L	0.18		
S	g/L	0.06		
Cl	g/L	1.16		
Dichtheid veen	kg/L	0.5		
Inhoud teeltlaag	kg	1000000		
SO <sub>4</sub>	g/kg	0.36		
S	g/kg	0.12		
Cl	g/kg	2.32		

## Opzet literatuurstudie

Om het effect van toepassing van zilt zeelib en zout op veen in te kunnen schatten en goede experimenten te ontwerpen die deze maatregelen zouden kunnen testen, is in deze literatuurstudie de huidige kennis in kaart gebracht aan de hand van de volgende onderwerpen:

1. Wat is er bekend over uitspoeling van zout in veenbodems?
2. Hoe snel gaat het proces van zoutuitspoeling?
3. Wat is er bekend over binding en uitwisseling tussen zouten en silt en lutumdeeltjes?
4. Heeft zoutstress invloed op de anaerobe microbiële gemeenschap?
5. Wat is er bekend over effect van zout op afbraak in de anaerobe veenlaag?
6. Interfereert de aanwezigheid van zout met de fenoloxidase activiteit?
7. Kan sulfaatreductie leiden tot een grotere afbraak?
8. Wat is bekend van het effect van zout op grasgroei
9. Wat zijn eventuele negatieve effecten van magnesium en natrium op bodemstructuur

Dit ter aanscherping van de volgende hypothesen

- Hypothese 1: Zout heeft geen effect op afbraakprocessen in de aerobe veenlaag
- Hypothese 2: Slibdeeltjes kunnen de afbraak van veen remmen.
- Hypothese 3: Sulfaat uit zeezout kan dienen als alternatieve elektronenacceptor en daarmee zorgen voor een toename oxidatieve afbraak
- Hypothese 4: Zout kan zorgen voor zoutstress in de anaerobe microbiële gemeenschap en daarmee voor een vermindering van aerobe en anaerobe afbraak
- Hypothese 5: Het gras blijft ondanks een hogere zoutconcentratie productief
- Hypothese 6: De concentratie natrium en magnesium worden in een te lage dosering aangebracht om structuurproblemen te veroorzaken (knipklei verschijnselen) aan bodemstructuur



# 1 Wat is er bekend over uitspoeling van zout in veenbodems?

Uit Duits onderzoek op veenbodems met verschillende gradaties van decompositie blijkt dat verzilting effect heeft op verschillende kationen. Bijvoorbeeld  $K^+$  en  $Ca^{2+}$  geven snel na verzilting een piek in uitspoeling, maar dalen daarna naar de concentratie van de zoute oplossing waarmee het veen gespoeld werd. Voor  $Mg^{2+}$  verloopt de stijging veel minder snel en was de hoeveelheid na 28 dagen nog niet terug op het niveau van de inputoplossing (Gosch et al., 2019). Hieruit kan geconcludeerd worden dat de uitwisseling van  $Mg^{2+}$  met  $Na^+$  uit het zoute water minder snel verloopt dan de uitwisseling van  $Na^+$  met  $K^+$  en  $Ca^{2+}$ . Kalium en calcium zijn dus gevoeliger voor uitspoeling dan  $Mg^{2+}$ . Dit komt mogelijk ook door de verhouding van Mg en Ca in het zeewater. Verder bleek uit hetzelfde onderzoek dat verhoogde  $Na^+$  concentraties verantwoordelijk waren voor verhoogde concentraties van  $Mn^{2+}$  en  $Al^{3+}$  in het effluent. Verhoogde  $Na^+$  concentraties waren niet direct verantwoordelijk voor verhoogde Fe concentraties in het effluent. Verhoogde anaerobe reductie van  $Fe^{3+}$  waarbij  $Fe^{2+}$  vrijkomt kan hier ook voor gezorgd hebben. Als laatste vonden Gosch et al. (2019) dat verschillen in het vrijkomen van opgeloste stoffen groter waren tussen veenbodems met een verschillende graad van decompositie (waarschijnlijk veroorzaakt door zeer verschillende concentraties Fe) dan tussen de verschillende behandelingen met oplopende  $SO_4^{2-}$  concentraties.

Verhoging van de concentratie kationen kan ook voor een toename in de neerslag van DOC (dissolved organic carbon / opgeloste organische koolstof) zorgen, waarbij deze kationen, omkeerbaar, uit de oplossing verdwijnen (Chow et al., 2003). Tegelijkertijd zorgt dit voor de verlaging van de concentratie DOC. Veel onderzoek heeft laten zien dat zout de oplosbaarheid van DOC vermindert en daardoor leidt tot een verlaging van de uitspoeling van DOC uit veen (Kalbitz et al., 2000; Chow et al., 2003; Clark et al., 2011; Ardon et al., 2016; Tiemeyer et al., 2017; Liu en Lennartz, 2019). Een toename in zout kan ook leiden tot lage pH door kation uitwisseling van zouten met gebonden  $H^+$  ionen, wat de oplosbaarheid van DOC verder kan verlagen door stimulatie van precipitatie van DOC met ijzer (Tiemeyer et al., 2017). Daarnaast kan ook de coagulatie van humuszuren door verhoogde zoutconcentraties ervoor zorgen dat meer DOC vastgehouden wordt in de bodem (Chow et al., 2003). Andere studies vonden juist positieve correlatie tussen saliniteit en DOC-concentratie (Gosch et al., 2018, 2019), wellicht door verschillen in bodemchemische eigenschappen tussen verschillende veensoorten en decompositiegradaties.

Ook stikstofuitspoeling wordt beïnvloed door zout. Ion substitutie door toegevoegde zouten kan ook voor de verhoogde uitspoeling van  $NH_4^+$  zorgen in veen (Ardón et al., 2013; Brouns et al., 2014). Gosch et al. (2019) vonden dat niet  $NH_4^+$  maar organische stikstof de oorzaak was van de toegenomen totale opgeloste stikstof pool die zij waarnamen na toevoeging van zout aan veen.

Saliniteit, voornamelijk door verhoging van de concentratie  $\text{SO}_4^{2-}$  kan voor de mobilisatie van fosfaat zorgen, doordat sulfaat concurreert met fosfaat voor binding met ijzer (Brouns et al., 2014), hoewel een andere studie juist een verhoogde binding van fosfaat met ijzer veronderstelt als oorzaak voor een lagere fosfaatuitspoeling (Liu en Lennartz, 2019).

Een ander mechanisme waardoor zouten invloed kunnen hebben op uitspoeling is het verhogen van de hydraulische conductiviteit van de bodem. Zout water zorgt voor dilatatie van poriën in een veenbodem door het coaguleren en oprollen van humuszuren en verhoogt daarmee de snelheid waarmee water door de poriën stroomt (Comas and Slater, 2004, Kettridge and Binley, 2010, Ours et al., 1997). Dit vermindert de tijd voor uitwisselingsprocessen tussen water en bodem en vermindert daarom DOC-concentraties (Tiemeyer et al., 2017). De hydraulische conductiviteit is niet afhankelijk van saliniteit in andere studie (tot 3,5% NaCl) maar hing waarschijnlijk af van een afname in gasbubbel formatie door een afname in methaan productie, een toename in dispersie van bodemdeeltjes door het verhogen van de concentratie  $\text{Na}^+$  en/of van *bio-clogging* door biologische activiteit. De invloeden van deze processen kunnen verschillen per veentype (Gosch et al. 2018).

## 2 Hoe snel gaat het proces van zoutuitspoeling?

In de onderstaande figuur wordt de relatie tussen de hoeveelheid spoelwater en de fractie overgebleven zouten weergegeven voor veen (Qadir et al., 2000). Om de hoeveelheid zout tot 80% te verminderen in de bovenste 10 cm is er dus 20 cm spoelwater nodig. Dit is echter onder ideale omstandigheden. Klei- en veenbodems vertonen vaak hoge mate van preferente stroming waardoor het water niet evenredig door de bodem stroomt en de efficiëntie van zoutverwijdering afneemt. Daarnaast kan dispersie van aggregaten en het oplossen van voormalig geprecipiteerde zouten het zoutverwijderingsproces hinderen (Qadir et al, 2000). Zout dat uitspoelt uit een bodem met een hoog grondwaterniveau kan bij stijging hiervan ook de bodem weer hersalinieren (Qadir et al., 2000; Walter 2018).

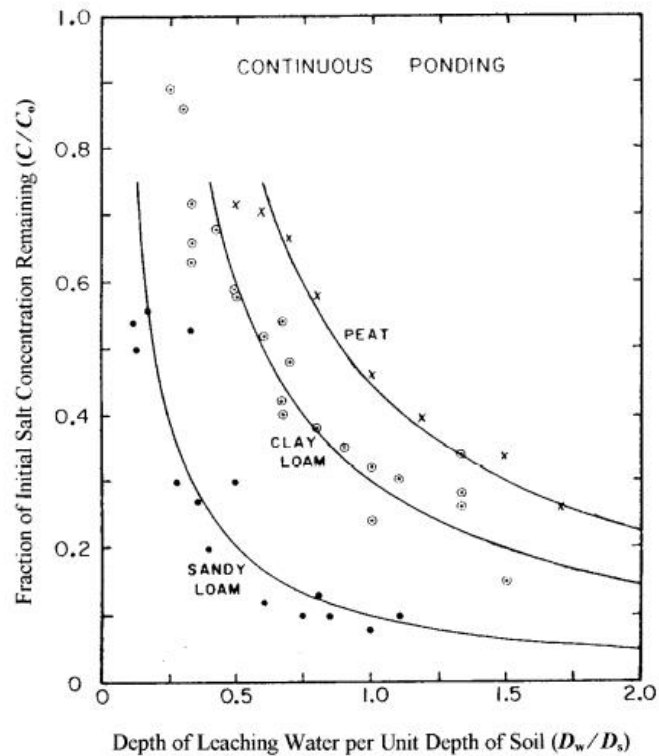


Figure 2. Depth of leaching water per unit depth of soil required to reclaim saline soils by continuous ponding (adapted from Hoffman, 1986, with permission from Springer-Verlag).

### 3 Wat is bekend over binding en uitwisseling tussen zouten en silt en lutumdeeltjes?

De verhoging van de saliniteit van een bodem zorgt ervoor dat  $\text{Na}^+$  ionen de plaats van  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{Mg}^{2+}$  op kleideeltjes innemen. Blootstelling aan zout water kan daarom effect hebben op de bodemstructuur. In het algemeen treedt dit effect alleen op na blootstelling aan zeer zout water, b.v. na inundatie met zeewater, maar gezien het zoutgehalte van bijvoorbeeld het Lauwersoogslib is dit toch iets om rekening mee te houden. In het proces van blootstelling aan zout water wordt het adsorptiecomplex van kleimineralen gedeeltelijk opgeladen met éénwaardige  $\text{Na}^+$ -ionen, ten koste van tweewaardige ionen, zoals  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{Mg}^{2+}$ . Doordat kationen bruggen vormen tussen kleideeltjes en hiermee de kleideeltjes aan elkaar binden, neemt de sterkte van de binding af onder invloed van de lagere lading van  $\text{Na}^+$  ten opzichte van  $\text{Ca}^{2+}$  en  $\text{Mg}^{2+}$ . (Van Dam et al., 2007). Daardoor worden de kleiplaatjes minder sterk tegen elkaar gebonden. Als vervolgens tijdens ontziltling de algehele ionenconcentratie in de bodemoplossing zakt, raken de kleiplaatjes nog verder los van elkaar (Van Dam et al. 2007). Of het effect van losraken van de kleideeltjes in veengrond verslemping geeft of juist kan bijdragen aan het vermindering van de veenafbraak is niet bekend en zal verder onderzocht moeten worden.

## **4 Heeft zoutstress invloed op de anaerobe microbiële gemeenschap?**

### **Zoutinvloeden op micro-organismen**

Zout in het bodemvocht heeft invloed op de anaerobe microbiële gemeenschap, omdat verzilting resulteert in osmotische stress en de aanwezigheid van toxische ionen.

Osmotische stress in het grondwater door de aanvoer van zouten betekent dat de concentratie van zouten in het bodemvocht buiten de cellen van micro-organismen hoger is, waardoor vocht uit de cellen van micro-organismen wordt gedreven. Als die stress te groot is, overleven micro-organismen dit niet. Micro-organismen kunnen zich in zekere mate aanpassen aan osmotische stress door de productie of opname van osmolyten, alleen kost die productie energie, waardoor de groei en activiteit van de micro-organismen lager wordt. Daarnaast wordt de activiteit van sommige enzymen, zoals fosfatase, geremd door verzilting. Een relatief lichte verzilting van het grondwater zal naast verminderde activiteit en omvang van de microbiële gemeenschap echter ook zorgen voor een verschuiving richting soorten die zich beter kunnen aanpassen aan zilte omstandigheden (Yang et al., 2018). Ook lijken schimmels gevoeliger te zijn voor verzilting dan bacteriën, waardoor het bacterie/schimmel ratio in verzilte bodems soms wat hoger is (Silva en Fay, 2012; Yan et al. 2015).

## **5 Wat is bekend over effect van zout op afbraak in de anaerobe veenlaag?**

### **Zoutinvloeden in de anaerobe laag blijven mogelijk beperkt**

In de anaerobe laag is in eerste instantie zuurstof de beperkende factor voor de omvang van de microbiële gemeenschap. In waterverzadigde omstandigheden is de zuurstof uitwisseling ongeveer 10.000 keer kleiner dan in de aanwezigheid van lucht (Yan et al. 2015). Om die reden is er veel minder microbieel leven in de anaerobe dan in de aerobe bodemlaag. Daarnaast is in een waterverzadigde bodem meer zout nodig om de saliniteit van het grondwater te verhogen, dan in een niet-waterverzadigde bodem. Wanneer het zout uit zilte slib de waterverzadigde, anaerobe laag bereikt (o.a. door inspoeling en diffusie), kan de zoutconcentratie in het bovenste bodemvocht toenemen. Echter, na verloop van tijd zal ook hier door concentratieverschillen met het diepere bodemvocht en eventuele bodemvochtstromen het zout diffunderen naar dieper of verder gelegen bodemvocht. In een aquariumproef naar verbraking van de veenbodem met brak water, is wel gevonden dat de bodem gedurende zoetwaterperiodes maar langzaam zout afstaat en dat pulsen van zout water op lange termijn leiden tot vergelijkbare zoutconcentraties in de bodem vergeleken met de continue aanwezigheid van zout in het water (Van Dijk et al., 2013). Toch is het een de vraag of bij aanwending van zilt slib vergelijkbare hoge zoutconcentraties in bodemvocht gehaald kunnen worden als in het slib zitten, gezien de verhouding van de hoeveelheid aan te brengen slib (ca. 2 cm vers materiaal) tot de omvang van de bodem en de hoeveelheid aanwezig bodemwater. Het lijkt in elk geval niet heel waarschijnlijk dat zoutconcentraties in het bodemvocht hoger zullen worden dan de concentraties van het zilte slib. Waarschijnlijk worden ze eerder lager. De verwachting is daarom

dat effecten op micro-organismen van zout uit zilt slib in de anaerobe laag vrij beperkt kunnen zijn. Rath et al. (2017) vonden bij bodemvochtconcentraties van 2.5 of 7.3 g/kg beperkte effecten op microbiële respiratie en groei. De effecten waren sterker bij een concentratie van 22 g/kg. Brouns et al. (2014) vond in een laboratoriumexperiment dat ongeveer 4 g/L zout in poriewater geen meetbaar effect had op anaerobe afbraak. Zij zagen in een 16 weken durend experiment geen tekens van aanpassingen van de microbiële gemeenschap aan de meer brakke omstandigheden, omdat de sulfaatconcentratie onder de drempelwaarde bleef waar bij sulfaatreducerende bacteriën competitief worden met methanogene bacteriën.

Samenvattend blijven zoutinvloeden in de anaerobe laag mogelijk beperkt. Een vraag is of verziltingseffecten op de bodem en micro-organismen een probleem of kans is. Omdat verzilting negatieve effecten kan hebben op de activiteit, samenstelling en omvang van de microbiële gemeenschap, kan verzilting ook de organische stof afbraak in de bodem remmen en daarmee ook de bodemdaling. De belangrijkste effecten hiervan zijn voornamelijk op de aerobe laag vastgesteld; zo vond Brouns et al. (2014) dat 4 g/L zout in poriewater de aerobe veenafbraak kon halveren. Ook Yang et al. (2018) vonden een afname van 47-55% in bodemrespiratie bij verzilting van 5-10 g/L. De vraag is of daarom of (lichte) verzilting, als bijkomend effect van het toepassen van zilt slib, juist positief of negatief is voor veenweiden. Verzilting zal indirect effect hebben op de natuurwaarden en landbouw. De effecten zijn echter mogelijk zeer beperkt, gezien de mate van verzilting die de toepassing van zilt slib met zich mee brengt.

## **6 Interfereert de aanwezigheid van zout met de fenoloxidase activiteit?**

De activiteit van de bodemmicroben wordt beïnvloed door omgevingseigenschappen en eigenschappen van het veen. Een veenbodem met een hoge C:N-verhouding en de aanwezigheid van fenolen heeft vaak een langzame afbraak. Fenolen zijn organische verbindingen die uit minimaal 1 aromatische ring bestaan. Deze ring maakt het moeilijk(er) afbreekbaar. Voorbeelden van fenolen zijn lignine, tannine en humuszuren. Behalve dat fenolen zelf al moeilijk afbreekbaar zijn, kunnen ze ook interfereren met de afbraak van andere makkelijker afbreekbare organische stof deeltjes, doordat ze binden aan de enzymen die sulfaat, fosfaat of koolstofverbindingen afbreken. Dit gebeurt voornamelijk onder zuurstofarme omstandigheden (Verhoeven et al., 1995; Sinsabaugh et al., 2010). De remmende werking van fenolen uit het veen wordt in de zuurstofrijke bodemlaag tenietgedaan door de productie van het enzym fenoloxidase, die fenolen afbreekt. Er zijn geen aanwijzingen dat verzilting direct effect heeft op fenoloxidase. Mogelijk zijn er wel indirecte effecten, door middel van verhoogde anaerobe reductie van  $Fe^{3+}$  waarbij  $Fe^{2+}$  vrijkomt (Gosch et al., 2019) bij hogere  $Na^+$  concentraties. Oxidatie van  $Fe^{2+}$  kan de activiteit van fenoloxidase verminderen en daarmee de afbraak van organische stof uit het veen (Van Bodegom et al., 2005; Sinsabaugh, 2010; Hall and Silver, 2013; Wang et al., 2017).

## 7 Kan sulfaatreductie leiden tot een grotere afbraak van veen?

Met het aanbrengen van zilt slib, wordt sulfaat ( $\text{SO}_4$ ) aangevoerd. Sulfaat kan onder anaerobe omstandigheden worden omgezet in waterstofsulfide ( $\text{H}_2\text{S}$ ) waarbij zuurstof wordt vrijgemaakt, en waarbij het zwavel als sulfide ( $\text{S}^{2-}$ ) kan oplossen in het bodemvocht of de bodem kan verlaten als gasvorm. De vrijgekomen zuurstof kan worden gebruikt om veen (organische stof) te oxideren. De omzetting van sulfaat heeft mogelijk ook een effect op de pH. Omdat sulfaatreductie plaats vindt onder anaerobe omstandigheden, vindt ook veenafbraak als gevolg van de aanwezigheid van sulfaat voornamelijk onder de grondwaterspiegel plaats, of eventueel in waterverzadigde delen van de bodem. Dit komt omdat zuurstof ( $\text{O}_2$ ) een sterkere oxidator is dan sulfaat, net als nitraat ( $\text{NO}_3^-$ ), mangaan ( $\text{MnO}_2$ ) en ijzeroxide ( $\text{FeO}_x$ ), waardoor deze oxidatoren eerst worden verbruikt als ze beschikbaar zijn. Pas als deze niet meer aanwezig zijn, wordt sulfaat verbruikt. In de veenweiden is er daarom doorgaans veenafbraak (oxidatie) in de aerobe en de anaerobe laag. In een 'reguliere' veenweide is die anaerobe afbraak – met behulp van alternatieve oxidatoren – naar schatting maximaal 10% van de totale afbraak (Hendriks en Van den Akker, 2012; Smolders et al. 2013). In het brakke Haringvlietmeer bijvoorbeeld, is sulfaat een belangrijke oxidator voor organische stof afbraak in het bodemsediment, na zuurstof en nitraat (Canavan et al. 2006).

Theoretisch kan sulfaat uit zilt slib dus voor veenafbraak (oxidatie) zorgen in het anaerobe deel van de bodem. Die afbraak zal waarschijnlijk echter relatief beperkt zijn ten opzichte van de andere oxidatieprocessen, doordat de zwavelaanvoer relatief beperkt is ten opzichte van andere bronnen (Tabel 2). Bij de aanname dat in een bodem met 10% anaerobe veenafbraak (maximale schatting) de extra sulfaataanvoer een rol in die afbraak gaat spelen (o.b.v. 16 kg S aanvoer per ha, Tabel 2), lijkt het voor de hand liggend dat dit maximaal één of enkele procenten van de totale (aerobe + anaerobe) veenafbraak zou kunnen zijn. Zo is de gemiddelde geschatte jaarlijkse sulfaatlevering van een veengrond al 50 kg per ha, dus grofweg 3x zoveel als de aanvoer via zilt slib.

Tabel 3. Schatting van de jaarlijkse zwavelaanvoer op een veenweidenperceel (naar Schils, 2016)

Bron van zwavel	Geschatte hoeveelheid (kg / ha)	Verhouding (%)
Slib <sup>1</sup>	12	9-10 %
Depositie	15	11-12 %
Sulfaat levering uit mineralisatie	50	36-41 %
Aanvoer via capillaire opstijging	20	15-16 %
Aanvoer via drijfmest	25-40	20-29 %

<sup>1</sup> Bij aanbrengen van 2 mm verse kleibagger / zilt slib per jaar

Sulfide, het bijproduct van sulfaatreductie, is giftig voor vele flora en fauna in de bodem. In de aanwezigheid van ijzer reageert sulfide tot ijzersulfide ( $\text{FeS}$ ) en pyriet ( $\text{FeS}_2$ ), waarbij ijzer gebonden fosfaat vrij kan komen afhankelijk van de Fe:S en de Fe:P ratio van de bodem. Daarom

kan sulfaatbelasting van de anaerobe bodem in bepaalde situaties leiden tot een verhoogde fosfaatuitspoeling. Dit kan mogelijk voorkomen worden door tegelijk extra ijzer aan te voeren (Smolders et al. 2013).

## **8 Wat is er bekend van het effect van zout op grasgroei?**

### **Effect zout**

Zout heeft een effect op grasgroei. Effecten kunnen plaatsvinden via zout uit het bodemvocht, dat door de wortels wordt opgenomen, en ook op via bladopname als gevolg van bijvoorbeeld zilt slib over het land spuiten. De mate van schade door zout wordt naast de aanwezige concentratie in de bodem of op het blad ook bepaald door het weer; er is meer schade bij droog en warm weer dan bij koel en vochtig weer (Maas, 1986). Dit komt omdat de planten bij hogere zoutconcentraties en daarmee een hogere osmotische druk minder goed water kunnen opnemen, een effect dat wordt uitvergroot bij droog en warm weer. Omdat de opname van zout via het blad alleen plaats vindt als het blad nat is, en het blad na beregenen enige tijd nat blijft, is (in elk geval bij beregening) één grote gift gunstiger dan meerdere kleine (van Dam et al. 2007).

### **Zouttolerantie bij bodemverzilting en beregening**

Het meeste onderzoek naar zouttolerantie en effecten van verzilting op bodem en gewas zijn vanuit het perspectief van verzilting van het grondwatersysteem gedaan. Een kleiner deel van het onderzoek is gedaan naar het beregenen met zout water, wat mogelijk vergelijkbaarder is het aanbrengen van zilt slib omdat in beide gevallen het zout in eerste instantie op de graszode wordt aangebracht. De route van aanbrengen heeft een effect op de zouttolerantie. Zo heeft gras volgens van Dam et al. (2007) een schadedrempel van 14 dS/m EC of 3606 mg Cl/L in het bodemvocht bij continue blootstelling. Voor gietwater zijn deze waarden 3.7 dS/m EC en 962 mg Cl/L. Volgens Venables en Wilkins (1978) wordt de wortelgroei van Engels raaigras bij zoutconcentraties van 50 mM NaCl nagenoeg niet beïnvloed en bij 100 mM NaCl beperkt beïnvloed. Dat is omgerekend ca. 2.9 tot 5.8 g/L, of ca. 1500 tot 3000 mg Cl/L. Ter vergelijking, Waddenzee water heeft een EC-waarde van ca. 50 dS/m en een chloride gehalte van ca. 15000 – 16000 mg/L. Met schadedrempel wordt de concentratie bedoeld vanaf wanneer het gewas schade ondervindt. Gietwater is water dat voor beregening of bevoeiing gebruikt kan worden, en dus op het gewas (blad) terecht komt. Puur zeewater bevat dus zoveel zout dat gras er schade van zal ondervinden.

### **Mogelijke effecten zilt slib**

Effecten van zout zijn dus groter naarmate concentraties verder stijgen, waarbij er een overgang is van een groeivertraging tot een punt waar het gras afsterft. Omdat zilt slib één of enkele keren per jaar wordt aangebracht, kan het zijn dat tijdelijke relatief hoge zoutconcentraties een effect hebben op de grasgroei, maar dat deze effecten kleiner worden of verdwijnen door inspoeling (en eventueel afspoeling van het blad) als gevolg van neerslag of bevoeien / beregenen met zoet water. Het zout uit zilt slib zou dus theoretisch problemen kunnen opleveren als het zout op het gras of in de bovenste centimeters van de bodem blijft zitten gedurende lange tijd, met name gedurende het groeiseizoen. Dit kan mogelijk relatief makkelijk voorkomen worden door het zilte slib vóór regenval aan te brengen, na het slib aanbrengen te beregenen met zoet water of het zilte slib buiten het groeiseizoen aan te brengen. De methode van aanbrengen, en de logistiek rondom het aanbrengen zijn daarmee ook van belang.

## **9 Wat zijn eventuele negatieve effecten van magnesium en natrium op bodemstructuur**

Onderzoek naar effecten van mineralen op de bodemstructuur is voornamelijk uitgevoerd met kleigronden. De meeste veengronden bevatten klei, waardoor soortgelijke effecten als met kleibodems kunnen worden verwacht, maar minder sterk afhankelijk van het kleigehalte. De kleistructuur met negatief geladen oppervlakten reageert verschillend op de positief geladen ionen  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  (kationen) omdat deze kationen verschillen in lading en grootte van de waterschil (hydration shell). De combinatie van de verschillende kationen bepaalt dan ook de aantrekkingskrachten tussen de kleiplaatjes. Wanneer de aantrekkingskracht laag is, voornamelijk bij  $\text{Na}^+$  en  $\text{K}^+$ , is de aggregaatvorming van kleideeltjes zwak en blijven ze langer in suspensie ('oplossing') in het bodemvocht. Daarmee ontstaat de eerdergenoemde slempvorming, en dit heeft een sterk negatieve invloed op de waterinfiltratiecapaciteit van de bodem, omdat een goede bodem-/poriënstructuur ontbreekt (Haynes en Naidu, 1998; Levy en Torrento, 1995; Marchuk et al., 2013). Door de wisselwerking van zoutconcentratie en de watermantel van de kationen aan een absorptiecomplex kan er bij verandering van de zoutconcentratie zwel of krimp optreden. Toediening van gips ( $\text{CaSO}_4$ ) wordt gezien als oplossing voor het vervangen van  $\text{Na}^+$  uit de kleiplaatjes door  $\text{Ca}^{2+}$  (Shainberg et al., 1989). Het effect van kationen op de samenhang van kleideeltjes neemt toe in de volgorde  $\text{Na} < \text{K} < \text{Mg} < \text{Ca}$  (Marchuk et al., 2013). In vergelijking met  $\text{Ca}^{2+}$  heeft  $\text{Mg}^{2+}$  dus een minder sterke aantrekkingskracht. Dit kan negatieve gevolgen hebben voor de bodemstructuur en waterinfiltratie (Curtin et al., 1994; Dontsova en Norton, 2002).



In 20 veengraslanden zijn aanwijzingen gevonden dat een hogere Ca-bezetting van de kleideeltjes gerelateerd was met meer kruimelstructuren, en dat een hogere Mg-bezetting juist samen ging met een lager vochtvasthoudend vermogen (Deru et al., 2019). In een vervolgonderzoek waarbij de graslanden zijn bemest met verschillende Ca- en Mg-houdende mineralen en de Ca:Mg verhouding sterk was beïnvloed werd echter geen duidelijk effect op de bodemstructuur, beworteling of waterinfiltratie gevonden (Deru et al., ingediend).



## Conclusies

Verziltting van veen kan gevolgen hebben voor allerlei processen in de bodem. Een veelheid aan processen wordt beïnvloed door het zoutgehalte en de daarmee samenhangende chemische en fysische processen zoals een hogere ionen concentratie en -uitwisseling, het chemisch evenwicht, beschikbaarheid van nutriënten, aggregatie en adsorptie. Daarnaast heeft verziltting ook een effect op de biologische processen. Toevoeging van zout of zilt slib met de zoutconcentratie zoals gevonden in het slibmonster uit Lauwersoog of de zilte klei uit het Blankenburg traject zal effect geven op de grasproductie, op de kation uitwisseling en daarmee op de uitspoeling en op de afbraak in de aerobe toplaag van het veen. Het effect zal echter door uitspoeling en aanpassing van het bodemleven met de tijd verminderen. De gevolgen voor de anaerobe afbraak en op de bodemstructuur zullen waarschijnlijk beperkt zijn. Doordat zout interacteert met lutum en in het proces van verziltten en uitspoelen kleiplaatjes van elkaar kunnen 'loskomen,' heeft verziltting mogelijk een effect op de werking van 'klei in veen', een bodemmaatregel die in onderzoek is om de veenafbraak te verminderen. De eerste labresultaten laten daar een remming van de veenafbraak zien van 50%. De werkingsmechanismen van de interactie tussen kleideeltjes en veen zijn echter nog onbekend, en of verziltting een versterkend effect heeft op de remmende werking van klei zou verder onderzocht moeten worden. Verziltting van veen kan indirect effect hebben op de natuurwaarden en landbouw. De effecten zijn echter waarschijnlijk beperkt, gezien de mate van verziltting die de toepassing van zilt slib met zich mee brengt.

Het hier gepresenteerde onderzoek heeft als doel om de kennis rondom de effecten van verziltting op de veenbodem en op de biochemische processen in het veen in kaart te brengen. Daarnaast is deze studie ook gebruikt om hypothesen rondom de werking van zilt slib en toevoegen van zout op veen aan te scherpen of te nuanceren.

- Hypothese 1: Zout heeft geen effect op afbraakprocessen in de aerobe veenlaag

Uit onderzoek van Brouns et al. (2014) en Yang et al. (2018) blijkt dat verziltting wel een effect heeft op de afbraak in de aerobe toplaag van het veen, de afbraak werd door zoutstressen tot 50% verminderd. Hoe duurzaam dit effect is, is echter de vraag. Door zoutuitspoeling en aanpassing van de microbiële gemeenschap is de verwachting dat dit effect zal afnemen.

- Hypothese 2: Slibdeeltjes kunnen de afbraak van veen remmen.

Lopend labonderzoek laat zien dat kleitoevoeging de afbraak van veen kan verminderen met 50%. De werking van zilt slib is nog niet onderzocht. Mogelijk versterkt zout het effect van kleitoevoeging. Door de interactie van zout met de kleideeltjes raken deze los, zodat het contactoppervlakte van de kleideeltjes groter wordt en er meer organische stof uit het veen gebonden wordt. Hierdoor wordt mogelijk het effect van de kleitoevoeging vergroot. Of deze interactie tussen zout en klei plaats vindt en een significant effect geeft op de veenafbraak zal verder onderzocht moeten worden.

- Hypothese 3: Sulfaat uit zeezout kan dienen als alternatieve elektronenacceptor en daarmee zorgen voor een toename oxidatieve afbraak.

Onder zuurstofloze omstandigheden kan sulfaat dienen als alternatieve elektronenacceptor en daarmee zorgen voor een toename oxidatieve afbraak. Dan kan mogelijk de afbraak snelheid toenemen in de anaerobe laag. De concentratie van sulfaat is hiervoor belangrijk: als deze over de drempelwaarde gaat waarbij sulfaatreducerende bacteriën competitief worden met methanogene bacteriën, neemt de methaanvorming af door verschuiving naar sulfaat-reductie. In de bodem ligt de anaerobe afbraak veel lager dan de afbraak bij aanwezigheid van zuurstof. De extra sulfaataanvoer door opbrengen van zilt slib lijkt slechts een beperkte rol te spelen. Zo is de gemiddelde geschatte jaarlijkse sulfaatlevering van een veengrond al 50 kg per ha, dus grofweg 4x zoveel als de aanvoer via zilt slib. Sulfaat uit zilt slib kan een rol spelen in de anaerobe afbraak. Het effect op de emissie van broeikasgassen lijkt echter zeer beperkt te zijn, omdat bij verhoogde afbraak via sulfaatreductie de methaanvorming afneemt en de bijdrage van sulfaatreductie op de totaalafbraak van veen zeer klein is.

- Hypothese 4: Zout kan zorgen voor zoutstress in de anaerobe microbiële gemeenschap en daarmee voor een vermindering van anaerobe afbraak zorgen.

Zout in het bodemvocht heeft invloed op de anaerobe microbiële gemeenschap, omdat verzilting resulteert in osmotische stress en de aanwezigheid van toxische ionen en in verschuiving van de microbiële gemeenschap. Als de zoutstress te groot overleeft namelijk een deel van microben het niet en zal een deel van de gemeenschap zich aanpassen aan osmotische stress door de productie of opname van osmolyten, ten koste van de groei en activiteit. Daarnaast wordt de activiteit van sommige enzymen, zoals fosfatase, geremd door verzilting. Echter, de verwachting is dat effecten op micro-organismen van zout uit zilt slib in de anaerobe laag vrij beperkt zullen zijn. Rath et al. (2017) vonden bij bodemvochtconcentraties van 2.5 of 7.3 g/kg beperkte effecten op microbiële respiratie en groei en Brouns et al. (2014) vonden in een laboratoriumexperiment dat ongeveer 4 g/L zout in poriewater geen meetbaar effect had op anaerobe afbraak. Dit betekent dat er een relatief hoge zoutconcentratie nodig is voor een effect op de afbraak. Deze concentratie zal in de praktijk weinig voor komen in de anaerobe veenlaag bij een dosering van 2 cm verse zilt slib.

- Hypothese 5: Het gras blijft ondanks een hogere zoutconcentratie productief

Ondanks het feit dat gras redelijk tolerant is voor zout, is er bij het opbrengen van zilt slib risico voor opbrengstderving. De drempelwaarde voor gewasschade ligt rond de 5g/L. Het is denkbaar dat bij opbrengen van zilt slib deze concentraties gehaald worden in de toplaag van het veen. De effecten van zout op de grasgroei zijn mede afhankelijk van de zoutconcentratie in het bodemvocht en lopen uiteen van groeivertraging tot aan het afsterven van het gras. Door de hogere zoutconcentratie heeft het gras moeite om zout op te nemen. Deze effecten worden kleiner of verdwijnen door inspoeling als gevolg van neerslag of bevoeien / beregenen

met zoet water. Ook kan opbrengstderving voorkomen worden door het zilte slib aan te brengen voor regen, door te beregenen met zoet water of het zilte slib buiten het groeiseizoen aan te brengen.

- Hypothese 6: De concentratie natrium en magnesium worden in een te lage dosering aangebracht om structuurproblemen te veroorzaken in de bodem.

Kleiplaatjes met negatief geladen oppervlakten reageren op de positief geladen kationen. Bij  $\text{Na}^+$  en  $\text{K}^+$ , is de aggregaat vorming van kleideeltjes zwak en blijven ze langer in suspensie in het bodemvocht waardoor er slompvorming kan optreden en de poriënstructuur van de bodem achteruit kan gaan. Waarschijnlijk spelen lokale omstandigheden hierbij een rol. Onderzoek naar de Ca:Mg verhouding in veengrond gaf geen eenduidig beeld. Gezien de kleine hoeveelheid aangebracht slib op een grote hoeveelheid veen zijn er weinig aanwijzingen dat natrium en magnesium uit slib structuurproblemen zullen geven in de bodem.



## Referenties

- Ardón, M., Morse, J. L., Colman, B. P., & Bernhardt, E. S. (2013). Drought-induced saltwater incursion leads to increased wetland nitrogen export. *Global change biology*, 19(10), 2976-2985.
- Ardón, M., Helton, A. M., & Bernhardt, E. S. (2016). Drought and saltwater incursion synergistically reduce dissolved organic carbon export from coastal freshwater wetlands. *Biogeochemistry*, 127(2-3), 411-426.
- Brouns, K., J. T. A. Verhoeven en M. M. Heffting, 2014. The effects of salinization on aerobic and anaerobic decomposition and mineralization in peat meadows: The roles of peat type and land use. *Journal of Environmental Management* 143, 44-53.
- Canavan, R.W., Slomp, C.P., Jourabchi, P., Van Cappellen, P., Laverman, A.M., van den Berg, G.A., 2006. Organic matter mineralization in sediment of a coastal freshwater lake and response to salinization. *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 2836-2855.
- Chow, A. T., Tanji, K. K., & Gao, S. (2003). Production of dissolved organic carbon (DOC) and trihalomethane (THM) precursor from peat soils. *Water research*, 37(18), 4475-4485.
- Clark, J. M., Van Der Heijden, G. M. F., Palmer, S. M., Chapman, P. J., & Bottrell, S. H. (2011). Variation in the sensitivity of DOC release between different organic soils following H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and sea-salt additions. *European Journal of Soil Science*, 62(2), 267-284.
- Comas, X., & Slater, L. (2004). Low-frequency electrical properties of peat. *Water Resources Research*, 40(12).
- Curtin, D., Steppuhn, H., Selles, F., 1994. Effects of Magnesium on Cation Selectivity and Structural Stability of Sodic Soils. *Soil Science Society of America Journal* 58, 730-737. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800030013x>
- Deru, J.G.C., Bloem, J., de Goede, R., Hoekstra, N., Keidel, H., Kloen, H., Nierop, A., Rutgers, M., Schouten, T., Van den Akker, J., Brussaard, L., Van Eekeren, N., 2019. Predicting soil N supply and yield parameters in peat grasslands. *Applied Soil Ecology* 134, 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.10.018>
- Dontsova, K.M., Norton, L.D., 2002. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Science* 167, 184-193. <https://doi.org/10.1097/00010694-200203000-00003>
- Gosch, L., Janssen, M., & Lennartz, B. (2018). Impact of the water salinity on the hydraulic conductivity of fen peat. *Hydrological Processes*, 32(9), 1214-1222.
- Gosch, L., Townsend, H., Kreuzburg, M., Janssen, M., Rezanezhad, F., & Lennartz, B. (2019). Sulfate mobility in fen peat and its impact on the release of solutes. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 189.
- Haynes, R.J., Naidu, R., 1998. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51, 123-137. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>
- Hendriks en van den Akker. 2012. Effecten van onderwaterdrains op de waterkwaliteit in veenweiden. *Alterra-rapport* 2354.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J. H., Michalzik, B., & Matzner, E. (2000). Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil science*, 165(4), 277-304.
- 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(18), 2629-2640.

Levy, G.J., Torrento, J.R., 1995. Clay dispersion and macroaggregate stability as affected by exchangeable potassium and sodium. *Soil Science* 160, 352–358.

Liu, H., & Lennartz, B. (2019). Short term effects of salinization on compound release from drained and restored coastal wetlands. *Water*, 11 (8), 1549.

Maas, E.V., 1986. Salt tolerance of Plants. *Applied Agricultural Research* 1, p. 12-26.

Ours, D. P., Siegel, D. I., & Glaser, P. H. (1997). Chemical dilation and the dual porosity of humified bog peat. *Journal of Hydrology*, 196(1-4), 348-360.

Marchuk, A., Rengasamy, P., McNeill, A., Kumar, A., Marchuk, A., Rengasamy, P., McNeill, A., Kumar, A., 2013. Nature of the clay–cation bond affects soil structure as verified by X-ray computed tomography. *Soil Res.* 50, 638–644. <https://doi.org/10.1071/SR12276>

Qadir, M., Ghafoor, A., & Murtaza, G. (2000). Amelioration strategies for saline soils: a review. *Land Degradation & Development*, 11(6), 501-521.

Rath, K. M., A. Maheshwari en J. Rousk. 2017. The impact of salinity on the microbial response to drying and rewetting in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 108, 17-26.

Shainberg, I., Sumner, M.E., Miller, W.P., Farina, M.P.W., Pavan, M.A., Fey, M.V., 1989. Use of Gypsum on Soils: A Review, in: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*, Vol 9. Springer, New York, NY, pp. 1–111. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3532-3_1)

Silva, C. en E. Fay. 2012. Effect of salinity on soil microorganisms. In: *Soil health and land use management*. ISBN 978-953-307-614-0.

Smolders, A., J. van Diggelen, J. Geurts, M. Poelen, J. Roelofs, E. Lucassen, L. Lamers. 2013. Waterkwaliteit in het veenweidegebied. De complexe interacties tussen oever, waterbodembodem en oppervlaktewater. *Landschap* 3-2013.

Schils, R. 2016. 30 vragen en antwoorden over zwavel. Wageningen Alterra brochure, <http://dx.doi.org/10.18174/392373>.

Tiemeyer, B., Pfaffner, N., Frank, S., Kaiser, K., & Fiedler, S. (2017). Pore water velocity and ionic strength effects on DOC release from peat-sand mixtures: Results from laboratory and field experiments. *Geoderma*, 296, 86-97.

Van Dam, A.M., O.A. Clevering, W. Voogt, Th.G.L. Aendekerk en M.P. van der Maas. 2007. Zouttolerantie van landbouwgewassen. Deelrapport Leven met zout water. Wageningen, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., publicatienr. 32 340194 00.

Van Dijk, G. , R. Loeb, A. Smolders & P.J. Westendorp, 2013. Verbrakking in voormalig brak laag Nederland: bedreiging of kans? *H2O-online* 28 maart 2013: 1-6.

Van der Heide, T., M.M. Van Katwijk en G.W. Geerling. 2006. Een verkenning van de groeimogelijkheden van ondergedoken Groot zeegras (*Zostera marina*) in de Nederlandse Waddenzee.

Venables, A. V. en D. A. Wilkins. 1978. Salt Tolerance in Pasture Grasses. *New Phytologist* 80, 613-622.

Wageningen Alterra brochure, <http://dx.doi.org/10.18174/392373>.

Walter, J.; Lück, E.; Bauriegel, A.; Facklam, M.; Zeitz, J. (2018). Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: A geophysical approach. *Geoderma*, 310(), 1–11. doi:10.1016/j.geoderma.2017.08.022

Yan, N, P. Marschner, W. Cao, C. Zuo en W. Qin. 2015. Influence of salinity and water content on soil microorganisms. *International Soil and Water Conservation Research* 3, 316-323.



Yang, J., Zhan, C., Li, Y., Zhou, D., Yu, Y., & Yu, J. (2018). Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China. *Science of the total environment*, 642, 946-953.

Zhou, Xue, et al. "Microbial communities in peatlands along a chronosequence on the Sanjiang Plain, China." *Scientific reports* 7.1 (2017): 1-11.