



De toekomst van voormalige brakwatervenen

De abiotische effecten van verhoogde zoutconcentraties

Het waterbeheer in laagvenen met een historische brakwaterinvloed is gericht op verzoeting. Hierdoor is de voor deze gebieden karakteristieke, unieke brakwaterflora de afgelopen decennia sterk afgenomen. In de toekomst worden verhoogde zoutconcentraties verwacht, maar er zijn maar weinig gegevens beschikbaar over de consequenties van stijgende zoutconcentraties. Dit artikel behandelt de abiotische effecten van verbrakking van voormalige brakwatervenen. Het blijkt dat verbrakking hier niet tot de gevreesde negatieve effecten leidt.

Een deel van de huidige Nederlandse laagvenen heeft tot in de twintigste eeuw sterk onder invloed gestaan van brak water. De Noord-Hollandse brakwatervenen zijn van oorsprong hoogveengebieden, die vanaf circa 2500 voor Christus tot in de Middeleeuwen (700 na Christus) grote delen van Noord-Holland bedekten (Vos, 2015). Zeespiegelstijging, overstromingen en de vorming van achtereenvolgens de Zuiderzee en het IJ zorgden voor erosie van hoogveen in Noord-Holland en voor een toename van de invloed van brak oppervlaktewater in de hoogveengebieden. Vanaf circa 1000 na Christus werden deze hoogvenen ontgonnen, ontwaterd en werd turf gewonnen, waarna het oppervlak daalde en opnieuw onder invloed van grond- en oppervlaktewater kwam te staan. In de nieuw ontstane wateren van het 'verdrinken' hoogveengebied ontwikkelde zich vervolgens laagveenmoeras. Deze zogenaamde brakwatervenen bezaten een brakwaterfauna en vegetatiesamenstelling die vrijwel nergens in Europa voorkomt (Van 't Veer, 2009). Menselijk ingrijpen heeft deze landschappen wezenlijk veranderd. Dat is goed zichtbaar in het huidige landschap: een lappendeken van intensief en extensief beheerde agrarische veenweidegraslanden, (veenmos)rietlanden, moerasbossen en verspreide lintdorpen. Enkele gebieden zoals Polder Westzaan, Ilperveld en Wormeren Jisperveld stonden nog vrij recent - tot de aanleg van de Afsluitdijk in 1932 - onder invloed van brakwater van

uit de voormalige Zuiderzee en het IJ. De chlorideconcentratie (Cl) van het oppervlaktewater varieerde tot 1932 tussen 2.500 en 4.000 mg Cl/l, met uitschieters tot 5.000 à 8.000 mg Cl/l. Na de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 is het polderwater steeds meer actief verzoet. De mate van verzoeting is gebiedsspecifiek. De verzoeting in Polder Westzaan trad vertraagd op door de aanvoer van brakwater vanuit het Noordzeekanaal via schutsluizen, terwijl de verzoeting van het Ilperveld veel sneller ging door de open verbinding met het Noordhollands Kanaal (Van Dijk et al., 2017d). Daarnaast komen er in midden Noord-Holland nog diverse droogmakerijen en onderbemalingen voor die onder invloed staan van brakke kwel (1.000 - >2.500 mg Cl/l). Doordat in de laatste vijftig jaar verzoeting en eutrofiëring vaak simultaan zijn verlopen is het moeilijk om met terugwerkende kracht de effecten van beide processen uit elkaar te halen (Van Dam, 2009; Van Dijk et al., 2017d). Ondanks de verzoeting en de sterke achteruitgang van de aan brakke condities aangepaste soorten zijn er verspreid nog relicten aanwezig van de oorspronkelijke kenmerkende brakwatervegetatie. Zoals vegetaties met brakke soorten als echt lepelblad (*Cochlearia officinalis* subsp. *officinalis*) en ruwe bies (*Schoenoplectus tabernaemontani*). Deze soorten maken dit verdrinken hoogveenlandschap uniek, zowel op nationale als op internationale schaal. Dit blijkt dan ook uit de vastgelegde

verbrakking
brakwater
eutrofiëring
broeikasgasemissies
waterdoorlatendheid

G. (Gijs) van Dijk
Onderzoekcentrum B-WARE
& Aquatische Ecologie en
Milieubiologie, Radboud
Universiteit, Postbus 6558,
6503 GB Nijmegen
g.vandijk@b-ware.eu

**A.J.P. (Alfons)
Smolders**
Onderzoekcentrum
B-WARE; Aquatische
Ecologie en Milieubiologie,
Radboud Universiteit

R. (Ron) van 't Veer
Ecologisch Adviesbureau
Van 't Veer & De Boer

R. (Roos) Loeb
Onderzoekcentrum B-WARE

L.P.M. (Leon) Lamers
Aquatische Ecologie
en Milieubiologie,
Radboud Universiteit &
Onderzoekcentrum B-WARE

vervolg auteurs:
volgende pagina

Foto: **Gijs van Dijk**.
Ilperveld, Noord-Holland.

J.J. (Jelmer) Nijp
Ecohydrologie groep,
KWR Watercycle Research
Institute

S. (Sarian) Kosten
Aquatische Ecologie en
Milieubiologie, Radboud
Universiteit

H.H. (Hein) van Kleef
Stichting Bargerveen

C. (Casper) Cusell
Witteveen + Bos

**P.J. (Piet-Jan)
Westendorp**
Onderzoekcentrum B-WARE

verplichtingen (Natura 2000) voor instandhouding en herstel van deze natuurwaarden (Habitatype ruigten en zomen (harig wilgenroosje): natte, soortenrijke ruigte van brakke omstandigheden of rivierdalen (H6430B), zie kader 1). Juist de aan brakke omstandigheden gebonden soorten van dit habitatype gaan de afgelopen decennia in rap tempo achteruit (Van 't Veer *et al.*, 2012; Van Dijk *et al.*, 2017d). Een belangrijke vraag daarbij is wat de effecten zullen zijn van verhoogde zoutconcentraties ('verbrakking') op abiotische processen (hydrologie, broeikasgasemissies) en standplaatsfactoren (nutriëntenbeschikbaarheid) en of dit zal bijdragen aan behoud en herstel van deze karakteristieke populaties. Deze vraag was de aanleiding voor onderzoek in het kader van het Kennisnetwerk Ontwikkeling en Beheer Natuurkwaliteit (OBN) (Antheunisse *et al.*, 2008). Dit artikel beschrijft experimenteel onderzoek naar deze effecten in voormalige brakwatervenen, met nadruk op processen in de waterbodem. Verwacht werd dat verbrakking van het oppervlaktewater o.a. zou leiden tot eutrofiëring en dat dit, mede door toevoer van sulfaat (SO_4^{2-}), de afbraak van organisch materiaal in de waterbodem en daarmee broeikasgasemissies zou verhogen (Antheunisse *et al.*, 2008).

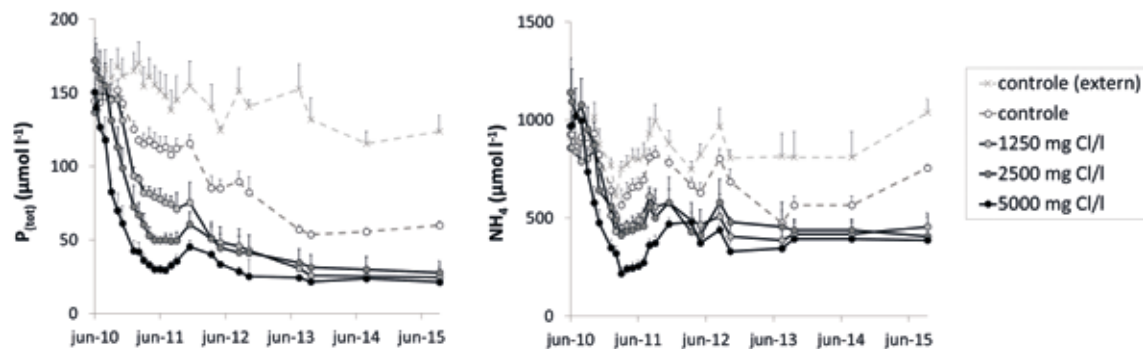
Het onderzoek

Om de effecten van verhoogde zoutconcentraties in het oppervlaktewater te bestuderen zijn meerdere laboratorium- en veldexperimenten uitgevoerd (Van Dijk, 2017a). In dit artikel worden de resultaten besproken van een zes jaar durend veldexperiment in het IJperveld, waarin een serie enclosures (bestaande uit een stalen frame met een cilindervormige zak van PVC, figuur 3) in een watergang is geplaatst. In deze enclosures zijn door middel van toevoeging van zeezout vier verschillende zoutgehalten gerealiseerd (alles in vier replica's): 600 mg

Cl/l (controle), 1.250 mg Cl/l, 2.500 mg Cl/l en 5.000 mg Cl/l. Daarnaast is een externe controle in de watergang zonder enclosure meegenomen. In alle behandelingen is het oppervlakte- en bodemporiewater gedurende zes jaar (2010-2016) intensief bemonsterd (met behulp van keramische cups) en chemisch geanalyseerd (Van Dijk *et al.*, 2019). In 2015 zijn de diffuse en ebullitieve (via gasbellen) uitstoot van koolstofdioxide (CO_2) en methaan (CH_4) vanuit deze enclosures bepaald, door middel van metingen in gesloten drijvende kamers en metingen van in flesvallen opgevangen bellen (Van Dijk *et al.*, 2017b). Aanvullend zijn in de controle en in de meest brakke enclosures eenmalig slug tests uitgevoerd om de doorlatendheid van de waterbodem te meten (Van Dijk *et al.*, 2017c).

Consequenties van verbrakking op biogeochemische processen in de waterbodem

Uit bovenstaand onderzoek is gebleken dat een verhoogde zoutconcentratie in het oppervlaktewater de biogeochemische processen in de waterbodem sterk beïnvloedt. Verbrakking leidt niet alleen tot een verhoogde zoutconcentratie (natrium (Na) en Cl), maar ook tot een sterke verhoging van andere elementen zoals SO_4^{2-} , kalium (K), calcium (Ca) en magnesium (Mg). De belangrijkste factor hierin is het proces van kationmobilisatie. Tijdens een verhoging van de zoutconcentratie in het oppervlaktewater krijgt ook de waterbodem te maken met sterk verhoogde kationconcentraties (o.a. Na en Ca), wat kan leiden tot de verdringing en mobilisatie van andere kationen van het bodemadsorptiecomplex in de waterbodem. De mate waarin dit gebeurt is afhankelijk van de bodemsamenstelling. Ook blijkt uit het onderzoek dat kationmobilisatie in voormalig brakke laagveenbodems kan leiden tot tijdelijke mobilisatie van ammonium (NH_4^+), wat via nitrificatie tot stikstofverliezen kan



Figuur 1 De gemiddelde nutriëntenconcentraties in het bodemporewater in de waterbodem in het veldexperiment met enclosures in het Ilperveld. Links de totaal fosforconcentratie, rechts de ammoniumconcentratie. De concentraties zijn weergegeven voor een periode van vijf jaar, waarbij vijf behandelingen zijn gevolgd: drie brakwater behandelingen in enclosures (1.250, 2.500 en 5.000 mg Cl/l) en twee controlebehandelingen (één buiten en één binnen de enclosures).

Figure 1 Average sediment porewater nutrient concentrations in the aquatic sediment in the enclosures of the field experiment in the Ilperveld. On the left the total phosphorus concentrations, on the right the total ammonium concentrations. Concentrations are presented for a period of five years, during which five treatments were followed; three salinity treatments in enclosures (1.250, 2.500 and 5.000 mg Cl/l) and two control treatments (one outside and one inside an enclosure).

leiden. Daarbij zorgt verdringing door Na voor een mobilisatie van Ca (en in kleiige bodems ook ijzer (Fe)), dat samen met het al in brakwater aanwezige Ca en bicarbonaat (HCO_3^-) kan neerslaan met fosfor (P). Hierdoor wordt een deel van het beschikbare P gebonden (Van Dijk et al., 2015). Dit onderzoek toont zo aan dat de nutriëntenbeschikbaarheid (zowel NH_4^+ als fosfaat (PO_4^{3-}) in voormalig brakke sulfaatrijke laagvenen significant daalt bij verhoogde zoutconcentraties (Van Dijk et al., 2019; zie figuur 1). De verwachting was dat er juist mobilisatie van P zou plaatsvinden, omdat verbrakking ook leidt tot een verhoogde sulfaatconcentratie wat op zijn beurt kan leiden tot sulfaatreductie en sulfideproductie (S^{2-}). S^{2-} kan zich goed aan Fe binden, waardoor het onder zuurstofrijke omstandigheden aan Fe gebonden P weer vrij kan komen. In voormalig brakke gebieden is echter het meeste Fe al aan S^{2-} gebonden. Hierdoor leidt een verdere verhoging van de sulfaatconcentraties als gevolg van verbrakking niet tot interne eutrofiëring. Dit in tegenstelling tot sulfaatarme laagvenen (zoals laagvenen zonder historische brakwaterinvloed) waar een verhoging van de sulfaatconcentratie als gevolg van verbrakking wel kan leiden tot een verhoogde fosfaatbeschikbaarheid (Lamers et al., 2002; Smolders et al.,

2006). Samenvattend blijkt verbrakking van het oppervlaktewater van verzoete voormalige brakwatervenen niet te leiden tot de verwachte stijging van de nutriëntenbeschikbaarheid. Op lange termijn leidt verbrakking in de onderzochte voormalige brakwatervenen juist tot een significante daling van de nutriëntenbeschikbaarheid, wat zelfs vijf jaar standhoudt (figuur 1; Van Dijk et al., 2019). Niet enkel een verhoogd zoutgehalte, juist ook fluctuering van de zoutgehalten in ruimte en tijd ('poikilohaline omstandigheden') is een kenmerk van brakke wateren. Uit een laboratoriumexperiment bleek dat fluctuerende zoutgehalten in de tijd in het oppervlaktewater uiteindelijk ook leiden tot een verhoogd zoutgehalte in de waterbodem, waardoor dezelfde effecten op NH_4^+ en PO_4^{3-} optreden als in permanent brakke wateren (Van Dijk et al., 2015).

Sterk gereduceerde methaanproductie

Wateren met een organische sliblaag of veenbodem kunnen grote hoeveelheden broeikasgassen, zoals CO_2 en CH_4 , uitstoten naar de atmosfeer (Kirschke et al., 2013). CH_4 , een 34 keer sterker broeikasgas dan CO_2 (Myhre et al., 2013) wordt vooral gevormd onder zuurstofloze omstandigheden, terwijl CO_2 ook onder

zuurstofrijke omstandigheden wordt geproduceerd. Hoewel de resultaten van eerdere studies niet eenduidig zijn, blijken veranderende zoutconcentraties de koolstofcyclus en broeikasgasemissies te beïnvloeden (Herbert *et al.*, 2015). Uit ons onderzoek is gebleken dat verbrakking van het oppervlaktewater de totale broeikasgasemissie naar de atmosfeer significant verlaagt (Van Dijk *et al.*, 2017b). Dit komt door de sterk geremde methaanproductie in de waterbodem als gevolg van de hoge sulfaatconcentratie in brakwater. Voor bacteriën is het namelijk gunstiger om organisch materiaal af te breken met behulp van sulfaatreductie dan door de vorming van CH_4 (Wetzel, 2001). De sulfaatreducerende bacteriën onderdrukken hierdoor de groei van de methaanvormende bacteriën die vervolgens ook nog eens hinder ondervinden van het tijdens sulfaatreductie geproduceerde toxische sulfide (S^{2-}). De emissie van CH_4 kan hierdoor bij verbrakking met wel 75-95% afnemen (figuur 2). In dit onderzoek leidde verbrakking op lange termijn (6 jaar) tot de combinatie van een verhoogde S^{2-} -concentratie in de waterbodem en een sterk gereduceerde CH_4 -emissie

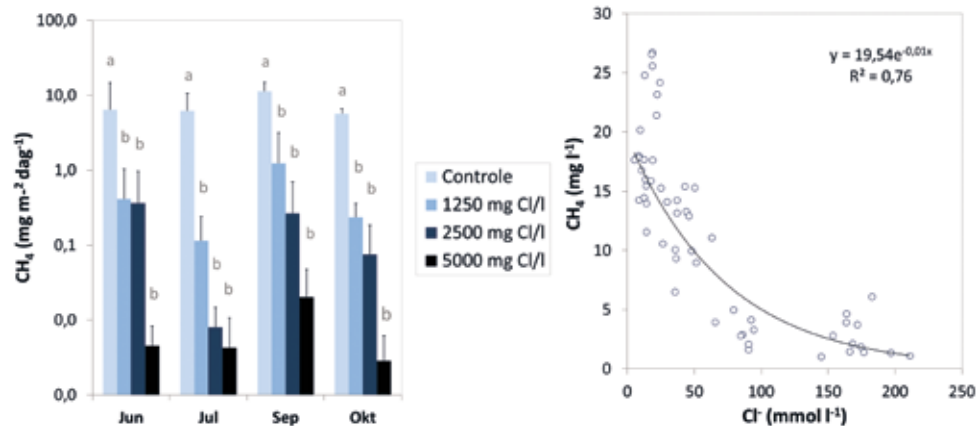
(zowel via diffusie als ebullitie). De emissie van CO_2 lijkt niet significant beïnvloed te worden door een verhoogde zoutconcentratie. Bij de interpretatie van deze uitkomsten moeten we niet vergeten dat dit specifiek geldt voor voormalige (reeds zwavelrijke) brakwatervenen. In zoete (zwavelarme) laagvenen kan de via verbrakking verhoogde sulfaatconcentratie juist leiden tot een verhoogde afbraak van organisch materiaal en verhoogde CO_2 -uitstoot (Smolders *et al.*, 2006). Verbrakking van voormalige brakwatervenen kan hiermee potentieel voordelen opleveren vanuit het perspectief van broeikasgasreductie.

Onverwachte hydrologische consequenties

Gedurende het veldexperiment met flexibele enclosures in het Ilperveld (figuur 3) bleek het volume van de enclosures met brakwater onverwacht af te nemen in de loop van de tijd. Uit nader onderzoek bleek dat een meerjarig verhoogde zoutconcentratie (tot 5.000 mg Cl/l) in het oppervlaktewater leidde tot een meer dan 2,5 keer hogere waterdoorlatendheid van de waterbodem, door een combinatie van biogeochemische en fy-

Figuur 2 Links: de gemiddelde methaanuitstoot via bellen (ebullitie) in de vier verschillende zoutbehandelingen op vier momenten in het jaar in het veldexperiment met enclosures in het Ilperveld (de y-as is weergegeven in logaritmische schaal). Rechts: de chlorideconcentratie in het poriewater in de waterbodem in hetzelfde veldexperiment, uitgezet tegen de methaanconcentratie in het poriewater in de waterbodem.

Figure 2 On the left the average ebullitive methane flux in four salinity treatments in the field experiment in the Ilperveld on four moments during the year (the y-axis is presented on a log scale). On the right the average sediment porewater chloride concentrations in the same experiment, plotted against the sediment porewater methane concentration.



sische processen (Van Dijk et al., 2017c; Van Dijk et al., 2018). Hierdoor was de infiltratie van oppervlaktewater in de waterbodem van de enclosures met brakwaterbehandelingen veel groter, wat resulteerde in een kleiner volume ten opzichte van de andere behandelingen (figuur 3). Door de sterk verlaagde productie van CH_4 als gevolg van verbrakking (zie hierboven) werden minder methaanbellen gevormd in de brakkere waterbodems. Van methaanbellen is bekend dat ze, met name in veenbodems, in de bodemporiën kunnen blijven hangen en zo het transport van water kunnen blokkeren (Strack et al., 2005). Een afname van methaanbellen kan dus de waterdoorlatendheid verhogen. De waterdoorlatendheid van veenbodems kan ook toenemen door fysische veranderingen in de structuur van de bodemporiën als indirect gevolg van een verhoogde zoutconcentratie (Hoag & Price, 1997; Ours et al., 1997). Zowel door fysische als biogeochemische processen kunnen brakkere condities dus leiden tot een verhoogde waterdoorlatendheid, en daarmee tot een toegenomen wegzijging naar diepere watervoerende pakketten. Hoewel in de huidige studie is aangetoond dat verhoogde zoutconcentraties in waterveebodems kunnen leiden tot een verhoogde waterdoorlatendheid, kunnen deze bevindingen niet zonder meer geëxtrapoléerd worden. Daarvoor is meer onderzoek nodig.

Conclusie

Uit het in dit artikel gepresenteerde onderzoek blijkt dat verbrakking grote gevolgen heeft voor de oppervlaktewater- en waterbodemkwaliteit, terwijl veel van de vooraf verwachte negatieve gevolgen, zoals een verhoogde veenafbraak en eutrofiëring, uitblijven. Verbrakking blijkt zelfs te leiden tot een verlaagde fosfaatbeschikbaarheid en een sterk verlaagde methaanemissie. Na verbrakking kan weer een milieu ontstaan waarin soor-



Figuur 3 Twee representatieve enclosures in het veldexperiment naar de effecten van verbrakking in het Ilperveld, links met controlebehandeling, rechts met de hoogste zoutbehandeling. Het is duidelijk te zien dat de inhoud van de rechter enclosure is afgenomen. Foto: Gijs van Dijk.

Figure 3 Two representative enclosures in the field experiment on the effects of surface water salinization in the Ilperveld, on the left a control treatment, on the right the highest salinity treatment. One can clearly see the reduced water content on the right enclosure. Photo: Gijs van Dijk.

ten met fysiologische aanpassingen voor sterk wisselende zoutconcentraties en verhoogde waterstofsulfideconcentraties bevoordeeld worden. Vervolgonderzoek is nodig om aan te tonen welke effecten dit kan hebben op behoud en herstel van soorten en soortgemeenschappen. Daarbij zal, naast de factor zout, ook aandacht besteed moeten worden aan andere belangrijke factoren zoals peil-, oever- en maaibeheer en de invloed van gebiedsvreemd water. Op het moment van schrijven wordt een veldexperiment uitgevoerd dat meer inzicht moet geven in de effecten van verbrakking en oeverbeheer op grotere schaal (sloot, oever en perceel) en op karakteristieke aan brakwater gebonden soorten, zoals echt lepelblad. Door de snelle achteruitgang van de overgebleven relictpopulaties (Van Dijk et al. 2017d) is de situatie urgent. Meer, ook praktisch toepasbare, kennis van deze processen is daarom van groot belang voor natuurbeheer en het behoud van deze soorten in de voormalige brakwatervenen.

Dit onderzoek werd gefinancierd vanuit het OBN-programma en de provincie Noord-Holland. De veldexperimenten zijn mogelijk gemaakt door inzet en hulp vanuit Landschap Noord-Holland en van vele collega's en studenten.

Figuur 4 Engels lepelblad (*Cochlearia officinalis* subsp. *anglica*). Foto: Mark van Veen.

Figure 4 English Scurvygrass (*Cochlearia officinalis* subsp. *anglica*). Photo: Mark van Veen.



Verbrakking van Polder Westzaan

Onder de lichtzoute omstandigheden in de veengebieden in het huidige Noord-Holland ontstond een brak systeem met bijzondere natuurwaarden. Deze waarden zijn erg zeldzaam in Europa en hebben hun zwaartepunt in Noord-Holland. Het gaat daarbij om verlanding, met ruwe bies als belangrijkste soort. We kunnen dan ook van 'veen-

mosbiezenlanden' spreken (Van 't Veer *et al.*, 2009), die bij de opgetreden verzoeting steeds meer zijn overgegaan in veenmosrietlanden (H7140B Overgangs- en trilvenen).

Ook zijn de brakke ruigten en zomen (habitattype ruigten en zomen (harig wilgenroosje): natte, soortenrijke ruigte van brakke omstandigheden of rivierdalen (H6430B)) langs waterlopen bijzonder door de aanwezigheid van brakke soorten als heemst (*Althaea officinalis*), (echte) zeebies (*Bolboschoenus maritimus*) en echt lepelblad. Nederland heeft een bijzondere verantwoordelijkheid voor deze gebieden, die ook tot uiting komt in de aanwijzing als Natura 2000 gebied.

Sinds de jaren zeventig van de vorige eeuw zijn de chloridegehalten van oppervlaktewateren in Noord-Holland sterk gedaald en verdwijnen de brakke soorten in rap tempo (Van Dijk *et al.*, 2017d). Van alle Noord-Hollandse laagveenmoerassen is Polder Westzaan het meest geschikt om deze waarden te behouden. Het gebied is via het Noordzeekanaal onder brakke invloed te brengen.

Polder Westzaan heeft een voorbeeldfunctie voor de oorspronkelijke brakwatervenen van Noord-Holland, daarom - én vanwege de Europese verplichting - is de provincie Noord-Holland vastbesloten om hier verbrakking tot stand te brengen. In OBN-kader wordt onderzoek gedaan naar de effecten van verbrakking op standplaatsfactoren en naar de meest geschikte herstelmaatregelen om de brakke waarden in de tussentijd te behouden.

Drs. R. (Robbert) de Ridder, Provincie Noord-Holland

Summary

The future of formerly brackish peatlands: effects of salinization

Gijs van Dijk, Alfons Smolders, Ron van 't Veer, Roos Loeb, Leon Lamers, Jelmer Nijp, Sarian Kosten, Hein van Kleef, Casper Cusell & Piet-Jan Westendorp

Salinization, brackish water, eutrophication, greenhouse gas emissions, hydraulic conductivity

The last decades, Dutch former brackish peatlands have been heavily influenced by fresh surface water. The de-

crease in salinity led to a decrease of brackish water dependent species and Natura 2000 habitat types. Re-salinization is currently considered. The present article summarizes studies on the effects of salinization on biogeochemical processes, hydrology. Salinization reduced in the long term phosphorus and ammonium concentrations in the benthic zone. Salinization increased sulfate reduction, which led to decreased methane emissions. The reduced gas content increased the hydraulic conductivity in the benthic zone.

Literatuur

- Antheunisse, A.M., W.C.E.P. Verberk, J.M. Schouwenars *et al.*, 2008.** OBN onderzoek: Preadvies laagveen-en zeekleilandschap -een systeemanalyse op landschapsniveau. Ede. Directie Kennis, Ministerie van LNV.
- Herbert E.R., P. Boon, A.J. Burgin *et al.*, 2015.** A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere* 6: (10) 206. dx.doi.org/10.1890/ES14-00534.1
- Hoag, R.S. & J.S. Price, 1997.** The effects of matrix diffusion on solute transport and retardation in undisturbed peat in laboratory columns. *Journal of Contaminant Hydrology* 28: 193–205.
- Kirschke, S., P. Bousquet, P. Ciais *et al.*, 2013.** Three decades of global methane sources and sinks. *Nature Geoscience* 6(10): 813-823.
- Lamers, L.P.M., S.J. Falla, E.M. Samborska *et al.*, 2002.** Factors controlling the extent of eutrophication and toxicity in sulfate-polluted freshwater wetlands. *Limnology and oceanography* 47 (2): 585-593.
- Lamers, L.P.M., J.M. van Schie, G. van Dijk *et al.*, 2018.** Waterkwaliteit en biodiversiteit in het laagveenlandschap. *Landschap* 35(2): 94-103
- Myhre G., D. Shindell, F. Bréon *et al.*, 2013.** Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Table 8: 714.*
- Ours, D.P., D.I. Siegel & P.H. Glaser, 1997.** Chemical dilation and the dual porosity of humified bog peat. *Journal of Hydrology* 196: 348–360.
- Smolders A.J.P., L.P.M. Lamers, E.C.H.E.T. Lucassen *et al.*, 2006.** Internal eutrophication: How it works and what to do about it - a review. *Chemistry and Ecology* 22(2): 93-111.
- Strack, M., E. Kellner, & J.M. Waddington, 2005.** Dynamics of biogenic gas bubbles in peat and their effects on peatland biogeochemistry. *Global Biogeochemical Cycles* 19(1). doi:10.1029/2004GB002330
- Van 't Veer, R., 2009.** Grasslands of brackish fen and of mesotrophic fen in Laag-Holland, The Netherlands. In: Veen, P., R. Jefferson, J. de Smidt & J van der Straaten (red.). *Grasslands in Europe -of high natural value.* KNNV: 122-133.
- Van 't Veer, R., T. Kisjes & N. Sminia, 2012.** *Natuuratlas Zaanstad. Jisp/ Zaansdam. Ecologisch Adviesbureau Van 't Veer & De Boer/ Stichting Natuur & Milieu Educatie -Zaanstreek.*
- Van Dam, H., 2009.** Evaluatie basismetnet waterkwaliteit Hollands Noorderkwartier: trendanalyse hydrobiologie, temperatuur en waterchemie 1982-2007. Amsterdam. Herman van Dam, Adviseur Water en Natuur, rapport 708.
- Van Dijk, G., 2017a.** Peatlands affected by biogeochemical stressors. Onderzoekcentrum B-WARE & Radboud Universiteit. Nijmegen. PhD-thesis.
- Van Dijk, G., S. Kosten, J.A.A. Stelzer *et al.*, 2017b.** Salinization decreases sediment carbon emissions: short- versus long term effects. In: Van Dijk, G., 2017. Peatlands affected by biogeochemical stressors. Onderzoekcentrum B-WARE & Radboud Universiteit. Nijmegen. PhD-thesis.
- Van Dijk, G., L.P.M. Lamers, R. Loeb *et al.*, 2019.** Salinization lowers nutrient availability in formerly brackish freshwater wetlands: unexpected results from a long-term field experiment. *Biogeochemistry* 143 (1): 67-83.
- Van Dijk, G., J.J. Nijp, K. Metselaar *et al.*, 2017c.** Salinity-induced increase of the hydraulic conductivity in the hyporheic zone of coastal wetlands. *Hydrological Processes* 31(4): 880-890. doi: 10.002/hyp.11068
- Van Dijk, G., J.J. Nijp, K. Metselaar *et al.*, 2018.** Hogere zoutconcentratie leidt tot een verhoogde waterdoorlatendheid van de waterbodem. *Stromingen* 31 (1): 43-57.
- Van Dijk, G., A.J.P. Smolders, R. Loeb *et al.*, 2015.** Effects of salinization on nitrogen, phosphorus and carbon biogeochemistry of coastal freshwater wetlands: constant versus fluctuating salinity levels. *Biogeochemistry* 126(1-2): 71-84:71. doi 10.1007/s10533-015-0140-1.
- Van Dijk, G., R. van 't Veer, H.H. van Kleef *et al.*, 2017d.** Verbrakking in het laagveenlandschap, fase III. VBNE Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren, rapport 2017/OBN219-LZ.
- Vos, P.C., 2015.** Origin of the Dutch coastal landscape: long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series. Utrecht University. PhD Thesis.
- Wetzel, R.G., 2001.** *Limnology: lake and river ecosystems.* San Diego. Elsevier.