



Ruben Goudriaan, Universiteit Utrecht

Perry de Louw, Deltares

Mark Kramer, Hoogheemraadschap van Rijnland

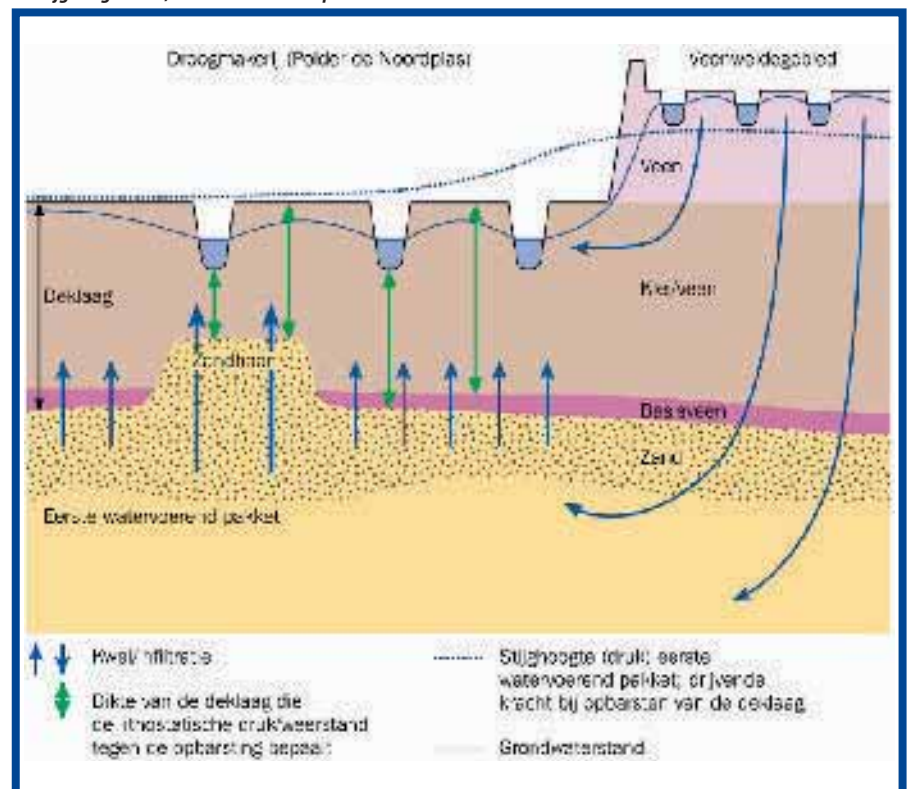
Lokaliseren van zoute wellen in de Haarlemmermeerpolder

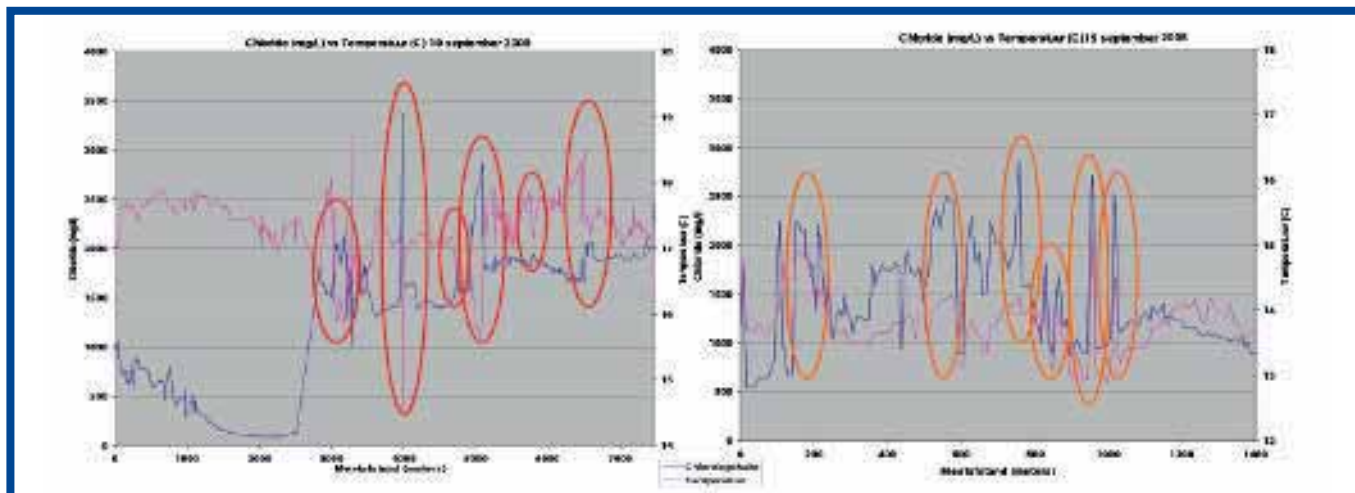
Uit uitgebreid onderzoek in Polder de Noordplas is gebleken dat wellen voor meer dan 60 procent bijdragen aan de verzilting van het oppervlaktewater¹⁾. Wellen zijn pijpvormige gaten in de Holocene deklaag waardoor water en soms ook zand vanuit het eerste watervoerend pakket met grote snelheid naar het oppervlak stroomt. Door de grote snelheid trekken ze dieper en daardoor zouter grondwater aan^{2), 3)}. De combinatie van hoge fluxen en hoge zoutgehalten leidt, ondanks het geringe oppervlak van wellen, tot hoge zoutbelastingen in het oppervlaktewater. In Polder de Noordplas zijn wellen in kaart gebracht door middel van veldobservaties en interviews met boeren. Op deze manier worden alleen wellen gekarteerd die met het oog zichtbaar zijn door bijvoorbeeld opborrelend water, zand en methaangas, uitgezakte slootkanten en zandvulkaantjes. Veel grote wellen zitten in de diepere en bredere watergangen en zijn alleen door middel van temperatuur of geleidbaarheidsmetingen op te sporen. In de Haarlemmermeerpolder is een nieuwe techniek succesvol toegepast voor het karteren van wellen in de diepere, bevaarbare watergangen. In dit artikel bespreken we de methodiek, de resultaten en houden we nog enkele andere kansrijke methoden tegen het licht.

Een wel bestaat vaak uit meerdere kanalen van één tot tien centimeter dikte. Door deze kanalen vindt versneld transport van (zout) water uit het eerste watervoerend pakket naar het oppervlaktewater plaats. Wellen komen met name voor in de diepe droogmakerijen en langs rivierdijken met een stijghoogte in het eerste watervoerende pakket die vaak boven maaiveld uitkomt. Het voorkomen van wellen hangt samen met de verhouding tussen lithostatische druk en kweldruk. Opbarsting van de deklaag treedt op wanneer deze verhouding kleiner is dan 1,1²⁾.

Kweldruk is het verschil tussen de stijghoogte van het water in het eerste watervoerende pakket en de hoogte van de onderkant van de deklaag maal het volumiek gewicht van water (10 kN/m^3). De lithostatische druk is het tegenwicht van deze kweldruk en bestaat uit het gewicht van de deklaag. Het gewicht van de deklaag is de som van de verschillende pakketdikten maal het verzadigd volumiek gewicht van de betreffende grondsoort. In watergangen is de lithostatische druk lager en bestaat een verhoogd risico op opbarsting ten opzichte van het omliggende land. Wellen worden dan ook voornamelijk in en rondom sloten aangetroffen^{4), 5)}. Aan de rand van een polder is een verhoogd opbarstingsrisico, doordat de stijghoogte in het eerste water-

Afb. 1: Kwel en kans op opbarsting van de deklaag (verhouding tussen de lithostatische druk van de deklaag en de stijghoogtedruk) in Polder de Noordplas^{2), 3)}.





Afb. 2: Het identificeren van wellocaties (met rood omcirkeld, links): een sprong in het chloridengehalte (mg/l) en een gelijktijdige daling in temperatuur (°C). Ander-soortige chloridenbronnen (met oranje omcirkelt, rechts) worden gekenmerkt door een sprong in het chloridengehalte, maar ook een sprong in temperatuur.

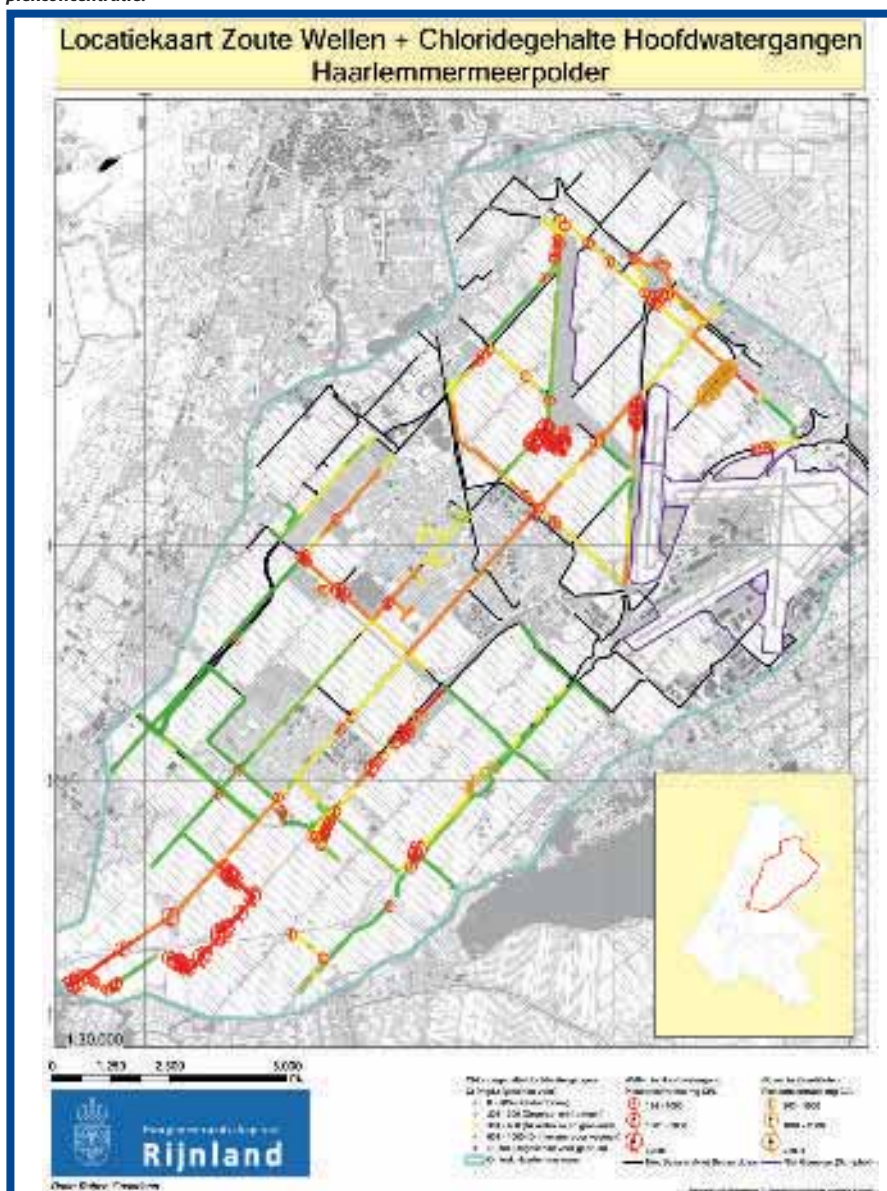
voerende pakket (kweldruk) hoger is dan in het midden van de polder (zie afbeelding 1).

De volgende (morfologische) kenmerken kunnen met het voorkomen van wellen

samenhangen: uitstroombaten, ingezakte oevers, het voorkomen van bacterielagen op het water, het voorkomen van zandvulkanen, kleurveranderingen in het water en slootkanten door neerslaan van ijzeroxides

en zichtbare (zout)aantasting van planten. Na langdurige vrieskou kunnen ook gaten in het ijs op wellen duiden. Wellen hebben namelijk een jaarconstante temperatuur van ongeveer 11°C. Daarnaast zijn wellen vaak zouter dan de nabije diffuse kwel als gevolg van *upconing* van dieper, zouter grondwater door de hoge en geconcentreerde waterfluxen in de wellen.

Afb. 3: De wellenkaart van de Haarlemmermeer. De indicatie van welgrootte is gebaseerd op de gemeten piekconcentratie.



Meetmethode

De metingen vonden plaats in de bevaarbare hoofdwatervgangen van de Haarlemmermeerpolder. De vaarsnelheid bedroeg vijf kilometer of minder per uur, aangezien dan geen verstoringen in de metingen plaatsvonden (wervelingen/menging). De metingen zijn al varende verricht met behulp van een EC-diver. Deze meet het elektrisch geleidend vermogen (gecorrigeerd naar een watertemperatuur van 25°C), de temperatuur en de waterdruk. De meetfrequentie bedroeg tien seconden, evenals de plaatsbepaling door het aan de EC-diver gekoppelde GPS-systeem. De EC-diver werd op een constante diepte onder de boot gehangen. Uit metingen in het oppervlaktewater blijkt dat het zoutgehalte toeneemt met de diepte. Op deze manier is in 29 dagen 200 km hoofdwatervgang in kaart gebracht. De gemeten EC-waarden zijn met behulp van de onderstaande formule omgezet naar chloridengehalte. Deze formule is gevalideerd door voor enkele locaties gemeten chloridengehaltes te vergelijken met de berekende.

$$EC_{25} \text{ (mS/cm)} = 0,003299 \times \text{mg Cl/liter} + 0,73 \text{ mS/cm}$$

De EC- en temperatuurmetingen zijn per dag uitgezet in een grafiek tegen het aantal gevaren meters. Het is belangrijk per dag te kijken, omdat de meetomstandigheden sterk kunnen variëren door bijmenging van neerslagwater, gemaalactiviteit, stromingsrichting- en snelheid van het oppervlaktewater. Indien de gemalen uitstaan, hoort zich zout op bij de wellen, wat een hogere concentratie geeft. De metingen zijn momentopnames. Een indicatie van de welgrootte wordt hierom enkel gebaseerd op de gemeten piekconcentratie. Het is

belangrijk om de metingen óf middenin de winter óf middenin de zomer uit te voeren. Op die momenten is het verschil tussen de oppervlaktewatertemperatuur en de temperatuur van het water in de wellen maximaal. In de zomer is het welwater kouder dan het oppervlaktewater, in de winter warmer. De metingen in de Haarlemmermeer vonden in de zomer plaats. De zoute wellen zijn visueel geïdentificeerd door pieken in chloridengehalten met simultaan lagere temperaturen uit de grafieken te extraheren. Het welwater heeft namelijk een hoger chloridengehalte dan het oppervlaktewater en kent een constante temperatuur van ongeveer 11,5°C versus een hogere oppervlaktewatertemperatuur (in de zomer).

Resultaten

Uit de grafieken zijn wellen gelokaliseerd. De meeste wellocaties zijn te onderscheiden door de gelijktijdige piek in chloridengehalte en daling van de watertemperatuur. Sommige grafieken tonen gelijktijdige stijgingen van chloridengehalte en watertemperatuur in de hoofdwatgang (zie afbeelding 2).

Dit wordt verklaard door instroming van welrijke kavelsloten. Het opgekwalde water in deze ondiepe sloten wordt tijdens stroming naar de hoofdwatgang verwarmd door de zon. Vele uitstroombanden van wellen in de slootkanten van deze sloten waren met het oog zichtbaar, terwijl de wellen in de (diepere) hoofdwatgangen niet zichtbaar zijn.

De vorm van de chloridenpieken hangt samen met het voorkomen van stroming en de grootte van de wel. Zonder stroming geven kleine wellen één steile piek als gevolg van ophoping van het welwater. Grote wellen beïnvloeden een groter gebied, waardoor de chloridenpiek breder is. Met stroming worden de pieken breder en afgevlakt, doordat het welwater wordt weggevoerd en menging plaatsvindt. Uit de metingen is een kaart gemaakt van het chloridengehalte van de bevaarbare watgangen in de Haarlemmermeerpolder. De geïdentificeerde wellen (rood) en locaties waar zoute kavelsloten de hoofdwatgang instromen, (bruin) zijn hierop weergegeven (zie afbeelding 3). De methode geeft ook een indicatie van de grootte van de wel op basis van piekconcentratie.

Een deel van het zuiden van de Haarlemmermeer kent veel wellen. De Algemene Hoogtekaart Nederland (maaielddoogte) toont dat dit welrijke gebied ongeveer een meter lager ligt dan de omgeving. Een dunnere deklaag leidt tot een lagere lithostatische druk en daarmee een hoger opbarstingsrisico. De stijghoogte is in dit deel van de polder relatief hoog, namelijk één tot twee meter boven maaiveld. Hierdoor zijn ook enkele wellen op het land ontstaan. In het midden van de Haarlemmermeer ligt in de ondergrond een oude getijdegeul³⁾. Deze bestaat uit een dik zandpakket met een maximale dikte van ongeveer 20 meter en naar het oosten toe aflopend in dikte. Opvallend is het voorkomen van wellen op de uitlopers van deze geul en het ontbreken

van wellen op de bulk van de geul. Het voorkomen van wellen op de uitlopers van de geul komt door de verlaging van de lithostatische druk boven de zandbanen (zie afbeelding 1). Het ontbreken van wellen op de bulk van de geul wordt verklaard door een afname van de kweldruk. Grondwater oefent opwaartse (kwel)druk uit op de grondlagen direct boven de zandbaan. Door de afwezigheid van klei treden hoge diffuse kwelfluxen op in de oude geul, waardoor de kweldruk daar wordt verlaagd en de kans op opbarsting afneemt.

De verlaging van de kweldruk is het grootst in het midden van de geul en neemt af naar de randen van de geul. De kweldruk, in combinatie met de afname van lithostatische druk, is aan de randen groot genoeg om wellen te doen ontstaan. Niet alleen rond deze getijdegeul maar ook in andere gebieden in de Haarlemmermeer en in andere droogmakerijen^{1,2)} blijkt de relatie tussen het voorkomen van zand in de ondergrond en wellen.

Overige methoden

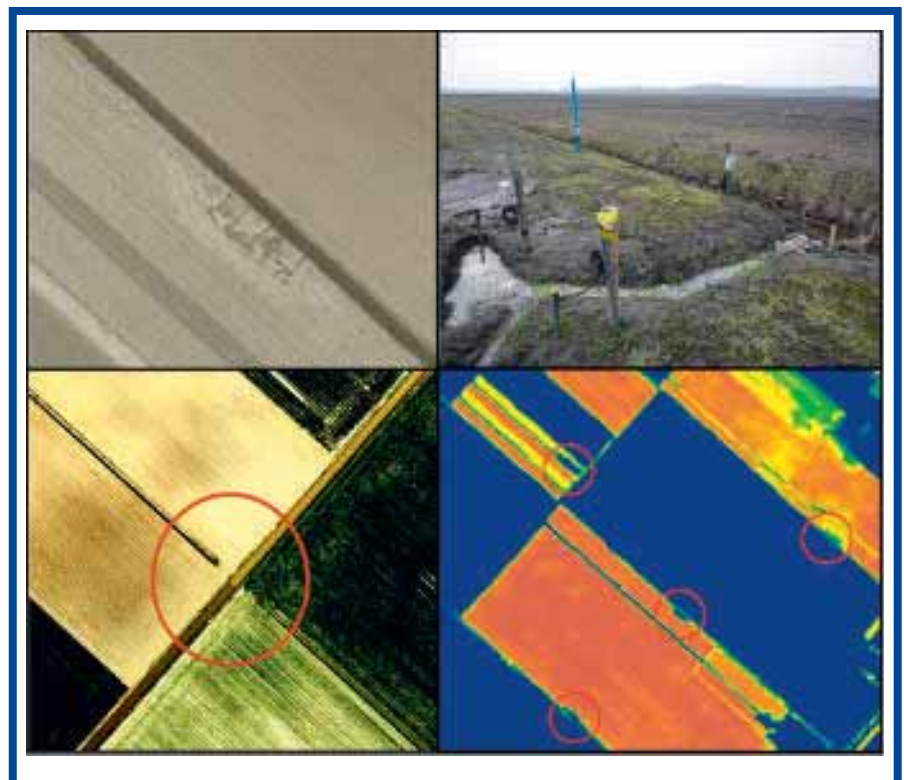
De gebruikte egv-routing is een betrouwbare maar intensieve methode voor het opsporen van wellen. Er zijn andere informatiebronnen beschikbaar die complementair zijn of mogelijk de veldtijd verkorten. In dit kader is gekeken naar het nut van luchtfoto's, thermaal infraroodbeelden (TIR) en satellietbeelden (NDVI) voor het verbeteren van de methodiek.

Op de luchtfoto's zijn grote wellen op land goed zichtbaar. Door verhoging van het contrast zijn ook kleurveranderingen door ijzeroxiden in het water te zien. IJzerrijk

grondwater komt door kwel naar boven. De opgeloste ijzerverbindingen in het kwelwater oxideren zodra het water met de lucht in aanraking komt. Deze ijzeroxiden geven het water en de slootkanten een rode gloed. Ook kunnen op deze manier de invloeden van kavelsloten duidelijk worden (zie afbeelding 4). De grens tussen het instromen van het ijzerrijke water vanuit de kavelsloten in de hoofdwatgang is duidelijk waarneembaar. Hierbij moet aangemerkt worden dat deze verkleuring niet altijd zichtbaar is bij het voorkomen van wellen.

Met thermaal infraroodbeelden zijn wellen te identificeren op basis van hun afwijkende temperatuur. De sloten kunnen worden gefilmd met een speciale camera die warmtestraling registreert. De thermaal infraroodbeelden kunnen verkregen worden door een (onbemande) helikopter of vliegtuig. Deze methode is succesvol getest voor een proeflocatie in Polder de Noordplas. Een voordeel van deze techniek is dat een precies beeld ontstaat van de plekken waar water met een afwijkende temperatuur opwelt (de beelden moeten dus ook óf in de zomer óf in de winter gemaakt worden, wanneer sprake is van een maximaal temperatuurverschil tussen het oppervlaktewater en het water in de wellen). Een groot nadeel is dat alleen het wateroppervlak in beeld wordt gebracht met de TIR-camera. Wellen in diepe watgangen waarbij het temperatuureffect niet doordringt tot aan het oppervlak, kunnen waarschijnlijk niet worden waargenomen. Kroos en algen kunnen leiden tot verstoringen in de meetresultaten. Het gebruik van satellietbeelden is gebaseerd op de gezondheid van de vegetatie. NDVI is

Afb. 4: Linksboven is de wel goed zichtbaar. Rechtsboven is de wel op het land te zien. Linksonder welrijke kavelsloten die ijzeroxiderijk water naar de hoofdwatgangen voeren. Door contrastverhoging is deze verkleuring duidelijk zichtbaar. Rechtsonder zijn wellen (rode cirkels) op land te zien door het gebrek aan gewasgroei.



een verhouding tussen reflectie van rood en nabij-infrarood licht.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$$

(NIR = nabij-infrarood, R = rood)

Er moet gebruik gemaakt worden van satellietbeelden uit het groeiseizoen. Gezonde planten hebben een hoge reflectie in nabij-infrarood en een lage in het rood. Ongezondere planten hebben een lagere reflectie in nabij-infrarood en een hogere in het rood. De bekende wellen op land en hun effect op de vegetatie is duidelijk zichtbaar op het NDVI-beeld. Rood is een hoge NDVI, blauw een lage. De invloed van wellen op de vegetatiegroei is duidelijk (zie afbeelding 4).

Er zijn ook gebieden waar de biomassa over een groter gebied is aangetast. Deze schade is waarschijnlijk te wijten aan een combinatie van verzadiging van de bodem met water en zoutschade. In de bodem zijn alle poriën gevuld met water. Hierdoor vindt verstikking van het wortelsysteem van de plant plaats. Een andere verklaring kan zijn dat het land daar te nat is om te bewerken met zware machines. Wellen in watergangen zijn niet zichtbaar op het satellietbeeld.

Conclusie

Zoute wellen in diepe watergangen in de Haarlemmermeerpolder zijn succesvol gekarteerd met behulp van een EGV- en temperatuurrouting per boot, gekoppeld aan

een GPS-systeem. Pieken in geleidbaarheid en pieken of juist dalingen in de temperatuur geven duidelijk de locatie van een wel aan en geven een indicatie over de grootte van de wel. Belangrijk is de invloed van de omstandigheden op de meetwaarden, zoals gemaalactiviteit, stromingsrichting, weersomstandigheden, diepte watergang. In de Haarlemmermeer komen veel grote wellen voor (79 gekarteerd met een piekconcentratie van 1000 mg of meer Cl⁻/l) en vormen waarschijnlijk, evenals in Polder de Noordplas, de dominante verziltingbron. De gekarteerde wellen zijn hoofdzakelijk aange troffen in het zoute oppervlaktewater van de Haarlemmermeer, terwijl watergangen zonder wellen zoet blijken te zijn. Veel wellen komen voor in het zuiden van de polder, aan de rand van de polder en ter hoogte van de paleo-getijddegeul. Andere factoren die van invloed zijn op het voorkomen van de wellen op de specifieke plekken in de Haarlemmermeer, zijn de hoogte van het maaiveld en de hogere stijghoogte aan de rand van de polder. Complementair aan de toegepaste methode voor het lokaliseren van wellen kan gebruik worden gemaakt van luchtfoto's voor wellen op land of in de slootkanten, waardoor de meettijd van de egv-routing gereduceerd kan worden. Het is aan te raden voor een egv-routing eerst een luchtfoto-analyse uit te voeren. Voor het lokaliseren van wellen op land is het mogelijk gebruik te maken van

satellietbeelden. Door de grovere resolutie is het niet mogelijk de satellietbeelden te gebruiken voor wellen in het water. Thermaal infrarood kan gebruikt worden voor ondiepe sloten, waar weinig tot geen kroos/algen voorkomt. Met deze methode kunnen voor een groot aantal kilometers watergang op een dag aanwezige wellen in kaart gebracht worden.

LITERATUUR

- 1) De Louw P., R. Bakkum, H. Folkerts en H. van Hardevel (2004). Het effect van waterbeheer op de chloriden- en nutriëntenbelasting van het oppervlaktewater in Polder de Noordplas. Syntheserapport: definitieve water- en stoffenbalans en effecten van verschillende waterbeheersscenario's. Rapport NITG 04-241-B.
- 2) De Louw P. (2007). Brakke kwel in diepe polders: case Polder de Noordplas. In: 'Verzilting in Nederland'. Nederlandse Hydrologische Vereniging. NHV-special 7.
- 3) De Louw P., G. Oude Essink, P. Stuyfzand en S. van der Zee (2010). Upward groundwater flow in boils as the dominant mechanism of salinization in deep polders, the Netherlands. Journal of Hydrology 394, pag. 494-506.
- 4) De Louw P., G. Oude Essink en P. Maljaars (2007). Achtergrondstudie kwelreductietechnieken. TNO. In opdracht van het Hoogheemraadschap van Rijnland.
- 5) Velstra J., R. van Diepen, M. Hoogmoed en M. Groen (2008). Aanvullend veldonderzoek Groot-Mijdrecht. Acacia Water.