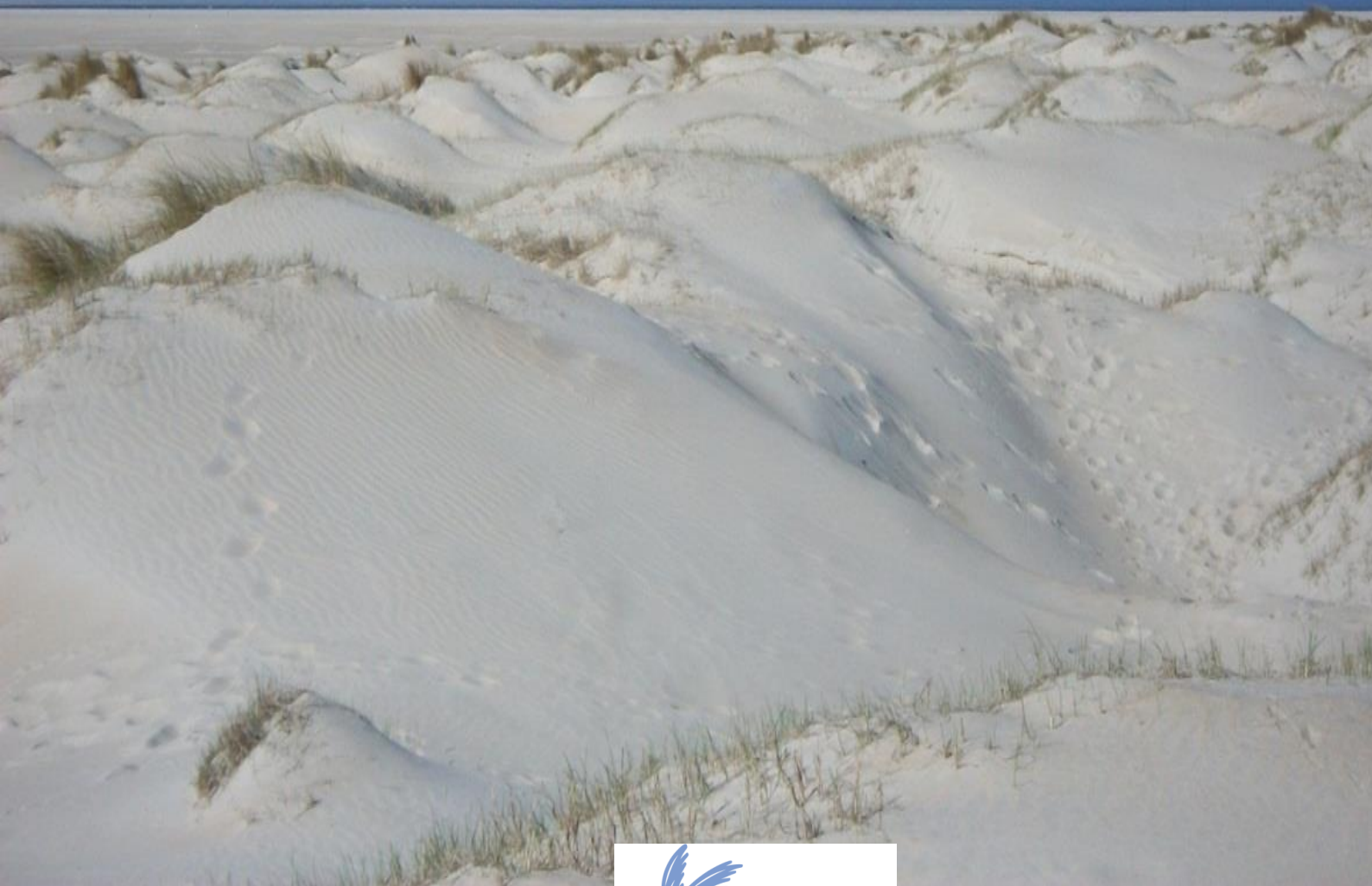


BTO 2014.221(s) | November 2014

Zoet-zout gradiënten op 4 eilanden, in hydrologisch en hydrogeochemisch perspectief



KWR

Watercycle
Research
Institute



vrije Universiteit

amsterdam



vrije Universiteit amsterdam

ontwikkeling+beheer natuurkwaliteit

o+bn

Zoet-zout gradiënten op 4 eilanden, in hydrologisch en hydrogeochemisch perspectief

BTO 2014.221(s) | November 2014

Opdrachtnummer
B111698-002

Projectmanager
Prof. dr. A.P. (Ab) Grootjans

Opdrachtgever
OBN via VBNE

Kwaliteitsborger(s)
OBN Deskundigenteam Duin en Kustlandschap

Auteurs
Prof. dr. P. J. (Pieter) Stuyfzand, Ivan Estrada de Wagt, Donovan Amatsat, Chantal Bland, Birgit Oskam, Danny van Loon, drs. Henk Everts, prof. dr. Ab Grootjans

Verzonden aan
Dit rapport is openbaar, verstrekt aan VBNE en tevens als pdf bij VBNE verkrijgbaar



Ministerie van Economische Zaken



Jaar van publicatie
2014

Meer informatie

T +31 (0)30 60 69 552
E pieter.stuyfzand@kwrwater.nl

PO Box 1072
3430 BB Nieuwegein
The Netherlands

T +31 (0)30 60 69 511
F +31 (0)30 60 61 165
E info@kwrwater.nl
I www.kwrwater.nl

KWR Watercycle
Research
Institute

KWR | September 2013 © KWR

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vervoelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen, of enig andere manier, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

Voorwoord

Voorliggend rapport vormt een technisch achtergronddocument bij het overkoepelende rapport 'Ontwikkeling van zoet-zoutgradiënten met en zonder dynamisch kustbeheer; een onderzoek naar de mogelijkheden voor meer natuurlijke ontwikkelingen in het kustgebied' door Grootjans et al. (2014), uitgegeven door VBNE (Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren).

Hoewel voorliggend rapport grotendeels boogt op onderzoek door ondergetekende met B.Sc. en M.Sc. studenten van de Faculteit Aard- en Levenswetenschappen (FALW) van VU met financiering door O+BN (Ontwikkeling+Beheer Natuurkwaliteit), wordt het door KWR uitgegeven. Reden is dat VU niet meer beschikt over een herkenbare rapportenlijn en VBNE niet over voldoende middelen beschikte om naast het overkoepelende rapport ook dit rapport te drukken. KWR heeft daarentegen een zeer herkenbare en toegankelijke rapportenlijn, waarbij steeds vaker het drukken achterwege blijft (of alleen op verzoek geschiedt) en vervangen wordt door levering van een digitale pdf versie. Bovendien past het onderzoek uitstekend binnen het bedrijfstakonderzoek (BTO) van KWR naar de effecten van klimaatverandering op grondwatersystemen in de kustregio, dat zich in de afrondingsfase bevindt (Stuyfzand, 2015).

Het onderzoek naar zoet-zout gradiënten op 4 eilanden was een genoegen maar ook een tour de force in verband met het omvangrijke veldwerk, waarvan een groot deel plaats vond in de winter van 2013 met extreem druilerig weer (koud en nat). Het broedseizoen op de eilanden weerhield ons van een aangename, wat latere start.

De inzet en hulp van velen was onmisbaar, in de eerste plaats natuurlijk die van de studenten: B.Sc. studenten Birgit Oskam en Danny van Loon op de Veermansplaat, M.Sc. studenten Donovan Amatsat en Chantal Bland op Texel, en M.Sc. student Ivan Estrada de Wagt op Schiermonnikoog. Daarnaast had het onderzoek niet uitgevoerd kunnen worden zonder de deskundige assistentie van John Visser (VU's Water Lab) en van Frans Backer en drs. Michel Groen (VU's veldtechnische dienst). Drs. Henk Everts assisteerde mij bij de bemonstering van grondwater op Borkum en bij het vinden van de meestal ondergedoken Groenknolorchis, terwijl prof. dr. Ab Grootjans de boorwerkzaamheden op Texel verlichtte, mijn botanische kennis verder bijspijkerde en het project in goede banen leidde.

Bij het verkrijgen van toegang en/of het bereiken van de veldlocaties met alle boorgereedschappen boden hulp: Otto Overdijk en Kees Soepboer (Natuurmonumenten Schiermonnikoog), Erik van der Spek (Staatsbosbeheer, Texel), en William van der Hulle (Staatsbosbeheer, Veermansplaat). Dr. Anton van Haperen (Staatsbosbeheer) stelde zijn archief over de Veermansplaat ter beschikking, zowel PWN als prof. dr. Ab Grootjans deed dat m.b.t. Texel, en Vitens m.b.t. Schiermonnikoog.

Discussies in het OBN deskundigenteam Duin- en Kustlandschap droegen bij aan de richting van en feedback op dit onderzoek. Ik hoop dat deze studie bijdraagt aan een beter begrip en beheer van duinterreinen met zoet-zout gradiënten. Veel leesplezier of naslaggenoegeen toegewenst!

Pieter J. Stuyfzand, 1 november 2014

Samenvatting en conclusies

Kader en inhoud

Op 3 Waddeneilanden (Borkum, Schiermonnikoog en Texel) en op een zandplaat in het zoute Grevelingenmeer zijn de hydrologische en hydrogeochemische condities onderzocht op de overgang van zoet naar zout, d.w.z. op de overgang van strand naar aangrenzend duin en van meeroever naar hogere delen op de zandplaat.

Het onderzoek is onderdeel van een door OBN gefinancierd project dat de ontwikkeling van zoet-zout-gradiënten in natte duinvalleien met en zonder dynamisch kustbeheer onder de loep neemt. In het overkoepelende project, kortweg 'Zoet-Zout-gradiënten' genaamd, staat de ecologische ontwikkeling aldaar centraal. Daarbij krijgt de Groenknolorchis (*Liparis loeselii*) speciale aandacht, omdat deze orchidee op zoet-zout gradiënten voorkomt en in Europa onder de Natura 2000 wetgeving speciale bescherming geniet. Bij iedere discussie over een veranderend beheer of terugkeer naar een meer natuurlijke habitatontwikkeling is informatie over de essentiële factoren die deze populatie in stand houden of verbeteren zeer gewenst.

In dit rapport worden de hydrologische en hydrogeochemische omstandigheden op 4 eilanden, waar de Groenknolorchis in een bepaalde zoet-zout-gradiënt voorkomt, vastgelegd zoals gemeten in de periode oktober 2012 – augustus 2013. Het betreft de NO punt van Borkum, het Groene strand van Schiermonnikoog, De Hors op Texel en de N-punt van Veermansplaat in de Grevelingen.

Aanpak

Het veldonderzoek bestond uit vele handboringen, bemonstering van grondwater, veld- en labanalyses, en waterstandsmetingen. Op Schiermonnikoog zijn vier 20 m diepe sonderingen gezet met plaatsing van 4 piezometernesten met filters op 5, 10, 15 en 20 m-MV. Verder zijn er voor dit onderzoek vijf 3-5 m diepe peilbuizen geplaatst waarin divers zijn gehangen. Het veldwerk is uitgevoerd in de periode oktober 2012 – augustus 2013. Borkum werd aanzienlijk minder intensief onderzocht dan de overige 3 eilanden.

In totaal zijn 410 grondwatermonsters genomen, merendeels met behulp van de door VU ontwikkelde spiraalboor waarmee gedetailleerde waterkwaliteitsprofielen zijn verkregen van het bovenste grondwater (op 0,1-4 m-MV). Deze monsters zijn chemisch onderzocht op een breed pakket aan macroparameters, nutriënten en spore-elementen.

Naast het karteren en interpreteren van de status-quo in genoemde periode, zijn tevens de huidige toestand en enkele toekomstscenario's doorgerekend met spreadsheet modellen: HYDROLENS ter bepaling van de omvang van zoetwaterlenzen, en DUVELCHEM ter bepaling van de ondiepe grondwaterkwaliteit. Daarbij staan veranderingen in overstromingsfrequentie, duinbreedte, regenval, begroeiing en ontkalking centraal.

Grondwaterstanden

Op Schiermonnikoog, Texel en de Veermansplaat zijn met 'divers' de grondwaterstanden gemeten in de nabijheid van Groenknolorchis standplaatsen, in de periode maart-augustus 2013. De metingen tonen voor die periode dat de grondwaterstanden daar varieerden tussen 0-0,4 (Schiermonnikoog), 0,5-1,2 (Texel) en 0-0,9 m-MV (Veermansplaat), met een dalende trend sinds maart.

Het verloop van grondwaterstanden op de eilanden vertoonde intrigerende dagelijkse schommelingen in de orde van 0,5-1 cm. De invloed van het getij en barometrische fluctuaties bleek verwaarloosbaar en in overeenstemming met het freatische karakter van de bemeten aquifers. Op de Veermansplaat en Schiermonnikoog konden de dagelijkse fluctuaties in verband gebracht worden met de dagelijkse gang van evapotranspiratieverliezen. Op Texel lukte dit niet om nog onopgehelderde redenen. Wel kon daar de veel sterkere reactie op regenval herleid worden tot een bergingscoëfficiënt van duinzand van ca. 30%, hetgeen goed spoort met literatuurwaarden.

Kwelplassen

Het hydrologische onderzoek op Texel onthult de grootschalige aanwezigheid van vele kwelplassen, soms een cascade van kwelplassen. Deze beïnvloeden het grondwaterstromingspatroon sterk doordat zij de grondwaterstroming naar zich toe trekken en zowel een exfiltratie- als infiltratiekant kennen. Voorbeelden van relatief grote kwelplassen liggen in de Mokslootvallei, Geul, Horsmeertjes en Kreeftepolder, waarvan alleen laatstgenoemde periodiek helemaal droogvalt. De zone met embryoduintjes op de Hors kent alleen in de winter kleinschalige kwelplassen, vooral aan de noordoostzijde.

Afsnoering van primaire duinvalleien en de aanleg van stuifdijken zijn de belangrijkste ontstaanswijze van de grootschalige kwelplassystemen. Ook op de strandvlakte achter de stuifdijk van Schiermonnikoog vormt zich periodiek in de westhoek een soort kwelplassysteem. Dit systeem onderscheidt zich echter van die op Zuid-Texel door periodieke inundatie met zeewater, waardoor de kwelstroom noordelijk van de Kobbeduinen zoutrijker is.

Het in kwelplassen geïnfiltreerde water onderscheidt zich van het ondiepe grondwater in infiltratiegebieden rond de kwelplassen door aanzienlijk hogere concentraties Fe, Mn, SiO₂, HCO₃, Ca, Sr, Al, As, Ni, V en Zn, en lagere concentraties SO₄, NO₃, K, Mg en B. Dit getuigt van meer contact met bodemslib in kwelplassen leidend tot diepere anaërobie en meer kalk- en diatomeeënoplossing.

Zeewaterinundatie en verzoeting

Op alle eilanden speelt zeewaterinundatie logischerwijs een belangrijke rol. Op het natte strand gebeurt dit dagelijks bijna 2 maal dankzij het getij, en op het droge strand meerdere malen per jaar tijdens extreme hoogwaterstanden (stormvloed). Dan kunnen soms ook de kleinere embryoduintjes zoals op het Groene Strand en op de Hors onderlopen; alleen gebeurt dat minder frequent terwijl de grotere en hogere embryoduintjes altijd boven water kunnen blijven. Op de Veermansplaat treedt ook zeewaterinundatie op, uitsluitend van de oevers en dan vooral tijdens perioden met windopzet van het zoute meer. Ook daar geldt dat de inundatie tijdens extreme situaties verder landinwaarts reikt en incidenteel de hogerop gelegen stuifrichel bereikt.

Op alle eilanden, met uitzondering van Borkum, is ter plaatse van de onderzochte locaties sprake van structurele verzoeting, d.w.z. van vergroting van de aanwezige zoetwaterlenzen of zoetwaterlens. De verklaring hiervoor is eenvoudig gelegen in de aangroei van de kust op het Groene Strand van Schiermonnikoog en op de Hors, en het droogvallen van de Veermansplaat sinds afdamming van de Grevelingen, hetgeen zorgde voor uitsluiting van het getij.

Op kleinere tijd- en ruimteschaal speelt nog, dat er in de winter van 2013 veel zeer zoutarm regenwater geïnfiltreerd is, dat zoutrijker regenwater uit een voorgaande periode verdrong en zo aanleiding gaf tot verzoetingsverschijnselen in de vorm van kationuitwisseling.

Bij zowel kleinschalige als grootschalige verzoeting zien we relatief hoge concentraties van Na, K, Mg, B, F en Li ten opzichte van Cl, en relatief lage Ca concentraties die aangezien zouden kunnen worden voor effecten van ontkalking (maar dat absoluut niet zijn!).

Met een nieuwe empirische relatie is getracht de Cl-concentratie van de bovenste meter grondwater op een zandplaat of een flauw hellend strand met of zonder embryoduintjes te voorspellen, als functie van de zeewaterstanden met bijbehorende inundaties. In die relatie (Eq.7.1) zijn de volgende parameters verdisconteerd: de Cl concentratie van het zoete en zoute grondwater, evapoconcentratie van het zoute grondwater, frequentie van zeewaterinundatie, laterale en benedenwaartse toestroming van zoet grondwater na afloop van de laatste inundatie, en dikte van de onverzadigde zone vlak vóór inundatie.

Waargenomen zoetwaterlensdiktes en brakwaterzones

Uit diepere waarnemingsputten en geofysische metingen volgt dat de onderkant van de grootschalige zoetwaterlenzen onder de 4 eilanden zich bevindt op maximaal 52 (Borkum), 80 (Schiermonnikoog), 60 (Texel-Zuid) en 14 m-NAP (Veermansplaat). De overgangszone tussen zeer zoet en volledig zout bedraagt op de Veermansplaat 5-7 m en elders in de meeste gevallen ongeveer 20 m.

Onder het Groene Strand van Schiermonnikoog met de aanwezige embryoduinen zijn de zoetwaterlenzen maximaal 2 m dik, en die onder de embryoduinen op de Hors maximaal 4 m. Daarbij spelen een rol: zeewaterinundatie, geringe ouderdom van de lenzen (deels door periodieke erosie) en op de Hors de aanwezigheid van een ondiepe kleilaag. De zoetwaterlens onder de stuifdijk van Schiermonnikoog is >2 m dik, waarschijnlijk ca. 8 m.

Dominante factoren van invloed op de grondwaterkwaliteit

De kwaliteit van het ondiepe grondwater op de 4 eilanden, volgens de spiraalboringen, wordt voornamelijk gedictieerd door de volgende factoren:

- Het percentage bijgemengd zeewater of de hoeveelheid atmosferisch gedeponeerd zeezout, in combinatie met de hoeveelheid evapoconcentratie (concentratietoename door verdampingsverliezen). Deze 3 factoren verhogen de EC en de concentraties van vooral Cl, Na, B, Br, Li, K, Mg, Mo, SO₄ en F. Op de Veermansplaat zijn langs de oevers de hoogste zeezoutconcentraties gemeten (tot 4x oceaanwater t.g.v. verdamping).
- Uitwisseling van zeewaterionen t.g.v. zoet-zout verplaatsing, voornamelijk Na, K, Mg, B, F en Li. De uitwisseling door verzoeting domineert over uitwisseling door verzilting in het studiegebied. Daarom nemen de concentraties van deze elementen op veel plaatsen toe, omdat zij na adsorptie tijdens doorspoeling met zeewater desorberen bij doorspoeling met zoet grondwater.
- Water-sediment interactie bij relatief hoge pH (>6,5). Het betreft HCO₃, Ca, Sr, Fe, As, SiO₂, Yb en TIC. In deze groep zit dus kalkoplossing (Ca, Sr, HCO₃, TIC), reductieve oplossing van ijzerhydroxiden (Fe, As), de oplossing van SiO₂ vanuit biogeen opaal, kwarts en silicaat-mineralen, en vreemd genoeg Yb (nog geen verklaring). Oplossing van deze minerale fasen buffert de pH op relatief hoog niveau. Zandplaten bevatten relatief veel biogeen opaal wat een afwijkend hoge SiO₂ concentratie oplevert.
- Water-sediment interactie bij relatief lage pH (<6). Het gaat om Al, Be, Co, Cr, La, Ni, Sc, Ti, Eu, V, Zn en Zr. In deze groep zitten parameters die vooral verband houden met het oplossen van Al-houdende mineralen (zoals kleimineralen en zware mineralen), hetgeen pas geschiedt als kalk uitgelooft is en de pH afneemt.
- Het begroeiingstype. Dit bepaalt de verdampingsverliezen, hoeveelheid interceptie van atmosferische aërosolen en gassen (waaronder zeezout en luchtverontreinigingscomponenten), opslag in biomassa, productie van CO₂, HCO₃ en DOC, en stikstof-fixatie. De concentratie opgeloste stoffen van grondwater neemt i.h.a. toe volgens de reeks: kaal < mossen < grassen < duindoorn < eiken < dennen. De algemene volgorde voor nitraat is: snel groeiende dennen/eiken < kaal < eiken voorbij hun climaxstadium < mossen < duindoorns.
- De grondwaterstand, die de dikte van de onverzadigde zone bepaalt. Een gemiddelde grondwaterstand binnen ca. 0,5 m-maaiveld (MV) kan leiden tot langdurige anoxische omstandigheden (d.w.z. alle zuurstof en nitraat verdwenen) of diep anoxische omstandigheden (tevens een groot deel van sulfaat verdwenen en methaan verschijnen), door stagnatie van water in de humeuze bodemlaag en O₂-gebrek. Bijgevolg ontstaan er soms hoge concentraties aan HCO₃, DOC, NH₄, Fe(II), Mn(II), PO₄ en SiO₂, en lage concentraties O₂, NO₃ en SO₄. Waar de gemiddelde grondwaterstand dieper is dan ca. 0,5 m-MV, domineren (sub)oxische omstandigheden (zuurstof- of nitraathoudend) in de onverzadigde zone en dientengevolge ook in het bovenste grondwater. Een langer verblijf in de (sub)oxische onverzadigde zone bij een diepere grondwaterstand bevordert duidelijk de verlaging van opgeloste organische koolstof.

Hydrochemische condities van Groenknolorchis standplaatsen

De hydrochemische condities van de standplaatsen van de Groenknolorchis op de 4 eilanden zijn als volgt (bovenste meter grondwater):

- Op Borkum: licht brak (Cl ≤1500 mg/L), SO₄<250 mg/L, (bijna) kalkverzadigd, anoxisch (meestal geen SO₄-reductie, hoog Fe, geen NO₃), PO₄ ≤0.4 mg/L, NH₄ ≤1.4 mg/L, en meest dominante watertypen B3NaCl en b3NaCl.

- Op Schiermonnikoog: zoet tot brak (Cl <2500 mg/L), anoxisch (meestal geen SO₄-reductie, hoog Fe, geen NO₃), NH₄<0,3 mg/L, hoog Ca en kalk(over)verzadigd, en meest dominante watertypen F₃CaHCO₃⁺, F₃MgHCO₃⁺ en B₃NaCl⁺.
- Op Texel: zoet tot licht brak (Cl <300 mg/L), anoxisch (vrijwel geen SO₄-reductie, hoog Fe, geen NO₃), NH₄<0,2 mg/L, hoog Ca en kalk(over)verzadigd, en meest dominante watertype F₃CaHCO₃⁺.
- Op Veermansplaat: zoet tot brak (Cl <1.000 mg/L), anoxisch (geen SO₄-reductie, hoog Fe, geen NO₃), NH₄ <0,2 mg/L, PO₄<0,2 mg/L, SO₄<150 mg/L, hoog Ca en kalk(over)verzadigd, en meest dominante watertype F₄CaHCO₃⁺.

Hieruit leiden we de volgende algemene condities af: zoet tot licht brak (Cl <2.500 mg/L), anoxisch (geen SO₄-reductie, hoog Fe, geen NO₃), NH₄ <0,3 mg/L, SO₄<250 mg/L, hoog Ca en kalk(over)verzadigd.

Modellering van zoetwaterlenzen

Uit de analytische modellen voor zoetwaterlenzen op brak tot zout grondwater volgt o.a. een bijna lineaire toename van de grootte met de breedte of doorsnede van niet overstromend land zoals een kustduingordel, zandplaat of waddeneiland. Daarbij nemen de volgende parameters toe: de maximale hoogte van de grondwaterstand (H), maximale diepte van de onderkant van de zoetwaterlens (Z), vormingstijd van de lens (t₉₉) en lengte van de zoetwatertong onder zee (L).

Een toename van de verticale weerstand van de ondergrond (b.v. door aanwezigheid van kleilagen) leidt tot een aanzienlijke verhoging van H, t₉₉ en L, en verlaging van Z. Een toename van de gemiddelde grondwateraanvulling, afname van de gemiddelde permeabiliteit en afname van het zoutcontrast (eigenlijk dichtheidscontrast) brengen met zich mee dat een zoetwaterlens groter wordt, zodat H, Z, t₉₉ en L dan toenemen. En tenslotte, een cirkelvormig eiland levert logischerwijs een kleinere lens (ca. 30% kleiner) op dan een langwerpige (in principe oneindig lange) lens.

De modellering van zoetwaterlenzen heeft onderstaande antwoorden opgeleverd t.a.v. specifieke vragen over toekomstige scenario's.

Peilverhoging van het Grevelingenmeer

Berekend is dat een gecontroleerde zeespiegelrijzing (SLR) van 0,35 m boven huidig meerpeil van 0,2 m-NAP (overeenkomend met een genoemde getijvariant T50), leidt tot een zeer aanzienlijke slinking van de zoetwaterlens waardoor slechts 10-40% overblijft van het huidige volume. Genoemde marge hangt samen met verschillen in helling van het landoppervlak. De peilverhoging zou voor de Groenknolorchis het einde betekenen.

Verwijdering stuifdijk achter oostelijke deel van Groene Strand op Schiermonnikoog

Het verwijderen van de stuifdijk ten zuiden van het oostelijke deel van het Groene Strand op Schiermonnikoog heeft natuurlijk tot gevolg dat de zoetwaterlens onder de stuifdijk verdwijnt en daarmee ook de kwelzone aan zijn noordzijde. Daar profiteert de Groenknolorchis van deze zoete kwel, en zal mogelijk verdwijnen als de stuifdijk verdwijnt. Deze voorspelling kan evenwel de mist ingaan als het kwelsysteem van de Kobbeduinen zich noordwaarts verlegt, of als de aangroei van embryoduinen doorgaat en voldoende bescherming biedt tegen zeewaterinundatie.

De zoetwaterlens onder de Kobbeduinen, ten zuiden van de westhoek van de strandvlakte aldaar, is waarschijnlijk 20 m dik en zorgt dankzij een duinbreedte van 250 m voor een minimaal ~10 m brede zoete kwelzone. Deze zone blijft behouden, is daadwerkelijk in het veld gemeten in 2013 en was ook zichtbaar aan afwijkende vegetatie.

Klimaatverandering incl. zeespiegelstijging

Klimaatverandering bestaat o.a. uit een toename van de temperatuur en neerslag. Of de toename van de neerslag ook leidt tot een toename van de grondwateraanvulling (R) is zeer onzeker omdat de begroeiing zowel kan toenemen als afnemen en dat heeft een beslissend effect op R.

Als we uitgaan van alleen een temperatuurstijging van het zoete grondwater in de periode 1990-2100 van 9,8 tot 13,3 °C (KNMI-scenario W voor lucht), dan krimpt volgens het model HYDROLENS de zoetwaterlens met 10% (Z en t99) en blijven H en L vrijwel gelijk. Als we uitgaan van 13% meer regenval (KNMI-scenario W) en grondwateraanvulling, in combinatie met de temperatuurstijging, dan krimpen de zoetwaterlenzen minder (6% in plaats van 10%). Een veel grotere impact heeft een zeespiegelstijging (SLR) wanneer deze **niet** wordt tegengewerkt door kustaangroei (hetzij natuurlijk dan wel door zandsuppleties). Zo wordt berekend dat een SLR van 0,35 en 1,00 m, bij een oneindig lange duinenrij van 2 km breedte met $R=0,45$ m/j, een helling van het land van 0,0041 en een dichtheidsverschil van 0,02 kg/L tussen zoet en zout grondwater, tot de volgende lensinkrimping leidt: terugwijking van de kust en dus versmalling van de lens met resp. 85 en 243 m, stijging van het zoet/zout grensvlak van 60.3 naar resp. 57,5 en 52.4 m-NAP, en een geringe toename van de maximale grondwaterstand van 3,25 naar resp. 3,29 en 3,35 m+NAP.

Effecten van kustverbreding door zandsuppleties

Berekend wordt dat 1 m zeespiegelstijging zonder compensatie en met b.v. 800 m kustuitbouw dankzij zandsuppleties leidt tot een netto groei van de lens met $800-243 = 557$ m breedte, een 24,1 m diepere ligging en een 1,4 m hogere maximale grondwaterspiegel.

Gevolgen van veranderingen in begroeiingsdichtheid

Berekeningen met DUVELCHEM laten zien hoe de ondiepe grondwatersamenstelling verandert wanneer de begroeiing toe- of afneemt. We zien in het algemeen dat de concentratie opgeloste stoffen van grondwater toeneemt volgens de reeks: kaal < mossen < grassen < duindoorn < eiken < dennen. Dit wordt verklaard door de toenemende verdampingsverliezen (evapoconcentratie), toenemende hoeveelheid interceptie van atmosferische aerosolen en gassen (meer sterke zuren), toenemende opslag van nutriënten in biomassa (vooral N en P), en toenemende productie van CO₂, HCO₃ en DOC.

Ontkalking en verzuring

De berekende ontkalkingssnelheid op de Veermansplaat, met een primair kalkgehalte van ~4,9% drooggewicht, met een begroeiing bestaande uit nat loofbos in een gebied met uitsluitend infiltratie, bedraagt gedurende de eerste 350 jaar 0,15 m/eeuw, en daarna wanneer het ontkalkingsfront onder de grondwaterspiegel zakt, 0,10 m/eeuw. Dit is relatief hoog in vergelijking met de kalkrijke duinen uit het Rhenodunale district, waar de snelheid gemiddeld ~0,06 m/eeuw bedraagt (Stuyfzand, 1993), en dat bij een lager primair kalkgehalte van 4%. De verklaring is dat zuurvorming door pyrietoxidatie op de Veermansplaat significant bijdraagt aan het ontkalken, en in de eolisch gevormde, aëroob afgezette duinen absoluut niet.

Op de Waddeneilanden verloopt het ontkalkingsproces in eenmaal vastgelegde duinen nog sneller, dankzij het lage primaire kalkgehalte van 0,5% (Texel) tot 1,2% (Schiermonnikoog). Voor Texel wordt zo een ontkalkingssnelheid gemodelleerd onder vrijwel kaal maar vastgelegd terrein van 0,56 m/eeuw totdat de grondwaterspiegel wordt bereikt en daarna met 0,15 cm/eeuw. Voor een droge, schrale duinbegroeiing (grassen en mossen) is de ontkalkingssnelheid 0,73 m/eeuw totdat de grondwaterspiegel wordt bereikt en daarna 0,26 cm/eeuw.

Als we uitgaan van een bewortelingsdiepte van b.v. 0,1 m voor de Groenknolorchis, dan is het hele wortelstelsel al na 14-18 jaar omgeven door ontkalkt, zuur duinzand, vooropgesteld dat er uitsluitend sprake is van infiltratie. Op Schiermonnikoog geldt dan een langere periode, namelijk $1,2/0,5 \times (14-18) = 34-43$ jaar.

Zeer snel na volledige ontkalking zet de verzuring in, omdat het zuurfront 3-10 maal sneller loopt dan het ontkalkingsfront. Vanaf het moment van zuurdoorbraak zien we in het bodemvocht en grondwater een scherpe daling van pH, Ca en HCO₃, en een scherpe toename van vooral Al en SiO₂.

Ontkalking en verzuring kunnen dus een verklaring zijn voor de geconstateerde achteruitgang van de Groenknolorchis op diverse oudere standplaatsen.

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies	1
1 Inleiding	11
1.1 Het overkoepelende project	11
1.2 Het hydrologische en hydrogeochemische onderzoek	13
2 Materiaal en methoden	15
2.1 Locaties	15
2.2 Sondering en plaatsing peilbuizen	15
2.3 Spiraalboring, bemonstering en veldmetingen	16
2.4 Chemische analyses	18
2.5 Grondwaterstanden	18
2.6 Dataverwerking hydrochemie	18
2.7 Modelleren vorm en ontstaan zoetwaterlenzen	19
2.8 Modelleren hydrogeochemische veranderingen	20
3 Borkum	21
3.1 Grootschalige hydrogeologie	21
3.2 Grootschalige hydrochemie	22
3.3 12 monsters ondiep grondwater in kwelzone van Ostland	24
4 Schiermonnikoog	25
4.1 Fysiografie	25
4.1.1 Klimaat	25
4.1.2 Geologie	25
4.1.3 Invloeden van de mens	26
4.1.4 Geomorfologie	26
4.1.5 Bodems	28
4.1.6 Habitat-typen	28
4.2 Grootschalige hydrologie van Schiermonnikoog	31
4.2.1 Hydrogeologische opbouw	31
4.2.2 Grondwateraanvulling en grondwaterwinning	31
4.2.3 Zeewaterstanden	32
4.3 Twee meetraaien loodrecht op het Groene Strand	34
4.4 Grondwaterstanden in studiegebied	34
4.5 Zoet-zout kartering	40
4.6 Patronen in grondwaterkwaliteit	42
4.6.1 Globaal overzicht	42
4.6.2 Snelle clustering via Pearson correlatiematrix	44
4.6.3 Vergelijking met onderzoek RUG uit jaren 90	47
4.6.4 Relaties met chloride nader beschouwd	47
5 Zuidwest Texel	51
5.1 Fysiografie	51
5.1.1 Klimaat	51
5.1.2 Geologie	51

5.1.3	Geomorfologie	53
5.1.4	Bodems	54
5.1.5	Onderzoek naar de Groenknolorchis	55
5.2	Twee ondiepe meetraaien bij de Hors	58
5.3	Grootschalige hydrologie van Zuid-Texel	60
5.3.1	Hydrogeologische opbouw	60
5.3.2	Grondwateraanvulling en grondwaterwinning	61
5.3.3	Zeewaterstanden en inundatiekansen	61
5.4	Grondwaterstanden in studiegebied	64
5.4.1	Naar een gedetailleerde isohypsenkaart	64
5.4.2	Inschatting van opbolling onder langgerekte hoge duinruggen	64
5.4.3	Grondwaterstand in de eigen peilbuizen	64
5.4.4	Trendmatige ontwikkelingen	70
5.5	Zoet-zout kartering	70
5.6	Patronen in oppervlaktewaterkwaliteit	72
5.7	Patronen in grondwaterkwaliteit	76
5.7.1	Globaal overzicht	76
5.7.2	Snelle clustering via Pearson correlatiematrix	79
5.7.3	De ondiepe dwarsdoorsnedes nader beschouwd	82
5.7.4	Vergelijking met Moksloot (onderzoek RUG)	85
5.7.5	Relaties met chloride nader beschouwd	86
6	Veermansplaat	91
6.1	Fysiografie	91
6.1.1	Klimaat	91
6.1.2	Invloeden van de mens	91
6.1.3	Bodems	92
6.1.4	Vegetatie en beheersmaatregelen	92
6.2	Meetpunten op de Noordkop in 2013	92
6.3	Hydrologische waarnemingen	94
6.3.1	Hydrogeologische opbouw	94
6.3.2	Grondwateraanvulling	94
6.3.3	Waterstanden en waterkwaliteit in de Grevelingen	96
6.3.4	Grondwaterstanden	98
6.3.5	Diepteligging van het zoet-zout grensvlak	101
6.3.6	Ontzilting	104
6.4	Ondiepe zoet-zout kartering op de Noordkop	105
6.5	Patronen in grondwaterkwaliteit	108
6.5.1	Globaal overzicht	108
6.5.2	Snelle clustering via Pearson correlatiematrix	109
6.5.3	Relaties met chloride nader beschouwd	111
6.5.4	Andere patronen	115
7	Modellering van de zoetwaterlens met HYDROLENS	117
7.1	HYDROLENS 3.2	117

7.2	Voorspelling in geval van periodieke zoutwater inundatie	118
7.3	Veermansplaat in het Grevelingenmeer	121
7.4	De Waddeneilanden	125
7.4.1	Verschillende schalen: van embryoduin via stuifdijk tot eilandkern.....	125
7.4.2	Effecten van zeespiegelstijging, erosie en kustaanwas.....	128
8	Modellering van grondwaterkwaliteit en ontkalking met DUVELCHEM	131
8.1	DUVELCHEM.....	131
8.2	Scenario's voor de Veermansplaat in het Grevelingenmeer	132
8.3	Scenario's voor de Waddeneilanden.....	135
9	Referenties.....	137
	Bijlage 1: Berekening van de vorm en vorming van zoetwaterlenzen.....	139

1 Inleiding

Pieter J. Stuyfzand en Ab P. Grootjans

1.1 Het overkoepelende project

Aanleiding

Voorliggend onderzoek is het hydrologische en hydrogeochemische onderdeel van een door OBN gefinancierd project dat de ontwikkeling van zoet-zout-gradiënten in natte duinvalleien met en zonder dynamisch kustbeheer onder de loep neemt (Grootjans et al., 2013). In het overkoepelende project, kortweg 'Zoet-Zout-gradiënten' genaamd, staat de ecologische ontwikkeling centraal. Daarover meer in deze paragraaf.

Beheer van duinvalleien is in de meeste gevallen helaas noodzakelijk, arbeidsintensief en dus duur. Duinvalleien die nieuw ontstaan door natuurlijke processen vergen echter geen onderhoud, zolang het goed gaat. De jonge successiestadia van met name kalkrijke duinvalleien zijn namelijk rijk aan zeldzame plantensoorten.

De meest voorkomende manier waarop een primaire kalkrijke duinvallei op natuurlijke wijze ontstaat, is wanneer een nieuwe duingordel een strandvlakte afsnoert, welke daarna verzoet. Deze nieuwvorming treedt weinig op, mede door menselijk ingrijpen (aanleg stuifdijken), en het duurt ook lang voordat een vallei geheel afgesloten is van de invloed van de zee. Op de Nederlandse Waddeneilanden zijn in het verleden situaties opgetreden waarbij zoete duinvalleivegetaties voorkwamen achter een duinenrij die nog niet geheel afgesloten was, maar waarbij de zee alleen bij zeer hoog tij en met name in de winter de duinvoet overstroomde. Een dergelijke tijdelijke (intensieve) overstroming wordt wel aangeduid als 'washover'. In zo'n situatie ontwikkelden zich in het verleden toch kalkrijke duinvalleivegetaties zonder dat hier beheer (maaaien) noodzakelijk was. Op het Duitse eiland Borkum bestaat een dergelijke zoet-zoutgradiënt al enige decennia. Hier komt een habitat type voor met honderden, soms duizenden orchideeën, zoals Groenknolorchis, Vleeskleurige orchis en Moeraswespenorchis.

De Groenknolorchis (*Liparis loeselii*; Fig.1.1) geniet in Europa onder de Natura 2000 wetgeving speciale bescherming. In dit onderzoek krijgt de Groenknolorchis daarom speciale aandacht. Bij iedere discussie over een veranderend beheer of terugkeer naar een meer natuurlijke habitatontwikkeling is informatie over de essentiële factoren die de populatie in stand houden of verbeteren zeer gewenst.



Fig. 1.1. De groenknolorchis (*Liparis Loeselii*) op de Veermansplaat. (de Kraker, 2012).

Korte achtergrond.

De laatste jaren is in OBN verband al veel kennis verzameld over de ontwikkelingen van de Nederlandse duinsystemen. Daarbij kregen de droge duinen veel aandacht. Er is gekeken naar de invloed van zandsuppleties op de achterliggende droge duinen, en naar het effect van begrazing op de Grijze duinen. Ook daar kwam naar voren dat re-dynamiseren van de systemen (inzet van natuurlijke processen) een oplossing zou kunnen zijn om de gewenste kwaliteit van habitats en soorten te behouden, te herstellen of te ontwikkelen. Ook in de herstelstrategieën die ontwikkeld zijn in het kader van de programmatische aanpak stikstof (PAS) is veel aandacht voor re-dynamiseren als herstelmaatregel. Daarbij gaat het niet alleen om verstuivingen door de wind, maar ook om een meer natuurlijke overstromingsfrequentie te realiseren in verouderde, deels verzoete kwelders.

In de Zeeuwse Delta echter, heeft het bestaande, onnatuurlijke peilregime (in de afgesloten zeearmen) van de delta een ontwikkeling in gang gezet die nogal afwijkt van de ontwikkeling op de Waddeneilanden. Een belangrijke vraag daar is, wat er zal gebeuren met de natuurwaarden indien een meer natuurlijk peilbeheer in de afgesloten zeearmen wordt nagestreefd. Al deze natuurwaarden hebben zich ontwikkeld na het gereedkomen van de Deltawerken, maar ze maken wel deel uit van habitattypen die in het kader van Natura 2000 bescherming genieten.

Doel van het onderzoeksproject Zoet-Zout-gradiënten

Doel van het overkoepelende onderzoek is om informatie aan te dragen over de bestaande populaties van de Groenknolorchis onder zowel natuurlijke situaties (met dynamisch kustbeheer) als onder situaties waarbij beheer (maaaien) noodzakelijk is om de jonge vegetatiestadia waar deze orchideeën zich optimaal ontwikkelen, in stand te houden. Daarbij worden de aantalsontwikkeling, de mogelijke verspreiding tussen eilanden, en de relatie met bodemfactoren en geohydrologische omstandigheden onderzocht.

Het onderzoek moet ertoe bijdragen dat de beheerders inzicht krijgen waar kansrijke situaties aanwezig zijn om washover systemen te ontwikkelen op de Waddeneilanden en waar kansen liggen om met peilbeheer in de Zeeuwse zeearmen betere levensomstandigheden te scheppen voor soorten waarvoor een instandhoudingsverplichting geldt.

Algemene kennisvragen.

Het onderzoeksproject Zout-Zout-gradiënten heeft de volgende hoofdkennisvragen:

- Hoe ontwikkelen zoet-zoutgradiënten zich bij een natuurlijke ontwikkeling van de Waddeneiland kust met name door opnieuw ontwikkelen van washover systemen, via dynamisch kustbeheer?
- Hoe zullen bestaande zoet-zout-gradiënten in de Zeeuwse Delta, met een gecontroleerd waterpeil, veranderen wanneer een meer natuurlijk peilregime wordt nagestreefd?

Deelvragen hierbij zijn:

- Welke zeldzame en bedreigde flora en fauna elementen zijn beperkt tot zoet-zout-gradiënten?
- Hoe ontwikkelen Groenknolorchis populaties zich in verschillende milieuomstandigheden?
- Welke zijn de belangrijkste milieufactoren die het voorkomen van Groenknolorchis bepalen?
- Hoe stabiel zijn die gradiënten?
- Hoe groot moeten duinsystemen zijn, willen zij voldoende grondwater leveren om zoet-zout-gradiënten in stand te kunnen houden?
- Wat is de noodzakelijke inrichting? Welk water- en vegetatiebeheer is nodig in het zoete en zoute landschap én in de brakke tussenzone?

1.2 Het hydrologische en hydrogeochemische onderzoek

In dit rapport worden, als onderdeel van het bovenomschreven project 'Zoet-zout-gradiënten', de hydrologische en hydrogeochemische omstandigheden vastgelegd zoals gemeten in de periode oktober 2012 – augustus 2013, op 4 eilanden waar de Groenknolorchis in een bepaalde zoet-zout-gradiënt voorkomt. Het betreft de NO punt van Borkum, het Groene strand van Schiermonnikoog, De Hors op Texel en de N-punt van Veermansplaat in de Grevelingen (Fig.1.2).

Naast het karteren en gedeeltelijk modelleren van de status-quo in genoemde periode, worden tevens enkele toekomst-scenario's doorgerekend. Daarbij staan veranderingen in overstromingsfrequentie, duinbreedte, regenval, begroeiing en ontkalking centraal.

Zoet-zout gradiënten

Zoet-zout gradiënten komen in kustgebieden zowel bovengronds als ondergronds voor: Bovengronds in regenwater, oppervlaktewater in duinvalleien met periodieke instroom van zout zeewater, estuaria en kustwateren, en ondergronds in het duingrondwater zelf, rond het grensvlak van zoet duingrondwater en omhullende zoute Noordzeegrondwater. Aanzienlijk dieper komen gradiënten voor op de overgangen van circulerend (sub)recent Noordzeegrondwater, oud fossiel, semi-stagnerend zeewater of brijn stammend van oplossende zoutlagen.

In de context van dit rapport gaat het vooral om zoet-zout gradiënten op het grensvlak van zoet duingrondwater en zout Noordzeegrondwater in de ondiepe ondergrond (<5 m-MV), op locaties waar duingrondwater exfiltreert, ondiepe zoetwaterlenzen zich vormen en kustnabij Noordzeewater (periodiek) infiltreert. Uiteraard dan vooral op locaties waar populaties van de Groenknolorchis (*Liparis loeselii*) voorkomen of voorkwamen, maar niet zonder beschouwing van de grotere systemen van duingrondwater en Noordzeegrondwater.

De rol van het hydrologische en hydrogeochemische systeem in het natuurbeheer, dat zich geconfronteerd ziet met problemen door verdroging, stikstofdepositie en verhindering van natuurlijke processen (zoals stuifdijken), is driedig (Grootjans): (1) hydrologie kan pionierstadia gedurende vele decennia stabiliseren; (2) elke verandering in het lokale hydrologische systeem geeft aanleiding tot een versnelde successie; en (3) laatstgenoemde maakt weer aangepaste beheersmaatregelen noodzakelijk (maaien, plaggen etc), die geld kosten, indien de veranderingen ongunstig zijn.



FIG. 1.2. Locatie van de 4 bestudeerde eilanden. Eco-districtengroepen underlay naar Klijn (1988).

2 Materiaal en methoden

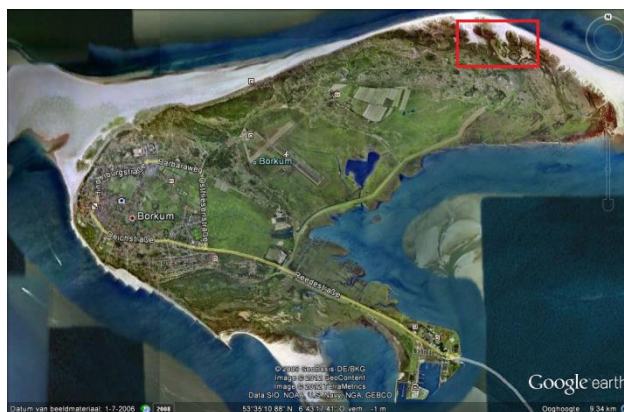
Pieter J. Stuyfzand

2.1 Locaties

Het hydrologische en hydrogeochemische onderzoek vond plaats op de NO punt van Borkum, het Groene strand van Schiermonnikoog, De Hors op Texel en de N-punt van Veermansplaat in de Grevelingen (Fig.1.1 en 2.1), waarbij Borkum aanzienlijk minder intensief is onderzocht. De locaties van waarnemingsputten en spiraalboringen zijn voor elk eiland aangegeven in resp. Fig.3.4, 4.1, 5.1 en 6.1.

2.2 Sondering en plaatsing peilbuizen

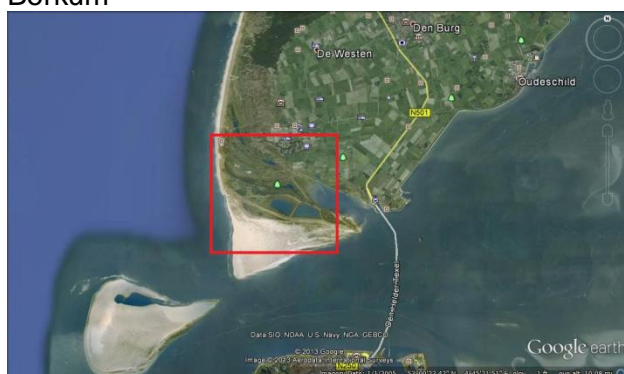
Op het Groene strand van Schiermonnikoog zijn 4 geleidbaarheidssonderingen verricht door Wiertsema & Partners (Fig.2.2B), en zijn met dezelfde truck op elk van die 4 locaties 4 peilbuizen de grond ingedrukt tot resp. ca. 5, 10, 15 en 20 m-MV. De X en Y coördinaten en peilbuisbovenkanten zijn door Wiertsema ingemeten m.b.v. 06-GPS. In hun rapport staan deze gegevens alsmede de boorlogs van de geleidbaarheidssonderingen.



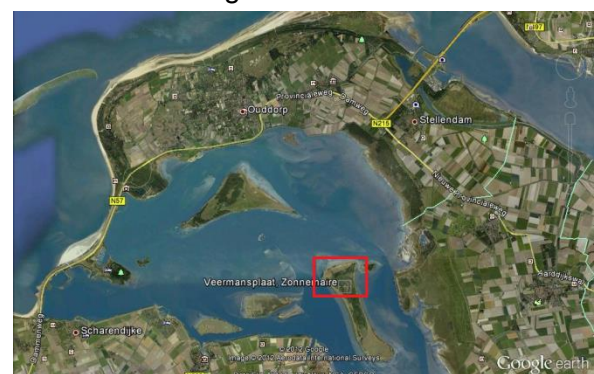
Borkum



Schiermonnikoog



Zuidwest Texel



Veermansplaat

FIG. 2.1. Locaties van onderzoek op de 4 eilanden.

Met een VU handpuls zijn 2 ondiepe peilbuizen (3-5 m-MV) geplaatst op Schiermonnikoog, Texel en Veermansplaat (Fig.2.2E). In 5 van de 6 peilbuizen zijn divers van Schlumberger gehangen en zijn metalen beschermkokers met dwarsanker over de peilbuis heen geplaatst ter bescherming tegen vandalisme.

Op de locatie Schiermonnikoog betrof het 2 peilbuizen, waarvan de peilbuis in het embryonale duingebied werd uitgerust met een CTD diver en die achter de stuifdijk met een diver plus barometer. Helaas werd de peilbuis met CTD diver op Schiermonnikoog na plaatsing niet meer aangetroffen, zij was met CTD diver en al uit de grond getrokken en gestolen met achterlating van de zware beschermkoker. Zie verder ad Ch.4.

2.3 Spiraalboring, bemonstering en veldmetingen

Spiraalboring

De door VU ontwikkelde spiraalboor is bedoeld om relatief ondiep grondwater (0-3 m beneden grondwaterspiegel) nauwkeurig op verschillende diepten te bemonsteren. De resolutie daarbij bedraagt ca 5 cm. Eerst wordt met de Edelman tot de grondwaterspiegel geboord, daarna wordt met de spiraalboor het kleine filtertje onderin de boor op de gewenste diepte onder de grondwaterspiegel geboord, om tenslotte met behulp van een vacuümsysteem een grondwatermonster te nemen. Na het eerste monster kan doorgeboord worden naar een volgende diepte om daar een tweede monster te nemen, etc. De spiraalboor is uitermate geschikt voor zandgronden. Fig.2.2 toont verschillende foto's van de spiraalboor in het veld. Voor nadere informatie zie Stuyfzand (2013).

Voor dit project zijn doorgaans per spiraalboring 10 grondwatermonsters genomen tot ca. 1.5 m beneden grondwaterspiegel (GWS). Dit gebeurde op de volgende dieptes, waarbij onderscheid tussen monsters met alleen veldmetingen en monsters met lab metingen:

Met alle lab-metingen: monsters op 0.15, 0.60, 1.05 en 1.5 m beneden grondwaterspiegel.

Met alleen veldmetingen: monsters op 0.3, 0.45, 0.75, 0.9, 1.2 en 1.35 m beneden grondwaterspiegel. Afwijkingen van dit patroon zijn vrij talrijk geweest, mede door het voorkomen van storende slib/klei-lagen. De GPS locaties zijn gemeten met een 'Etrex Vista HCx' van Garmin. Op Texel is de maaiveldshoogte ter plaatse van de boringen ingemeten met een digitale landmeter 'Sprinter 150' Leica en een tripod Topcon, een 50 meter meetlint en een waterpasinstrument (Suunto PN-5/1520) ter controle van de digitale hoogtemetingen.

Bemonstering en veldmetingen

Na het voorpompen van ca. 250 mL ter spoeling van stijgleiding en reductie van meekomend zwevend stof (slib, klei), zijn de veldmetingen verricht en watermonsters genomen.

In het veld zijn de volgende metingen en waarnemingen gedaan: het elektrisch geleidingsvermogen (EC), de temperatuur (T) en zuurgraad (pH). Daarnaast zijn ook enkele audiovisuele waarnemingen gedaan en genoteerd: kleur, troebeling, H₂S geur en eventuele overige bijzonderheden.

Voor het meten van de EC en temperatuur is gebruik gemaakt van de 'GMH 3430' van Greisinger, terwijl de pH metingen verricht zijn met '1001 pH' van Sentron.

In het veld zijn 3 containers voor laboratoriumanalyse gevuld:

- buisje A (12 cc) ontving in veld gefiltreerd water (over 0.45 µm membraan), werd ter conservering aangezuurd in lab (zelfde dag of dag erna) met 0.7 mL HNO₃ suprapuur 65% per 100 cc (--> dus ca. 0.05 mL per 12 cc indien HNO₃ 65%), en geanalyseerd op hoofd- en sporenelementen via ICP-OES (bewaartijd max 6 maanden);
- buisje B (12 cc) ontving in veld gefiltreerd water zonder conserveermiddel voor analyse in lab op zowel anionen via conductometrie na ion-chromatografische scheiding (IC) als NH₄ via Aquachem. Analyses zijn zsm na bemonstering (0.5-2 dag erna) uitgevoerd. Een NH₄ deelmonster werd gehaald uit het anionenbuisje op het moment van anionenanalyse en vervolgens ingevroren bewaard tot er voldoende monsters bijeen waren om NH₄-analyse via Aquachem op te starten; en
- PE-flesje (50-100 cc) werd ongefiltreerd tot nok toe gevuld met water ter analyse in lab op pH, EGV (=EC) en HCO₃, zelfde dag van bemonstering of dag erna.

Op Texel en Schiermonnikoog is een deel van de monsters direct in het veld geanalyseerd op HCO_3 via titratie met 0.16 N H_2SO_4 na additie van 'bromcresol green-methyl red indicator' poeder, tot een kleuromslag van groen naar licht roze.



A



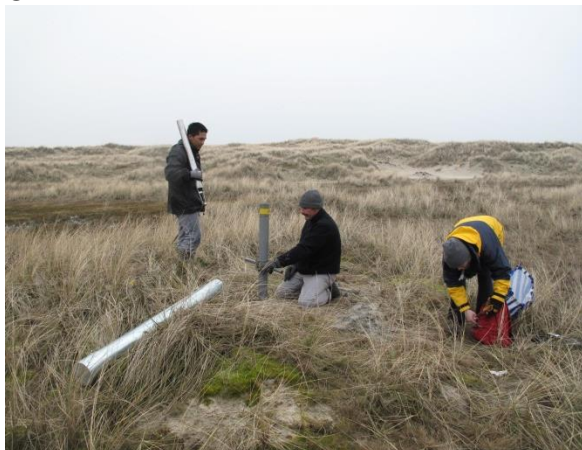
B



C



D



E



F

FIG. 2.2. Impressies van het veldwerk (foto's Stuyfzand, m.u.v. E door Grootjans). A = Spiraalboring op Borkum; B = sondering op Schiermonnikoog; C = spiraalboring op Groene strand Schiermonnikoog; D = periodiek duinmeertje met exfiltratie ijzerrijk grondwater op voorgrond, De Hors (Texel); E = plaatsing van peilbuis op De Hors (Texel); F = spiraalboring op noordpunt Veermansplaat.

2.4 Chemische analyses

Het flesje met 50-100 cc ongefiltreerd water is gebruikt om zelf zsm de EC, pH en HCO_3 concentratie in het lab te meten, de HCO_3 concentratie met een titratie tot eindpunt pH4.5. De EC en pH zijn ook in het veld gemeten ter vergelijking.

Via IC zijn bepaald: Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , F^- , Br^- , PO_4^{3-} en NO_2^- , via ICP-OES de belangrijkste kationen (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe, Mn), SiO_2 , S-totaal en P-totaal, en een serie spore-elementen (Ag, Al, As, B, Be, Ba, Bi, Br, Cd, Co, Cr, Cu, Eu, Ga, Ho, In, La, Li, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Sr, Th, Tl, U, V, Yb, Zn en Zr). Van deze spore-elementen waren de concentraties Bi, Ga, In, Sb, Se, Sn, Th, en U vrijwel altijd beneden een feitelijk te hoge minimum detectie limiet (MDL; resp. 4, 2, 5, 3, 5, 20 en 40 $\mu\text{g/L}$) en zijn derhalve verder buiten beschouwing gelaten. De concentratie NH_4^+ is bepaald met de zogenaamde Aquachem, via spectrofotometrie.

In totaal zijn 410 watermonsters genomen voor het Zoet-zoutgradiënten project (>95% met de VU-spiraalboor), op Borkum 23, Schiermonnikoog 141, Texel 179 en Veermansplaat 67.

2.5 Grondwaterstanden

Met divers van Schlumberger (Eijkelkamp) zijn de grondwaterstanden en temperatuur op 5 locaties doorgaans elke 10 minuten geregistreerd. De registratieperiode en verdere details zijn samengevat in Tabel 2.1. Voor de uitlezing in het veld is gebruik gemaakt van de e+Control uitleesapparatuur van Schlumberger, en voor de verwerking van de data inclusief correctie voor barometrische fluctuaties is het programma ?? van Schlumberger toegepast. Incidentele handmetingen met een peilklokje fungeerden ter calibratie van de divermetingen. Aanvullend zijn grondwaterstandsgegevens verkregen van Dinoloket.

Het waterniveau (WL; cm H_2O) is berekend, conform diver manual, met de volgende formule waarbij de atmosferische drukgegevens van de barodiver of een nabijgelegen weerstation worden gebruikt:

$$\text{WL} = \text{TOP} - \text{DL} + 9806.65 (P_{\text{DIVER}} - P_{\text{BARO}}) / (g \rho_{\text{H}_2\text{O}}) \quad (2.1)$$

Waarin: TOP = bovenkant peilbuis [cm +NAP]; DL = diepte diver t.o.v. TOP [cm]; P_{DIVER} , P_{BARO} = druk gemeten in resp. diver en barometer [cm H_2O]; g = lokale zwaartekracht versnelling [m/s^2]; $\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ = dichtheid van water in stijgbuis [kg/m^3]

TABEL 2.1. Overzicht van de 5 voor dit onderzoek geïnstalleerde divers ter automatische registratie van de waterstand + temperatuur (MiniDiver), luchtdruk (BaroDiver) en waterstand + temperatuur + EC (CTD Diver) in gepulste peilbuizen.

Divertype	Borkum	Schiermon-	Texel	Veermans-
		nikoog	De Hors	plaat
MiniDiver	0	1	2	1
BaroDiver	0	1	0 ##	1
CTD diver	0	1 #	0	0
periode	-	jan. - sep. 2013	jan. - aug. 2013	mrt. - nov. 2013
meetfrequentie	-	1x / 10 min.	1x / 10 min.	1x / 10 min.

= gestolen tussen ?? en ??; ## = waarnemingen KNMI-station De Kooy gebruikt

2.6 Dataverwerking hydrochemie

De chemische analyseresultaten zijn opgeslagen en verwerkt met HYDROGEOCHEMICAL (HGC 2.1), een programma in Excel spreadsheet, voor opslag, management, controle, correctie en interpretatie van waterkwaliteitsgegevens (Stuyfzand, 2012). Manual en programma zijn downloadbaar via:

<http://hydrology-amsterdam.nl/valorisation/Valorisation.html>

Tabel 2.2 biedt een overzicht van de diverse berekeningen uitgevoerd in HGC.

Voor dit onderzoek zijn vooral belangrijk:

- datacontrole via ionenbalans, vergelijking van gemeten met berekend EC, en vergelijking van pH met Al concentratie (controle op meebemonsterd, in zuur opgelost slib)
- de basen uitwisselingsindex (BEX) en het chemische watertype
- de kalkverzadigingsindex (SI_C)
- de redox index, met onderscheid tussen (sub)oxisch (O₂ en/of NO₃ bevattend), anoxisch (O₂ = NO₃ = 0; Fe-reducerend, geen SO₄-reductie), en diep anoxisch (SO₄-reducerend en eventueel methaanvormend).
- de kwantitatieve bijdrage van processen (vooral luchtverontreiniging, zeezout via atmosferische depositie en zeewaterbijmenging, en kalkoplossing) aan totaal opgeloste stoffen (TDS)
- het percentage bijgemengd oceaanwater en de eutrofiëringspotentie index (EPI).
- de Spider-plot en Pearson's correlatie matrix.

TABLE 2.2. Overzicht van de diverse berekeningen in HGC 2.1. Uit: Stuyfzand (2012).

Ch.	Category	Parameters involved
3	Data control	conversion to standard unit, values <MDL, IB, EC, missing values, bird dropping correction (BDC), filtration bias correction (FBC)
4	Base exchange and nonmarine concentrations	BEX, Na, K, Ca, Mg, Cl, SO ₄ , B, Br, F, I, Li, Mo, Rb, Sr, 18O
5	Chemical watertype	Chlorinity, alkalinity, dominant cation & anion, BEX
6	Mineral equilibria	Saturation index for calcite, dolomite, siderite, rhodochrosite, gypsum, barite, fluorite; TIC, CO ₂
7	Ratios	Cl/Br, Cl/Na, Ca/Mg, Ca/Sr, HCO ₃ /Ca, HCO ₃ /ΣA, Fe/Mn, COD/TOC, MONC, SUVA, 2H/18O
8	Hydrochemical facies	pH-class, redox index, BEX, pollution index WAPI
9	TDS contributing processes	TDS, % Marine, % Atm pollution, % Bulk Organic Matter, % Mineral dissolution (silicates and carbonates)
10	Various calculated parameters	O ₂ -sat, oxid capacity, trace element groups, Wirdum, SAR, ESR, EPI, water density, viscosity, O-18 corrected for salinity effects
11	Normalization of analytical data	Spider plot, WAPI radar plot, norm exceedance
12	Complexation of 2+ trace metals in fresh water	free conc., inorg and org complexed: Ba, Cd, Co, Cu, Ni, Pb, Zn
13	Pearson Correlation Matrix	Chemical and site parameters

BEX = Base Exchange index; EC = Electrical conductivity; IB = Ionic Balance; MDL = Minimum Detection Limit; MOC = Modified Oxidation/reduction Capacity; NA = Not Available; SAR = Sodium Adsorption Ratio; SI = Saturation Index; TDS = Total Dissolved Solids; TIC = Total Inorganic Carbon; TIN = Total Inorganic Nitrogen ions; TotH = Total Hardness; WAPI = Water Pollution Index;

2.7 Modelling vorm en ontstaan zoetwaterlenzen

Veranderingen in duinbreedte, duinvorm (langgerekt of cirkelvormig), nuttige neerslag, regionale en lokale drainagebasis (resp. zeeniveau en niet afwaterende plassen), zoutgehalte Noordzee, temperatuur en tijd sinds de verandering hebben gevolgen voor de grootte van een zich op zout grondwater vormende zoetwaterlens, zoals die algemeen langs de Nederlandse kust voorkomen (Stuyfzand, 1993).

Deze gevolgen zijn met analytische oplossingen te berekenen voor eenvoudige situaties die zich laten schematiseren met een homogeen, isotroop watervoerend pakket (WVP) waarbinnen de lens ruimschoots past, ruimtelijk uniforme en constante nuttige neerslag, een scherpe zoet-zout overgang en homogeen stilstaand zout grondwater. Deze oplossingen zijn in het spreadsheetmodel HYDROLENS 3.2 ondergebracht (Stuyfzand, 2009; Stuyfzand et al., 2010), waarvan enkele eigenschappen in Tabel 2.3 zijn samengevat. Het model is gevalideerd door de resulterende simulaties voor grote kustduinsystemen in Nederland (met lenzen >100 m dik) te vergelijken met waarnemingen in de relatief ongestoorde periode rond

1900 (Bakker, 1981; Stuyfzand 1993), alsmede door vergelijking ervan met metingen in een klein schaalmodel met een <1 m dikke zoetwaterlens (Stoeckl & Houben 2012). HYDROLENS blijkt dus zowel zeer kleine (<1 m dik) als zeer grote zoetwaterlenzen (>100 m dik) goed te benaderen. In Bijlage 1 worden de belangrijkste berekeningen van de vorm en vorming van zoetwaterlenzen gepresenteerd.

2.8 Modelling hydrogeochemische veranderingen

Het EXCEL spreadsheetmodel 'DUVELCHEM', acronym voor DUne VEgetation Lens CHEMistry, is ontwikkeld om de chemische samenstelling van ondiep (duin)grondwater en bodemvocht op elke gewenste diepte te voorspellen in een natuurlijk infiltratiegebied (met gemiddelde grondwaterstand >0.5 m-MV) en in de tijd (op jaarbasis), als functie van (zie ook Tabel 2.3):

- de tijd sinds duinvorming of vervorming;
- belangrijke ecologische standplaatsfactoren, zoals grondwaterstand, afstand tot de kust, begroeiing, atmosferische depositie, ontkalkingsdiepte en ophoping van organisch materiaal aan maaiveld;
- effecten van klimaatverandering, betreffende o.a. temperatuur, netto neerslag, evapotranspiratie, windkracht en windrichting; en
- kustafslag (b.v. door zeespiegelrijzing) of kustverbreding (b.v. door zandsuppletie).

Met DUVELCHEM wordt niet alleen de ondiepe grondwaterkwaliteit voorspeld, doch tevens de ontkalking en verzuring van kalkhoudend duinzand. De geadresseerde waterkwaliteitsparameters zijn: EC, pH, Cl, SO₄, HCO₃, NO₃, PO₄, Na, K, Ca, Mg, NH₄, Fe, Mn, Al, SiO₂ en DOC.

DUVELCHEM is gebaseerd op: (a) expert regels bogend op zeer omvangrijke chemische waarnemingen aan regenwater, doorval, drainagewater lysimeters, ondiep duingrondwater en duinbodems in de vastelandsduinen tussen Scheveningen en Camperduin, en daaraan ontleende proceskennis (o.a. Stuyfzand, 1984, 1987b, 1988, 1989, 1991, 1993; Stuyfzand & Lüers, 2000); (b) chemische massabalansen; (c) chemische evenwichten; en (d) een gereconstrueerde tijdreeks van atmosferische depositie van 1900-2012.

De belangrijkste in- en output van DUVELCHEM staan in Tabel 2.3.

TABEL 2.3. Enkele karakteristieken van het instrumentarium ter kwantificering van de hydrologische en hydrochemische effecten van kustuitbreiding of kusterosie en klimaatverandering.

	HYDROLENS	DUVELCHEM
	Zoetwaterlens op zout	Kwaliteit ondiep duinwater
Software	EXCEL	EXCEL
Hoofd Input	Nuttige neerslag (N)	Neerslag (P)
	Breedte duinstrook	Evapotranspiratie
	Doorlaatvermogen	Atmosf. Depositie
	Porositeit (eff)	Afstand kust (HWL)
	Dichtheid zoet en zout	Begroeiingstype
	Polderpeil	Bewortelingsdiepte
		Grondwaterstand
		Ontkalkingsdiepte (OD)
Hoofd Output		Kalkgehalte onder OD
	Positie grondwaterspiegel	Chem: zeezouten
	Diepteligging zoet/zout	Chem: luchtverontreinigingscomp
	Dispersieve menging zoet/zout	Chem: kalk-koolzuur
	Lengte zoetwatertong onder zee	Chem: NO ₃ , NH ₄ , Silicaatverwerking
	Groeitijd lens	Ontkalking
	Effecten van:	Effecten van:
	Verandering in temp, N	Verandering in temp, P
Dichtheid zout	Verandering in begroeiing	
Kustverbreding / zeespiegelstijging	Kustverbreding / zeespiegelstijging	

3 Borkum

Pieter J. Stuyfzand en Henk Everts

3.1 Grootschalige hydrogeologie

Borkum kent 2 duingebieden met een flinke zoetwaterlens, te weten het Westland en Oostland elk met een puttenveld voor de drinkwatervoorziening (Fig.3.1). De opbolling van de zoetwaterlens is weergegeven in Fig.3.2 samen met de pompputlocaties. De ondergrond waarin zich de tot maximaal 52 m-GZN (Gemiddeld Zee Niveau) reikende zoetwaterlens bevindt (Fig.3.3), bestaat uit 4 zandige watervoerende pakketten, n.l. van MV – 5 m-GZN, 10-18 m-GZN, 22-53 m-GZN en 60-180 m-GZN (Sulzbacher et al. (2012).

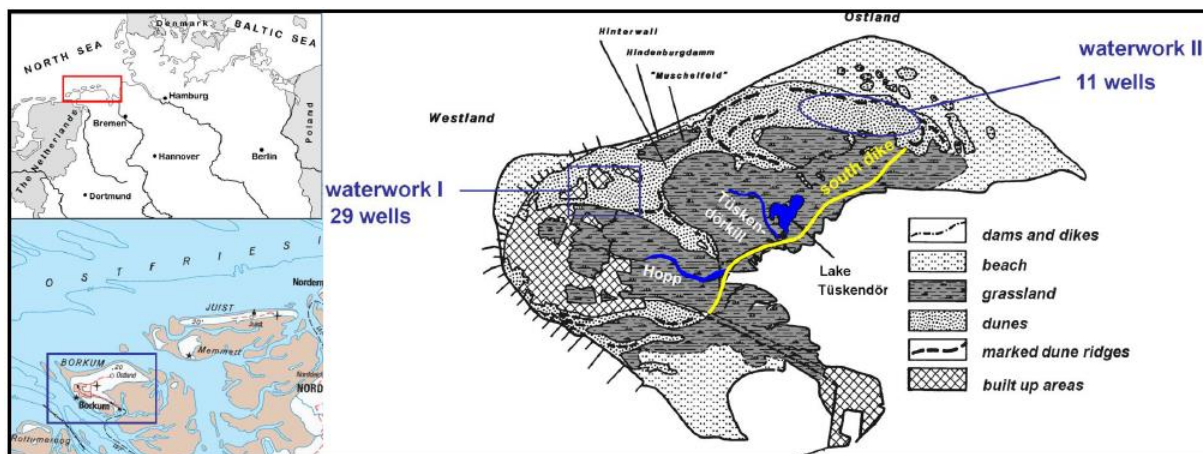


FIG. 3.1. Left panel: Location map of the island of Borkum. Right panel: Landscapes of Borkum with its two waterworks (WW): WW I Waterdelle and WW II Oostland and the two major rivers. Slightly modified from: Sulzbacher et al. (2012).

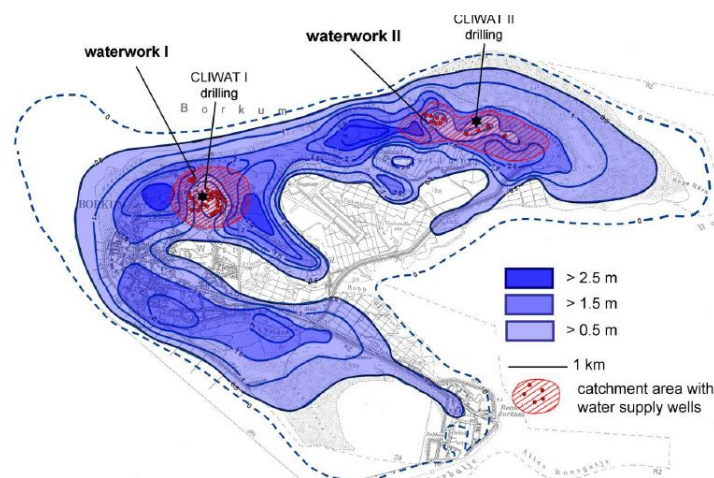


FIG. 3.2. Groundwater table of the upper aquifer during March 2010 (water supply wells marked by red circles, location of CLIWAT drillings marked by black stars, mean sea level marked by dashed line). From: Sulzbacher et al. (2012).

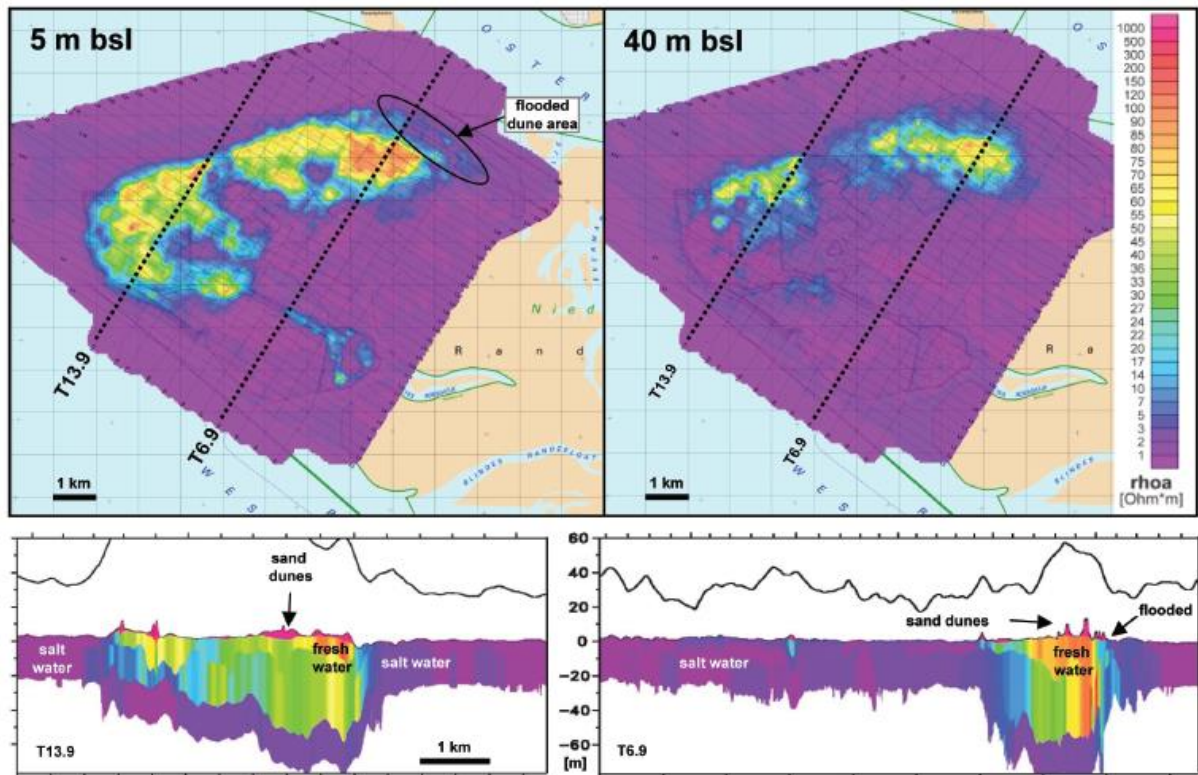


FIG. 3.3. 1D inversion results: resistivity maps at 5 m and 40 m BSL (above) and resistivity cross-sections along tie lines T13.9 and T6.9 (below) crossing Westland and Ostland, respectively (dotted lines on the maps). From Simon et al. (2009).

3.2 Grootschalige hydrochemie

Hydrochemische analyses van grondwater uit pompputten en enkele waarnemingsputten zijn verstrekt door Dr. Susanne Stadler (Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR), Hannover). De resultaten, verzameld in het kader van het CLIWAT onderzoek, zijn samengevat in Tabel 3.1, waarin de data gesorteerd zijn op diepte. Belangrijke kanttekening is dat de missende pH berekend is onder aanname van kalkevenwicht, en dat enkele verhoogde Al concentraties op meebemonsterd slib wezen zodat de concentraties van Al en enkele spore-elementen gecorrigeerd zijn hiervoor.

Geconcludeerd wordt dat al het bemonsterde grondwater (P5-Br38Pr), van 0-34 m – GZN, kalkrijk is en vermoedelijk in evenwicht verkeert met kalk. De meeste monsters vertonen verzoetingskenmerken (BEX positief), waarbij vooral de monsters OD37_A en Br38Pr eruit springen met zeer lage Ca concentraties als gevolg van vergaande uitwisseling voor Na, hetgeen resulteert in resp. NaHCO_3^+ en NaMix^+ watertypen.

Al met al sluiten de waargenomen concentratieniveaus en kenmerken goed aan bij die gevonden in het Nederlandse Rhendunale en Waddendistrict. Enkele opmerkelijke verschillen met de zeer ondiepe, eigen grondwatermonsters uit het Ostland, komen aan de orde in de volgende paragraaf.

TABEL 3.1. Grondwaterkwaliteit op de 12 ondiepe meetpunten in de Ostdünen in 2012 (A1-F2; dit onderzoek), en op 11 meetpunten verspreid over Borkum stammend van CLIWAT onderzoek (P5-Br38Pr; data verstrekt door dr. S. Stadler). Lichtblauwe regels = zoet grondwater (Cl < 300 mg/L). Groene regels = met groenknolorchis; BLS = Below Land Surface. Vegetatie beoordeeld door dr. Henk Everts.

Sample	Depth	EC	pH	Cl	SO4	HCO3	NO3	PO4	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	NH4	SiO2
	m BLS	lab	lab	mg/L	mg/L	mg/L	mg NO3/L	tot	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg NH4/L	mg SiO2/L
A1	0.5	3650	6.91	1147.8	161.5	422	0.0	0.364	572.1	27.6	103.2	75.4	18.753	0.490	1.075	13.7
A2	1.0	4540	6.96	1501.3	227.8	425	0.0	0.133	686.9	29.9	148.5	120.1	14.538	0.624	1.355	14.6
B1	0.5	3780	6.96	1144.0	70.4	425	0.0	0.187	628.9	44.7	64.6	71.8	24.020	0.217	1.300	18.7
B2	1.0	4500	6.95	1444.3	157.2	424	0.0	0.795	696.2	35.3	169.3	100.7	24.059	0.612	1.342	16.4
C1	0.5	8980	6.95	3235.6	481.8	424	0.0	0.713	1767.2	93.6	187.4	202.3	10.337	0.433	2.198	23.2
C2	1.0	9990	6.96	3762.7	567.3	425	0.0	1.704	2001.4	104.4	209.7	237.4	30.766	0.653	4.256	28.2
D1	0.5	2220	7.07	607.4	46.7	431	0.0	0.222	379.0	32.8	38.2	41.3	8.154	0.148	0.707	13.3
D2	1.0	2910	7.22	886.5	108.3	441	0.0	0.013	335.3	37.9	103.2	104.2	2.885	0.213	0.725	9.0
E1	0.5	6000	7.04	1967.4	300.8	430	0.0	0.092	1075.2	54.0	125.6	120.3	3.928	0.856	1.450	15.9
E2	1.0	7700	6.90	2791.2	367.9	421	0.0	0.564	1522.3	58.3	148.0	128.8	14.478	0.358	4.422	14.7
F1	0.5	11990	6.95	4852.8	726.0	424	0.0	0.573	2427.2	128.8	283.2	298.1	7.580	0.674	4.382	21.3
F2	1.0	12610	7.06	5330.5	731.4	431	0.0	2.586	2661.4	121.4	258.7	319.4	21.291	1.576	4.379	19.2
P5	3.5	366	7.49	25.9	12.3	212	14.4	0.160	14.0	4.3	66.4	9.3	0.107	0.031	-0.010	11.9
P6	3.5	6080	7.59	2118.0	335.0	333	0.2	1.690	1172.0	64.2	79.0	158.0	0.098	0.037	1.040	33.1
P7	3.5	526	7.33	52.1	10.6	308	0.1	0.930	40.4	9.3	70.6	15.7	0.425	0.094	0.670	37.7
OD 37_A	4.5	412	8.22	44.0	13.9	231	0.8	1.410	75.5	15.3	11.1	9.2	5.850	0.020	0.030	51.1
P2	7.0	386	7.54	36.8	13.8	215	1.3	0.410	28.6	4.3	58.6	7.9	0.452	0.072	0.380	18.8
P3	7.0	429	7.42	34.6	9.6	266	0.1	0.720	29.5	8.8	63.7	11.2	1.360	0.233	0.770	29.8
P4	7.0	642	7.24	63.4	20.5	372	0.1	1.270	42.6	19.5	76.6	26.8	1.910	0.157	1.380	38.3
OD22	8.0	541	7.80	58.3	0.5	290	0.1	0.480	31.0	5.4	81.7	10.5	0.928	0.426		22.7
OD 37_B	10.0	1366	7.73	386.0	67.6	215	0.1	0.290	248.0	9.1	48.7	22.6	0.239	0.049	0.040	18.5
OD 37_C	19.5	6673	7.23	2421.0	359.0	208	0.1	0.290	1119.0	32.9	300.0	142.0	0.076	0.194	0.650	36.6
Br38Pr	33.5	1212	8.10	208.0	50.4	378	2.2	5.940	254.0	25.4	13.1	19.6	0.624	0.044		17.7

Sample	Depth	EC	Al	As	B	Ba	Br	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Sr	V	Zn
	m BLS	lab	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
A1	0.5	3650	12	24.2	394	12.0	4060	1.6	0.6	2.1	16.6	0.6	0.3	636	10.0	75.0
A2	1.0	4540	4	34.1	428	11.4	5375	3.1	0.6	1.6	19.0	1.0	1.1	937	2.5	38.6
B1	0.5	3780	0	33.2	525	12.9	4069	2.5	2.6	1.1	16.0	0.5	0.4	484	32.0	27.1
B2	1.0	4500	7	55.5	558	11.9	4887	1.2	1.0	0.6	23.0	0.7		1035	5.4	16.2
C1	0.5	8980	3	31.5	1288	17.6	10342	1.9	0.5	1.8	45.9	2.2	0.7	1639	0.1	19.3
C2	1.0	9990	2	90.5	1363	21.5	11770	3.4	0.6	0.8	50.0	1.4	1.0	1895	1.0	16.8
D1	0.5	2220	0	50.4	341	3.2	2014	0.6	2.2	3.4	9.0	1.7	0.1	339	40.7	11.2
D2	1.0	2910	4	3.9	244	9.3	3056	1.4	0.8	1.7	16.0	0.3	0.1	677	1.0	8.1
E1	0.5	6000	16	18.3	823	16.9	6726	2.3	0.6	1.4	25.1	1.9	0.3	967	1.8	15.5
E2	1.0	7700	6	18.7	837	20.3	9477	1.1	0.5	1.7	26.0	1.1		1224	4.6	12.3
F1	0.5	11990	4	16.8	1267	32.4	15298	2.5	0.6	2.9	54.6	1.0	0.3	2640	1.0	19.2
F2	1.0	12610	2	75.5	1224	38.7	17052	3.8	0.3	1.1	54.8	0.8	2.5	2566	1.0	17.0
P5	3.5	366	0		40	2.0	80				7.0		4.0	199	3.0	6.9
P6	3.5	6080	8		876	5.0	7430				32.0			1086	4.0	
P7	3.5	526	1		152	8.0	180				11.0		3.0	373		22.9
OD 37_A	4.5	412	0	60.0	210	0.1	100	3.0	0.1		16.0		9.0	86	0.1	0.1
P2	7.0	386	0		40	3.9	110				11.0		3.0	233	2.9	10.5
P3	7.0	429	0		98	2.9	100				9.0			281	4.9	5.6
P4	7.0	642	0		215	3.0	240				16.0			499	4.0	3.8
OD22	8.0	541	16	10.0	61	3.0	190	1.5	1.5	1.5	11.0		5.0	284	1.5	4.0
OD 37_B	10.0	1366	0		139	7.8	1430				10.0			270		
OD 37_C	19.5	6673	8		187	21.0	8500				28.0		6.0	2326		8.0
Br38Pr	33.5	1212	17	10.0	869	27.0	927	1.5	4.0	1.5	22.0		2.5	143	26.0	3.0

Sample	Depth	EC	BEX	Chem.Wtype	SI-C	Marine		Ocean		EPI	Vegetation or site	F
						%TDS	% Mix					
A1	0.5	3650	-2.89	b3NaCl	-0.18	81.9	18.0	5.65	3.3		schoenetum	0.37
A2	1.0	4540	-4.85	b3NaCl	-0.05	86.0	13.4	7.44	3.0		schoenetum	0.3
B1	0.5	3780	-0.16	b3NaCl	-0.30	83.3	16.6	5.63	3.3		schoenetum met inslag juncus	0.36
B2	1.0	4500	-4.18	b3NaCl-	-0.05	85.4	14.5	7.15	3.5		schoenetum met inslag juncus	0.43
C1	0.5	8980	-1.88	b3NaClO	-0.10	91.4	8.1	16.21	3.8		juncetum gerarii met Juncus	0.59
C2	1.0	9990	-4.46	b3NaCl	-0.06	92.7	6.7	18.88	4.3		juncetum gerarii met Juncus	0.47
D1	0.5	2220	2.37	B3NaCl+	-0.39	69.0	30.9	2.92	3.0		schoenetum met aspect kruipwilg	0.52
D2	1.0	2910	-2.66	B3NaCl	0.14	79.4	20.6	4.33	1.4		schoenetum met aspect kruipwilg	0.16
E1	0.5	6000	-1.41	b3NaCl	-0.13	87.2	12.1	9.80	2.8		Carex flacca met Carex extensa en	0.3
E2	1.0	7700	-6.05	b3NaCl	-0.23	92.6	7.3	13.96	4.1		Carex flacca met Carex extensa en	0.33
F1	0.5	11990	-13.27	b3NaCl	0.00	96.1	3.4	24.39	4.1		juncetum gerarii met Juncus	0.57
F2	1.0	12610	-15.96	b3NaCl	0.03	97.8	2.2	26.80	4.3		juncetum gerarii met Juncus	0.58
P5	3.5	366	0.7	g2CaHCO3+	-0.01	12.7	81	0	3.2		South East Dunes, well 1-6 m BSL	0.31
P6	3.5	6080	1.61	b3NaCl	0	89.5	9.5	10.56	3.3		Sewage, well 1-6 m BSL	0.38
P7	3.5	526	1.71	F3CaHCO3+	0	17.3	81.7	0.11	3		Landfill, well 1-6 m BSL	0.47
OD 37_A	4.5	412	3.1	F2NaHCO3+	-0.01	17.4	80.4	0.07	2.2		Dunes Ostland, monit well 4-5 m BSL	0.19
P2	7.0	386	0.89	F2CaHCO3+	0	17.3	79.9	0.03	3		North Beach, well 0-14 BSL	0.39
P3	7.0	429	1.38	F3CaHCO3+	0	13.8	84.8	0.02	3.1		Sewage, Bantje Dunes, 0-14 m BSL	0.42
P4	7.0	642	2.64	F3CaHCO3+	0	17.3	80.4	0.17	3.5		well 0-14 m BSL	0.28
OD22	8.0	541	0.59	F3CaHCO3+	0	20.1	75	0.14	0.2		Dunes Ostland, well 8-10 m BSL	
OD 37_B	10.0	1366	1.21	B2NaCl+	-0.01	69	29.6	1.8	1.2		Dunes Ostland, monit well 9.5-10.5 m	0.06
OD 37_C	19.5	6673	-11.97	b2NaCl-	0	95.1	4.4	12.09	3		Dunes Ostland, monit well 19-20 m	0.28
Br38Pr	33.5	1212	7.02	f3NaMix+	0.05	36.8	55.3	0.9	2.9		Ostbake, monit well 33-34 m BSL	2.65

3.3 12 monsters ondiep grondwater in kwelzone van Ostland

In het Ostland, in het 'flooded dune area' van Fig.3.3, zijn eenmalig op 12 mei 2012, 12 ondiepe grondwatermonsters genomen met de spiraalboor, nabij de in Fig.3.4 aangegeven locaties 2 en 3. De meetresultaten zijn gepresenteerd in Tabel 3.1. Op de locaties A, B en D waren in 2012 tekenen van voorkomen van de groenknolorchis, hetgeen op locatie B een geringe uitbreiding inhoudt t.o.v. 2010.

Vergelijking in Tabel 3.1 van de kwaliteit van het ondiepste grondwater ter plaatse, met (A1, B1, D1) en zonder groenknolorchis (C1, E1, F1), leert het volgende. De locaties met groenknolorchis vertonen een lagere concentratie aan Cl (≤ 1500 mg/L), SO₄ (≤ 150 mg/L), PO₄ (≤ 0.4 mg/L), NH₄ (≤ 1.4 mg/L), B (≤ 550 µg/L), Br (≤ 5000 µg/L), Li (≤ 23 µg/L) en Sr (≤ 1000 µg/L). Deze locaties zijn gekenmerkt door licht brak, (bijna) kalkverzadigd, anoxisch grondwater met (zeer) hoge ijzer concentratie en geen tot geringe sulfaatreductie. Het water heeft een EPI van ca 3 (licht eutroof) en is stikstof gelimiteerd (als het water bepalend zou zijn).

De conditie voor chloride bepaalt ook die van SO₄, B, Br, Li en ten dele Sr, omdat deze parameters sterk verbonden zijn aan de zeewaterbijdrage, waarvoor Cl model staat.

De grondwaterstand op de locaties met groenknolorchis bedroeg in mei 2012 0.1-0.5 m-MV. De metingen in de kwelzone van Ostland laten hoge As concentraties zien, doorgaans hoger dan in het diepere grondwater in de zoetwaterkernen van het eiland (Tabel 3.1).



FIG. 3.4. Grondwatermonsterpunten A-F (yellow diamonds) op Borkum d.d. 12 mei 2012. Vegetatieopnames 1-5 (green and red dots) door Kooijman d.d. 7-8 september 2010: Groen = *Liparis loeselii*; rood = geen *Liparis loeselii* (waarschijnlijk te zout en/of te nat).

4 Schiermonnikoog

Pieter J. Stuyfzand en Ivan Estrada de Wagt

4.1 Fysiografie

Het studiegebied omvat het oostelijke deel van het zogenaamde Groene Strand aan de Noordzeekust, het westelijke deel van de stuifdijk en het westelijke deel van de daarachterliggende strandvlakte (Fig.2.1B en Fig.4.3).

4.1.1 Klimaat

Het typische zeeklimaat wordt in dit gebied onder andere gekenmerkt door een overheersende wind uit het zuidwesten, een jaarlijks gemiddelde temperatuur van lucht (en ondiep grondwater) van 9.5 °C (meetstations Leeuwarden en Groningen 1981 - 2010) en een gemiddelde jaarlijkse neerslag van 809 mm voor KNMI-station Schiermonnikoog over 1951-1980, 819 mm over 1981-2010 en 826 over 2004-2013 (Tabel 4.1). Deze waarden dienen naar alle waarschijnlijkheid nog gecorrigeerd te worden voor te lage opbrengsten i.v.m. sterke windeffecten langs de kust (Braak, 1945), zelfs als het regenvangers in Engelse opstelling betreft (Stuyfzand, 1988b). De correctiefactor bedraagt hier waarschijnlijk 1,025, zodat het gemiddelde jaartotaal voor het gebied uitkomt op 829 -840 mm/j. De droogste maanden zijn februari t/m mei, de natste zijn juli t/m december. Er is sprake van een geringe stijgende trend in regenval, waarbij april droger en juni t/m augustus natter lijken te zijn geworden (Tabel 4.1).

Maritieme luchtmassa's met een hoge stormfrequentie overheersen in de periode oktober t/m december en in maart. Meer informatie kan worden ontleend aan de Klimaatatlas van Nederland (KNMI, 1972) en aan KNMI (1983). Voor micro-meteorologische waarnemingen zij verwezen naar Van Putten (1979) en Vugts (2002).

TABEL 4.1. Gemiddelde maandelijkse en jaarlijkse regenval op KNMI-regenstation Schiermonnikoog voor enkel perioden, incl. de bijbehorende standaardafwijking. Gebaseerd op data van KNMI.

Par.	Period	Jan	Feb	Mrt	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	year
Mean	1951-1980	66.9	44.1	46.2	46.2	48.0	54.3	84.0	90.4	78.5	80.5	89.2	80.9	809.0
Mean	1981-2010	70.8	47.0	58.6	36.6	53.2	64.4	77.2	83.3	85.4	84.5	82.7	75.5	819.0
Mean	2004-2013	66.4	44.8	44.5	29.4	47.9	68.1	99.6	112.9	74.8	82.6	78.1	76.6	825.6
St. Dev.	1951-1980	30.7	21.8	19.5	27.1	22.1	26.0	41.2	43.2	35.5	41.2	38.4	36.3	125.4
St. Dev.	1981-2010	35.2	27.5	28.8	22.3	31.5	30.4	42.2	48.6	44.1	32.7	30.7	37.7	119.3
St. Dev.	2004-2013	34.2	22.3	33.8	18.4	32.5	33.1	50.2	53.8	34.0	35.5	36.3	36.3	105.0

4.1.2 Geologie

Tot de hier beschouwde, maximale diepte van 100 m-NAP komen uitsluitend onverkitte sedimenten uit het Kwartair voor. Pleistocene afzettingen zijn overal afgedekt door zandige en kleirijke Holocene sedimenten behorende tot de Westland formatie. De bovenkant van de jongste Pleistocene afzettingen, de mariene Eem Formatie ligt gemiddeld op 23 m-NAP. Fig.4.1 toont een geologisch oost-west profiel van het eiland volgens Beukeboom (1976).

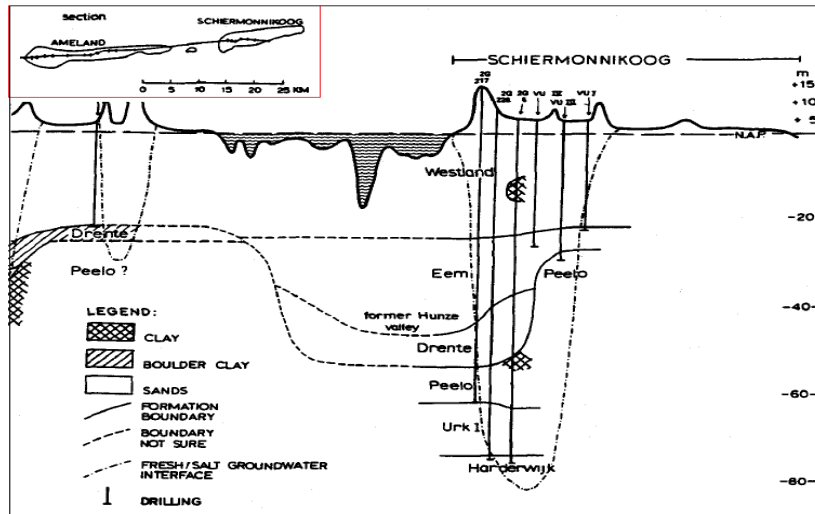


FIG. 4.1. Oost-west geologisch profiel over de oostzijde van Ameland tot het middendeel van Schiermonnikoog, met indicatie van de ligging van het zoet/brak grensvlak. Uitsnede uit langer profiel door Beukeboom (1976).

De duin- en strandzanden behoren tot het primair kalkarme type (~1%), en maken daarmee deel uit van het Noordelijke Duindistrict ook wel Waddendistrict genaamd. Zij zijn ook gekenmerkt door lagere veldspaat en hogere toermalijn en titaan gehalten, die op een andere herkomst van het kalkarme zand wijzen (Eisma, 1968; Stuyfzand et al., 2012). In Fig.4.1 valt te zien dat beneden 26 m-NAP tot de onderzijde van de zoetwaterlens de volgende geologische formaties kunnen worden aangetroffen : de Eem Formatie, Formatie van Drente, Peelo Formatie, Formatie van Urk en Formatie van Harderwijk.

Voor een uitvoerige beschrijving van de geologische geschiedenis en opbouw, ook tot grotere diepte, wordt verwezen naar Van Staalduinen (1977) en Zagwijn (1986).

4.1.3 Invloeden van de mens

Antropogene beïnvloedingen van het onderzoeksgebied, gelegen in het Nationaal Park Schiermonnikoog, zijn ten opzichte van andere duingebieden en Waddeneilanden in Nederland uiterst gering (Braat 2011). Zij bestaan hoofdzakelijk uit: bebouwing van het dorp Schiermonnikoog dat in ieder geval vóór 1854 op de huidige plaats aanwezig was; de Bancks polder, die in 1860 ingedijkt is in het zuidelijk aangrenzende gebied; de vóór 1928 gegraven Ijsbaan; omstreeks 1912 aangeplante dennenbossen (één ten oosten van de camping en één ten noordoosten van het Kapenglop); de waterwinning door middel van pomputten, sedert 1950 ten zuidwesten van het Kapenglop, en sedert 1996 gedeeltelijk rond de Westerplas die is ontstaan door inpoldering van een deel van de vroegere Westerkwelder in 1964; de stuifdijk die tussen paal 7 en 14 tot stand kwam tussen 1957 en 1959; en enige agrarische activiteiten vooral in de Banckspolder en rond een boerderij ten zuiden van het Kapenglop. Het natuurbeheer in diverse duinvalleien bestaat sinds de jaren 70 uit maaien, plaggen en begrazen. Zandsuppleties hebben nog niet plaatsgevonden.

Voor het onderhavige onderzoek vormt de aanleg van de stuifdijk de belangrijkste ingreep.

4.1.4 Geomorfologie

De geomorfologie van Schiermonnikoog beantwoordt aan die van een typisch 'model' Waddeneiland, zoals weergegeven in Fig.4.2. Voor een verdere bespreking van de diverse onderscheiden onderdelen zij verwezen naar Arens et al. (2009).

De belangrijkste geomorfologische eenheden op het westelijke en midden deel van Schiermonnikoog zijn in Fig.4.3 weergegeven, met indicatie van de vermoedelijke tijd c.q. periode van ontstaan.

De volgende eenheden zijn hier onderscheiden, globaal in volgorde van jong naar oud :

A : het huidige strand; B : de omstreeks 1958 aangelegde stuifdijk in het noordoosten;
 C : de onvolledig afgesnoerde, na 1958 gevormde strandvlakte met enkele strandduinen;
 D : het na 1854 gevormde zeereepgebied in het noorden en westen;
 E : de in de periode 1854-1927 gevormde gebieden van paraboolduinen en bijbehorende uitstuiwingsvalleien, één ten noordoosten van het Kapenglop en één ten zuidwesten van het Kapenglop;
 F : het omstreeks 1885 gevormde zeereepgebied der Kobbelduinen; G : de Oosterkwelder;
 H : de in 1860 met succes ingedijkte Westerkwelder, sedertdien Banckspolder;
 I : het vóór 1568 gevormde zeereepgebied der Kooiduinen en het noordwestwaartse verlengstuk daarvan;
 J : het vóór 1568 gevormde duinruggengebied langs de zuidrand van het centrale duingebied; en
 K : het vóór 1568 gevormde centrale duingebied, waarin ook het Kapenglop gelegen is. Het betreft in het noordoosten voornamelijk duinvalleien, die in eerste aanleg primair zijn, en in het zuidwesten voornamelijk lage duinkopjes.

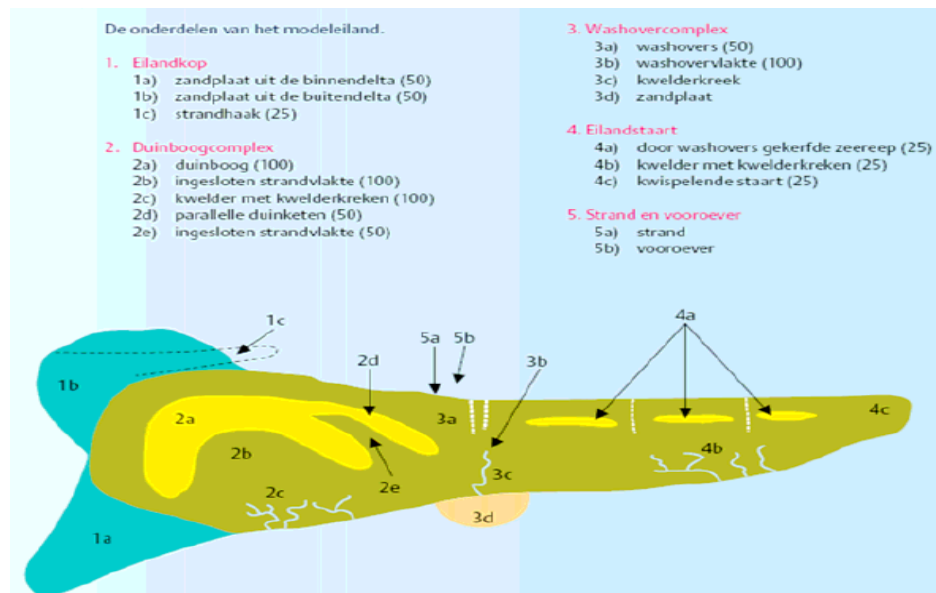


FIG. 4.2. Opbouw van een "model" Waddeneiland. Het Waddeneiland als geheel (geel) heeft er enkele duizenden jaren voor nodig om zich te ontwikkelen. Binnen eeuwen ontstaan daarbinnen vijf hoofdvormen, die op hun beurt weer zijn opgebouwd uit andere onderdelen. Van die onderdelen is de karakteristieke ontwikkelingstijd over het algemeen decennia. Naar Lammerts et al. (2008).

Voor het onderhavige onderzoek zijn de eenheden A, B, C en F het belangrijkste. Binnen de eenheid A (strand) onderscheiden we tegenwoordig tenminste 4 eenheden (Fig.4.5): het huidige strand, embryoduinen van de 2^e generatie (jongst), een tijdens hoogwater vollopend zwin (afgesnoerde strandvlakte), en embryoduinen van de 1^e generatie (oudst, gevormd na 1958 aan voet van stuifdijk).

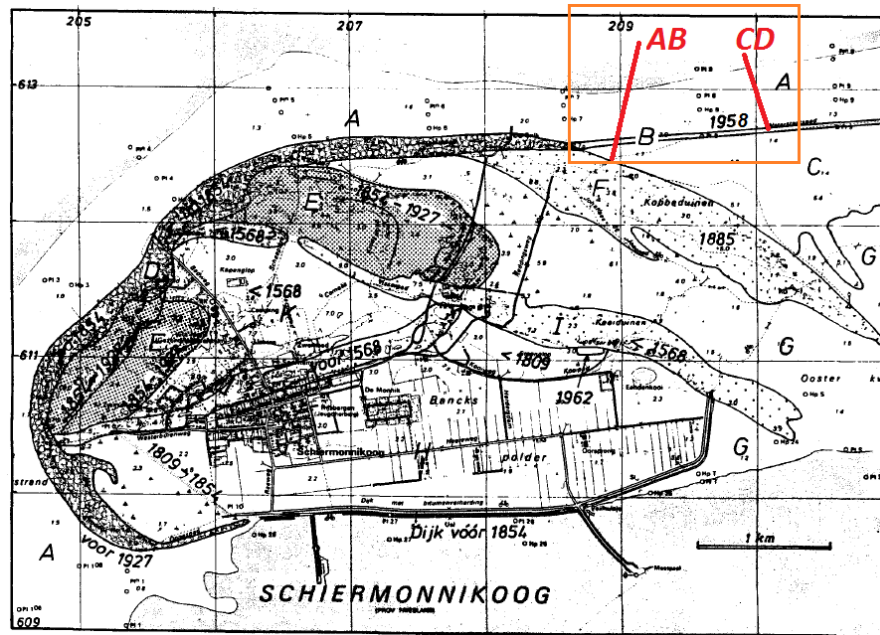


FIG. 4.3. Enkele belangrijke geomorfologische eenheden (A-K) en de vermoedelijke tijd c.q. periode van ontstaan. Iets gewijzigd naar Stuyfzand et al. (1992) op basis van gegevens in Isbary (1936) en Bakker et al. (1979). Tevens aangegeven de ligging van het studiegebied en de profielen AB en CD.

4.1.5 Bodems

Van het studiegebied is een STIBOKA bodemkaart 1 : 50.000 voorhanden. Het wordt geheel ingenomen door kalkhoudende (bovenin ontkalkende) en kalkloze duin- en vlakvaaggronden, bestaande uit matig fijn zand c.q. leemarm of zwak lemig, fijn zand. Hier zijn ontkalking (verzuring) en de accumulatie van organisch materiaal de belangrijkste bodemvormende processen (Klijn, 1981).

In het tijdens hoogwater vollopende zwin (eenheid 6 in Fig.4.6) komen lokaal dunne kleilaagjes en periodiek algmatten voor. Enkele bodemkundige data van de strandvlakte en het Groene Strand zijn gepresenteerd in Grootjans et al. (2013). Het oorspronkelijke kalkgehalte van strandzand is 1.5-1.8 %, dat van duinzand ca. 1.2 %. Het gehalte aan organische stof daarvan is resp. ?? en ?? %.

4.1.6 Habitat-typen

De ruimtelijke verbreiding van de door Staatsbosbeheer onderscheiden habitat-typen in het onderhavige studiegebied met omgeving is weergegeven in Fig.4.4. Hierin komen de volgende voor deze studie belangrijke habitat-typen voor, in de volgende landschappelijke eenheden: Groene Strand, Stuifdijk en Strandvlakte:

Groene Strand

Het gebied maakt deel uit van het Natura 2000 gebied 'Noordzeekustzone'. Er komen 7 habitattypen voor, waarvan de Embryonale duinen (H2110), witte duinen (H2120), zilte pionierbegroeiing (H1310) en zilte graslanden buitendijks (H1330A) het grootste oppervlak innemen. In de recente ontwikkeling zijn ook kalkrijke duinvalleivegetaties ontstaan met een goede kwaliteit.

Het beheer van het Groene strand bestaat uitsluitend uit niets doen. Er is de afgelopen 10-15 jaar een zeer progressieve vegetatieontwikkeling opgetreden over een strook van bijna 10 km lengte, met een breedte van enkele honderden meter.

In 1958 voltooide stuifdijk

Aan de zeezijde zien we hier wit duin met helm begroeid, daarachter domineert duindoornstruweel (H2160), met hier en daar kleine residuen van grijs duin (H2130A).

In 1958 afgesnoerde strandvlakte

Het gebied maakt deel uit van het Natura 2000 gebied 'Waddenzee'. Er komen 8 habitattypen voor. Daarbij neemt het habitatype Schorren en zilte graslanden buitendijks (H1330A) het grootste oppervlak in.

Voor de verschillende habitattypen zijn verbeterdoelen geformuleerd. Het areaal struweel en hoge kruiden is namelijk fors toegenomen ten koste van de hoger gewaardeerde lage kruiden. De Strandvlakte van Schiermonnikoog is dus sterk aan het verruigen, waarbij het aandeel van hoog opgaand Riet sterk toeneemt sinds 1980 (Grootjans et al. 1999). De Knopbiesvegetatie aan de voet van het Kobbeduin heeft zich onder invloed van de relatief sterke toestroom van kalk- en ijzerrijk grondwater lange tijd (ca. 40 jaar) goed kunnen handhaven (zie Grootjans et al. 1995). De laatste tien jaar worden de Knopbiesen minder vitaal en gaan de Rode lijstsoorten sterk achteruit. Groenknolorchis is sinds 2012 verdwenen. Aanvankelijk had maaien een licht positief effect, maar op dit moment heeft maaien alleen tot gevolg dat er meer licht op de grond valt en dat lichtminnende soorten daarvan profiteren.

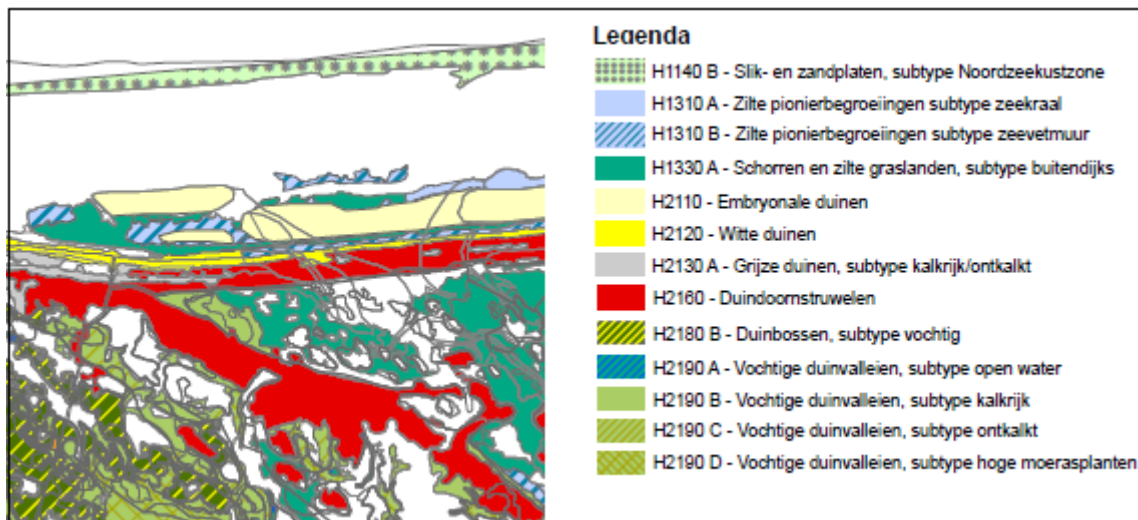


FIG. 4.4. *Habitat-typen in het studiegebied na 2000. Naar Beheersplan Staatsbosbeheer (in Rus et al., 2011).*

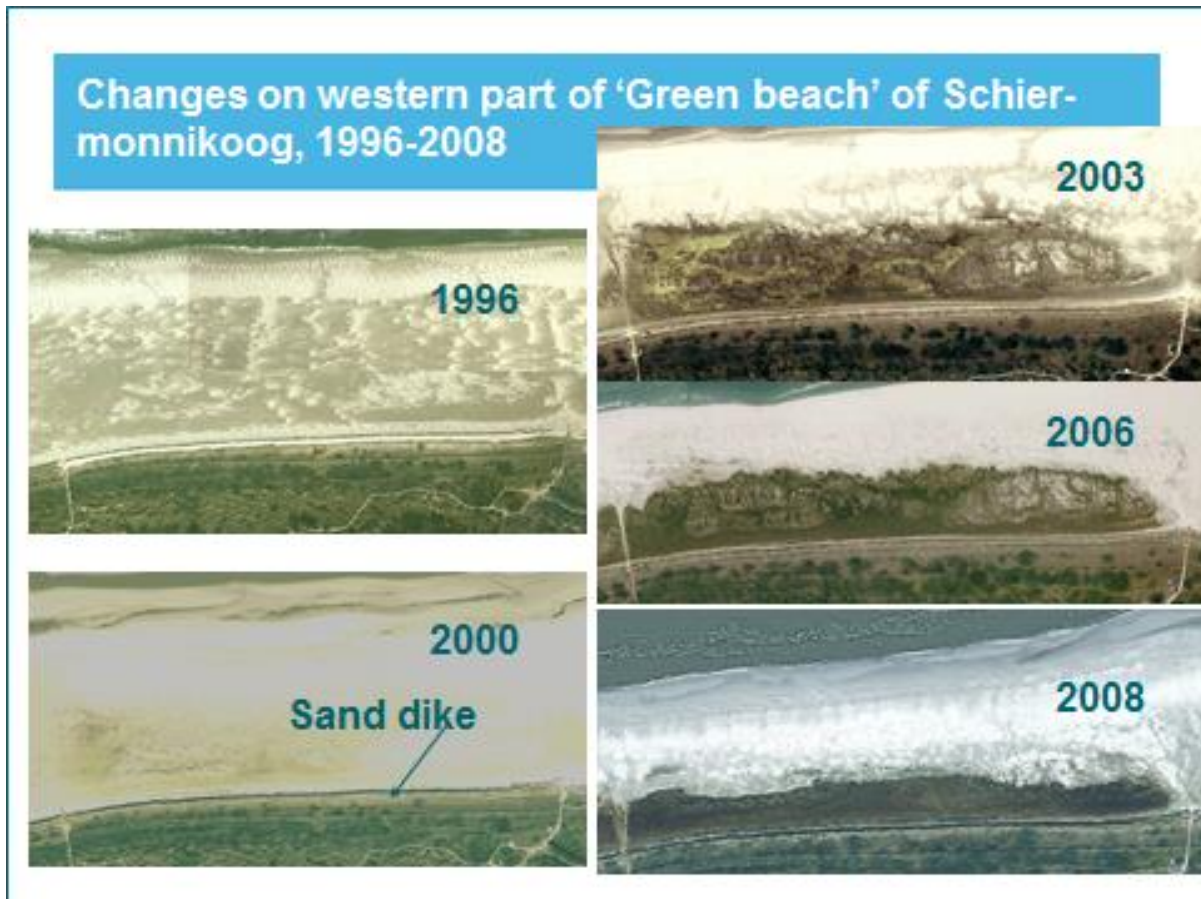


FIG. 4.5. Ontwikkelingen op het Groene Strand van Schiermonnikoog: de veranderingen op de westelijke helft van het Groene Strand in de periode 1996-2008 (fotocollage door Niels Schotsman, DT-DK).



FIG. 4.6. Luchtfoto van het oostelijke deel van het Groene Strand omstreeks 2010? (© Rijkswaterstaat). 1 = omstreeks 1885 gevormde zeereepgebied der Kobbeduinen; 2 = de onvolledig afgesnoerde, na 1958 gevormde strandvlakte met enkele strandduinen; 3 = oude 1^o linie van stuifdijk; 4 = jonge 2^o linie van stuifdijk; 5 = 1^o generatie embryoduinen; 6 = hoogwater zwin; 7 = 2^o generatie embryoduinen; 8 = strand.

4.2 Grootschalige hydrologie van Schiermonnikoog

4.2.1 Hydrogeologische opbouw

De hier gehanteerde indeling in watervoerende en slecht-doorlatende pakketten (afgekort respectievelijk WVP en SDP) volgt uit tabel 4.1 en een N-Z profiel 1 km ten westen van het onderhavige onderzoeksgebied (Fig.4.7).

Met betrekking tot SDPs is een onderverdeling aangebracht om geologisch onderscheid aan te brengen in een SDP, dat dikwijls is opgebouwd uit meerdere formaties of eenheden. Daarbij is gebruik gemaakt van de codering volgens Stuyfzand (1989b). De in Tabel 4.1 gepresenteerde bodemconstanten zijn geënt op gegevens in Krajenbrink et al. (1974) en Veldhuijzen (1991).

De situatie op grotere diepte dan 50 m-NAP is onduidelijk door gebrek aan voldoende boringen. Een echte hydrologische basis lijkt afwezig tot tenminste 160 m-NAP, waar zich de top van de Formatie van Maassluis bevindt (Zagwijn & Van Staalduinen, 1975).

Voor de onderhavige studie is de ruimtelijke verbreiding van Holocene wadafzettingen (SDP 1B) van groot belang. Deze bevinden zich volgens de 4 sonderingen vanaf ca. 4 m-NAP tot voorbij de maximale sondeerdiepte van 20 m-NAP. Zij bestaan uit fijnzandiger materiaal dan de erop liggende, ondiep mariene en strand afzettingen, en bevatten bovendien op onregelmatige diepten een enkele dunne klei- of siltlaag.

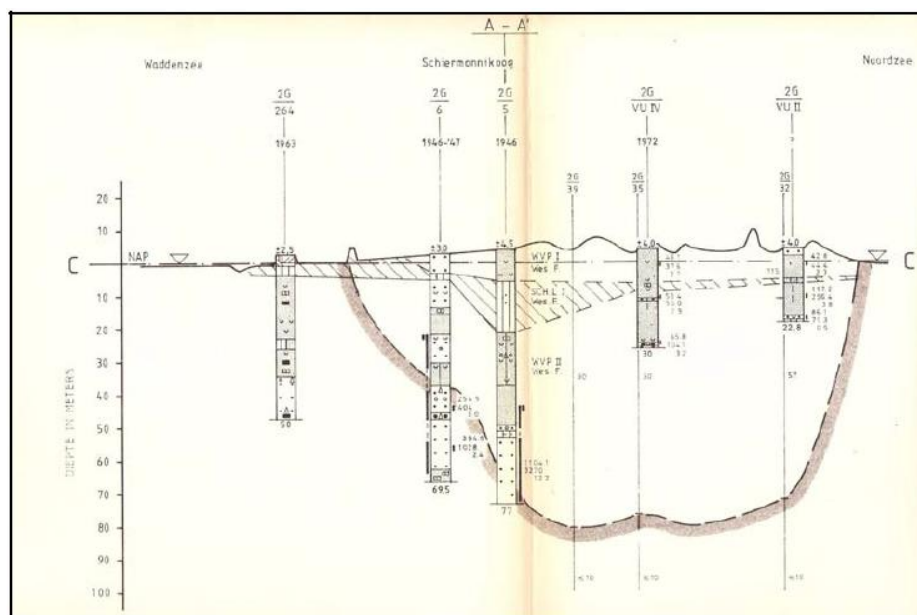


FIG. 4.7. Hydrogeologisch Noord-Zuid profiel over de oostzijde van het duinmassief van Schiermonnikoog, ongeveer 1 km ten westen van het studiegebied. Naar De Wit (1987).

4.2.2 Grondwateraanvulling en grondwaterwinning

De grondwateraanvulling van duingebieden is een functie van vooral de hoeveelheid en intensiteit van regenval, de begroeiing, de temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en oppervlakkige afvoer. Laatstgenoemde is in het studiegebied betrekkelijk groot in de primaire duinvaleien zoals het hoogwaterzwin (6 in Fig.4.6) en de afgensnoerde strandvlakte.

Het verband tussen begroeiing en grondwateraanvulling indien oppervlakkige afvoer ontbreekt, is weergegeven in Tabel 4.3, behorende bij een gemiddeld jaartotaal aan regenval van 835 mm.

TABEL 4.2 Onderscheiden watervoerende (WVP) en slecht-doorlatende (SDP) pakketten met de volgende specificaties: de opbouwende geologische eenheid, mediaan van de top en dikte, horizontale doorlatendheidscoëfficiënt van het WVP (K_h) of verticale weerstand (C_v) van het SDP.

Hydrologische eenheid	Geologische afzetting	top m+NAP	mediaan dikte (m)	K_h (m/d) of C_v (d)
WVP 1	Westland F. : duinzand	+4	5	8
	Westland F. : Noordzee-zand	-1	-4	12
	Westland F. : Geulafz. (zand)	-5	5	8
SDP 1B	Westland F., Duinkerken-afz.	-10	13	4
	slibh. zand en dunne kleilaagjes			
WVP 2	Eem F. : zand	-23	17	15
	F. van Drente : fluvioglac.	-40	10	15
SDP 2A	Eem F. : slibh. Zand #	-30	5	300 d
SDP 2D	F. v. Drente : keileem #	-49	3	300 d
SDP 2F	F. v. Peelo #	-50	10	?
WVP 3	F. v. Urk	-60	15	20
	F. v. Harderwijk	-75	85	40
SDP 5	F. v. Maassluis	-160 ca.	?	?

= mogelijk afwezig in studiegebied

TABEL 4.3. Grondwateraanvulling (R) als functie van de begroeiing, bij een jaarlijkse regenval (P) van 0.797 m. Berekeningen volgens DUVELCHEM (Stuyfzand, 2010). E = evapotranspiratie.

VEGETATION		EVAP			Conc.	R
Type	Code	$R = (p \ln(P)-c)/1000$			factor Evap	m/a
	Prec (P) m/a = 0.835	p	c	E/P	$f_E = P/R$	
Bare	1	750.0	4330	0.144	1.167	0.716
Bare + some mosses/grasses	Lys 1 2	741.6	4338	0.223	1.283	0.651
Mosses	Mosses-1 3	730.0	4360	0.344	1.515	0.551
Poor dry dune veg, mix of mosses+grasses+bare	4	720.0	4370	0.438	1.763	0.474
Dry shrubs (open), <50% mosses/grasses	5	710.0	4383	0.536	2.122	0.393
Rich dry dune veg, Heather, Dry deciduous	Lys 2 6	702.4	4398	0.617	2.553	0.327
Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks	Lys 3 7	641.6	3977	0.601	2.463	0.339
Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	600.0	3750	0.664	2.915	0.286
Pines, dense dry	9	550.0	3500	0.768	4.173	0.200
Pines	Lys 4 9.5	504.3	3251	0.838	5.884	0.142
Pines, wet and dense	10	475.0	3100	0.894	8.741	0.096

Sedert 1950 wordt grondwater gewonnen uit het duingebied ten noordwesten van het dorp, ten behoeve van een centrale drinkwatervoorziening. Vóór 1950 waren er diverse particuliere putten in gebruik, met name door de diverse vakantiekolonies c.q. tehuizen en de zuivelfabriek.

In de periode 1950-1960 waren er slechts 5 drinkwaterputten in bedrijf, in een puttenveld dicht bij het dorp. In de periode 1962-1967 werden er 11 bijgeboord in een tweede wingebied in de Hertenbos vallei. Het eerste puttenveld werd in de periode 1960-1967 geleidelijk verlaten. Sinds 1996 wordt tevens grondwater gewonnen rond de Westerplas. De drinkwaterproductie is in de periode 1950 t/m 2012 gegroeid van 8.000 tot 190.000 m³/j met een duidelijke piek in de maanden juli-augustus. Het opgepompte water wordt belucht en passeert een langzaam zandfilter vóór distributie.

De invloed van de waterwinning op het onderhavige studiegebied is zeer beperkt (vrijwel verwaarloosbaar) dankzij de relatief grote afstand en geringe onttrekking.

4.2.3 Zeewaterstanden

De voor Schiermonnikoog meest relevante meetpunten van de zeewaterstand zijn Wierumergronden en Huibertgat aan Noordzee-zijde en Schiermonnikoog aan de Wad-zijde (Fig.4.8)

Een bron voor de zeewaterstanden is b.v:

http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden_tcm174-326696.pdf

Kengetallen voor waterstandsfluctuaties op de Waddenzee Schiermonnikoog en Noordzee Huibertgat zijn gerubriceerd in Tabel 4.4. De gebieden die met zeewater inunderen bij een stormvloedstand van 2.3 m+NAP (voorkomen 5x/jaar) en 3.35 m+NAP (voorkomen 1x/10 jaar) zijn in Fig.4.9 weergegeven. Daarbij dient bedacht te worden dat het maaiveld op het Groene Strand sedert de kartering aanzienlijk gewijzigd, wellicht hoger, kan zijn, waardoor het inundatie-areaal aldaar mogelijk is afgenomen.



FIG. 4.8. Meest relevante RWS-meetpunten van de zeewaterstand voor Schiermonnikoog: Wierumergronden en Huibertgat aan Noordzee-zijde en Schiermonnikoog aan de Wad-zijde. De getoonde meetwaarden in cm+NAP zijn een momentopname op 20 November 2013.

TABEL 4.4. Kengetallen voor de getijdefluctuaties op de meetpunten Waddenzee/Schiermonnikoog en Huibertgat/Noordzee. Afgeleid uit RWS 2013.

Waddenzee Schiermonnikoog

Mean tidal characteristics*	Unit**	Value	Extremes*	Unit**	Value
Tidal range	cm	228	3-Jan-76	cm	350
High Water (HW)	cm	104	2-Mar-87	cm	-283
Low Water (LW)	cm	-124	1x in 100 years	cm	400
Spring-tide	cm	-138 to 119	1x in 50 years	cm	380
Neap-tide	cm	-99 to 87	1x in 20 years	cm	355
Water level	cm	1	1x in 10 years	cm	335
Duration of rise	hour	6:33	1x in 5 years	cm	315
Duration of fall	hour	5:52	1x in 2 years	cm	290
* Period: year 1966 -1991.			1x in 1 year	cm	275
** cm + NAP			2x in 1 year	cm	255
			5x in 1 year	cm	230

Noordzee Huibertgat, Schiermonnikoog

Mean tidal characteristics*	Unit**	Value	Extremes*	Unit**	Value
Tidal range	cm	215	26-Feb-90	cm	306
High Water (HW)	cm	94	2-Mar-87	cm	-262
Low Water (LW)	cm	-121	1x in 100 years	cm	360
Spring-tide	cm	-135 to 108	1x in 50 years	cm	
Neap-tide	cm	-98 to 77	1x in 20 years	cm	
Water level	cm	-6	1x in 10 years	cm	300
Duration of rise	hour	6:00	1x in 5 years	cm	
Duration of fall	hour	6:25	1x in 2 years	cm	260
* Period: year 1973 -1991.			1x in 1 year	cm	240
** cm + NAP			2x in 1 year	cm	
			5x in 1 year	cm	

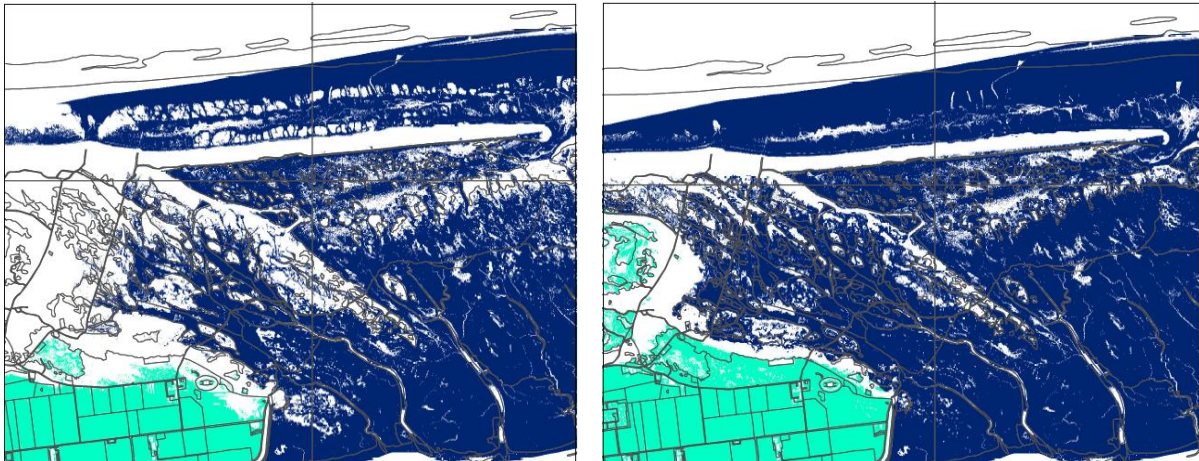


FIG. 4.9. Overstroming met zeewater (donker blauw buitendijks, turquoise binnendijks) bij een stormvloedstand van 2.3 m+NAP (voorkomen 5x/jaar) en 3.35 m+NAP (voorkomen 1x/10 jaar). Naar Rus et al. 2011.

4.3 Twee meetraaien loodrecht op het Groene Strand

Het onderzoek speelde zich vooral af op het Groene Strand, ongeveer 1 km ten oosten van strandpaviljoen De Marlijn, tussen strandpaal 7 en 9. Daar zijn 2 meetraaien ingericht en bemonsterd: AB in het westen (Fig.4.10) langs peilbuizen PB2-PB5 waarvan PB2-PB4 elk uit 4 weggedrukte peilbuizen op resp. 5, 10, 15 en 20 m-MV bestaan en PB5 gepulst is tot ca 5 m-MV; en CD in het oosten (Fig.4.10) over peilbuis PB1 (zelfde karakteristieken PB2-PB4). Langs profiel AB zijn in totaal 22 spiraalboringen verricht en bemonsterd, waarvan 14 in oktober-november 2012 en 8 in juni 2013. Langs profiel CD zijn in totaal 7 spiraalboringen verricht en bemonsterd in juni 2013. De gestolen CTD Diver bevond zich ~40 m ten oosten van PB3, de MiniDiver en BaroDiver zaten in PB5.

4.4 Grondwaterstanden in studiegebied

Regionaal

Uit het isohypsenbeeld van het freatische grondwater in een natte winter (dec. 1993 – jan. 1994) en in een droge zomer (aug. – sept. 2003), in Fig.4.11, volgt dat de regionale grondwaterstroming in het studiegebied ongeveer noordoostwaarts gericht moet zijn. Dit geldt waarschijnlijk meer voor de Kobbeduinen en de 's-winters drainerende, afgesloten strandvlakte die noordelijk grenst aan de Kobbeduinen, dan voor het Groene Strand, dat ter plaatse van de eigen meetraaien vooral vanuit de stuifdijk en het strand zelf gevoed wordt. Het afleiden van trendmatige ontwikkelingen in grondwaterstand in de omgeving van het studiegebied wordt bemoeilijkt door gebrek aan meetpunten met een onberispelijke tijdreeks. Het meetpunt 2G.353 (X= 207940, Y = 612350) zou zich hiervoor het meest lenen, maar kampt met veranderingen in het meetpunt (o.a.?) omstreeks 2004. Het verloop op het lokale meetpunt 2E.002 (Strandvlakte) is te kort en kent te veel hiaten voor duidelijke conclusies. Het verder weg gelegen meetpunt VU III (Groenglop) etaleert een zeer geringe stijgende trend (Fig.4.12).

Lokaal

De grondwaterstand in het studiegebied is gemeten op meetpunt 2E.002 sinds 2002, en in PB5 alleen in de periode maart-augustus 2013. Beide meetpunten liggen vlak bij elkaar (50-100 m uiteen) aan de zuidrand van de stuifdijk; PB5 op de zuidflank van de stuifdijk en 2E.002 op de overgang van de voormalige strandvlakte achter de dijk naar de dijk.

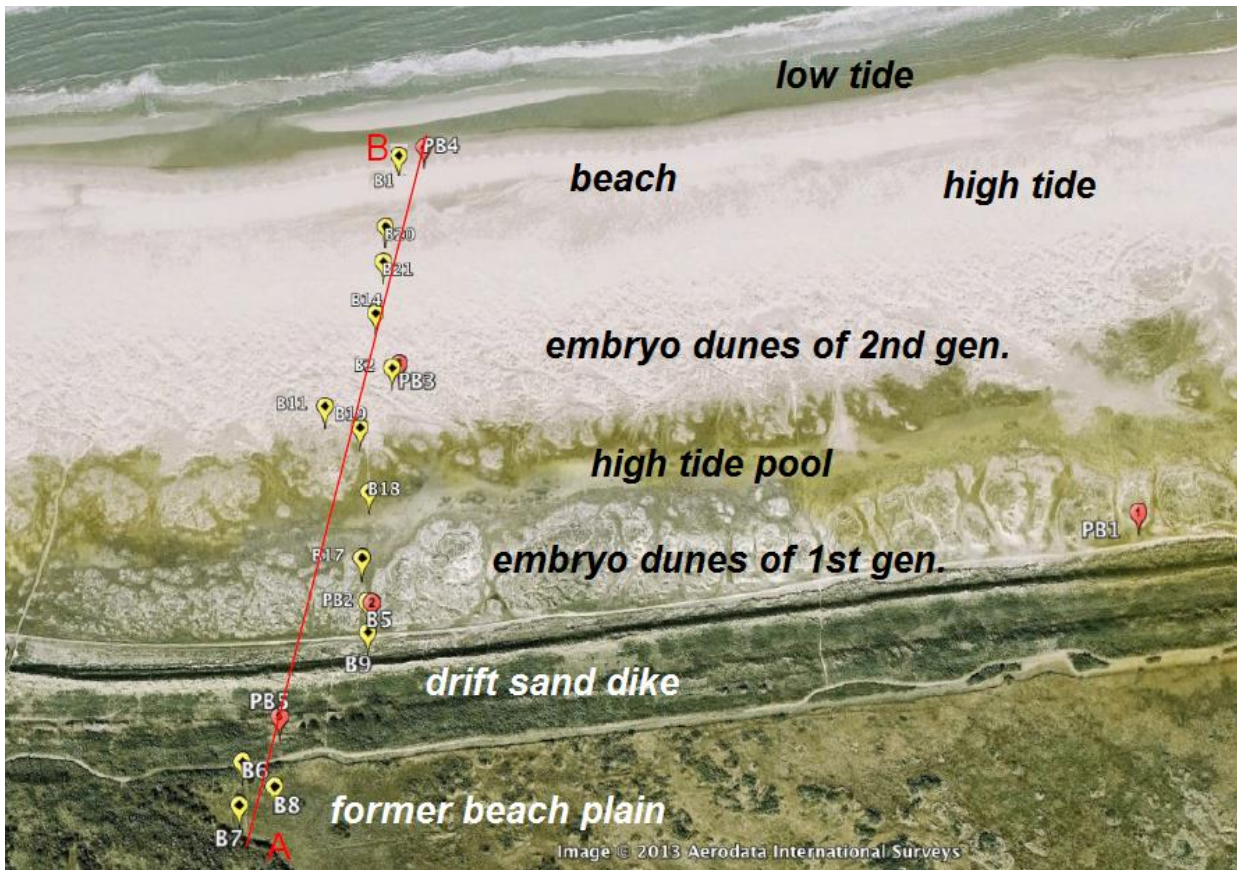


FIG. 4.10. Ligging van de meettraaien AB en CD en landschappelijke zones, met de peilbuizen PB1-PB5 en de spiraalboorpunten B1-B36. De in oktober-november 2012 bemonsterde meetpunten staan in de bovenste figuur, de in juni 2013 bemonsterde meetpunten in de onderste.

Het verloop van daggemiddelde grondwaterstanden ter plaatse van PB5 is weergegeven in Fig.4.13. Als we het dagelijkse verloop nader bekijken en vergelijken met het getij in Fig.4.14, dan zien we geen dagelijkse schommelingen t.g.v. het getij, maar wel t.g.v. de dagelijkse fluctuatie in evapotranspiratie. Het patroon wijkt evenwel af van wat gangbaar is (zie Fig.6.14-6.15). Het patroon is normaal tussen 8 uur a.m. en 21 uur maar klimt niet door tot tenminste 4 uur a.m. Nader onderzoek is vereist.

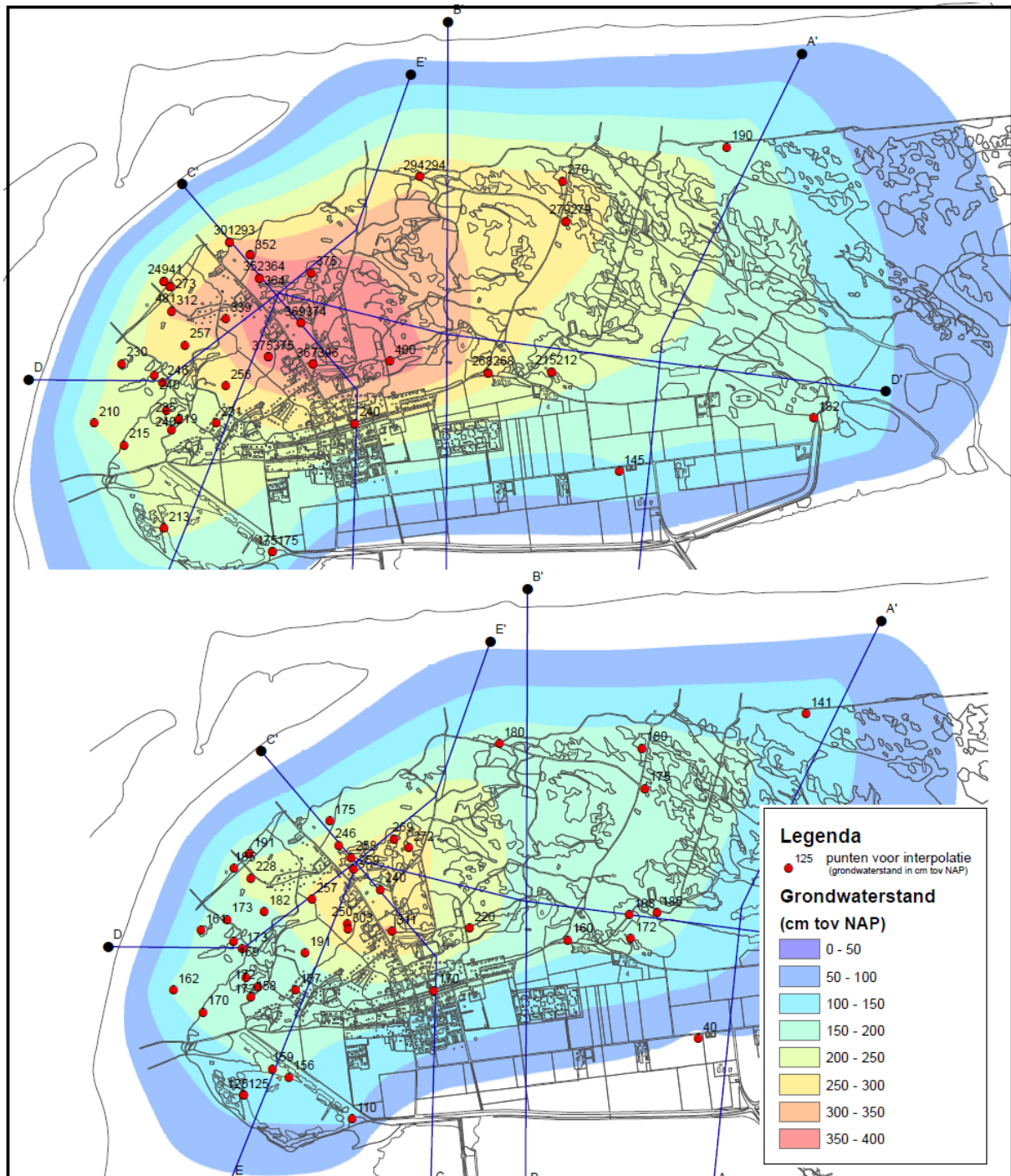


FIG. 4.11. Isohypsenbeeld van het freatische grondwater in een natte winter (dec 1993 - jan 1994) en in een droge zomer (aug - sept 2003). Gewijzigd naar Rus et al. (2011).

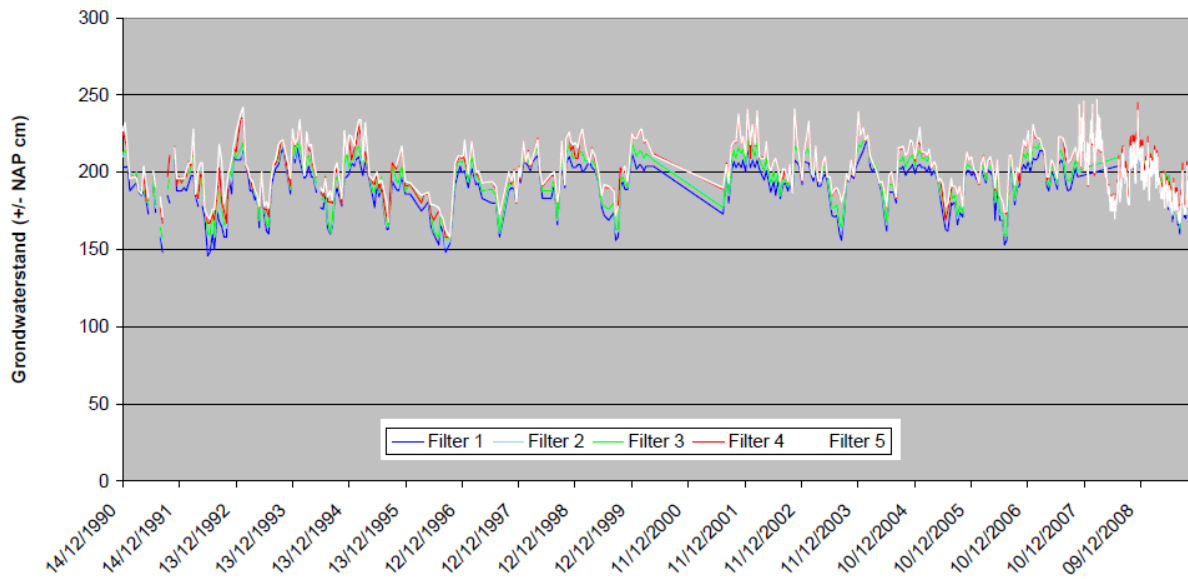


FIG. 4.12. Verloop grondwaterstand en stijghoogtes in waarnemingsput 02GP7820 (VU III) nabij Groenglop. Naar Rus et al. (2011). Filter 1-5: 5, 10.8, 17.1, 24.8 en 29.4 m-NAP.

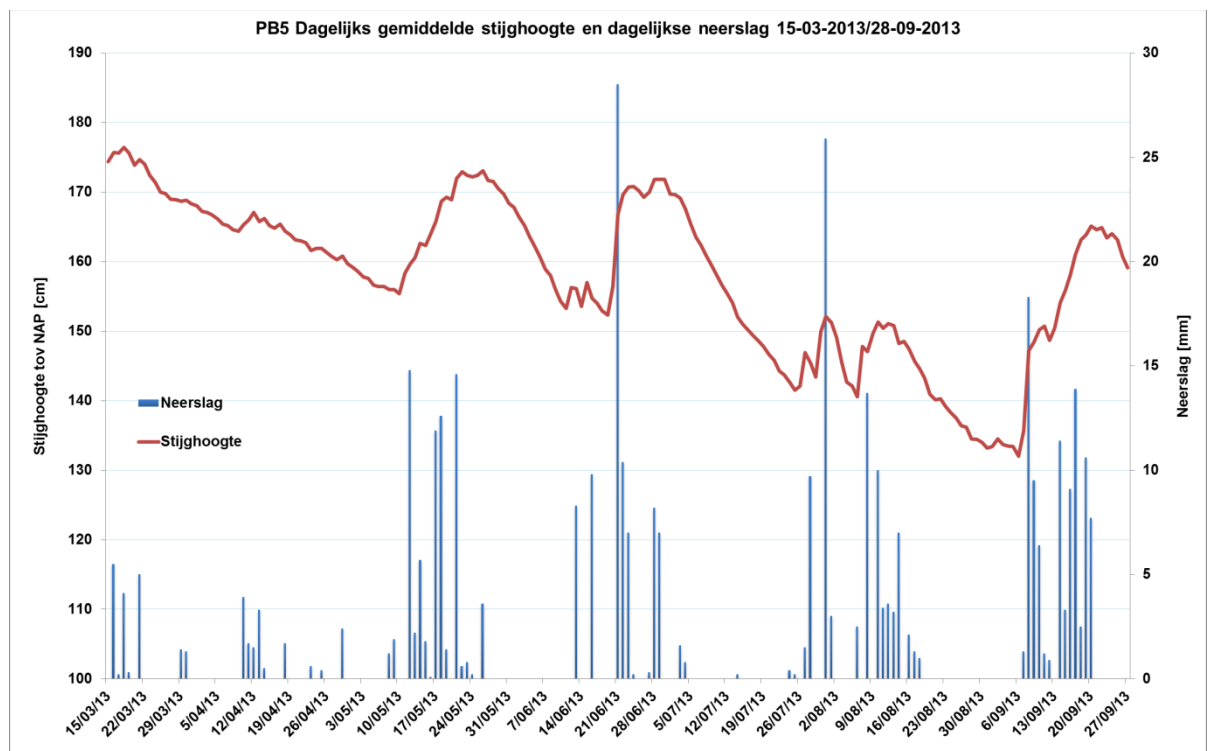


FIG. 4.13. Verloop van de grondwaterstand in peilbuis PB.5 in de zuidrand van de stuifdijk (dagelijks gemiddelde; 0-24 uur), en van de regenval op meetstation Schiermonnikoog (dagtotaal; 8 uur a.m. vorige dag -8 uur a.m. betreffende dag). Maaiveld ligt op ca. 4,2 m+NAP, noordelijk van zeer nabije strandvlakte achter stuifdijk welke op ca. 1.7 m+NAP.

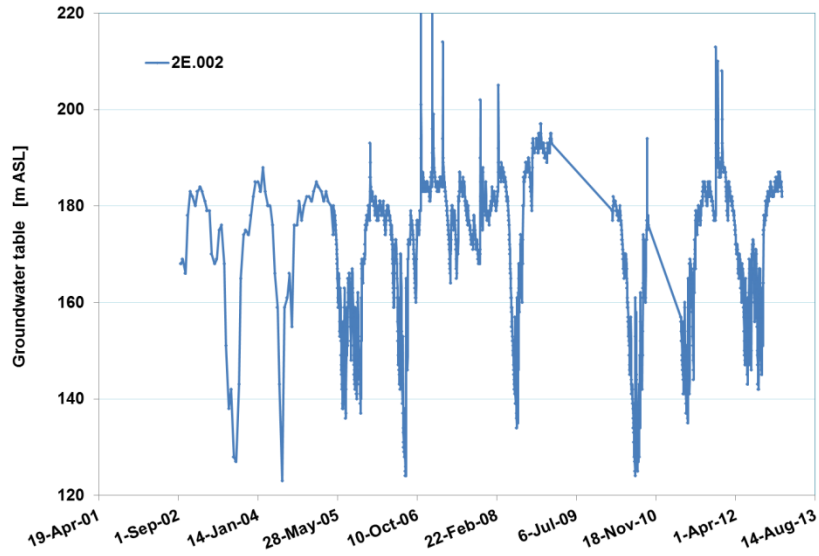


FIG. 4.14. Verloop van de grondwaterstand in peilbuis 2E.002, waar het maaiveld zich op 167 cm + NAP bevindt, zodat inundatie vrij frequent voorkomt. Data verkregen via DINOloket.

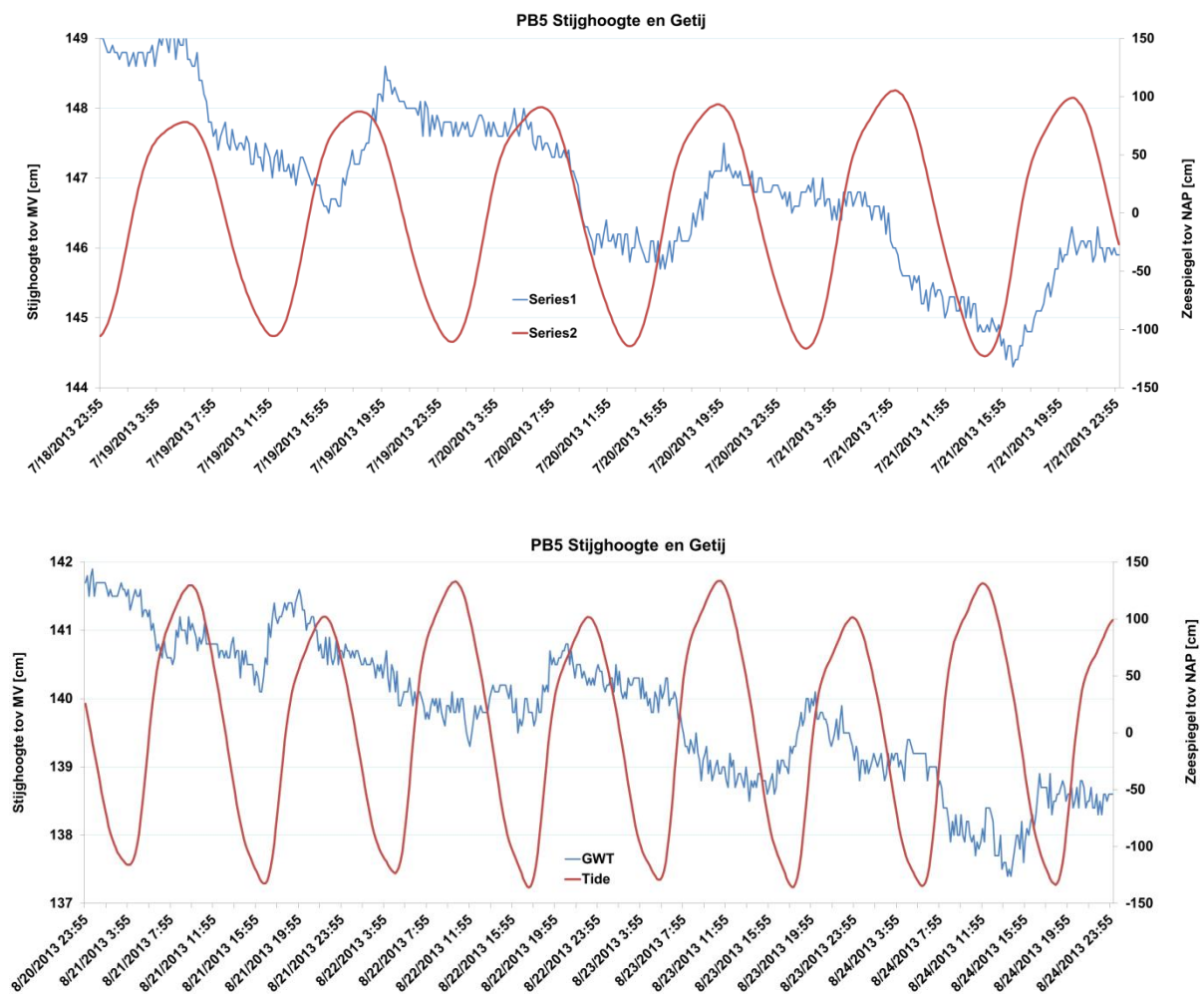


FIG. 4.15. Gedetailleerd verloop van de grondwaterstand in peilbuis PB.5 en van de zee­waterstand, tijdens droge dagen in juli en augustus 2013.



FIG. 4.16. Sedimentaire structuren in de lagere delen van de embryonale duinen onthullen dat zij door zeewater overspoeld zijn en glad geschoren, waarna eolisch zandtransport vers zand met windribbels heeft afgezet. De donkere banden zijn zandlaagjes met verhoogd gehalte aan zware mineralen waaronder titaanrijke mineralen. Foto links in mei 2012, foto rechts in september 2013 (genomen door auteur).



FIG. 4.17. De belangrijkste peilbuizen in het studiegebied: PB.5 in de lijzijde van de stuifdijk (links) en PB.3 in het embryonale duingebied (rechts). Door winderosie worden de straatpotjes voortdurend losgewoeld (vervanging door diepe kokers is gewenst). Foto's door auteur.

4.5 Zoet-zout kartering

De grootschalige verdeling van zoet en zout grondwater is weergegeven in bovenaanzicht in Fig.4.18 en langs het diepe Noord-Zuid profiel westelijk van het studiegebied in Fig.4.7. We zien een zoetwaterlens die onder het centrale deel van de duinen een maximale diepte bereikt van 80-90 m-NAP en die richting studiegebied vrij abrupt ondieper komt te liggen (<10 m-NAP). Kanttekening hierbij is dat meetgegevens feitelijk ontbraken in het studiegebied, wat de beelden uit de jaren 70-80 daar een hoog speculatief gehalte geeft.

De 4 geleidbaarheidsonderingen en waarnemingen met de ter plaatse geïnstalleerde peilbuizen en met de spiraalboringen hebben meer inzicht gegeven in de lokale ligging van het zoet-zout grensvlak (Fig.4.19-4.20). We zien in dit gebied op slechts 3 locaties zoetwaterlenzen die bovendien zeer dun zijn: In het zuiden waar de Kobbeduinen grenzen aan de afgesloten strandvlakte (<10 m), onder de stuifdijk (en langs de randen ervan; <5 m) en onder de hogere embryoduinen (<2 m). De zoetwaterlens onder de afgesloten strandvlakte, die deels gevoed wordt vanuit de Kobbeduinen, kent periodiek inputs van brak oppervlaktewater tijdens hoge zeestanden (Fig.4.9). Het grondwater onder de strandvlakte in het studiegebied is daardoor in de winter brak en in de zomer (bij gebrek aan inundaties) zoet (Fig.4.19). We zien tevens dat het brakke/zoute grondwater onder de zoetwaterlenzen noordwaarts zouter wordt t.g.v. frequenter overstroming.

Raai CD (Fig.4.20) vertoont geen zoetwaterlenzen onder de embryoduintjes, wel onder de stuifdijk, conform verwachting.

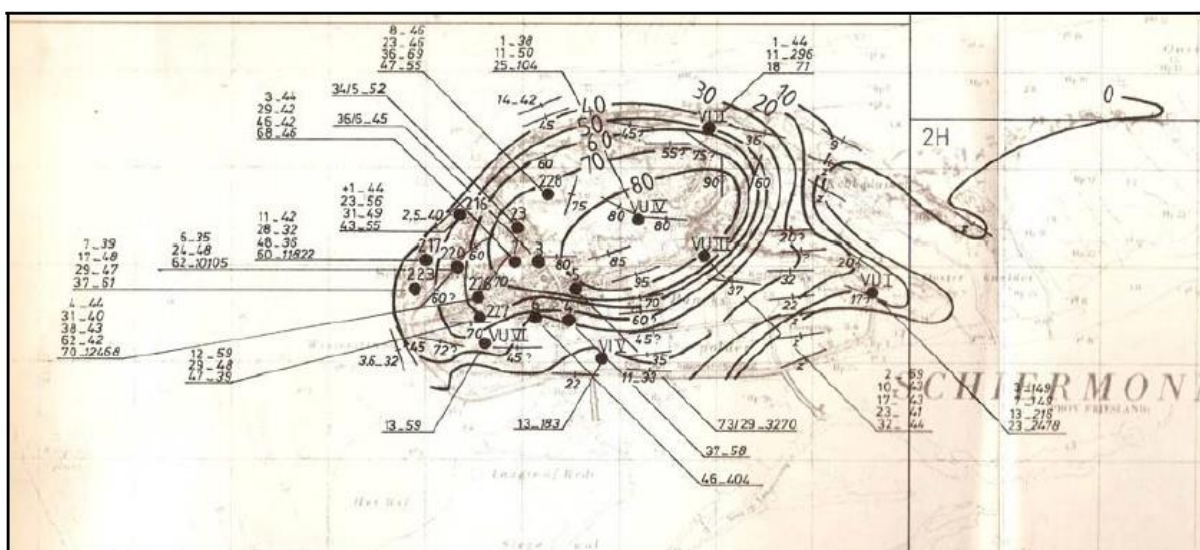
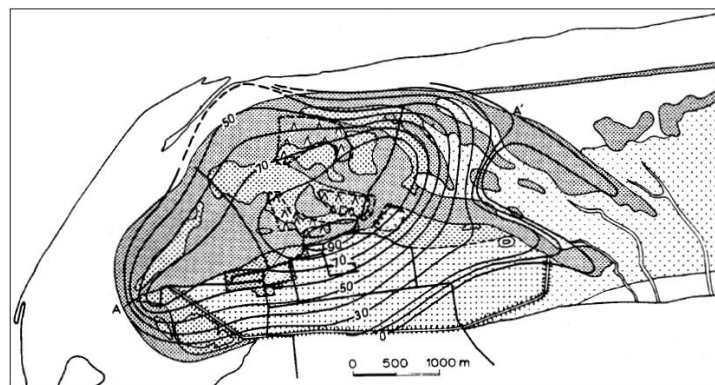


FIG. 4.18. Diepteligging van het zoet/brak grensvlak (300 mg Cl/L) op het westelijke en midden deel van Schiermonnikoog, volgens Beukeboom (1976; boven) en De Wit (1987; onder).

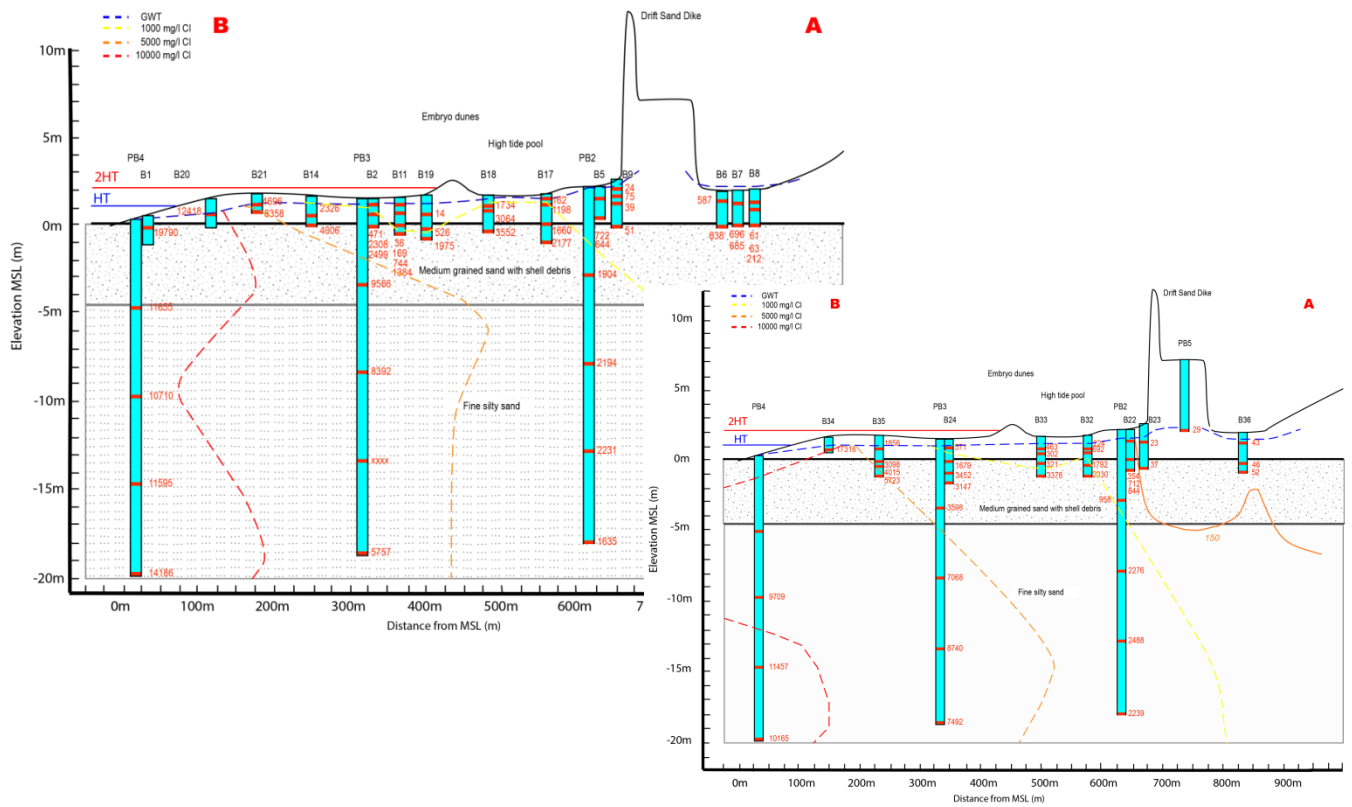


FIG. 4.19. Ruimtelijke verdeling van de chloride concentratie langs transect AB in november 2012 (linksboven) en in juni 2013 (rechtsbeneden). Zwarte, blauwe, rode horizontale lijn = NAP, GHW (= gemiddeld hoog water) en 2xGHW (>5x/jaar).

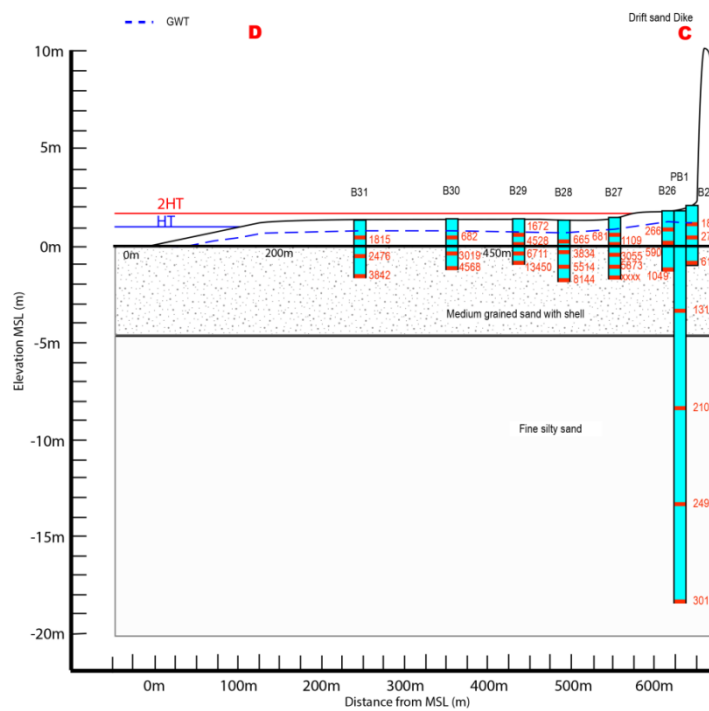


FIG. 4.20. Ruimtelijke verdeling van de chloride concentratie langs transect CD in juni 2013. Zwarte, blauwe, rode horizontale lijn = NAP, GHW en 2xGHW (GHW = gemiddeld hoog water).

4.6 Patronen in grondwaterkwaliteit

4.6.1 Globaal overzicht

De grondwaterkwaliteit op de in 2013 bemonsterde meetpunten op het Groene Strand van Schiermonnikoog en in aangrenzend duingebied is samengevat in Tabel 4.5. Zij vertoont een enorme variatie, van oligohalien-zoet (Cl <30 mg/L) t/m zout (Cl 10.000-20.000 mg/L), van nitraathoudend ((sub)oxisch) t/m sulfaatloos (diep anoxisch; methanogeen), en van atroof (EPI <0.5) t/m eutroof (EPI 3,5-4,5, in bijna alle gevallen met stikstof beperking). Het grondwater is vrijwel overal kalkrijk en kalk(over)verzadigd (SI-calciet >0), ten teken dat de ontkalking onvoldoende voortgang boekt tgv tijdgebrek en verse aanvoer van kalkhoudend zand. In veruit de meeste gevallen vertoont het grondwater verzoetingskenmerken (BEX significant positief), enerzijds door dominantie van regenwaterinfiltratie over zeewaterinundatie in de meetperiode, en anderzijds door een geleidelijke verzoeting dankzij kustuitbreiding.

De laagste saliniteit troffen we aan ondiep onder de embryodünen van de 2^e generatie op zekere afstand van de hoogwaterlijn, waar overspoeling zelden of nooit optreedt en de invang van sea spray beperkt is, en wanneer er tevoren veel regen/sneeuw gevallen is met weinig zeezout (zoals in de winter van 2013). De hoogste saliniteit is te vinden onder de zeebodem, onder het natte strand en in het diepere grondwater onder de zoetwaterlens.

De bovenste 7 monsters in Tabel 4.5 (monstercode = boringnummer_diepte in cm-MV) vertegenwoordigen navolgende watertypen:

- **B9_60 = g3CaHCO3+ watertype**, oligohalien-zoet, kalkrijk, (sub)oxisch tot licht-anoxisch en verzoet (BEX positief). Dit watertype is aangetroffen vlak onder de grondwaterspiegel aan de voet van de noordzijde van de stuifdijk (6 meetpunten). De extreem lage Cl-concentraties zijn tamelijk bijzonder en wellicht gerelateerd aan een infiltratieperiode met veel regen en sneeuw zonder veel wind;
- **B7_70 = F3CaHCO3+ watertype**, zoet, kalkrijk, (sub)oxisch t/m diep anoxisch en verzoet. Dit watertype is voornamelijk aangetroffen langs de zuidelijke rand van de westhoek van de strandvlakte ten zuiden van de stuifdijk, waar diep grondwater uit de Kobbedünen opkwelt;
- **B25_300 = F3MgHCO3+ watertype**, zoet, kalkrijk, (sub)oxisch t/m anoxisch en verzoet. Dit watertype is gevonden aan de voet van de noordzijde van de stuifdijk en onder embryodünen van de 2^e generatie;
- **B11_100 = F3NaHCO3+ watertype**, zoet, kalkrijk, (sub)oxisch t/m diep anoxisch en verzoet. Dergelijk water komt ondiep vooral voor onder de embryonale duinen van de 2^e generatie;
- **B2_90 = B3NaCl+ watertype**, brak, kalkrijk, (sub)oxisch t/m anoxisch en verzoet. Dit watertype komt frequent voor op geringe diepte tussen de embryodünen van de 2^e generatie en de stuifdijk alsmede aan de noordzijde van de strandvlakte achter de stuifdijk.
- **B17_80 = b3NaCl+ watertype**, brak-zout, kalkrijk, (sub)oxisch t/m anoxisch en verzoet. Dit watertype vertoont de grootste ruimtelijke spreiding in het studiegebied, en dan met name tussen de stuifdijk en de hoogwaterlijn van het strand, op geringe tot middelmatige diepte.
- **B34_100 = S2NaCl watertype**, zout, kalkrijk en (sub)oxisch t/m anoxisch. Dit water komt tot de onderzochte diepte van maximaal 20 m-NAP zeer algemeen voor alleen onder het natte strand waar dagelijks tijdens vloed zeewater infiltreert. De dagelijkse doorspoeling verklaart dat het water niet verzilt noch verzoet is.

Het globale beeld is, dat de zoetwaterbellen voor een groot deel bestaan uit verzoetingswatertypen met de klassieke opeenvolging richting zoetwaterintrusiefront van F2CaHCO3 (niet aangetroffen) naar g2CaHCO3+ / F3CaHCO3+ naar F2/F3MgHCO3+ naar F3/F4NaHCO3+ naar f3NaCl+ naar B3/B4NaCl+ en tenslotte b3/b4NaCl+ watertypen (Stuyfzand, 1993). Het onderliggende zoute grondwater is grotendeels S2NaCl of S3NaCl.

TABEL 4.5. Samenvatting van de grondwaterkwaliteit op de in 2013 bemonsterde meetpunten op het Groene Strand van Schiermonnikoog en in aangrenzend duingebied. Groene regels = met groenknolorchis; BGL = Below Ground Level. Aanwezigheid Lipares (= Groenknolorchis) beoordeeld op basis van informatie verstrekt door prof. Dr. Ab Grootjans. 10 k = 10.000.

Bovenste 7 enkelvoudige monsters vertegenwoordigen navolgende sleutelcondities (code = boring nr_ diepte in cm-MV):

B9_60 = zoet, anoxisch, verzoet; B7_70 = zoet, diep anoxisch, verzoet; B25_300 = zoet, (sub)oxisch, verzoet; B11_100 = zoet, (sub)oxisch, verzoet; B17_80 = brak, anoxisch, verzoet; B2_90 = licht brak, (sub)oxisch, verzoet; B34_100 = zout, anoxisch.

Sample	Depth	EC	pH	Cl	SO4	HCO3	NO3	PO4	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	NH4	SiO2
	Screen	lab	lab	mg/L	IC	mg/L	NO3/L	tot	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
B9_60	0.6	648	6.94	23.9	4.3	459	0.1	0.075	35.8	20.2	63.5	38.2	0.270	0.055		6.1
B7_70	0.7	759	7.23	61.2	0.9	486	0.0	0.819	26.3	4.3	119.6	33.5	7.117	0.230		14.5
B25_300	3.0	607	7.41	60.9	19.6	280	2.0	0.516	31.6	14.2	39.7	33.6	0.047	0.014	0.011	9.4
B11_100	1.0	592	7.57	72.3	38.8	292	15.2	0.521	101.3	13.9	19.6	13.8	0.106	0.006		7.8
B2_90	0.9	2445	8.24	470.9	75.7	486	19.4	1.007	506.0	27.7	8.2	16.0	0.087	0.014		6.4
B17_80	0.8	3471	7.21	1198.9	180.8	479	0.0	0.727	758.1	46.0	74.3	74.0	4.107	0.436		11.9
B34_100	1.0	36100	7.08	17316.8	2381.4	154	0.0	0.388	9006.2	401.3	357.4	1110.3	0.402	0.019	0.893	2.2
MIN	0.3	275	6.20	13.6	0.3	102	0.0	0.002	15.8	2.6	6.0	6.0	0.006	0.004	0.010	2.2
MEAN	4.2	8802	7.61	3073.2	465.6	366	1.7	0.742	1742.0	89.8	116.0	215.3	1.876	0.215	0.261	11.2
MAX	20.0	48293	8.90	17500.0	2402.1	781	19.4	5.779	9061.1	439.1	371.6	1138.1	28.702	1.068	2.011	39.4
Cl <30	1.9	391	7.32	20.6	8.9	264	2.0	0.197	29.5	10.7	40.1	15.6	0.116	0.016	0.151	7.8
Cl = 30-150	1.7	585	7.58	56.9	16.3	299	3.4	0.361	57.1	10.6	47.0	20.2	1.080	0.077	0.010	9.5
Cl = 150-300	0.9	1233	7.20	205.1	38.0	508	2.2	0.207	195.8	17.6	57.4	29.5	1.270	0.221	0.036	10.0
Cl = 300-1000	1.6	2276	7.67	590.6	89.7	399	1.6	0.539	418.0	31.4	58.1	50.2	2.372	0.265	0.085	8.7
Cl = 1-10 k	5.7	10229	7.66	3628.7	517.0	383	1.4	0.799	2055.6	105.8	133.6	249.1	2.200	0.214	0.267	11.6
Cl = 10-20 k	7.9	31462	7.63	12728.0	1814.4	297	1.4	2.218	6812.2	313.2	307.2	846.6	1.092	0.397	0.966	18.8
Lipares medium	0.8	1570	7.31	386.6	50.5	394	0.3	0.318	273.5	23.7	69.8	43.5	3.908	0.154	0.059	9.3
No Lipares	1.2	9537	7.75	3666.0	494.5	328	5.7	0.537	1932.0	104.8	107.3	236.8	1.361	0.139	0.204	7.0

Sample	EC	Al	As	B	Ba	Be	Br	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Sr	V	Zn
	lab	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
B9_60	648	40	1.2	311	2.4	0.010	41	1.6	0.5	17.2	12.4	0.5	0.8	502	0.7	23.4
B7_70	759	4	8.9	144	3.8	0.006	79	1.1	0.5	0.5	10.6	0.3		496	1.0	9.0
B25_300	607	36	14.0	125	1.9	0.010	79	2.0	0.8	1.8	12.0	0.3	0.3	263	2.8	5.9
B11_100	592	86	10.3	369	1.4	0.000	233	0.5	1.8	4.4	8.5	1.3	0.3	178	2.7	33.1
B2_90	2445	59	20.4	1281	1.2	0.011	1532	2.5	0.5	12.6	11.9	6.0	2.3	113	4.6	15.2
B17_80	3471	18	27.5	703	10.1	0.010	3265	2.7	0.4	4.3	19.2	1.8	1.2	612	2.5	41.5
B34_100	36100	77	9.0	3938	22.7		54523	18.8	0.8	15.5	156.7	10.6		6384		20.4
MIN	275	1	0.4	48	1.2	0.000	36	0.2	0.0	0.1	3.3	0.1	0.0	51	0.1	1.2
MEAN	8802	36	15.1	1035	11.4	0.009	10768	2.6	0.6	2.7	38.7	2.7	0.9	1464	1.7	16.1
MAX	48293	162	111.7	3938	48.3	0.024	71268	18.8	2.7	17.2	156.7	11.1	5.7	6834	10.6	405.8
Cl <30	391	69	2.9	139	2.7	0.010	46	0.9	0.9	6.0	7.2	0.8	0.4	244	1.6	12.4
Cl = 30-150	585	47	8.9	206	1.9	0.008	136	1.2	0.9	3.1	9.1	0.8	0.5	249	2.3	12.9
Cl = 150-300	1233	48	16.2	472	3.5	0.010	696	3.7	1.3	5.3	9.2	1.6	3.0	338	5.4	27.4
Cl = 300-1000	2276	32	23.9	541	4.6	0.010	1879	2.0	0.5	3.2	16.3	2.3	1.1	473	2.1	29.4
Cl = 1-10 k	10229	31	14.5	1209	15.8	0.009	12308	2.6	0.4	1.8	44.9	3.3	0.7	1704	1.2	11.2
Cl = 10-20 k	31462	41	11.8	3012	22.3	0.009	44917	6.7	0.9	3.9	123.8	4.4	0.6	5122	1.0	15.2
Lipares medium	1570	34	18.7	388	4.7	0.010	1224	1.8	0.7	3.6	12.5	1.0	1.3	480	2.5	22.3
No Lipares	9537	52	14.9	1225	7.1	0.009	13293	3.2	0.8	5.0	39.7	3.8	0.7	1544	2.5	14.8

Sample	Number	EC	Cd	Pb	BEX	Chem.Wtype	SI-C	Marine	Cont	Ocean	EPI	cations	Σ anions	F	Lipares
	samples	lab	ug/L	ug/L	meq/L	Code	calcite	% TDS	% Mix	N-limited	meq/L	meq/L	meq/L	mg/L	present
B9_60	1	648	0.04	0.9	4.50	g3CaHCO3+	-0.30	6.6	93.1	0.00	0.8	8.40	8.30	0.26	5.0
B7_70	1	759	0.00	2.6	2.16	F3CaHCO3+	0.27	14.7	85.1	0.16	0.4	10.25	9.72	0.23	5.0
B25_300	1	607	0.05	0.7	2.66	F3MgHCO3+	-0.18	22.5	74.7	0.16	2.9	6.48	6.76	0.21	5.0
B11_100	1	592	0.03	1.4	3.71	F3NaHCO3+	-0.43	22.8	69.5	0.21	4.0	6.89	7.89	0.35	0.0
B2_90	1	2445	0.03	3.2	9.80	B3NaCl+	0.06	52.7	45.3	2.23	4.5	24.45	23.27	2.55	0.0
B17_80	1	3471	0.03	3.6	4.01	b3NaCl+	-0.15	76.9	22.6	5.91	0.4	44.11	45.46	0.37	5.0
B34_100	1	36100	1.88	48.6	-29.99	S2NaCl	-0.57	99.9	0.1	87.42	3.2	511.25	540.61	0.93	0.0
MIN	136	275	0.00	0.1	-106.68		-1.18	6.6	-0.1	0.00	0.0	3.24	3.00	0.06	0.0
MEAN	136	8802	0.14	6.6	1.00		0.12	71.5	27.6	16.29	1.6	105.95	107.38	0.59	2.3
MAX	136	48293	2.53	48.6	36.53		1.02	99.9	93.1	101.18	4.5	538.77	618.48	3.87	5.0
Cl <30	7	391	0.05	0.6	2.22	g3CaHCO3+	-0.29	9.3	88.5	0.00	3.1	4.86	5.14	0.16	3.3
Cl = 30-150	17	585	0.05	1.1	2.69	F3CaHCO3+	0.05	19.8	77.8	0.14	3.2	6.81	6.91	0.31	2.0
Cl = 150-300	4	1233	0.07	1.2	5.20	f4NaHCO3+	-0.06	34.9	64.0	0.89	3.0	14.32	14.96	0.36	5.0
Cl = 300-1000	28	2276	0.20	2.4	5.27	B3NaCl+	0.22	64.9	34.5	2.84	2.8	26.12	25.11	0.55	2.7
Cl = 1-10 k	68	10229	0.12	7.5	2.95	b3NaCl+	0.27	92.8	7.0	18.20	3.0	119.38	119.45	0.62	1.9
Cl = 10-20 k	12	31462	0.37	23.7	-10.69	S3NaCl	0.28	99.7	0.1	64.21	3.5	389.41	401.77	1.54	0.0
Lipares medium	19	1570	0.16	2.1	4.40	B3NaCl+	-0.02	55.8	44.1	1.80	1.9	19.72	18.44	0.34	5.0
No Lipares	19	9537	0.18	8.5	-4.59	b3NaCl	0.20	96.5	3.4	18.39	3.7	111.63	119.20	0.74	0.0

Een zogenaamde Spider-plot in Fig.4.21 toont hoe de bovenste 7 monsters in Tabel 4.5 zich voor elk element verhouden tot standaard gemiddeld oceaanwater (SMOW). Het zoute grondwatermonster B34_100 vertoont voor Br, Na, Cl, SO₄, Mg, Sr, K, Li, Ba, B, Ca, Mo en F een grote gelijkenis met SMOW (genormaliseerde concentratie ~1). Deze bestanddelen vertonen voor zoet grondwater logischerwijze waarden ver beneden 1, en vrijwel alle overige bestanddelen vanaf SiO₂ naar rechts etaleren gemiddeld een genormaliseerde concentratie

>1 of >>1. Waarden <1 duiden op verdunning door regenwater en/of immobilisatie in vaste fasen, waarden >1 wijzen vooral op geogene mobilisatie vanuit vaste fasen. De genormaliseerde concentraties van Cd, PO₄, NH₄ en Fe vertonen een zeer groot bereik.

Het voorkomen van de Groenknolorchis is blijkens Tabel 4.5 geassocieerd met locaties waar het bovenste grondwater zoet tot brak (Cl <2500 mg/L) is. Verdere hydrochemische kengetallen van de standplaats zijn: anoxisch (meestal geen SO₄-reductie, hoog Fe, geen NO₃), NH₄<0,3, hoog Ca en kalk(over)verzadigd, en meest dominante watertypen F3CaHCO₃⁺, F3MgHCO₃⁺ en B3NaCl⁺. PO₄ lijkt geen beperkende factor, totaal ionisch N (TIN = NO₃+NO₂+NH₄) wel.

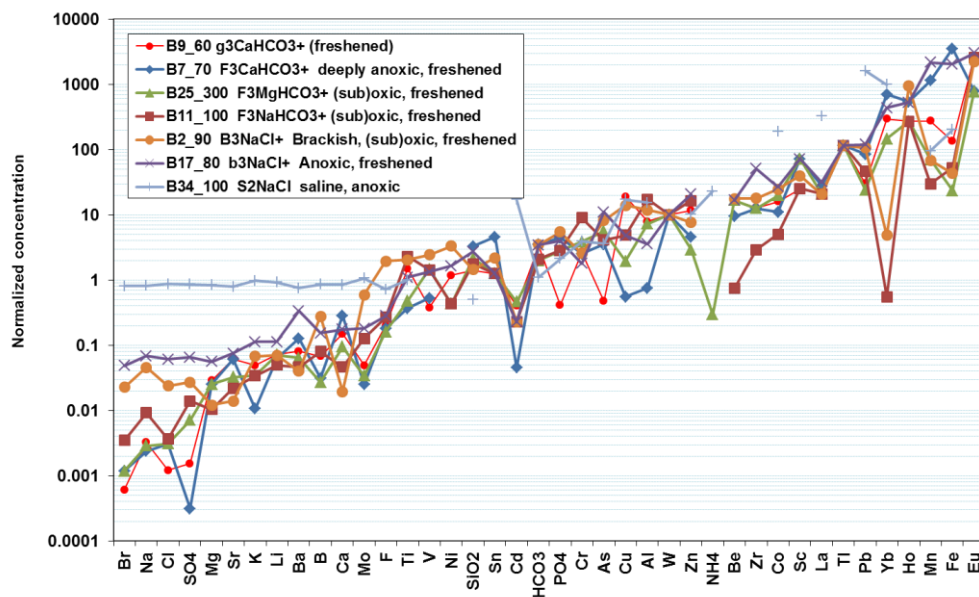


FIG. 4.21 Spiderplot van de op SMOW genormaliseerde grondwaterkwaliteit op 7 sterk uiteenlopende meetpunten op het Groene Strand van Schiermonnikoog en in aangrenzend duingebied (zelfde meetpunten als in Tabel 4.5). SMOW = Standard Mean Ocean Water.

Genormaliseerde concentratie = $C_{N-SMOW} = C_M / C_{SMOW}$ (waarin C_M = concentratie in monster).

4.6.2 Snelle clustering via Pearson correlatiematrix

Van alle bemonsterde grondwatermonsters op in totaal 31 locaties in het studiegebied (Groene Strand en omgeving) is een Pearson, lineaire correlatiematrix berekend met HGC in Excel. De resultaten staan in Tabel 4.6, terwijl Fig.4.22 toont met hoeveel parameters elke parameter correleert binnen een bepaalde klasse van correlatiecoëfficiënt R (boven 0,5 of onder -0,5). In Fig.4.22 zijn de parameters naar links opklimmend gesorteerd op hun correlatiescore CS:

$$CS = n_{0.9}^2 + n_{0.7} + \sqrt{n_{0.5}} \quad (4.1)$$

Waarin: $n_{0.9}$ = aantal met $R > 0.9$ en $R < -0.9$; $n_{0.7}$ = aantal met $R = 0.7$ tot 0.9 en $R = -0.9$ tot -0.7 ; $n_{0.5}$ = aantal met $R = 0.5$ tot 0.7 en $R = -0.7$ tot -0.5 .

De correlatiematrix in Tabel 4.5 toont de volgende clustering van parameters (-X houdt een negatieve correlatie in, X een positieve):

- (1) **zeezout** (Cl, EC, Na, K, Ca, Mg, SO₄, B, Br, Li en Sr, alle met $R > 0,9$, en F en Mo met $R = 0,5$). Genoemde elementen zijn belangrijke bestanddelen van zeeewater en sea spray.
- (2) **zeezout en andere elementen** (voorgaande groep + Pb en Yb met $R \geq 0,8$; voorgaande groep + NH₄, Co en Eu met $R = \sim 0,7$; en voorgaande groep + PO₄, Ba, Ho en La met $R = \sim 0,5$). Het is zeer opmerkelijk dat, en nog niet volledig begrepen waarom, de lanthaniden

(Eu, Ho, La en Yb) positief correleren met zeezout. Als zij sterk met Al zouden correleren (hetgeen niet zo is!), dan zou de hogere saliniteit gepaard kunnen zijn met een grotere kans op penetratie van ultrafijne kleideeltjes door het 0,45 μm membraanfilter.

Deze deeltjes lossen dan tijdens de erop volgende aanzuring ter conservering op, zodat hun concentratie kunstmatig verhoogd is. Dit lijkt het geval te zijn op de Veermansplaat (\rightarrow § 6.5.2). De verhoogde NH_4 en PO_4 concentraties bij hoge saliniteit houden wellicht verband met diepere anaërobie en mineralisatie van organische stof. Het vermoeden bestaat dat Pb in zouter water kampt met corrosie van de spiraalboor.

- (3) **de kleimineralen en zware mineralen groep.** Het betreft de onderling sterk correlerende elementen Al, Cr en Ti, die duidelijk niet gecorreleerd zijn met zeezout, in tegenstelling tot groep 2. Het betreft waarschijnlijk penetratie van ultrafijne kleideeltjes door het 0,45 μm membraanfilter. Deze deeltjes lossen dan tijdens de erop volgende aanzuring ter conservering op, zodat hun concentratie kunstmatig verhoogd is. Normaliter zouden ook de lanthaniden meeliften in deze groep, maar de geringe Al-verhoging en dominante koppeling aan zeezout verhinderen dit.
- (4) **Fe en As ($R=0.7$).** Zoals in veel studiegebieden correleren Fe en As redelijk met elkaar, terwijl As doorgaans slecht correleert met alle andere elementen. De relatie is genetisch van aard, omdat As en Fe samen voorkomen in de 2 belangrijkste bodemleveranciers van As: ijzerhydroxiden en pyriet (Stuyfzand, et al., 2006). Arseen komt bovendien vooral ondiep voor (Fig.4.25).
- (5) **Cd en Zn ($R=0.74$).** Dit paar vormt een zogenaamde hydrogeochemische tweeling, omdat zij dikwijls tezamen verschijnen in grondwater en ook in vaste fasen vaak geassocieerd zijn.H.
- (6) **bemonsteringsdiepte** (diepte en SiO_2 met $R=0.82$). De positieve relatie van SiO_2 met de diepte getuigt van voortgaande oplossing bij toenemende diepte. Daarbij speelt de oplossing van diatomeeën in dieper liggende mariene kleilagen een belangrijke rol. Voor de zeezouten zien we een zwak positief verband met de diepte ($R = -0.35$), vanwege de met diepte toenemende kans op ontmoeting van Noordzee-grondwater onder de zoetwaterlens. Een zwakke negatieve relatie ($R = -0.2$ à -0.4) voor NO_3 , As en Cu wijst op toenemende afbraak (NO_3) en vastlegging met de diepte b.v. in ijzersulfiden (As en Cu).

Bovenstaande clusters zijn de belangrijkste (er zijn er meer maar met minder impact); zij dienen met een specifieke clusteranalyse geverifieerd en geëvalueerd te worden, maar zijn plausibel genoeg om zonder die bewerking te presenteren.

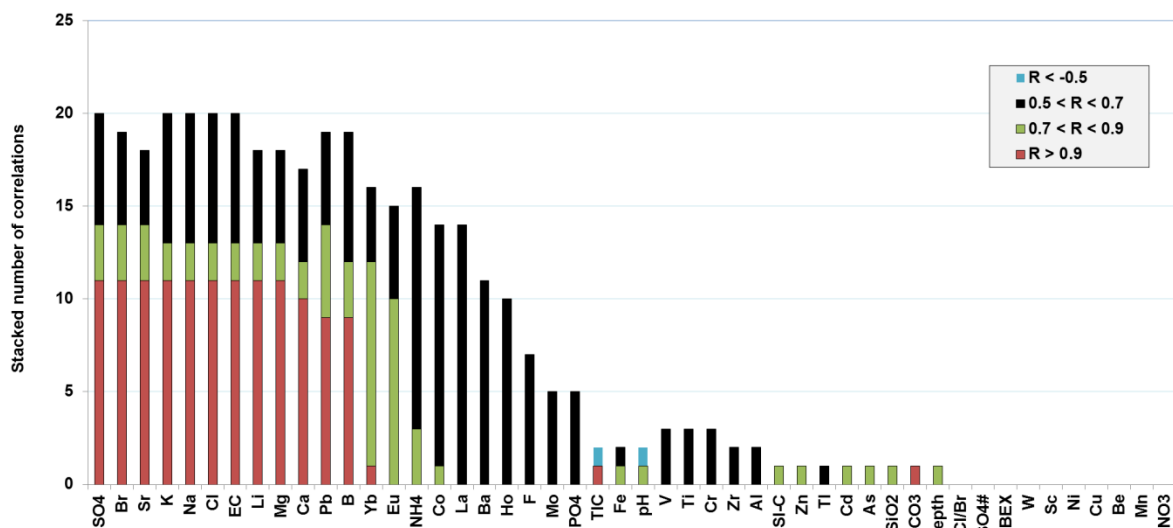


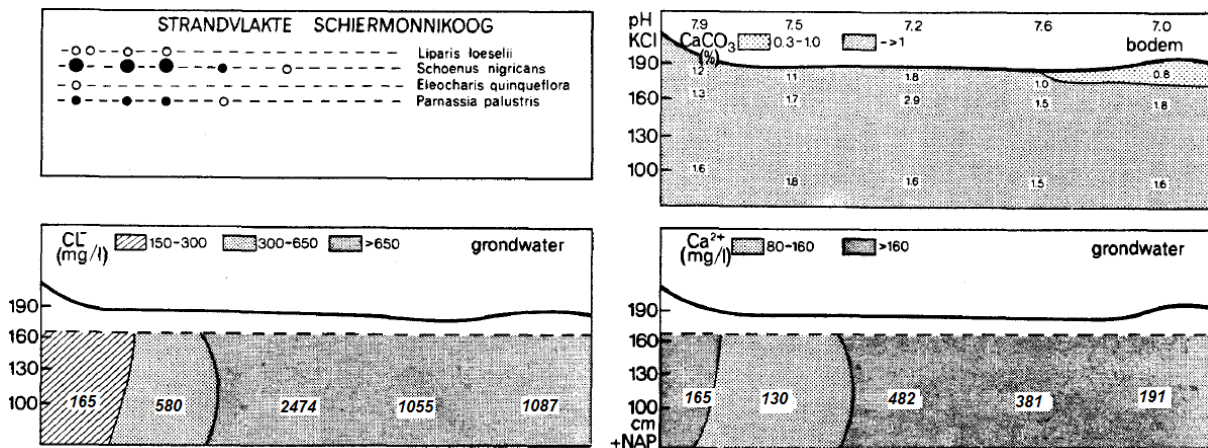
FIG. 4.22. Plot van parameters en het gestapelde aantal correlaties (>0.5 of <-0.5) van elk met alle andere parameters. De parameters zijn gerangschikt van hoogste naar laagste correlatiescore CS (zie tekst).

TABEL 4.6. Pearson lineaire correlatiematrix van ondiep en middeldiep, zoet t/m zout grondwater (<20 m-MV) op 31 lokaties op de in 2013 bemonsterde meetpunten op het Groene Strand van Schiermonnikoog en in aangrenzend duingebied. Correlatiecoëfficiënten (R) zijn als volgt gemarkeerd: oranje = >0.90; geel = 0.70-0.90; donker groen = 0.5-0.7; licht blauw = -0.7 - -0.5. Betrokken aantal monsters = 138 (eigen veldcampagnes).

Param	Depth	EC	pH	Cl	SO4	HCO3	NO3	PO4	F	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	NH4	SiO2	Al	As	B	Ba	Be	Br	Cd
Depth	1.00																							
EC	0.36	1.00																						
pH	0.03	0.10	1.00																					
Cl	0.34	0.99	0.09	1.00																				
SO4	0.35	0.99	0.11	1.00	1.00																			
HCO3	0.18	-0.08	-0.28	-0.10	-0.11	1.00																		
NO3	-0.22	-0.03	0.26	-0.05	-0.05	-0.14	1.00																	
PO4	0.33	0.49	0.19	0.49	0.51	-0.03	-0.11	1.00																
F	0.30	0.51	0.27	0.50	0.50	0.13	0.19	0.40	1.00															
Na	0.35	0.99	0.09	1.00	1.00	-0.09	-0.05	0.50	0.51	1.00														
K	0.37	0.99	0.09	0.99	0.99	-0.07	-0.05	0.51	0.52	0.99	1.00													
Ca	0.32	0.93	-0.08	0.93	0.93	0.03	-0.18	0.41	0.39	0.93	0.92	1.00												
Mg	0.37	0.99	0.07	1.00	0.99	-0.08	-0.08	0.49	0.49	0.99	0.99	0.94	1.00											
Fe	-0.17	0.00	-0.33	-0.01	-0.02	0.28	-0.15	0.05	0.00	-0.01	0.00	0.12	-0.01	1.00										
Mn	0.01	0.23	-0.25	0.21	0.21	0.33	-0.24	0.13	0.13	0.22	0.20	0.36	0.21	0.30	1.00									
NH4	0.22	0.68	0.02	0.69	0.70	0.09	-0.21	0.59	0.37	0.69	0.69	0.69	0.69	0.29	0.33	1.00								
SiO2	0.82	0.37	-0.07	0.35	0.36	0.25	-0.27	0.48	0.38	0.36	0.38	0.36	0.38	0.02	0.29	0.34	1.00							
Al	-0.07	0.04	0.23	0.08	0.09	-0.06	0.31	0.00	0.07	0.08	0.04	-0.02	0.08	-0.28	-0.24	0.36	-0.13	1.00						
As	-0.27	-0.05	-0.17	-0.06	-0.07	0.24	-0.07	0.13	0.03	-0.06	-0.04	0.00	-0.08	0.70	0.22	0.07	-0.08	-0.16	1.00					
B	0.32	0.95	0.12	0.95	0.95	0.00	0.03	0.51	0.58	0.96	0.96	0.85	0.93	0.06	0.24	0.66	0.37	0.06	0.04	1.00				
Ba	0.43	0.56	-0.13	0.55	0.55	0.14	-0.25	0.29	0.22	0.54	0.55	0.61	0.56	0.26	0.19	0.43	0.35	-0.08	0.07	0.50	1.00			
Be	0.10	0.02	0.00	0.02	0.03	0.02	-0.13	-0.05	0.01	0.03	0.03	0.00	0.03	0.17	-0.02	0.08	0.05	-0.06	0.04	0.05	0.08	1.00		
Br	0.35	0.99	0.07	1.00	0.99	-0.12	-0.04	0.50	0.49	0.99	0.99	0.92	0.99	-0.03	0.20	0.73	0.36	0.10	-0.07	0.95	0.53	0.02	1.00	
Cd	-0.07	0.26	-0.08	0.29	0.27	0.14	-0.08	-0.03	0.10	0.29	0.28	0.28	0.28	0.12	0.27	-0.04	0.04	0.07	0.32	0.12	0.00	0.27	1.00	
Co	0.06	0.64	-0.04	0.68	0.67	0.15	-0.13	0.18	0.25	0.68	0.66	0.68	0.68	-0.01	0.27	0.42	0.12	0.16	-0.01	0.66	0.31	0.10	0.66	0.47
Cr	-0.12	0.04	0.16	0.07	0.07	-0.01	0.28	0.14	0.04	0.07	0.04	-0.03	0.06	-0.01	-0.13	0.35	-0.04	0.62	0.04	0.04	-0.17	0.10	0.09	0.08
Cr	-0.41	-0.03	-0.06	0.00	-0.01	-0.08	0.24	-0.13	0.03	-0.01	-0.01	-0.10	-0.02	-0.09	-0.06	0.05	-0.36	0.24	0.00	0.06	-0.29	0.00	-0.01	0.14
Eu	0.39	0.75	0.05	0.74	0.73	-0.18	-0.01	0.37	0.38	0.74	0.73	0.67	0.73	0.04	0.16	0.53	0.42	0.06	-0.06	0.69	0.38	-0.03	0.76	-0.01
Ho	0.02	0.56	-0.06	0.55	0.53	-0.03	0.22	0.18	0.31	0.54	0.53	0.47	0.54	0.04	0.19	0.02	0.12	-0.11	0.00	0.49	0.19	-0.21	0.54	-0.04
La	-0.10	0.55	-0.01	0.59	0.59	-0.11	-0.04	-0.04	0.10	0.59	0.56	0.56	0.59	0.05	0.17	0.55	-0.10	0.19	-0.03	0.54	0.23	-0.01	0.57	0.44
Li	0.40	0.98	0.06	0.98	0.98	-0.03	-0.10	0.50	0.50	0.98	0.98	0.94	0.99	0.00	0.24	0.69	0.42	0.07	-0.07	0.94	0.57	0.04	0.98	0.30
Mo	-0.05	0.51	0.33	0.50	0.50	-0.12	0.27	0.15	0.39	0.51	0.50	0.35	0.46	-0.11	-0.12	0.07	-0.17	0.10	0.03	0.58	0.18	0.05	0.49	0.15
Ni	-0.15	-0.10	-0.20	-0.11	-0.11	0.49	-0.09	-0.16	0.05	-0.10	-0.11	0.01	-0.10	-0.06	0.41	-0.08	0.01	0.03	-0.02	-0.02	-0.06	0.04	-0.12	-0.09
Pb	0.26	0.90	0.03	0.92	0.91	-0.07	-0.07	0.37	0.42	0.92	0.91	0.88	0.92	0.05	0.15	0.60	0.24	0.09	-0.02	0.88	0.50	0.01	0.91	0.41
Sc	0.08	0.16	-0.02	0.18	0.18	0.04	-0.16	0.11	0.09	0.19	0.16	0.20	0.19	0.15	0.03	0.14	0.07	-0.04	0.12	0.12	0.16	0.08	0.17	0.10
Sr	0.38	0.98	0.04	0.99	0.98	-0.07	-0.10	0.46	0.47	0.98	0.98	0.96	0.99	0.01	0.23	0.70	0.39	0.05	-0.07	0.92	0.58	0.02	0.98	0.28
Ti	-0.19	-0.16	0.02	-0.15	-0.15	0.14	0.25	-0.07	0.02	-0.14	-0.15	-0.22	-0.15	-0.02	-0.11	0.05	-0.10	0.61	0.03	-0.11	-0.22	0.02	-0.15	-0.02
Tl	0.20	0.44	0.09	0.46	0.45	0.07	-0.07	0.20	0.18	0.46	0.42	0.45	0.48	-0.07	0.06	0.14	0.16	0.02	-0.07	0.35	0.14	-0.03	0.46	0.13
V	-0.23	-0.25	0.09	-0.25	-0.26	0.13	0.23	0.04	0.05	-0.23	-0.24	-0.38	-0.27	0.03	-0.11	-0.25	-0.13	0.36	0.09	-0.11	-0.31	0.03	-0.24	0.00
W	0.14	0.24	-0.01	0.19	0.19	0.08	0.06	0.15	0.09	0.19	0.21	0.10	0.16	0.10	0.09	0.17	0.22	-0.12	0.17	0.33	0.16	0.16	0.18	0.05
Yb	0.25	0.80	-0.17	0.79	0.80	0.14	-0.21	0.39	0.34	0.79	0.80	0.93	0.81	0.32	0.44	0.69	0.34	-0.15	0.15	0.73	0.63	0.02	0.78	0.22
Zn	-0.16	-0.05	-0.07	-0.05	-0.06	0.14	-0.01	-0.09	0.01	-0.04	-0.05	-0.03	-0.05	0.14	0.15	0.22	-0.08	-0.05	0.07	0.01	-0.08	-0.20	-0.05	0.74
Zr	-0.14	-0.09	-0.21	-0.10	-0.13	0.45	-0.10	-0.04	0.01	-0.08	-0.07	0.01	-0.10	0.55	0.15	-0.12	0.02	-0.05	0.30	0.02	-0.01	0.32	-0.11	0.29
BEX	0.06	-0.45	0.09	-0.49	-0.49	0.39	-0.08	-0.17	-0.02	-0.44	-0.44	-0.41	-0.45	0.00	0.02	-0.27	0.08	-0.01	-0.04	-0.36	-0.25	0.09	-0.48	-0.04
SO4#	0.18	0.11	0.22	0.13	0.20	-0.12	-0.07	0.39	0.10	0.13	0.12	0.13	0.12	-0.17	0.01	0.36	0.15	0.11	-0.13	0.13	0.17	0.09	0.10	-0.19
SI-C	0.19	0.24	0.76	0.23	0.24	0.15	-0.05	0.23	0.29	0.25	0.26	0.25	0.24	-0.12	0.10	0.20	0.17	-0.01	-0.06	0.25	0.12	0.01	0.22	0.03
TIC	0.13	-0.13	-0.50	-0.15	-0.16	0.94	-0.15	-0.08	0.05	-0.14	-0.13	0.00	-0.13	0.34	0.31	0.05	0.22	-0.07	0.24	-0.07	0.13	0.02	-0.15	0.12
Cl/Br	-0.20	-0.34	-0.21	-0.32	-0.32	-0.14	-0.02	-0.19	-0.29	-0.33	-0.35	-0.28	-0.31	-0.01	-0.16	-0.22	-0.12	-0.04	-0.10	-0.40	-0.33	-0.02	-0.33	-0.09
aramet	Co	Cr	Cu	Eu	Ho	La	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Sr	Ti	Tl	V	W	Yb	Zn	Zr	BEX	SO4#	SI-C	TIC	Cl/Br
Co	1.00																							
Cr	0.08	1.00																						
Cu	0.23	0.24	1.00																					
Eu	0.41	-0.03	-0.08	1.00																				
Ho	0.28	0.00	0.12	0.53	1.00																			
La	0.62	0.11	0.15	0.22	0.22	1.00																		
Li	0.70	0.04	-0.05	0.71	0.48	0.61	1.00																	
Mo	0.39	-0.10	0.18	0.38	0.27	0.28	0.44	1.00																
Ni	0.34	-0.01	0.25	-0.07	0.16	-0.05	-0.10	-0.01	1.00															
Pb	0.71	0.04	0.10	0.76	0.54	0.64	0.91	0.53	-0.10	1.00														
Sc	0.26	-0.05	-0.20	0.16	-0.07	0.09	0.20	0.07	-0.15	0.18	1.00													
Sr	0.68	0.02	-0.05	0.75	0.52	0.58	0.98	0.45	-0.08	0.92	0.18	1.00												
Ti	0.02	0.56	0.27	-0.12	-0.07	0.00	-0.16	-0.06	0.16	-0.13	-0.05	-0.17	1.00											
Tl	0.44	0.08	-0.13	0.49	0.33	-0.02	0.44	0.27	-0.03	0.52	0.06	0.48	-0.04	1.00										
V	0.05	0.53	0.29	-0.06	0.12	0.04	-0.28	0.04	0.31	-0.19	-0.01	-0.30	0.57	-0.06	1.00									

4.6.3 Vergelijking met onderzoek RUG uit jaren 90

Grootjans (1993) verrichtte begin jaren 90 onderzoek in de strandvlakte achter de stuifdijk, in de westhoek. Het door hem gevonden patroon in vegetatie en ondiepe grondwaterkwaliteit is weergegeven in Fig.4.23. De chemische patronen komen redelijk overeen met de door ons gevonden patronen, al waren de zoutconcentraties in de jaren 90 hoger dan thans.



Figuur 4.23: Voorkomen van rode lijstsoorten in een doorsnede door de westpunt van de Strandvlakte (vlak achter de stuifdijk) op Schiermonnikoog, in relatie tot zuurgraad, kalkgehalte van de bodem en Ca en Cl concentraties van het grondwater. Naar Grootjans 1993.

4.6.4 Relaties met chloride nader beschouwd

De correlatiematrix van Tabel 4.6 vertoont zeer sterke lineaire relaties van diverse elementen met Cl. De relaties met de hoofdelementen SO₄, Na, K, Ca en Mg zijn evident en zo ook die met de typisch mariene spore-elementen B, Br, Li, Mo en Sr. De Cl-relatie met de spore-elementen is weergegeven in Fig.4.24. Daarin is de belangrijke menglijn van regenwater met Standard Mean Ocean Water (SMOW) doorgetrokken, waarbij de concentraties in regenwater het punt X=0, Y=0 benaderen (op de gehanteerde schaal). We noemen deze lijn kortweg de 'SMOW-menglijn'. De Cl concentratie van het Noordzeewater bedroeg tijdens de meetperiode gemiddeld 17.500 mg Cl/L.

De Br-Cl relatie wijst erop dat zeewater voor 100% de bron is van Cl en Br. De concentraties Sr, B en Li laten een geheel ander patroon zien in hun relatie met Cl (Fig.4.24). Zij vertonen gemiddeld hogere concentraties dan de SMOW-menglijn, ten teken van mobilisatie, en alleen Sr vertoont bij Cl > 15.000 mg/L juist lagere concentraties wijzend op immobilisatie. De Sr (en Ca) toenames bij lagere concentraties verklaren zich door menging met zeewater en kalkoplossing. Hun adsorptie tijdens verzoeting wordt ruimschoots gecompenseerd door kalkoplossing. De B toenames hangen vermoedelijk samen met desorptie tijdens verzoeting (Stuyfzand, 2014).

Lithium vertoont over de volle Cl-breedte hogere concentraties dan de SMOW-menglijn. Dit sluit goed aan bij de geconstateerde kationuitwisseling tgv verzoeting. Li gedraagt zich het meest vergelijkbaar met K.

Molybdeen, dat relatief hoge concentraties kent in SMOW, vertoont geen duidelijke relaties met de Cl-concentratie (Fig.4.24), hoewel er toch wel een zeker overschot t.o.v. de SMOW-menglijn te zien valt. Ook dat duidt op overwegend desorptie door verzoeting.

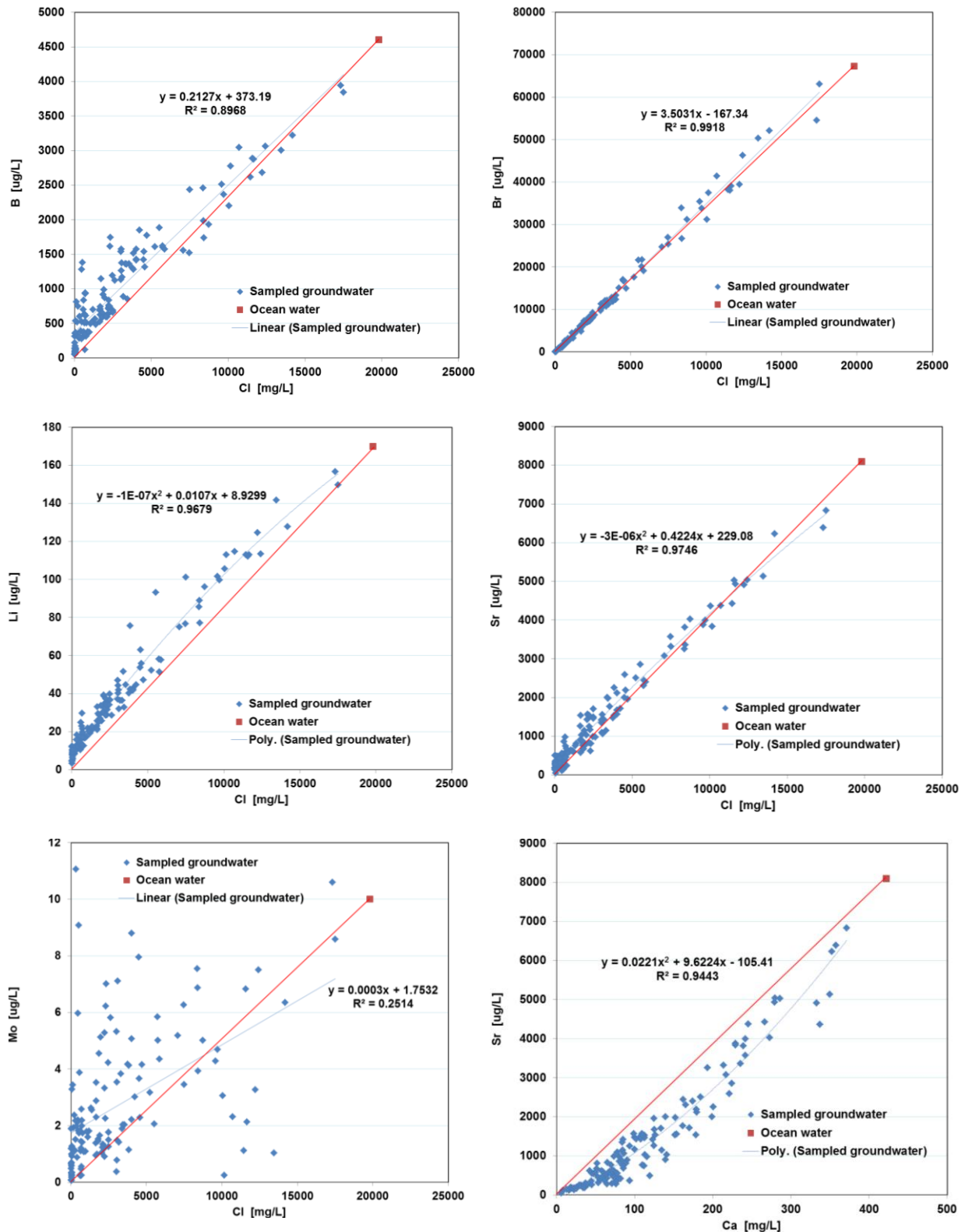


FIG. 4.24. Plot van B, Br, Li, Mo en Sr concentraties als functie van Cl, en van Sr als functie van Ca. SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie.
NB: Cl concentratie van Noordzeewater ca. 17.500 mg/L.

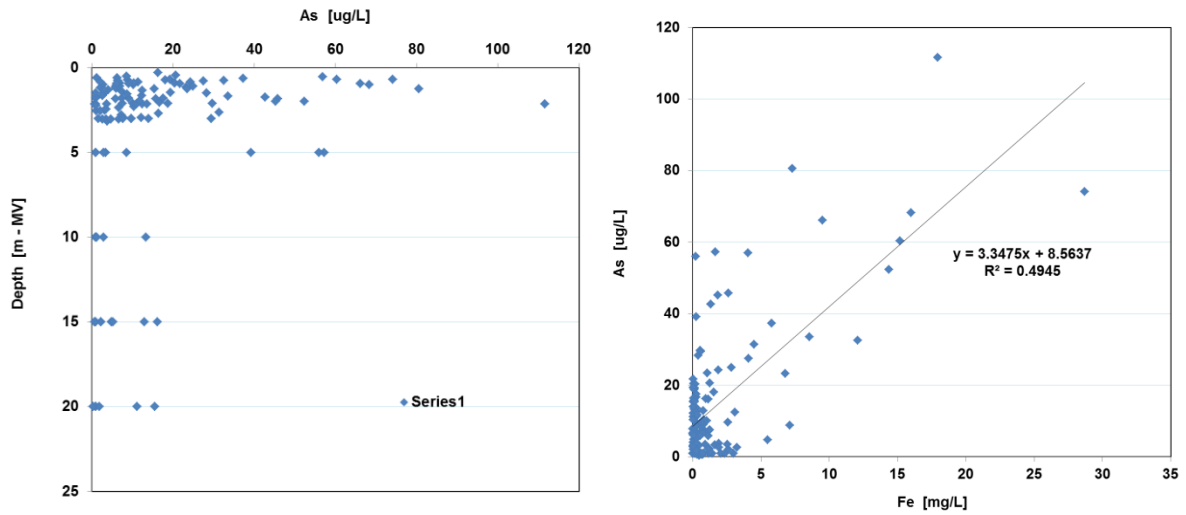


FIG. 4.25. Plot van arseen met diepte en Fe, waaruit volgt dat arseen vooral ondiep sterk verhoogd is met een positief verband met Fe.

5 Zuidwest Texel

Pieter J. Stuyfzand, Donovan Amatirsat en Chantal Bland

5.1 Fysiografie

Het studiegebied bevindt zich op Zuidwest Texel, in het gebied en de omgeving van de Horsmeertjes en De Hors (Fig.2.1C en Fig.5.1), 52°59'N, 4°44'E. Het omvat gefossiliseerde zeereepduinen, primaire duinvalleien, stuifdijken, embryonale duinen en strand. De hoogteligging van maaiveld is weergegeven in Fig.5.1 met inbegrip van alle meetpunten grondwaterkwaliteit.

5.1.1 Klimaat

Het typische zeeklimaat wordt in dit gebied onder andere gekenmerkt door een overheersende wind uit het zuidwesten, een jaarlijks gemiddelde temperatuur van lucht (en ondiep grondwater) van 10.1 °C (gemiddelde meetstation De Kooy 1981-2010) en een gemiddelde jaarlijkse neerslag van 831, 824 en 814 mm voor resp. KNMI-stations De Koog, Den Burg en De Kooy in de periode 1981-2010. Als we deze getallen vermenigvuldigen met 1,025 ter compensatie van te lage opbrengsten door winddefecten, dan komen we uit op resp. 852, 845 en 834 mm/j. Gemiddelde maandtotalen van regenval staan in Tabel 5.1. Maritieme luchtmassa's met een hoge stormfrequentie overheersen in de periode oktober t/m december en in maart. Meer informatie kan worden ontleend aan de Klimaatatlas van Nederland (KNMI, 1972) en aan KNMI (1983).

TABEL 5.1. Gemiddelde maandtotalen van de regenval voor 3 regenstations op Texel en station De Kooy (bij Den Helder), in periode 1981-2010 (data van KNMI, 2011). Ter vergelijking is tevens het nationale gemiddelde weergegeven. Gewijzigd naar Amatirsat (2014).

Station	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Den Burg	73.7	49.6	57.7	37.4	46.3	55.2	67.8	71.2	89.6	98.8	96.5	80.0	823.6
De Cocksdorp	75.5	52.5	60.7	39.5	47.6	55.2	71.0	71.5	91.2	102.0	99.5	81.4	847.6
De Koog	72.2	50.2	59.8	38.2	46.5	53.4	70.7	68.3	92.4	98.4	100.4	80.5	830.8
De Kooy	70.3	47.0	57.5	35.8	49.6	55.4	61.0	79.3	87.1	101.8	92.0	76.8	813.7
Average	72.9	49.8	58.9	37.7	47.5	54.8	67.6	72.6	90.1	100.3	97.1	79.7	828.9
<i>stdev 4 stations</i>	2.2	2.3	1.6	1.5	1.5	0.9	4.6	4.7	2.3	1.9	3.8	2.0	14.3
National average	72.8	54.6	67.6	43.9	61	68.4	78.3	77.9	78	82.7	82.2	79.9	847.3

5.1.2 Geologie

Tot de hier beschouwde, maximale diepte van 100 m-NAP komen uitsluitend onverkitte sedimenten uit het Kwartair voor. Pleistocene afzettingen zijn overal afgedekt door zandige en kleirijke Holocene sedimenten behorende tot de Naaldwijk en Nieuwkoop formaties (voorheen Westland F.). De bovenkant van de jongste Pleistocene afzettingen, de mariene Eem Formatie in het zuiden/zuidoosten en de Formatie van Drente (keileem) elders, ligt op resp. ~23 m en ~12 m-NAP.

Fig.5.12 toont een hydrogeologisch oost-west profiel van ZW Texel eiland volgens De Wit (1987).

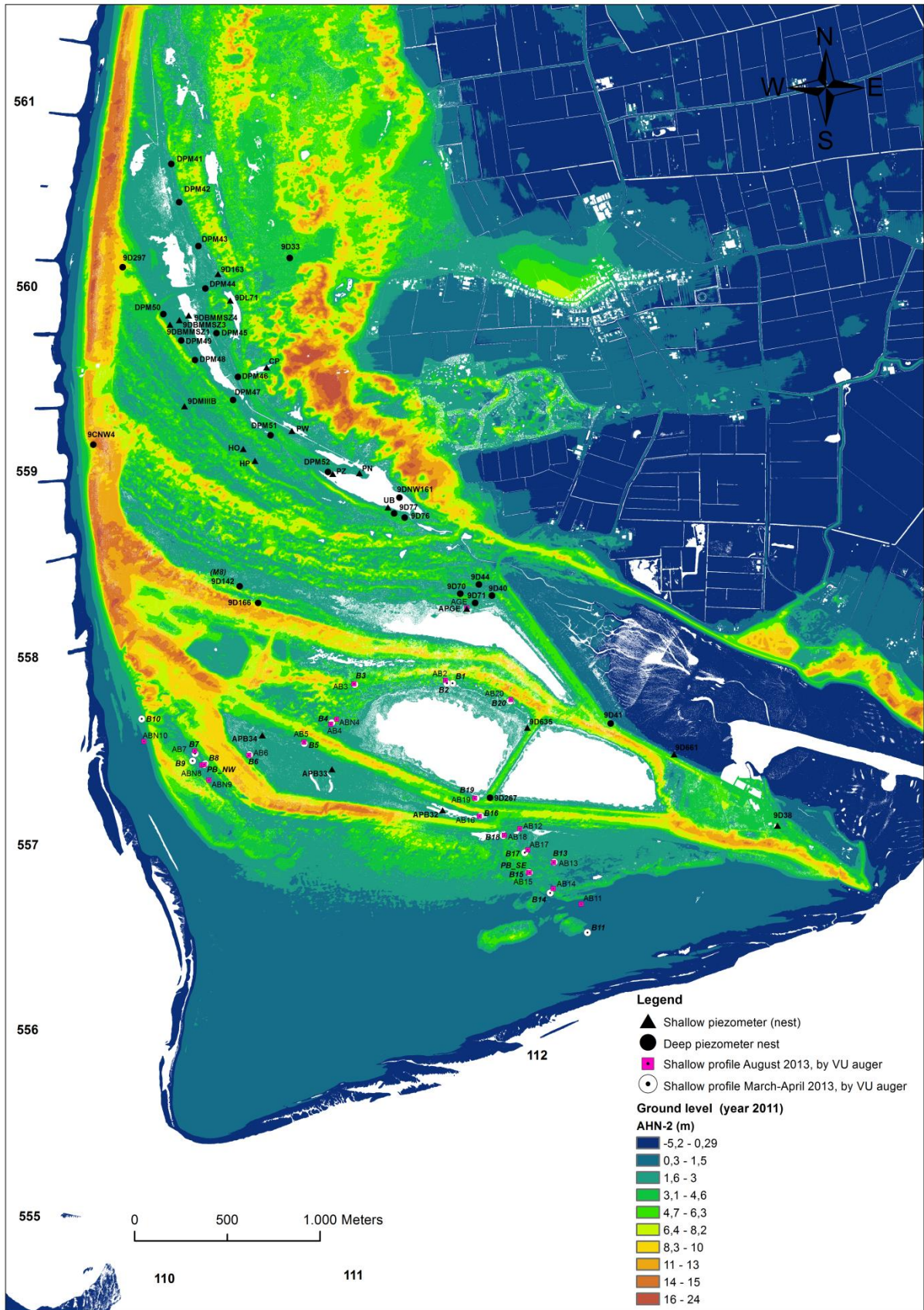


FIG. 5.1. Hoogteligging van maaiveld op Zuidwest Texel volgens AHN-2 geprojecteerd op de topografische kaart. AHN-2 dateert van 2011. Belangrijkste grondwatermeetpunten tevens aangegeven. Naar Amatsat (2014).

De duin- en strandzanden behoren tot het primair kalkarme type (~0,5-1%), en maken daarmee deel uit van het Noordelijke Duindistrict ook wel Waddendistrict genaamd. Zij zijn ook gekenmerkt door lagere veldspaat en hogere toermalijn en titaan gehalten, die op een andere herkomst van het kalkarme zand wijzen (Eisma, 1968; Stuyfzand et al., 2012). In Fig.5.12 valt te zien dat beneden NAP tot de onderzijde van de zoetwaterlens de volgende geologische formaties (afgekort F.) kunnen worden aangetroffen : de Naaldwijk F., Eem F., F. van Drente, Peelo F., F. van Urk en F. van Appelscha of Peize.

Voor een uitvoerige beschrijving van de geologische geschiedenis en opbouw, ook tot grotere diepte, wordt verwezen naar Van Staalduinen (1977) en Zagwijn (1986).

5.1.3 Geomorfologie

De Hors is een uitgestrekte strandvlakte op de zuidpunt van Texel, waar de aanlanding van verschillende grote zandplaten vanuit de Noordzee de kust al enkele eeuwen doet aangroeien. Achter deze strandvlakte met veel embryoduin en ligt een reeks duinruggen (waarvan enkele stuifdijken) en primaire duinvalleien van verschillende leeftijd, zoals blijkt uit historische kaarten (Oost et al. 2004) en recent ook uit 'Optische Luminescentie' metingen (OSL) door Ballarini et al. (2003). Primaire duinvalleien vormen zich wanneer delen van de strandvlakte door een nieuwe duinenrij worden afgesnoerd.

De belangrijkste duinvalleien zijn, in volgorde van jong naar oud, dus in noordelijke richting vanaf de Hors (Fig.5.2): Kreeftepolder, Horsmeertjes, Kelderhuispolder, de Geul, vallei zonder naam, en de Mokslootvallei (waarin gelegen het Grote Vlak en Pompe Vlak).

Langs de westkust waar de strekdammen zich bevinden, erodeert de kust evenwel (sinds 1950 ~10 m/j; Grootjans et al., 1995).

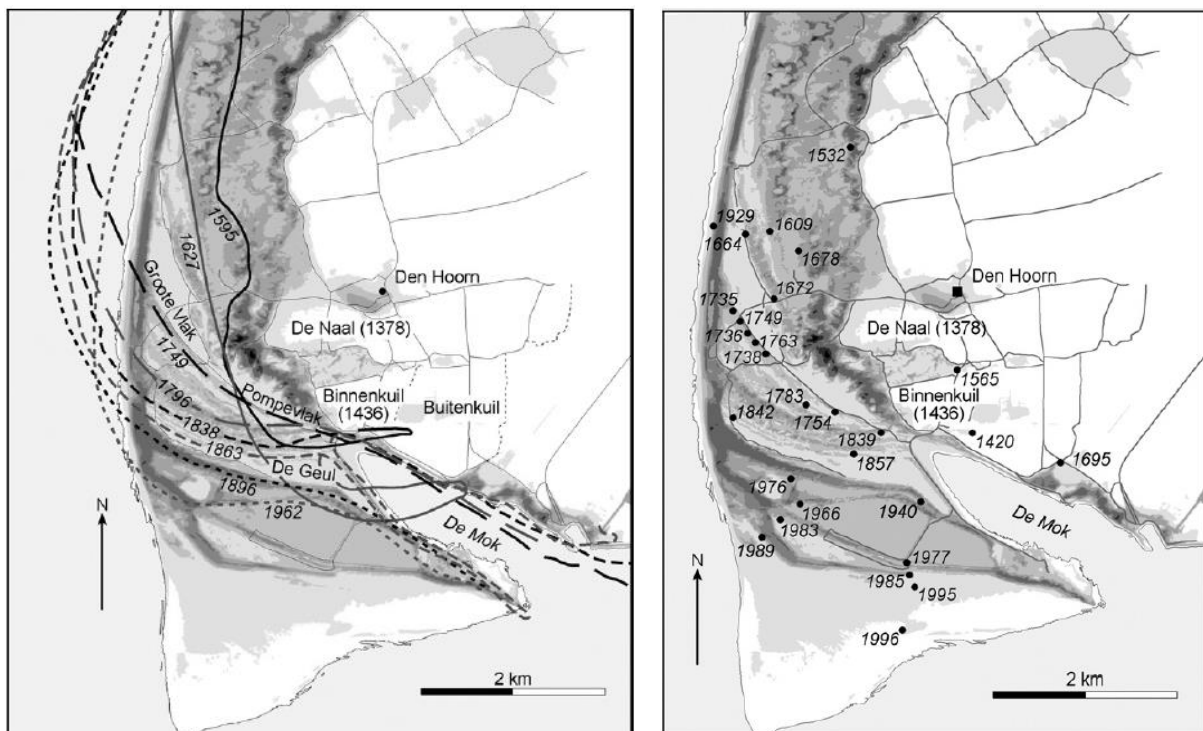


FIG. 5.2. Linker paneel: Historische veranderingen op ZW Texel, die de correlatie tonen tussen de huidige duinruggen en kustlijnen in het verleden. Rechter paneel: OSL ouderdom van zandmonsters van de zeewaartse zijde van duinruggen. Deze ouderdommen, in kalenderjaren AD, etaleren interne consistentie en overeenkomst met de historische data in het linker paneel. Naar Van Heteren et al. (2009). Grijskleuren op de ondergrond tonen de topografie (bron: altimetry): licht is laag and donker is hoog (klassen: 0–1, 1–3, 3–5, 5–8, 8–10, 10–15, 15–20, and > 20 m). De grijze lijnen op land zijn wegen.

5.1.4 Bodems

Het studiegebied wordt geheel ingenomen door zwak-kalkhoudende (bovenin ontkalkende) en kalkloze duin- en vlakvaaggronden, bestaande uit matig fijn zand c.q. leemarm of zwak lemig, fijn zand. Hier zijn ontkalking (verzuring) en de accumulatie van organisch materiaal de belangrijkste bodemvormende processen (Klijn, 1981).

Het oorspronkelijke kalkgehalte van strandzand is 0.5-1.2 %, dat van duinzand 0,4-1.0 %, en het gehalte aan organische stof daarvan is resp. 0.01 en 0.04 % (berekend uit dataset Stuyfzand et al., 2012).

TABEL 5.2. Gemiddelde geochemische samenstelling van duinzand tussen 0.1 en 0.5 m-MV in juni 2009, op de in Fig.5.3 aangegeven locaties, gesorteerd volgens opklimmende ouderdom van het zand. Tevens aangegeven de lineaire correlatiecoëfficiënt voor 4 parameters (ouderdom, afstand tot hoogwaterlijn [X-HWL], organisch koolstof [C-org] en totaal Ca. Gebaseerd op data uit het onderzoek van Stuyfzand et al. (2012).

Site #	X-HWL	Age	C-org	N	<2	P50	P60/P10	Ti	Ca	Mg	Fe	P	Bi	Co	Cu	Eu	Ni	Pb	Sr	CaCO ₃	Mg-Sil	S-inorg	Ca/Sr	Ca/Mg
on map	m	year	%	%	sum 8	CALC	CALC	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	Best	%	ppm		
7-1	0	6	0.001	0.001	0.53	291	1.82	269	2470	710	1728	55	0.03	0.74	0.61	0.15	1.97	4.58	40	0.45	0.63	98	15.6	3.5
7-2	100	10	0.004	0.003	0.51	324	1.87	430	3530	700	1843	69	0.02	0.80	0.63	0.14	2.15	4.50	40	0.71	0.64	76	25.2	5.4
7-3	250	13	0.01	0.001	0.59	335	1.87	298	2150	536	1673	53	0.02	0.71	0.57	0.14	1.64	4.30	33	0.44	0.49	40	16.0	4.1
7-4	713	14	0.02	0.002	1.06	242	1.74	390	2815	712	2006	58	0.03	0.76	0.66	0.17	1.99	4.49	41	0.55	0.65	44	18.6	3.9
7-5	850	19	0.05	0.004	1.09	257	1.89	306	1795	554	1597	47	0.02	0.66	0.52	0.15	1.80	4.11	34	0.17	0.50	28	13.5	3.2
7-6	975	24	0.09	0.002	1.06	249	2.00	443	1465	589	2017	56	0.03	0.69	0.67	0.17	1.88	4.43	34	0.17	0.53	18	11.3	2.5
7-7	1438	69	0.08	0.003	1.43	228	2.07	709	2840	816	3025	82	0.04	0.81	1.02	0.20	2.04	5.84	43	0.36	0.74	24	20.5	3.5
7-8	1725	152	0.16	0.009	1.01	251	1.90	944	2857	925	2897	71	0.04	0.92	0.85	0.15	3.28	5.80	42	0.45	0.84	13	20.0	2.6
7-9	2050	170	0.06	0.002	0.95	248	1.81	330	825	510	1749	47	0.02	0.70	0.70	0.14	1.79	4.84	31	0.04	0.45	18	6.0	1.6
7-10	1250	226	0.17	0.007	1.10	241	1.82	402	951	532	2017	55	0.04	0.64	0.70	0.07	1.54	5.89	33	0.03	0.47	10	6.7	1.8
7-11	675	247	0.11	0.007	1.27	234	1.80	403	982	602	2106	64	0.06	0.80	0.91	0.17	2.05	8.69	36	0.04	0.53	19	6.2	1.6
7-12	1550	255	0.13	0.007	1.22	240	1.84	503	866	554	1781	50	0.04	0.70	0.76	0.10	1.76	5.17	33	0.04	0.49	15	5.7	1.6
7-13	863	337	0.43	0.028	1.46	227	1.85	322	807	510	1759	61	0.08	0.58	0.80	0.14	1.53	9.93	34	0.05	0.44	2	5.1	1.6
7-15	2883	444	0.54	0.022	1.27	272	1.83	525	835	332	1728	46	0.08	0.34	0.84	0.09	0.81	7.56	24	0.02	0.27	0	8.2	2.5
7-16	1413	477	0.09	0.008	0.74	278	1.82	360	563	289	1240	34	0.05	0.42	0.78	0.10	0.95	7.79	25	0.00	0.25	11	4.4	1.9
7-14	1933	609	0.46	0.027	2.41	269	3.35	391	656	330	1359	112	0.09	0.41	1.21	0.11	1.06	12.67	27	0.02	0.26	8	4.7	2.0
R - Age	0.65	1.00	0.79	0.81	0.64	-0.18	0.51	0.00	-0.75	-0.73	-0.40	0.22	0.88	-0.78	0.69	-0.62	-0.63	0.87	-0.73	-0.72	-0.75	-0.64	-0.73	-0.65
R - X	1.00	0.65	0.66	0.49	0.52	-0.38	0.27	0.41	-0.52	-0.40	0.05	0.06	0.53	-0.52	0.54	-0.43	-0.33	0.38	-0.54	-0.59	-0.41	-0.74	-0.45	-0.56
R - Corg	0.66	0.79	1.00	0.95	0.70	-0.24	0.46	0.12	-0.56	-0.52	-0.18	0.30	0.90	-0.69	0.60	-0.48	-0.50	0.77	-0.55	-0.56	-0.56	-0.62	-0.52	-0.48
R - Ca	-0.52	-0.75	-0.56	-0.53	-0.45	0.34	-0.20	0.35	1.00	0.82	0.54	0.20	-0.57	0.70	-0.29	0.58	0.68	-0.56	0.83	0.97	0.83	0.69	0.99	0.87

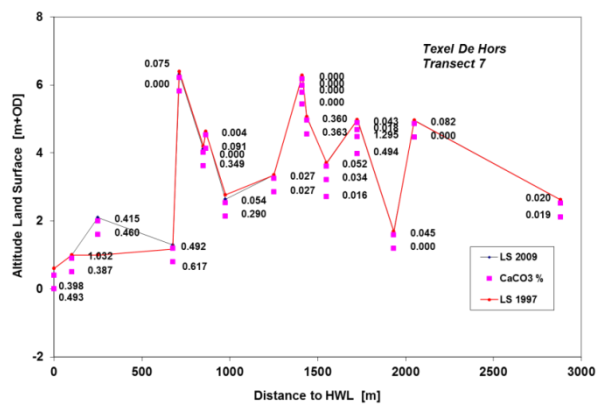


FIG. 5.4. CaCO₃ gehalte langs een N-S transect op ZW Texel. Naar Stuyfzand et al. (2012). LS = maaiveld; HWL = hoog water lijn.

FIG. 5.3. Locatiekaart van ZW- Texel met de ligging van de 16 ondiepe profielkuilen die tot max. 1 m-MV zijn bemonsterd voor geochemisch onderzoek. Naar Stuyfzand et al. (2012).

De meeste meetpunten liggen op slechts enkele meters afstand van de locaties waar Van Heteren et al. (2006) bodemonsters dateerden via luminescentie techniek. Die dateringen zijn in Tabel 5.2 overgenomen.

Enkele bodemvormende processen komen tot uiting door beschouwing van de geochemische analyses van duinzand tussen 0,1 en 0,5 m-MV, genomen op locaties waar Van Heteren et al. (2006) duinzand dateerden (Tabel 5.2, Fig.5.3). We zien met toenemende ouderdom van het zand sinds stabilisatie, dat de gehalten aan o.a. Ca, Mg, kalk, Mg-silicaat, Co, Eu, Ni, Sr en anorganisch S afnemen, en die van organische koolstof, lutum, Bi, Cu en Pb toe. De afnames zoals van kalk en Co (Fig.5.5 links) verklaren zich door uitloging, en de toenames zoals die van C-org en Pb door ophoping (Fig.5.5 rechts). Hoewel de kalkplot een exponentieel dalend verloop suggereert (Fig.5.5 links), dienen de gehalten <0.05 % wellicht als volledig kalkloos te worden beschouwd, omdat we dan rond de minimum detectie limiet zitten. Dit betekent dat de bovenste decimeters duinzand in enkele tientallen jaren volledig ontkalken en dat er meetpunten zijn waar dit niet gebeurt dankzij b.v. inwaai van kalkhoudend zand of door bioturbatie. Het diepteprofiel voor kalk in Fig.5.4 toont tevens dat alleen in de eerste paar 100 meter landinwaarts van de hoogwaterlijn het maaiveld is toegenomen in de periode 1997-2008; dit volgens altimetrie.

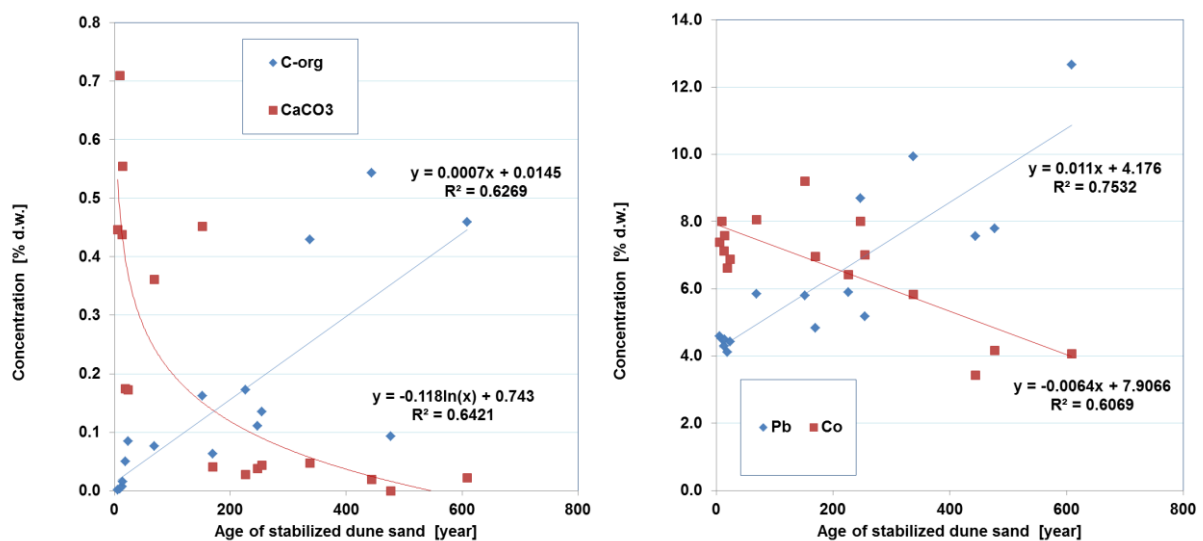


FIG. 5.5. Ophoping (organische koolstof en Pb) en uitloging (kalk en Co) als functie van de ouderdom van gestabiliseerd duinzand in ZW Texel. Gebaseerd op metingen aan duinzand tussen 0.1 en 0.5 m-MV in juni 2009, uit Tabel 5.2.

5.1.5 Onderzoek naar de Groenknolorchis

Onderstaande tekst vormt een samenvatting van § 4.1 in het rapport van EGG Consult (2014), dat weer gebaseerd is op het werk van Van der Craatz (2011) en Shahrudin et al. (2014). Laatstgenoemden hebben in 2010 een studie uitgevoerd naar de ontwikkeling van de Groenknolorchis (*Liparis loeselii*) in een reeks van primaire duinvaleien op De Hors. Fig.5.6 toont waar de valleien en populaties van Groenknolorchis zijn onderzocht. De oudste valleien waar de orchidee is gevonden (sinds 1978 tot 1998) zijn de valleitjes bij de Horsmeertjes. Deze valleien werden reeds in 1953 gevormd, maar het is niet bekend wanneer de groenknolorchis zich voor het eerst hier heeft gevestigd. Wel bekend is dat de soort zich hier tenminste 20 jaar heeft gehandhaafd, gedeeltelijk onder een beheer van maaien (zie Tabel 5.3). De oudst levende populatie is gelegen in hetzelfde gebied van de Horsmeertjes (Grauwe ganzen Vallei), maar deze vallei was in 1986 nog kaal, vermoedelijk als gevolg van lokale verstuiwingen. In 2010 was deze populatie waarschijnlijk 18 jaar oud en wist zich tot nu toe te handhaven, mede dankzij een beheer van jaarlijks maaien. De volgende vallei die ontstond is de grote Kreeftpolder. In 1977 was de vallei volledig afgesloten, mede door toedoen van Rijkswaterstaat.

In 1994 werd al een Knopbiesvegetatie gevonden en een jaar later werd de eerste Groenknolorchis ontdekt. 7 jaar later werd ook in het Centrum van de vallei een populatie van deze soort beschreven. Nog jongere valleien ontstonden op een natuurlijke wijze aan de oostkant van de Hors en nog later ook aan de westzijde. De jongste populatie van de groenknolorchis vinden we in deze westelijk gelegen nieuwe valleien, die nog gedeeltelijk onder invloed staan van de Noordzee. In 2010 was de populatie 2 jaar oud. In 2012 stonden er al vele honderden individuen. In een aantal plots van 2 x 2 meter werden meer dan 100 individuen geteld. De plek waar nog geen orchideeën werden aangetroffen in 2010, was toen wel begroeid.

De populatieopbouw van de groenknolorchis in duinvalleien in 2010 is weergegeven in Fig.5.7. De climax lijkt hier bij de 12 jaar oude populatie op te treden.

Uit het bodemonderzoek kwam naar voren dat verschillen in organische stofopbouw (en de daarmee samenhangende milieufactoren) en verschillen in zuurgraad de belangrijkste factoren waren die het voorkomen van de Groenknolorchis bepalen (Fig.5.8). Opmerkelijk was dat verschillen in grondwaterstand niet van belang waren voor het voorkomen van de Groenknolorchis.

Uit dit onderzoek volgt dat de Groenknolorchis het in jonge, natuurlijke valleien beter doet dan in oudere valleien en valleien die gemaaid worden. In het gebied van De Hors op Texel houdt de soort het niet langer dan 20 jaar vol en dan alleen dankzij aanvullend maaibeheer. Zonder dit beheer zouden de populaties het waarschijnlijk maar een jaar of 10 volhouden. Dit betekent dat nieuwvorming van valleien door afsnoering van de strandvlakte niet te lang op zich moet wachten, anders sterft de orchidee lokaal uit. De hoeveelheid organische stof die zich in de bodem ophoopt, lijkt een nadelige invloed te hebben na verloop van tijd. Onderzoek elders toont echter aan dat verzuring voor de groenknolorchis waarschijnlijk veel bedreigender is dan stapeling van organische stof. Voorliggend onderzoek bevestigt dit.

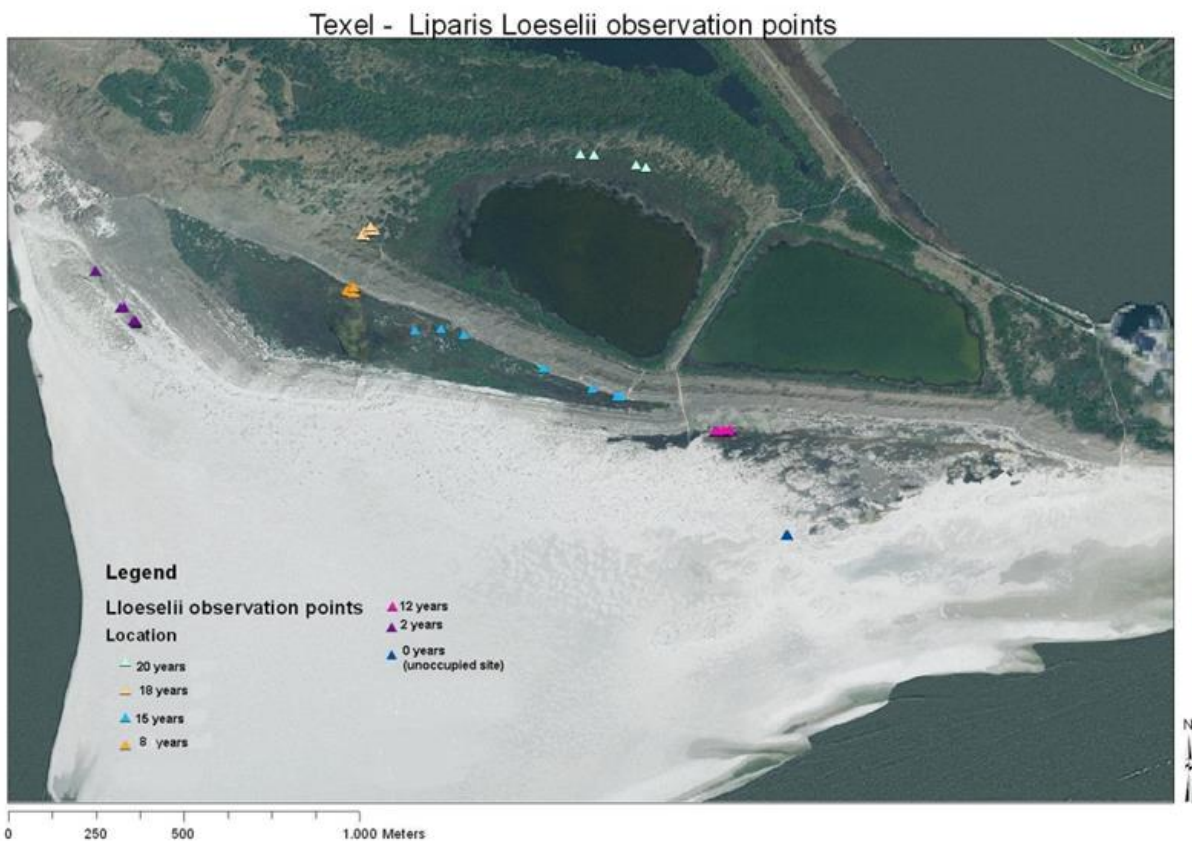


FIG. 5.6. Ligging onderzoeksgebieden en geschatte leeftijd van populaties Groenknolorchis. Naar Grootjans et al., 2014).

TABEL 5.3: Geschatte leeftijden van de duinen, de valleien en de populaties van Groenknolorchis (Van der Kraatz 2011 en Shahrudin et al. 2014). Valleien in geel worden gemaaid, die in het blauw worden niet beheerd.

Lokatie	X-Coordinaat	Y-Coordinaat	Leeftijd duinen volgens historische kaarten (jaren)#	Leeftijd duinen volgens OSL (jaren)#	Leeftijd van de vallei (jaren)	Leeftijd Groenknolorchis (<i>L. loeselii</i>) populatie in 2010 (jaren)
Valleien langs de Hors meertjes	111498	557847	57	69±4	Onbekend	34*
Grauwe Gansen Vallei	110906	557659	57	Niet gemeten	24	18
Kreeft Polder-Oost	111054	557381	31	Niet gemeten	16	15
Hors valleitjes	111930	557107	46	24±3	12	12
Kreeft Polder-Centrum	110852	557460	31	26±1	16	8
Recent gevormde valleien in Hors-West	110141	557493	10	20±2	7	2
Toekomstige vallei op het strand	112110	556759	5	13±2	1	0

= gegevens van Ballarini et al. (2003) en Oost et al. (2003). * = leeftijd geschat op basis van het verschijnen van vegetatie in de vallei.

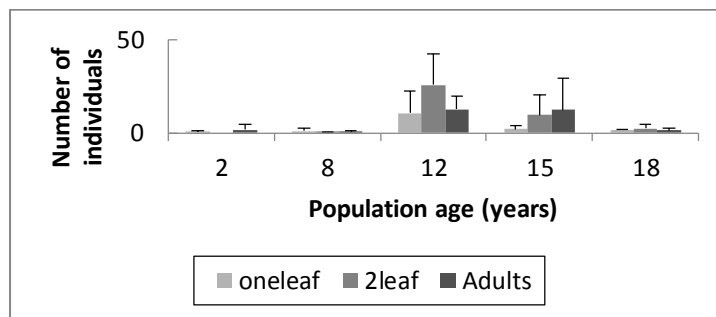


FIG. 5.7. Aantallen en populatiestructuur van de Groenknolorchis in valleien van verschillende leeftijd. Aantallen werden geteld in vakken van 1x1 meter. Planten met 1 of 2 bladeren zijn jonge planten die nog niet bloeiden. Volwassen planten bloeiden wel. Naar Shahrudin et al. (2014).

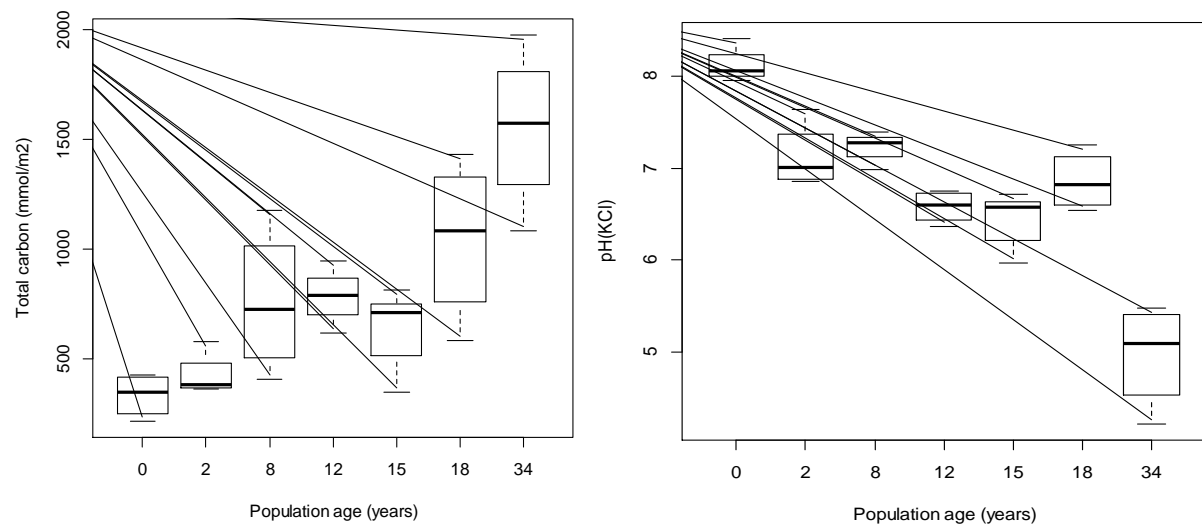


FIG. 5.8. Ontwikkeling van de hoeveelheid organische stof (uitgedrukt als C-elementair) en van de pH (KCl) in valleien met populaties van Groenknolorchis van verschillende leeftijd. Naar Shahrudin et al. (2014).

5.2 Twee ondiepe meetraaien bij de Hors

Het onderzoek speelde zich vooral af in de omgeving van de Hors en Horsmeertjes in het zuidwestelijke duin- en strandgebied van Texel. Daar zijn 2 ondiepe meetraaien ingericht (voor ligging zie Fig.5.11) en bemonsterd: raai N-S in het oosten (Fig.5.9) langs peilbuizen APGE, 9D.635, 9D.267 en PB-SE; en raai E-W in het westen (Fig.5.10) langs peilbuizen APGE, APB-33, APB-34 en PB-NW. Langs zowel profiel N-S als profiel E-W zijn in totaal 21 spiraalboringen verricht en bemonsterd, waarvan 10 in maart-april 2013 en 11 in augustus 2013. De boringen in augustus zijn i.h.a. geplaatst binnen een straal van 10 m tot de boring verricht in maart-april. In 3 gevallen bedroeg de afstand ~150 m. Een MiniDiver was geïnstalleerd in peilbuizen PB-SE en PB-NW (Tabel 2.1).

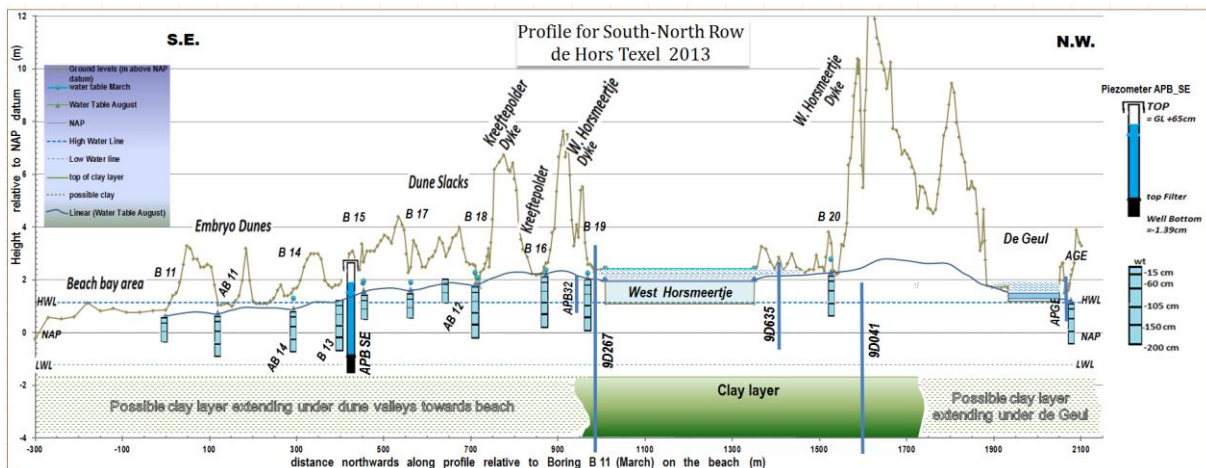


FIG. 5.9. Meetraai NS met de positie van de eigen spiraalboringen, de eigen peilbuis PB-SE en 3 bestaande peilbuizen. Voor ligging transect zie Fig.5.11. Naar Bland (2014).

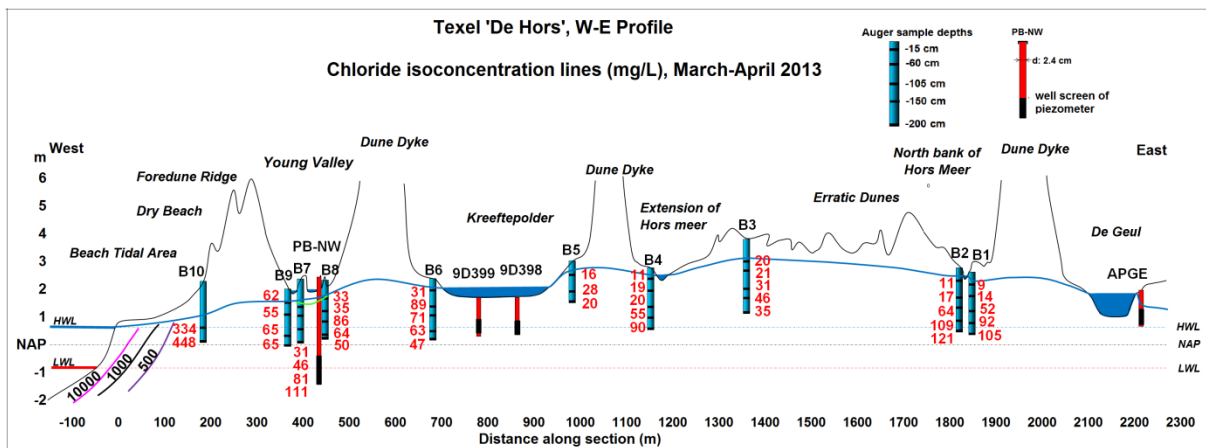


FIG. 5.10. Meetraai WE met de positie van de eigen spiraalboringen, de eigen peilbuis PB-NW en 3 bestaande peilbuizen. Voor ligging transect zie Fig.5.11. Naar Amateursat (2014).



FIG. 5.11. Locatiekaart van de spiraalboringen en bemonsterde peilbuizen in het studiegebied, met de ondiepe meetraaien N-S en E-W, en de diepe meetraai NW-SE. De Grote raai W-E en Kleine raai W-E refereren aan ondiepe meetraaien beschreven door Berg & Sagel (1995). Naar Amatsirsat (2014).

5.3 Grootschalige hydrologie van Zuid-Texel

5.3.1 Hydrogeologische opbouw

De hydrogeologische opbouw van het studiegebied volgt uit een oost-west profiel in Fig.5.12 en een noord-zuid profiel in Fig.5.13. Onder de Horsmeertjes, oostzijde van De Geul en het zuid-oostelijke deel van de Mokslootvallei bevindt zich ondiep (2-8 m-NAP) een slecht-doorlatende kleilaag, die verder in het studiegebied ontbreekt. Op 10-30 m-NAP komt slecht-doorlatende keileem voor in de noordelijke helft van het studiegebied.

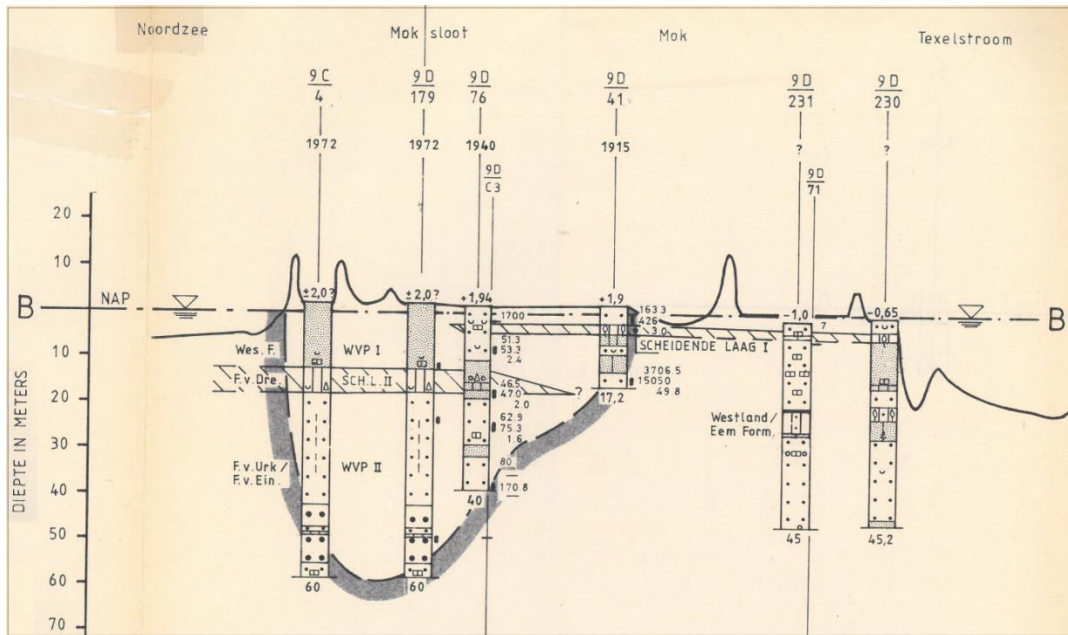


FIG. 5.12. Oost-west hydrogeologisch profiel over Zuid-Texel, over de Moksloot vallei. Boorkolom: (zeer) fijne/grove stippels = (zeer) fijn/grof zand; verticale lijnen = klei of leem of keileem. Naar De Wit (1987).

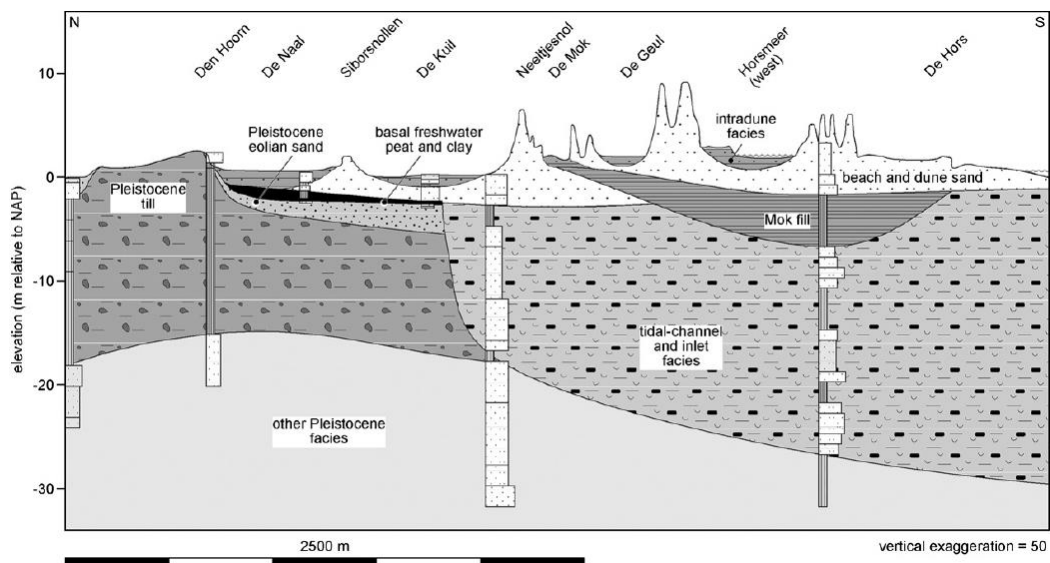


Fig. 5.13. NZ-profiel over ZW Texel, van Den Hoorn tot de zuidpunt van De Hors. In de boorprofielen is de wijfde een kwalitatieve maat voor de korrelgrootte, grijskleuring een maat voor het organische stofgehalte, verticale streepjes indiceren silt en klei, en puntjes wijzen op zand. Naar: Van Heteren et al. (2009).

5.3.2 Grondwateraanvulling en grondwaterwinning

Grondwateraanvulling

De grondwateraanvulling van duingebieden is een functie van vooral de hoeveelheid en intensiteit van regenval, de begroeiing, de temperatuur, luchtvochtigheid, windsnelheid en oppervlakkige afvoer. Laatstgenoemde is in het studiegebied betrekkelijk groot, omdat diverse primaire duinvalleien zoals de Mokslootvallei benedenstrooms (Grote Vlak en Pompevlak), De Geul en Horsmeertjes versneld kunnen afwateren op het buitenwater (De Mok). Deze afwatering geschiedt, waar geblokkeerd door een stuifdijk of dijk, gewoon onder de dijk door via grondwaterstroming. Voor het gebied als geheel is de grondwateraanvulling dus relatief laag, tussen de primaire (afwaterende) duinvalleien in kan de grondwateraanvulling hoog zijn, vooral waar de begroeiing schaars is of ontbreekt.

Het verband tussen begroeiing en grondwateraanvulling indien oppervlakkige afvoer ontbreekt, is weergegeven in Tabel 5.4, behorende bij een gemiddeld jaartotaal aan regenval van 850 mm.

Waterwinning

De waterwinning door PWN startte in 1956 in de Moksloot Vallei, ter plaatse van het Grote Vlak en Pompevlak. Deze vallei voerde voordien 0.5-0.7 Mm³/j aan zoet duinwater af naar de Mokbaai, door oppervlaktewaterafvoer. De winning, die in 1991 vrijwel en in 1993 volledig werd beëindigd, bedroeg in de hoogtijdagen (1964-1971) 0.55-0.75 Mm³/j. De winning geschiedde met 40 ondiepe pompputten met filter op 2-12 m-NAP, en in 1979 kwamen daar 12 diepe pompputten bij met filter op gemiddeld 27-32 m-NAP.

TABEL. 5.4. Grondwateraanvulling (R) als functie van de begroeiing, bij een jaarlijkse regenval (P) van 0.797 m. Berekeningen volgens DUVELCHEM (Stuyfzand, 2010). E = evapotranspiratie.

VEGETATION		EVAP			Conc.	LogPCO2	Interception deposition	
Type	Code	R = (p ln(P)-c)/1000			factor Evap	100 kPa	Total / Bulk	
	Prec (P) m/y = 0.85	p	c	E/P	f _E = P/R		f _{NR}	f _{IR}
Bare	1	750.0	4330	0.142	1.166	-3.007	1.080	2.080
Bare + some mosses/grasses	Lys 1 2	741.6	4338	0.219	1.280	-2.828	1.131	2.131
Mosses	Mosses-1 3	730.0	4360	0.336	1.507	-2.588	1.228	2.228
Poor dry dune veg, mix of mosses+grasses+bare	4	720.0	4370	0.428	1.747	-2.429	1.322	2.322
Dry shrubs (open), <50% mosses/grasses	5	710.0	4383	0.522	2.093	-2.284	1.447	2.447
Rich dry dune veg, Heather, Dry deciduous	Lys 2 6	702.4	4398	0.600	2.503	-2.179	1.582	2.582
Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks	Lys 3 7	641.6	3977	0.588	2.426	-2.195	1.557	2.557
Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	600.0	3750	0.650	2.861	-2.118	1.691	2.691
Pines, dense dry	9	550.0	3500	0.753	4.050	-2.005	2.012	3.012
Pines	Lys 4 9.5	504.3	3251	0.822	5.633	-1.938	2.373	3.373
Pines, wet and dense	10	475.0	3100	0.878	8.174	-1.889	2.859	3.859

5.3.3 Zeewaterstanden en inundatiekansen

De belangrijkste meetpunten van de zeewaterstanden zijn aangegeven in Fig.5.14. De getijdendata van meetpunt Den Helder zijn het meest relevant voor De Hors en komen van <http://live.getij.nl> en van Rijkswaterstaat (RWS).

Kengetallen voor waterstandsfluctuaties op meetpunt Den Helder zijn gerubriceerd in Tabel 5.5. Inundatie van de strandvlakte (MV op ~1,2+NAP) van de Hors geschiedt derhalve >>5x/jaar, maar niet dagelijks. De duingebieden achter de stuifdijken zijn beschermd tegen overstroming, de laagtes tussen de embryoduinien niet (Fig.5.16).

De Noordzee kent een dubbeldaags getij, waarbij een hele eb-vloed cyclus 12 uur 25,2 minuten duurt en de vloed sneller opkomt dan eb. Springtij doet zich voor 2 dagen na volle of nieuwe maan, dus elke 14,75 dag en doortij volgt 7 dagen na springtij. Amateursat (2014) biedt meer informatie over het getij rond Texel. Het verloop van de zeewaterstand bij De Hors in de periode maart – augustus 2013 is weergegeven in Fig.5.15.

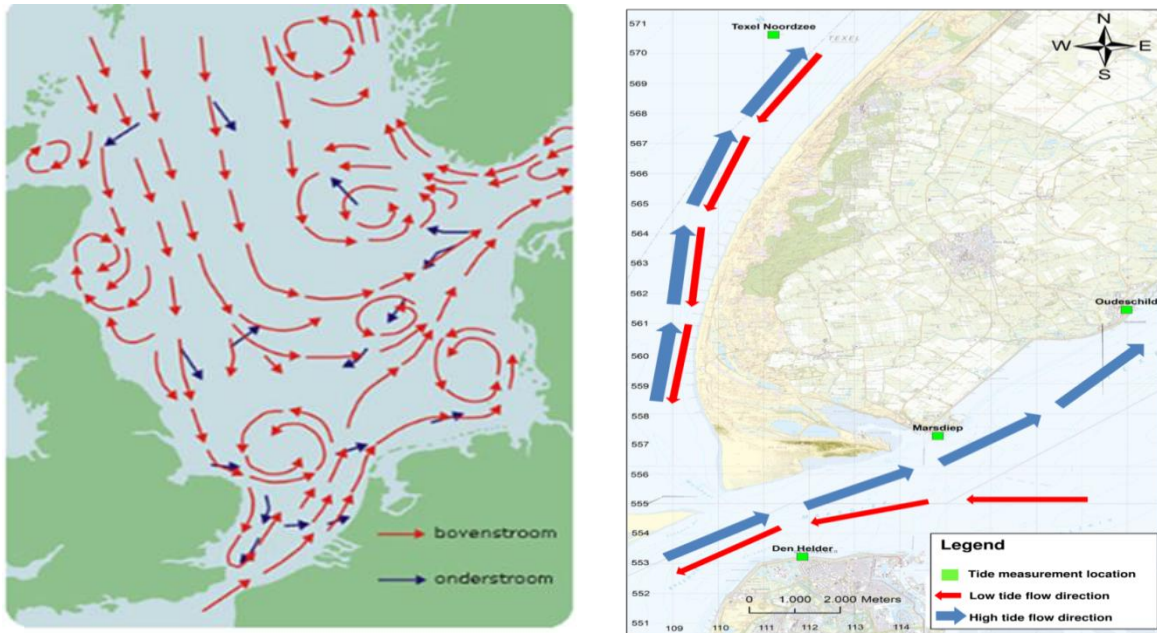


Fig. 5.14. Linker paneel: Dominante stroming in de Noordzee (www.ecomare.nl). Rechter paneel: De voor Texel meest relevante getijde-stations van RWS. Naar AmatiRSat (2014).

TABEL 5.5. Kengetallen voor waterstandsfluctuaties op meetpunt Den Helder, zoals afgeleid uit RWS 2013. Normalen voor de periode 1951-1990.

Mean tidal characteristics*	Unit**	Value	Extremes*	Unit**	Value
Tidal range	cm	139	February, 1, 1953	cm	325
High Water (HW)	cm	58	March, 15, 1964	cm	-260
Low Water (LW)	cm	-81	1x in 100 years	cm	340
Spring-tide	cm	-90 to 66	1x in 50 years	cm	320
Neap-tide	cm	-66 to 49	1x in 20 years	cm	295
Water level	cm	-1	1x in 10 years	cm	275
Duration of rise	hour	5.40	1x in 5 years	cm	255
Duration of fall	hour	6.45	1x in 2 years	cm	225
Notes: * Period: year 1951 -1991. ** cm + NAP			1x in 1 year	cm	205
			2x in 1 year	cm	190
			5x in 1 year	cm	165

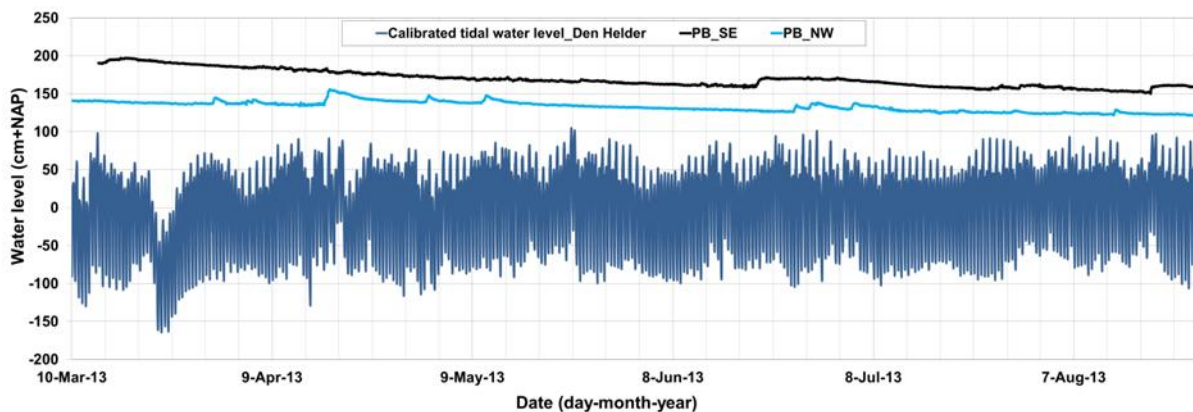


FIG. 5.15 Verloop van de zee­water­stand bij de Hors (na geringe transformatie van de data van meetstation Den Helder) en de grondwater­stand bij peil­buizen PB_SE (345 m van HWL) en PB_NW (430 m van HWL), in de periode 10 maart t/m 25 Augustus 2013. Naar AmatiRSat (2014).

Uit Fig.5.16 volgt dat de belangrijkste Groenknolorchis standplaatsen op de Hors (buiten de buitenste stuifdijk) gelegen zijn op plekken waar zeewater af en toe inundeert. Ook valt te zien, dat de grondwatermeetpunten B10, ABN10, B11, AB11, B14 en AB14 de grootste kans op inundatie lopen, hetgeen klopt met hun relatief hoge zoutgehalte en sterke verzoetingsverschijnselen in 2013 toen zeewaterinundatie nauwelijks optrad.

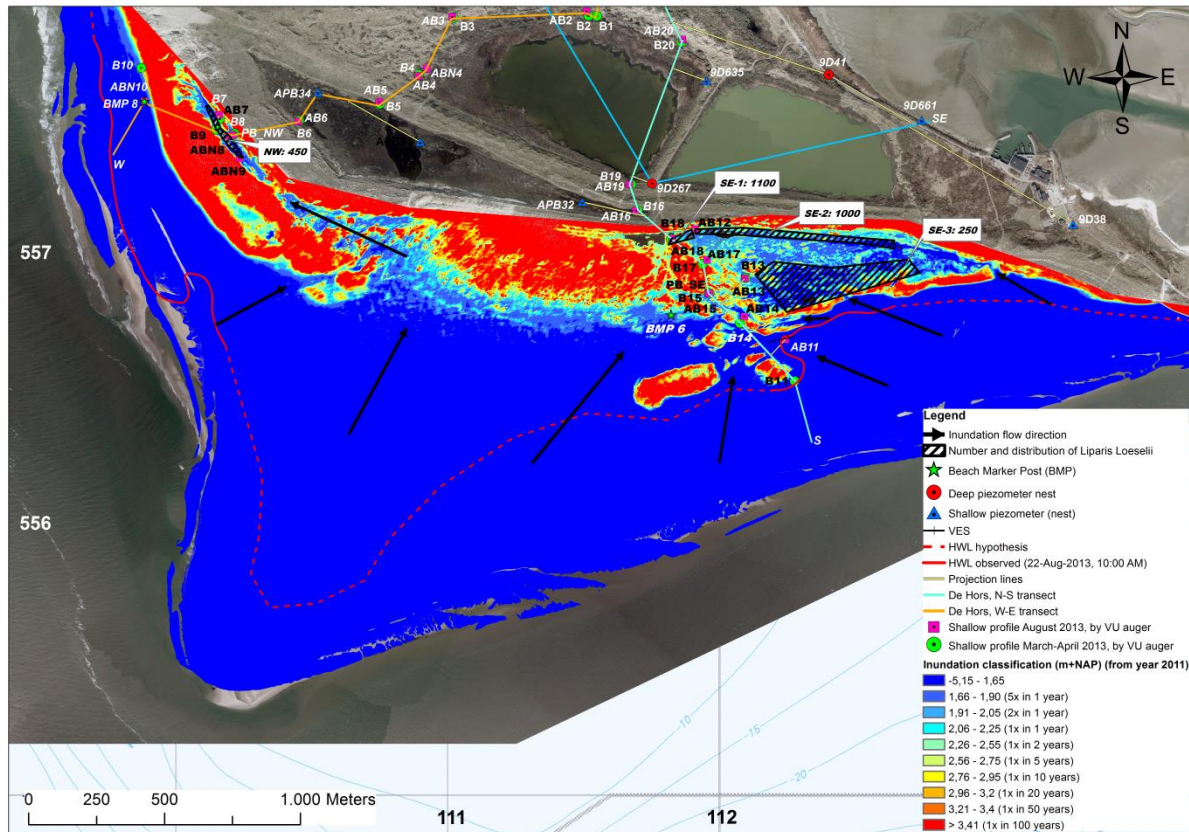


FIG. 5.16 Inundatiekaart van de Hors met kans op inundatie door zeewater, variërend van $>5x$ /jaar tot $1x/100$ jaar (naar Amatirsat, 2014). Gebaseerd op hoogtekkaart volgens AHN-2 uit jaar 2011 en de zeewaterstanden uit Tabel 5.5. De belangrijkste toestroomroutes zijn aangegeven; het dichtstuiven ervan kan het gebied erachter beschermen tegen inundatie.



FIG. 5.17 Luchtfoto van de oosthoek van de Hors, waarbij de natte en met riet begroeide strook grenzend aan de stuifdijk opvalt. Het oppervlaktewater daarin is zoet (zie Fig.5.30), mogelijk wijzend op kwel vanuit het noordelijk gelegen Horsmeer Oost. De kans op zeewaterinundatie is inmiddels sterk verkleind. Foto verkregen van Ton Zegers and Erik van der Spek (Staatsbosbeheer).

5.4 Grondwaterstanden in studiegebied

5.4.1 Naar een gedetailleerde isohypsenkaart

De Wit (1987) geeft voor de zomer van 1982 een isohypsenkaart (Fig.5.26), waarop de Horsmeertjes een grondwaterstand vertonen om en nabij NAP, wat natuurlijk fout is en stoelt op gebrek aan gegevens.

Om tot een gedegen isohypsenkaart van het onderzoeksgebied te komen zijn diverse gegevens ingezet: (i) de eigen grondwater- en oppervlaktewater-metingen in de periode maart – augustus 2013, (ii) grondwaterstanden van DINOloket van TNO, (iii) oppervlaktewaterstanden van HHNK, (iv) maaiveldshoogten volgens AHN2, en (v) berekeningen met de vergelijking van Hooghoudt, om de opbolling van de grondwaterstand onder hoge duinruggen tussen langgerekte duinvalleien te bepalen (§ 5.4.2).

Het resultaat, een isohypsenkaart van de grondwaterstand in augustus-september 2013, is weergegeven in Fig.5.18. Als afgeleide daarvan is in Fig.5.19 weergegeven de richting van grondwaterstroming in het freatische pakket, met rekenschap van kwelplassen.

5.4.2 Inschatting van opbolling onder langgerekte hoge duinruggen

Het vermoeden bestaat dat de grondwaterspiegel opbolt onder langgerekte duinruggen tussen duinvalleien, onder een stuifdijk of zeereep. Reden is dat de geringere begroeiing en diepe grondwaterstand voor meer aanvulling zorgen. In bepaalde omstandigheden hoeft dat niet zo te zijn, namelijk wanneer er door indroging ‘water repellency’ optreedt en het water over de duinhelling naar beneden stroomt. Er is dan sprake van ‘depression focussed recharge’. Niettemin zijn er meerdere redenen om aan te nemen dat de grondwaterstand gemiddeld toch opbolt, en dan is het handig om de vergelijking van Hooghoudt (1940) te gebruiken ter inschatting van de grondwaterstand tussen beide valleien. Waarnemingsputten staan daar immers zelden of nooit. De vergelijking is uitgewerkt in HYDROLENS (Fig.5.20) en werkt als volgt:

$$h(x) = \sqrt{\left(\frac{R}{K}\right) \cdot (L \cdot x - x^2) + \frac{x \cdot ((h_2 + d)^2 - (h_1 + d)^2)}{L + (h_1 + d)^2}} - d \quad (5.1)$$

Waarin: $h(x)$ = grondwaterstand op afstand x [m+NAP]; h_1, h_2 = grondwaterstand resp. links en rechts van duinmassief [m+NAP]; K = gemiddelde horizontale doorlatendheid [m/d]; R = gemiddelde grondwateraanvulling [m/d]; X = afstand vanaf linker zijde van duinmassief [m]; L = duinbreedte [m]; d = diepte weerstandbiedende laag [m-NAP].

Er kleven uiteraard onnauwkeurigheden aan het gebruik, vanwege de aanname van 2 volledig penetrerende kanalen (in plaats van een vlakke ondiepe grondwaterstand in de valleien), en de aanname dat er geen intredeweerstand is naar de vallei toe.

5.4.3 Grondwaterstand in de eigen peilbuizen

Het verloop in grondwaterstand in de eigen ondiepe (freatische) peilbuizen PB-NW en PB-SE, waarvan de ligging is aangegeven in Fig.5.11, staat in Fig.5.21. Het verloop is gebaseerd op divermetingen. Fig.5.21 toont tevens verschillende meteorologische waarnemingen. We zien een dalende grondwaterstand in de meetperiode maart – augustus 2013, in PB-NW met ca. 0.55 m en in PB-SE met ca. 0.37 m, waarbij PB-NW sterker reageert op regenbuien dan PB-SE.

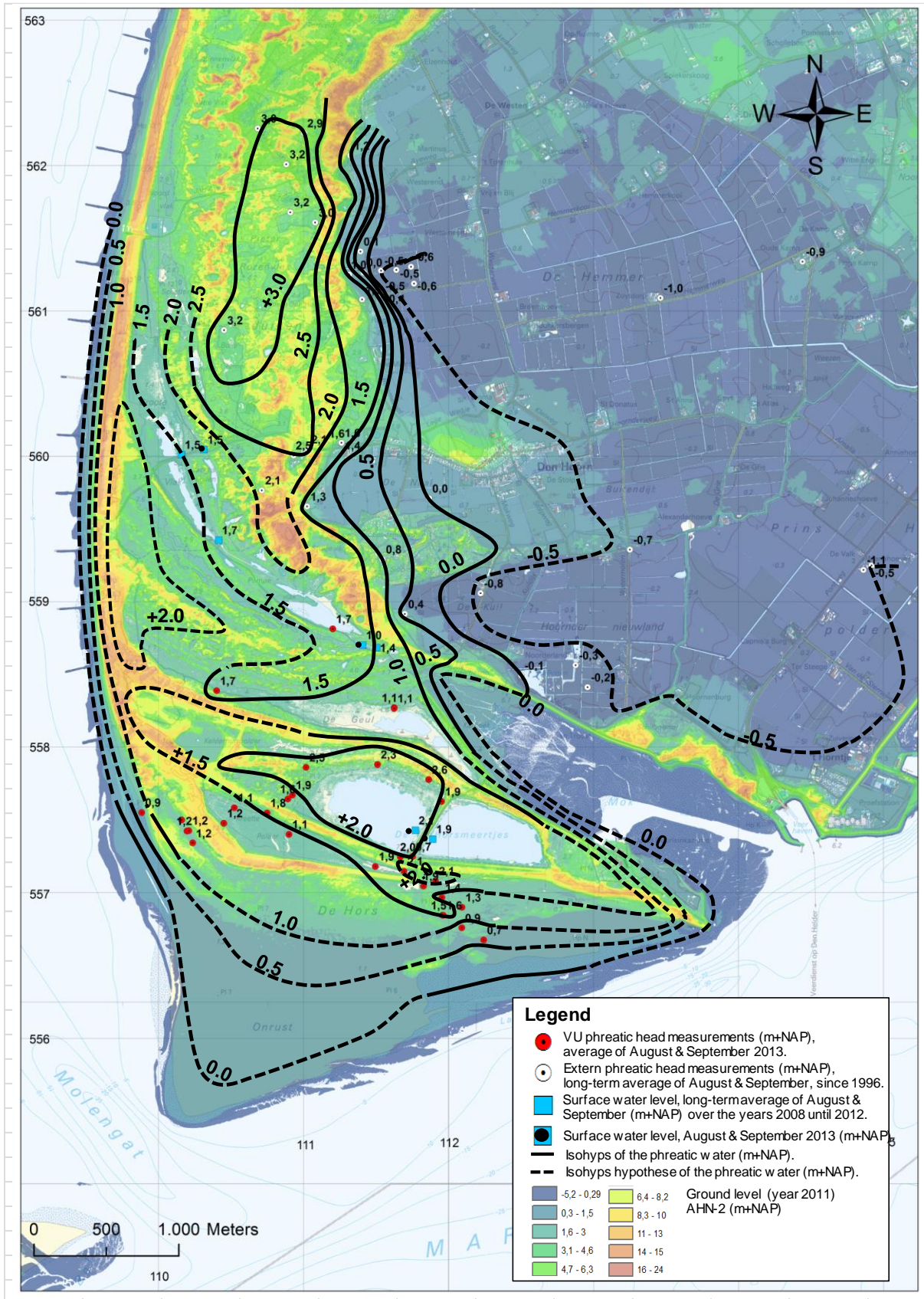


FIG. 5.18 Isohyps van de grondwaterstand in augustus-september 2013. Data van niet-VU meetpunten zijn gedownload van www.dinoloket.nl, met selectie op periode 2000-2012. Naar Amatirsat (2014).

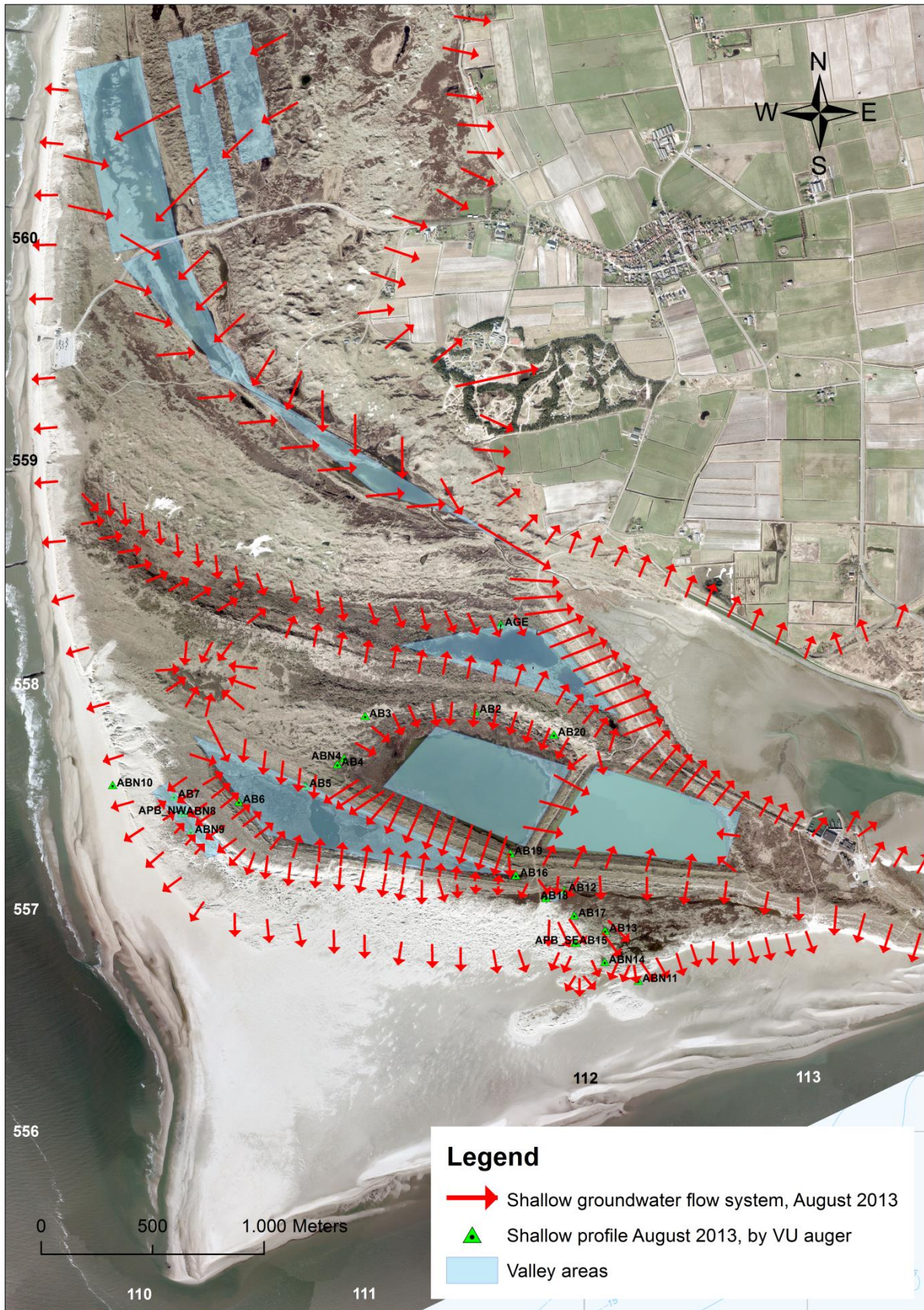


FIG. 5.19 *Richting van grondwaterstroming in freatische pakket, met rekenschap van kwelplassen. Naar Amatsat (2014).*

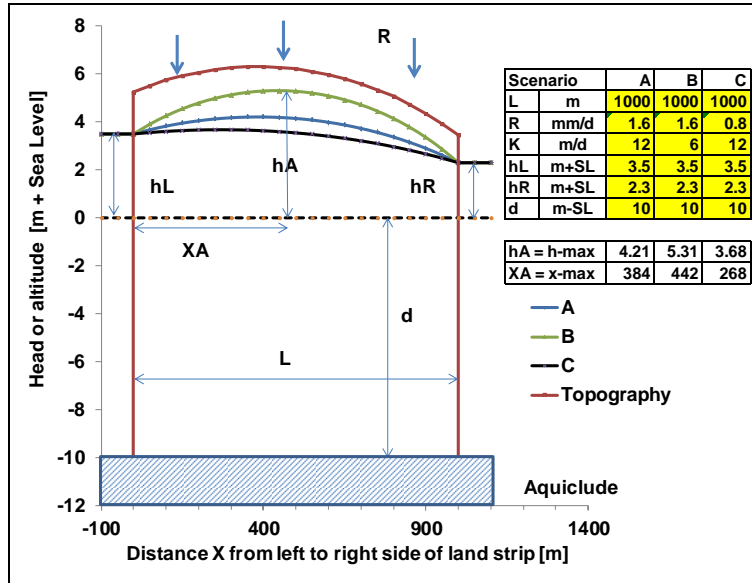


FIG. 5.20 Principe van berekening van de opbolling onder een langgerekte duinrug tussen 2 laagtes (duinvallei of strand), volgens Hooghoudt (Eq.5.1) en zoals geprogrammeerd in HYDROLENS.

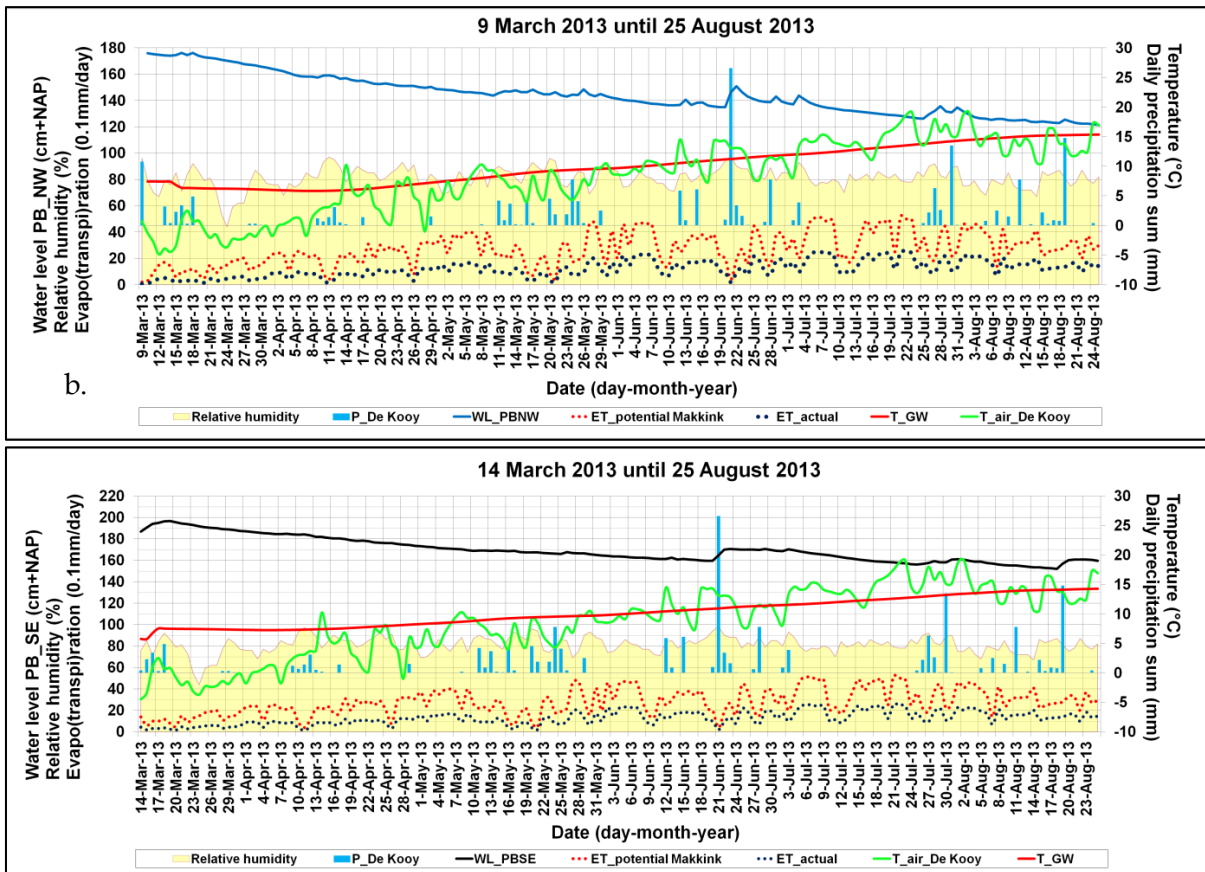


FIG. 5.21 Grondwaterstanden in peilbuizen PB-NW en PB-SE op de Hors (via divers gemeten, incl. barometrische correctie), in de periode maart - augustus 2013. Tevens aangegeven het verloop van de temperatuur van lucht en grondwater, dagelijkse regenval, relatieve luchtvochtigheid en verdamping berekend volgens Makkink. De maaiveldshoogte van PB-NW is 2.36 m+NAP en van PB-SE 2.66 m+NAP. Naar Amatsat (2014).

Als we meer inzoomen op de fluctuaties in grondwaterstand in een periode zonder regenval, dan worden op minder dan cm schaal ritmische patronen zichtbaar (Fig.5.22 en 5.23). Daarbij rijst de vraag of deze nu samenhangen met de dagelijkse gang van evapotranspiratie, de gang van het getij (van de Noordzee of de aarde), onvolkomenheden in de toegepaste barometrische correctie, of bias (b.v. door het meer of minder uitzetten van het ophangsnouer t.g.v. dagelijkse temperatuurschommelingen).

Het principe van de bepaling van de dagwaarde van de evapotranspiratie (ET; mm/d) volgens White (1932) en daarvan afgeleide methoden (Gribovski et al., 2010; Carlson Mazur et al., 2014) kan worden toegepast, alleen als er een bij benadering sinusoidaal verloop in grondwaterstand is, waarbij de periodieke daling telkens inzet in de ochtend (b.v. rond 8 uur) en in de late middag of vroege avond (b.v. 16-19 uur) omslaat in een stijging, terwijl er op langere tijdschaal sprake is van een dalende trend. Voor details en een toepassing zie § 6.3.4.

Maar, de tijdstippen waarop de verdamping start kloppen niet met het White model, en zijn ook niet constant genoeg (Fig.5.22). Kortom, er speelt meer.

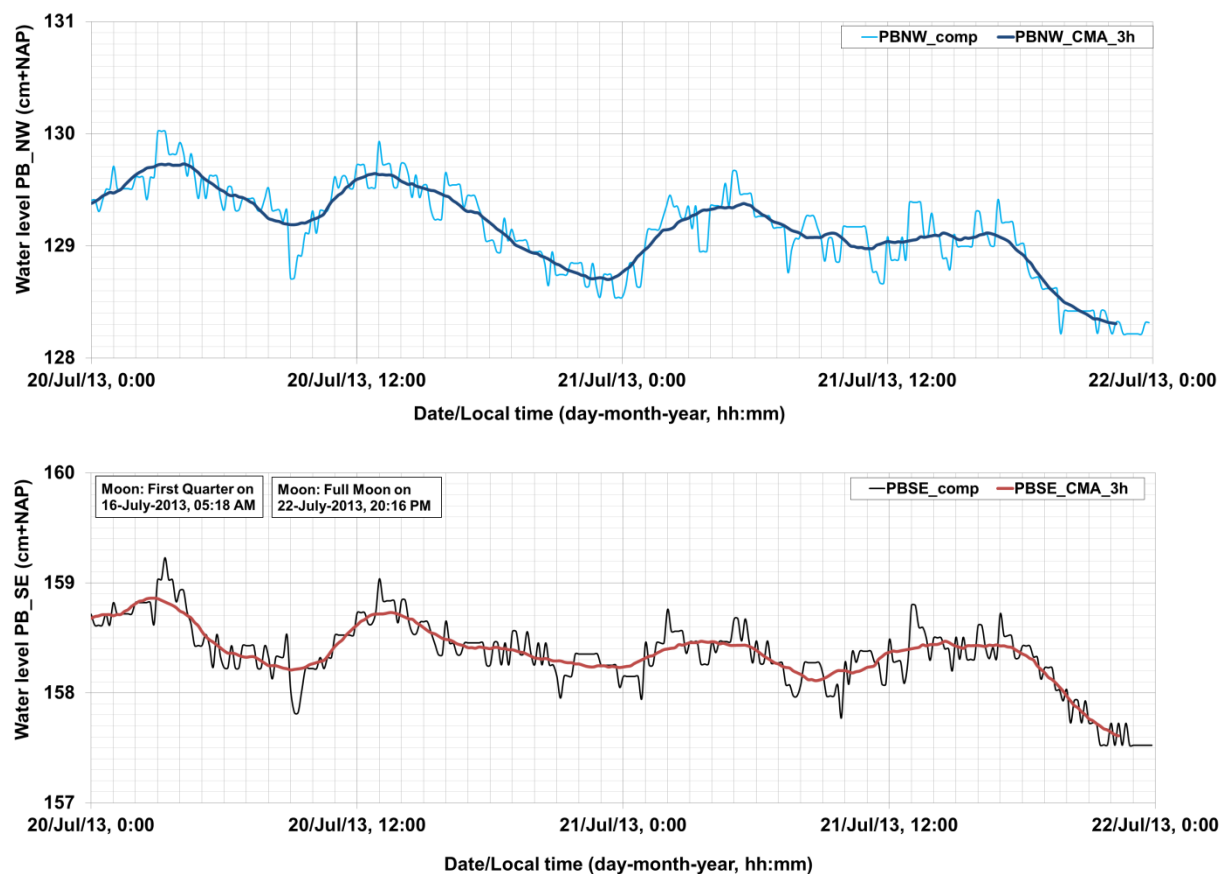


FIG. 5.22 Grondwaterstanden in peilbuizen PB-NW en PB-SE op de Hors (via divers gemeten, incl. barometrische correctie), in de droge periode 20 tot 22 juli 2013. Weergegeven zijn tevens het 3 uurs Centered Moving Average (CMA). Naar Amatirsat (2014).

Amatirsat (2014) onderzocht of de barometrische compensatie misschien een rol speelde, maar dat bleek geenszins het geval. Vervolgens onderzocht hij de invloed van het getij (Fig.5.23). Hiervoor gelden volgens b.v. Todd (1959) de volgende relaties voor de amplitudedemping en fasevertraging van de sinusoidaal veronderstelde getijdegolf in zee, wanneer de resulterende drukgolven zich landinwaarts voortplanten:

$$h = h_0 e^{-x\sqrt{\pi S/t_0 T}} \sin\left(\frac{2\pi t}{t_0} - x\sqrt{\pi S/t_0 T}\right) \tag{5.2}$$

Waarin: h = netto stijging of daling van grondwaterstand of piezometrisch oppervlak (m+NAP); h_0 = amplitude of halve bereik van getijde (cm); t = tijd (d); t_0 = getijde periode (d); S = bergingscoëfficiënt van aquifer (-); T = transmissiviteit (m^2/d).

De amplitude (h_x) en fasevertraging (t_L) van grondwaterfluctuaties op afstand x van de kust worden dan:

$$h_x = h_0 e^{-x\sqrt{\pi S/t_0 T}} \tag{5.3}$$

$$t_L = x\sqrt{t_0 S/4\pi T} \tag{5.4}$$

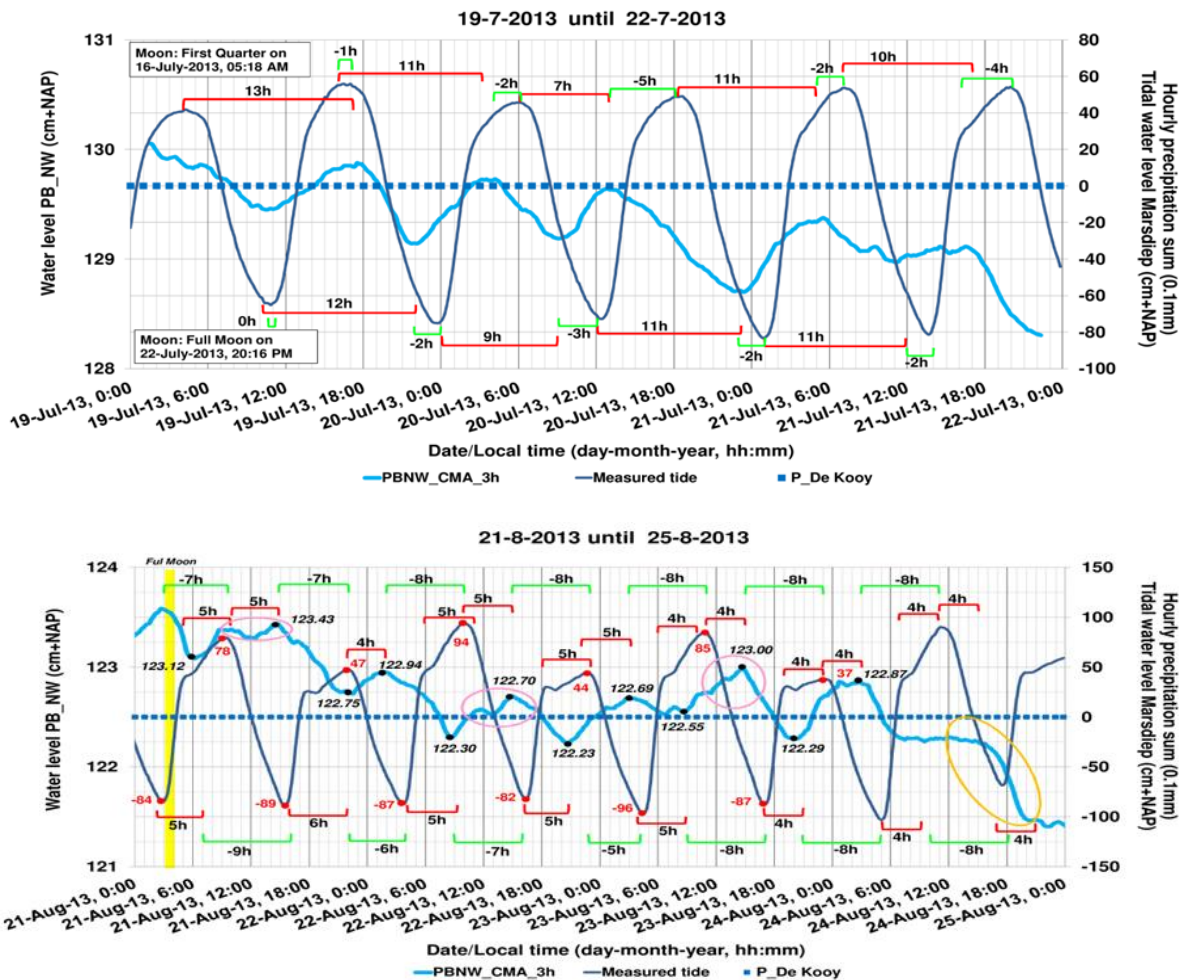


FIG. 5.23 Verloop van de zeewaterstand bij de Hors en de grondwaterstand bij peilbuis PB_NW (430 m van HWL), in regenloze periode 19 t/m 21 juli 2013, en regenloze periode 21 t/m 24 augustus 2013. Naar Amatirsat (2014). Fase verschuiving voor grondwater naar later in rood en naar vroeger in groen. De gemiddelde vertraging in de voortplanting van de getijdesinus bedroeg in juli 10.5 uur en in augustus 4.5 uur, en de amplitudedemping was $100(1 - 0.5/135) = 99.6\%$.

Invulling van diverse afstanden tot de kust en relevante waarden voor de vereiste parameters in Eqs 5.3 en 5.4, levert het beeld in Tabel 5.6 op. Hieruit concluderen wij dat, ter plaatse van de peilbuizen in het freatische pakket op 345-430 m afstand van zee, sprake moet zijn van volledige afvlakking (en dat de fasevertraging 5-6 dagen bedraagt). Dit correspondeert niet met de meetresultaten in Fig.5.23. Belangrijk probleem is ook dat de gemeten fasevertraging niet constant blijkt (Fig.5.23), en dat de meetwaarden van h_x en t_L geen consistente waarden opleveren van S en T (Amatirsat, 2014). In de onderliggende half-afgesloten aquifer is daarentegen een stevige invloed te verwachten van het getij (Tabel 5.6). Het freatische karakter van de aquifer waarin peilbuizen PB-NW en PB-SE steken, wordt overigens bevestigd door volledig gebrek aan barometrische invloeden.

In een ultieme poging tot ontrafeling van het gesignaleerde fluctuatiepatroon, is een Fourieranalyse uitgevoerd (Amatirsat, 2014). Deze leverde aanknopingspunten voor een 12-uurs periode van 0.5 cm voor beide peilbuizen, naast andere periodes van geringere significantie. Dit zou kunnen wijzen op toch invloeden van de dagelijkse evapotranspiratiegang, of op bias waarvan Von Asmuth (2011) er vele beschrijft.

TABEL 5.6. *Berekende amplitude (h_x) en fasevertraging (t_L) van het getijdesignaal als functie van de afstand tot de zee (X), bij aangegeven constanten voor de freatische aquifer en onderliggende halfafgesloten aquifer. h_0 = amplitude of halve bereik van getijde in zee; t_0 = getijde periode; S = bergingscoëfficiënt van aquifer; T = transmissiviteit. Eigen peilput PB-NW bevindt zich op 430 m en PB-SE op 345 m van de kust.*

Aquifer		phreatic					semiconfined				
h_0	cm	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135
X	m	10	100	345	430	1000	10	100	345	430	1000
S		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
t_0	day	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
T	m ² /d	60	60	60	60	60	400	400	400	400	400
h_x	cm	23.4	0.0	7.0E-25	2.3E-31	8.8E-75	133.3	119.3	88.0	79.2	39.0
h_x/h_0		0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.99	0.88	0.65	0.59	0.29
t_L	d	0.14	1.43	4.92	6.13	14.25	0.00	0.01	0.03	0.04	0.10

5.4.4 Trendmatige ontwikkelingen

Van enkele meetpunten zijn langjarige stijghoogtemetingen beschikbaar via DINOloket. Voor 2 meetpunten is het verloop geplot in Fig.5.24, namelijk voor 9D142 ten WNW van het westelijke Horsmeer, en voor 9D267 aan de zuidzijde van de weg door de Horsmeertjes (Fig.5.11). De meeste peilbuizen laten een toename van de stijghoogte zien, hetgeen grotendeels zal samenhangen met (i) de toegenomen neerslag, en (ii) enige verzoeting dankzij het stoppen van de waterwinning in de Mokslootvallei en dankzij uitbreiding van het duingebied op de Hors. Het diepe filter 6 van 9D142 laat rond 2003-2004 een merkwaardige daling zien, en zo zijn er meer uitschieters die meerendeels op fouten zullen berusten.

5.5 Zoet-zout kartering

De grootschalige verdeling van zoet en zout grondwater is weergegeven in bovenaanzicht in Fig.5.25, langs het diepe Oost-west profiel in Fig.5.12 en langs het diepe NW-S profiel in Fig.5.27. We zien een zoetwaterlens die onder het centrale deel van de duinen een maximale diepte bereikt van ca. 60 m-NAP en die richting Hors vrij abrupt ondieper komt te liggen (waarschijnlijk op 2 m-NAP). Die ondiepe ligging op de Hors en onder de Hors meertjes houdt verband met enerzijds de aanwezigheid van een ondiepe, slecht-doorlatende Holocene kleilaag, en anderzijds de geringe ouderdom van dit duingebied dat in 1962 nog periodiek door zeewater overspoeld werd.

De Cl-concentraties zijn langs de ondiepe meetraaien geplot, voor zowel de winter- als zomerperiode: profiel W-E in Fig.5.28, en profiel NW-SE in Fig.5.29.

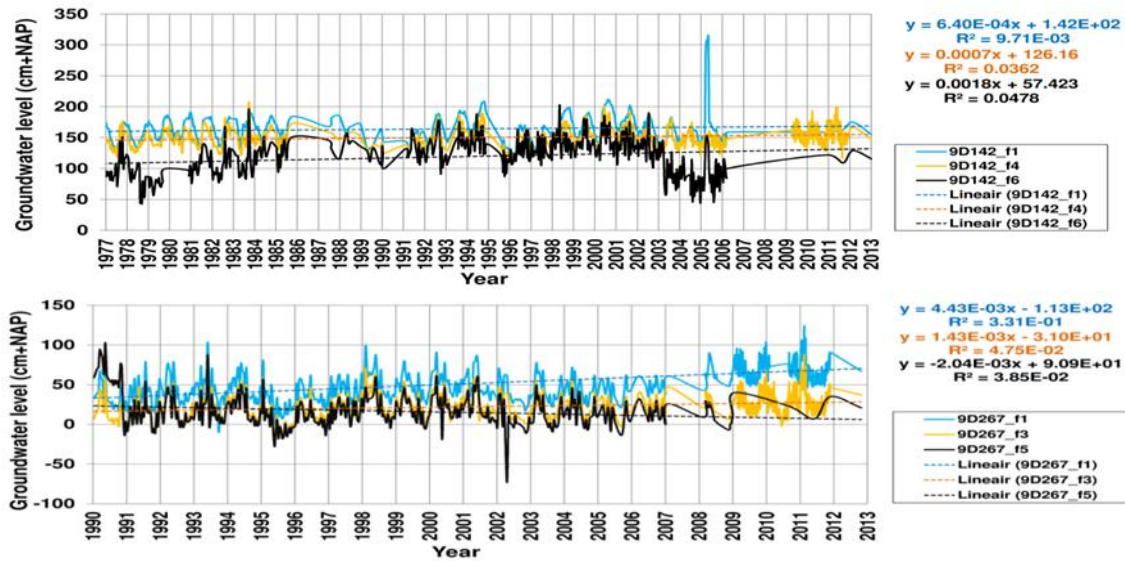


FIG. 5.24. Stijghoogteverloop in de peilbuizen van 9D142 ten WNW van het westelijke Horsmeer, en 9D267 aan de zuidzijde van de weg door de Horsmeertjes (Fig.5.11). Tevens aangegeven de lineaire trendlijn. Naar Amatirsat (2014).

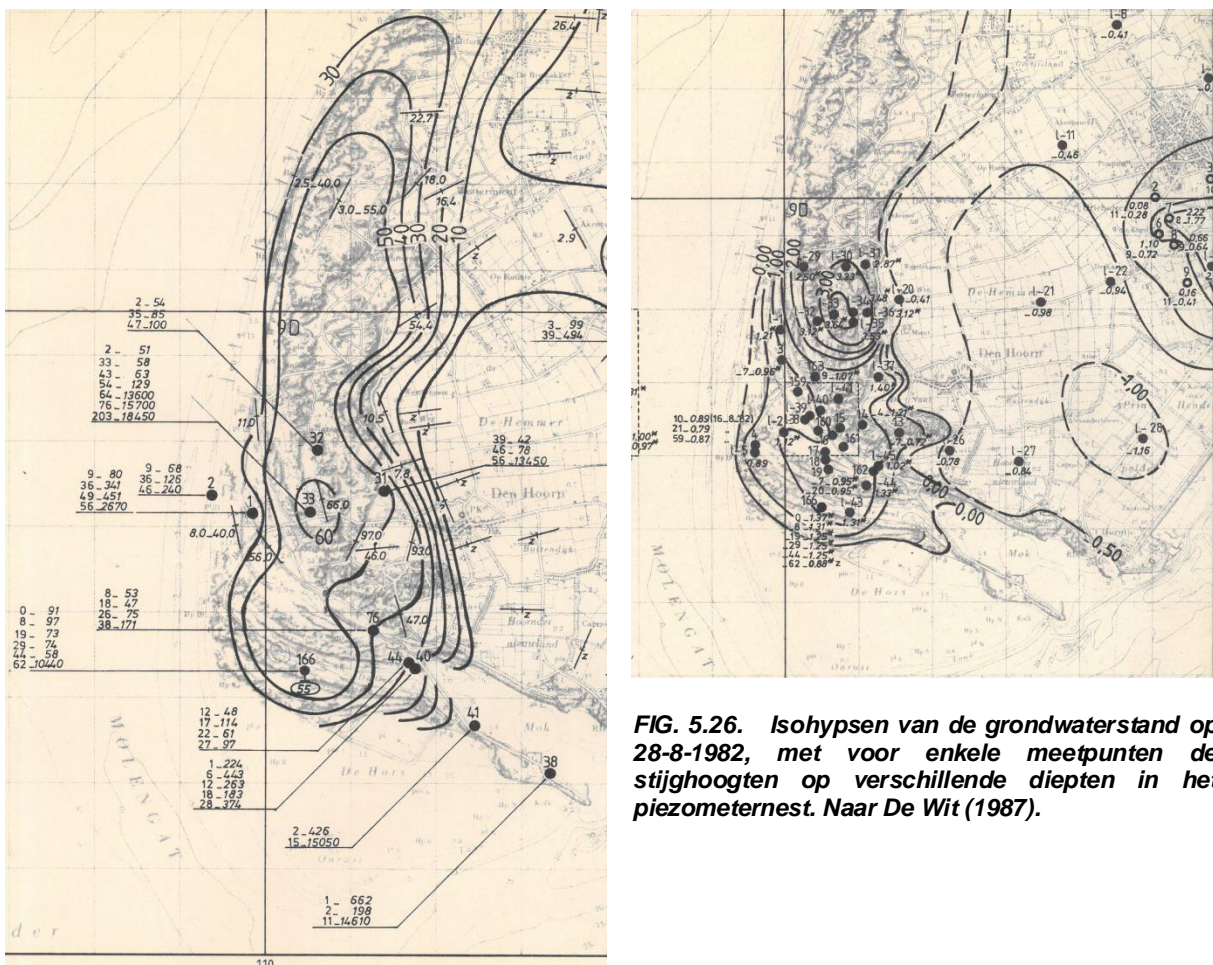


FIG. 5.25. Diepteligging van het zoet/brak grensvlak (300 Cl mg/L) op het zuid-westelijke deel van Texel, volgens De Wit (1987).

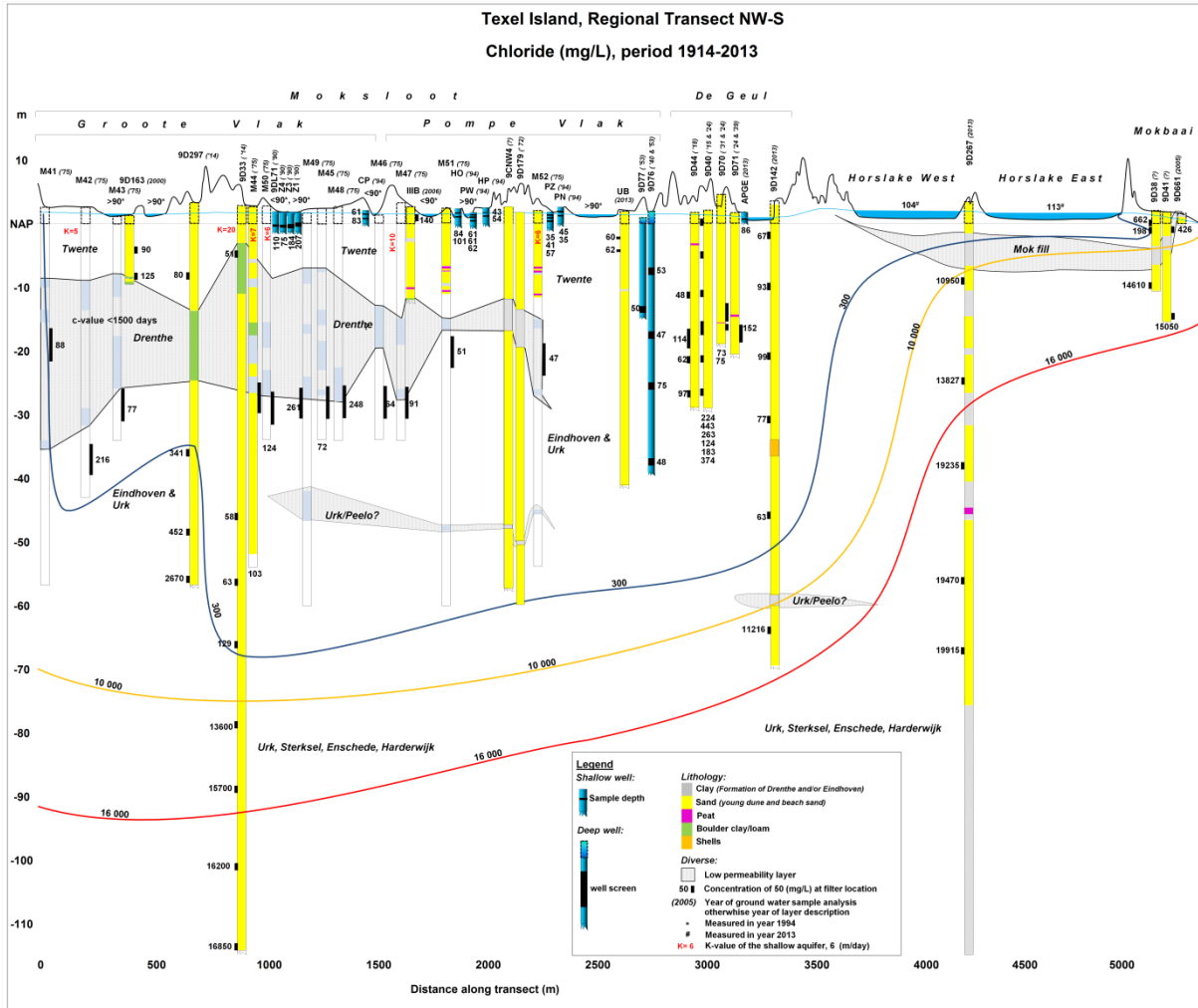


FIG. 5.27. Isoconcentratielijnen voor Cl (300, 10.000 en 16.000 mg Cl/L) in het diepe NW-S profiel. Voor ligging van profiel zie Fig.5.11. Naar Amäirsat (2014).

5.6 Patronen in oppervlaktewaterkwaliteit

De ligging van de meetpunten waar de kwaliteit van het oppervlaktewater gemeten is, staat in Fig.5.30. Daarin zijn tevens weergegeven de meetwaarden van pH en EC, incl. datum van veldanalyse. De meetpunten van 1994 stammen van Berg & Sagel (1995). De meetpunten van HHNK (Hoogheemraadschap Hollands Noorder Kwartier) nemen een speciale plaats in dankzij uitvoerigere analyses in de periode 1993-2013. De meetresultaten daarvan zijn in Tabel 5.7 gerubriceerd en geplot in Fig.5.31.

Geconcludeerd wordt dat alle oppervlaktewateren binnen het duingebied zoet zijn (Cl meestal <150 mg/L) en tot het CaHCO₃ of NaMix watertype behoren. Op plekken waar zeer ondiep, zuur grondwater opkwelt, geldt doorgaans dat pH<7 en EC<500 uS/cm. In de zomer is het zoutgehalte hoger dan in de winter, hetgeen vooral Cl en goed oplosbare zouten betreft, veel minder Ca en HCO₃. Dit wijst op indamping als oorzaak.

Het water bevat nauwelijks NO₃, redelijk veel Fe (waarschijnlijk als zwevend stof) en O₂. Dit getuigt van een grote kwelcomponent. De PO₄ en NH₄ concentraties variëren van zeer laag tot licht verhoogd, waarbij de hogere concentraties zich voordoen waar duingrondwater opkwelt.

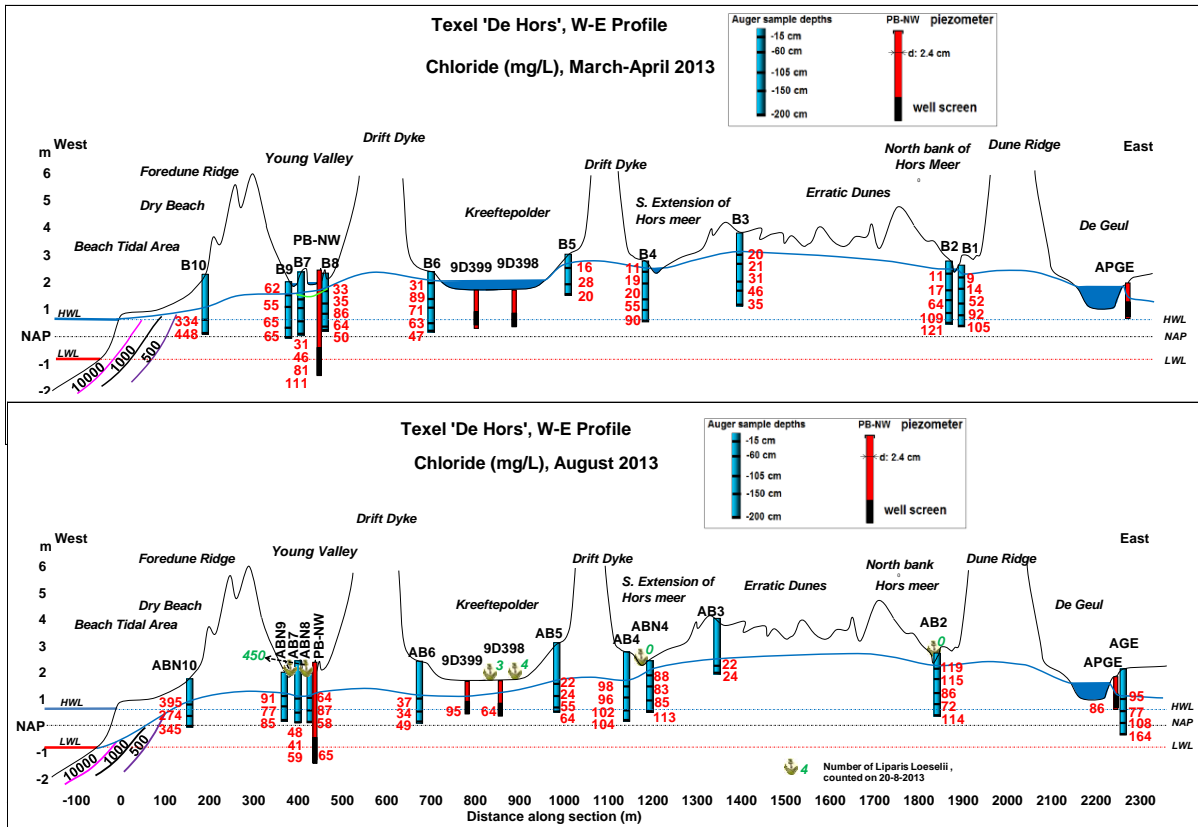


FIG. 5.28. Cl concentraties langs de ondiepe meetraai W-E in winter en zomer 2013. Voor ligging meetraai zie Fig.5.11. NB: diver in PB-NW. Naar Amatsrat (2014).

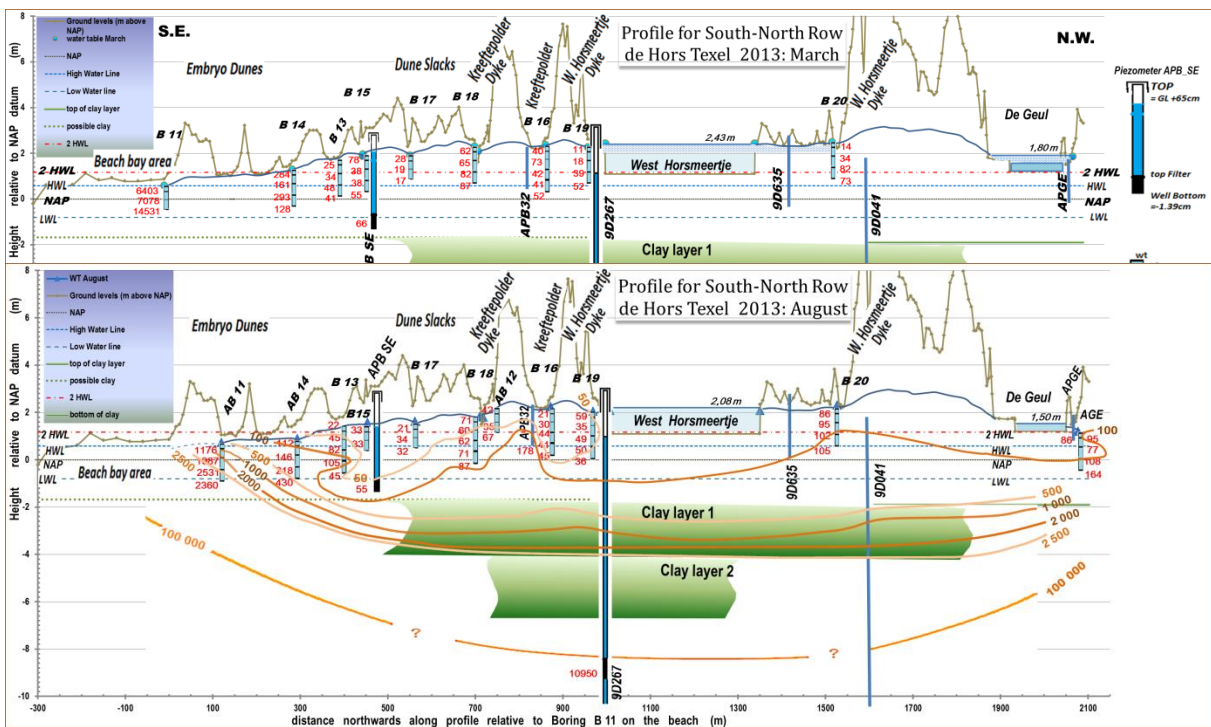


FIG. 5.29. Cl concentraties langs de ondiepe meetraai NW-SE in winter en zomer 2013. Voor ligging meetraai zie Fig.5.11. NB: diver in APB-SE. Naar Bland (2014).



FIG. 5.30. Meetpunten oppervlaktewaterkwaliteit, met indicatie van de waargenomen pH en EC op aangegeven datum. De waterkwaliteit op de langjarige meetpunten van HHNK staat in Tabel 5.7 Naar Aamatijsat (2014).

TABEL 5.7 Gemiddelde kwaliteit van oppervlaktewater op 5 meetpunten van HHNK (Hoogheemraadschap Hollands Noorder Kwartier), in de periode 1993-2013. Ligging der meetpunten staat in Fig.5.30.

Parameter	Unit	808001	809001	BDV048	BDV001	801004
		Gr. Vlak	Hors-West	Hors-Oost	Kwelsloot	Polder
EC	uS/cm	624	580	618	24537	1744
pH		7.40	7.73	7.82	7.40	7.40
O2	% sat.	48.6	64.7	64.9	31.3	34.8
Cl	mg/L	114.2	113.9	130.5	10601.0	443.5
SO4	mg/L	14.2	12.4	13.8	1380.8	63.8
HCO3	mg/L	209	124	143	257	260
NO3	mg/L	0.13	0.10	0.13	0.32	0.17
NO2	mg/L	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02
PO4	mg/L	0.12	0.06	0.02	0.22	0.55
Na	mg/L	61.2	67.5	72.7	5151.3	263.7
K	mg/L	3.8	7.5	7.1	200.7	13.5
Ca	mg/L	63.1	35.8	42.2	281.3	65.9
Mg	mg/L	11.7	10.4	11.8	613.3	33.1
Fe	mg/L	2.77	0.38	1.23	0.30	0.82
NH4	mg/L	0.53	0.06	0.11	0.24	0.57
SiO2	mg/L		7.9	4.6	5.4	
NKj	mg/L	2.4	4.6	2.7	1.5	1.9
ZS	mg/L	9.7	32.6			9.1
BOD5	mg/L	3.6	5.8			2.0
Chlf-a	mg/L	21.9	22.6	141.6	24.7	11.2
Water depth	cm	83.0	16.0	22.6	15.8	35.6
Zicht	cm	58.0	14.0	19.6	15.5	29.2

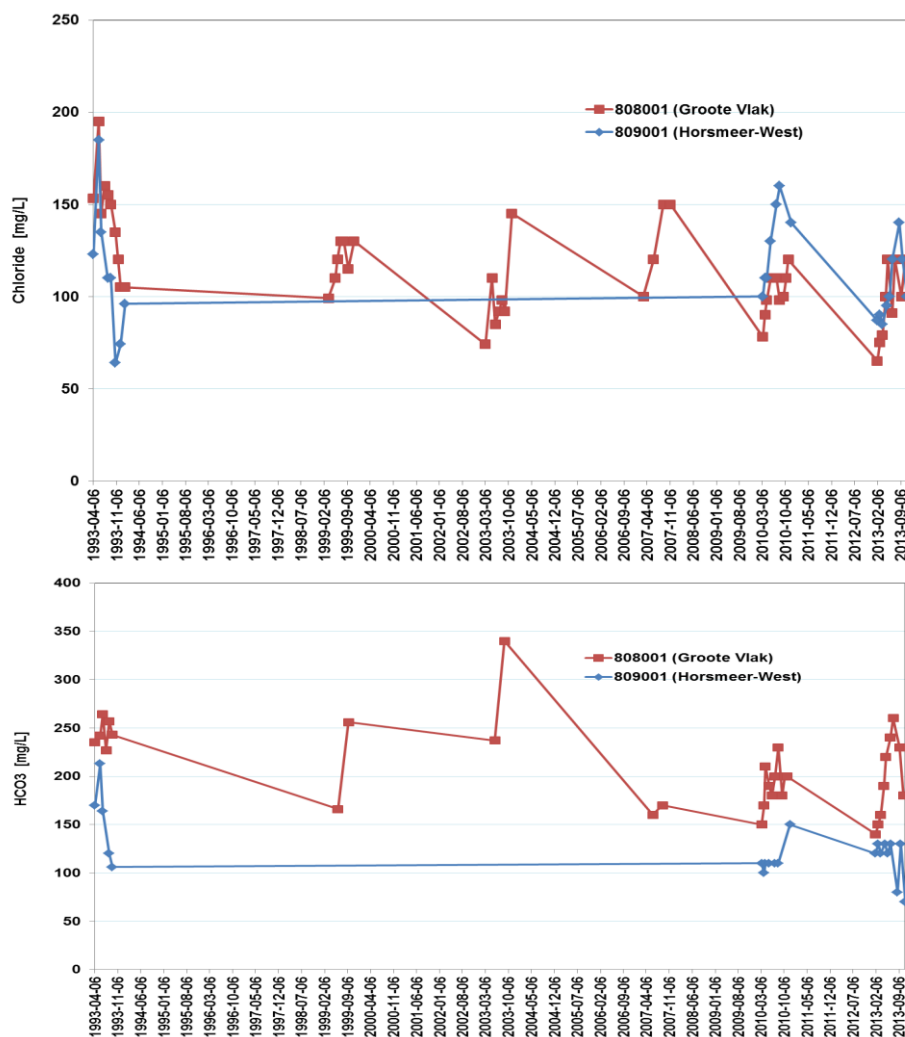


FIG. 5.31: Verloop van Cl en HCO₃ concentratie in oppervlaktewater (Groote Vlak en westelijk Horsmeer), in periode 1993-2013. Gebaseerd op data van HHNK, ligging metpunten in Fig.5.30.

5.7 Patronen in grondwaterkwaliteit

5.7.1 Globaal overzicht

De grondwaterkwaliteit op de in 2013 bemonsterde meetpunten op de Hors en in aangrenzend duingebied is samengevat in Tabel 5.8. Zij vertoont een enorme variatie, van oligohalien-zoet (Cl <30 mg/L) t/m zout (Cl 10.000-20.000 mg/L), van nitraathoudend ((sub)oxisch) t/m sulfaatloos (diep anoxisch; methanogeen), en van atroof (EPI <0.5) t/m hypertroof (EPI 5,5-6,5, in bijna alle gevallen met stikstof beperking). Het grondwater is, behalve op enkele zeer ondiepe, landinwaartse locaties, overal kalkrijk en kalk(over)verzadigd (SI-calciet >0), en bevat tamelijk veel SiO₂ ten gevolge van het oplossen van vooral biogeen opaal (diatomeeën e.d.).

De laagste saliniteit treffen we ondiep aan op zekere afstand van de hoogwaterlijn, waar overspoeling zelden of nooit optreedt en de invang van sea spray beperkt is, en wanneer er tevoren veel regen/sneeuw gevallen is met weinig zeezout (zoals in de winter van 2013). De hoogste saliniteit is te vinden onder de zeebodem, onder het natte strand en in het diepere grondwater onder de zoetwaterlens.

De bovenste 7 monsters in Tabel 5.8 (monstercode = boringnummer_diepte in cm-MV) vertegenwoordigen navolgende watertypen:

- **B19_15 = g1CaHCO3o watertype**, oligohalien-zoet, zuur, kalkarm en anoxisch, vlak onder de grondwaterspiegel in lage delen van ondiep ontkalkt duin. Dit watertype is tevens aangetroffen op 2 andere meetpunten langs de oever van het westelijke Horsmeer (B1_15 en B4_15). Dergelijk kalkarm grondwater (wel met uiteenlopende dominantie van kat- en anionen) is ook aanwezig langs de randen van de Mokslootvallei en verder landinwaarts, waar de duinen ondiep ontkalkt zijn. De extreem lage Cl-concentraties zijn tamelijk bijzonder en zijn alleen in de winter aangetroffen na een periode van veel regen en sneeuw zonder veel wind;
- **B8_150 = F2CaHCO3o watertype**, zoet, basisch, kalkrijk en (sub)oxisch. Dit watertype komt algemeen voor ondiep onder duinruggen waar het grondwater wat dieper weg staat, er nauwelijks sprake is van bodemvorming en zeewater geen kans heeft te inunderen;
- **B14_150 = F3NaHCO3+ watertype**, zoet, basisch, verzoet (BEX positief) en anoxisch; Ook dit watertype is zeer algemeen, maar het kent 2 verspreidingszones: (a) ondiep waar zeewater periodiek inundeert en weer verdrongen wordt door infiltrerend regenwater, zoals tussen de embryoduintjes op de Hors, en (b) op grotere diepte o.a. in het tweede watervoerend pakket, waar zout grondwater verdrongen wordt door een uitdijende of in verleden uitgedijde zoetwaterbel;
- **AB2_200 = F3CaHCO3 watertype**, zoet, basisch, kalkrijk, diep anoxisch. Dergelijk water komt ondiep algemeen voor, onder periodiek onderlopende duinvalleien waar het grondwater dicht aan maaiveld staat en periodiek erboven, waar duidelijk sprake is van bodemvorming (organische stof en kalk afzetting), en waar zeewater geen kans heeft te inunderen;
- **APB32 = f4CaHCO3+ watertype**, zoet-brak, basisch, kalkrijk, verzoet, diep anoxisch. Dit watertype komt weinig voor, omdat het alleen in de Kreeftepolder is gevonden. Het betreft een kalkrijkere en wat zoutere variant van het F3CaHCO3 watertype, waarbij sprake is van verzoeting.
- **B11_105 = S2NaCl watertype**, zout, basisch, kalkrijk en anoxisch. Dit water komt algemeen voor onder het natte strand waar dagelijks tijdens vloed zeewater infiltrert. De dagelijkse doorspoeling verklaart dat het water niet verzilt noch verzoet is. De positieve basenuitwisselingsindex BEX wordt automatisch niet serieus genomen omdat de som der kationen die der anionen ruim overtreft, hetgeen getuigt van een slechte analyse.

TABEL 5.8. Samenvatting van de grondwaterkwaliteit op de in 2013 bemonsterde meetpunten op de Hors en in aangrenzend duingebied. Groene regels = met groenknolorchis; BGL = Below Ground Level. Aanwezigheid Lipares (= Groenknolorchis) beoordeeld op basis van kaarten door Gerard Oostermeijer, dd 20-08-2013. 10 k = 10.000.

Bovenste 7 enkelvoudige monsters vertegenwoordigen navolgende sleutelcondities (code = boring nr diepte in cm-MV):

B19_15 = zoet, zuur, kalkarm, anoxisch; B8_150 = zoet, basisch, kalkrijk en (sub)oxisch; B14_150 = zoet, basisch, verzoetend en anoxisch; AB2_200 = zoet, basisch, kalkrijk, diep anoxisch; APB32 = licht brak, basisch, kalkrijk, verzoetend, diep anoxisch; B11_105 = zout, basisch, kalkrijk, anoxisch; 9D267_F5 = zout, basisch, kalkrijk, neigend tot diep anoxisch.

Sample	Depth m BGL	EC lab	pH lab	Cl mg/L	SO4 mg/L	HCO3 mg/L	NO3 mg NO3/L	PO4 tot	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	NH4 mg NH4/L	SiO2 mg SiO2/L
B19_15	0.5	103	5.47	10.9	1.2	52	0.131	11.8	1.1	8.7	3.5	1.269	0.104	0.092	7.8	
B8_150	2.0	410	8.03	64.1	16.6	152	3.6	0.018	28.3	3.5	52.9	8.1	0.037	0.005	0.001	11.6
B14_150	1.8	762	8.31	128.1	23.9	279	0.0	0.373	152.3	17.1	10.0	16.3	0.407	0.005	0.005	10.4
AB2_200	2.4	869	7.31	114.1	0.1	397	0.2	0.023	67.8	4.0	131.9	13.4	33.952	0.545	0.502	30.7
APB32	1.6	1440	7.06	177.6	2.2	721	0.0	0.929	152.4	8.7	139.9	29.4	31.660	0.468	0.036	32.9
B11_105	1.3	31860	7.71	14530.8	1880.6	220	0.0	1.879	7519.3	311.3	352.4	936.5	4.574	0.129	1.885	13.1
9D267_F5	71.0	48764	7.13	19915.5	1971.3	912	0.0	7.001	11661.0	412.3	487.4	1408.5	24.458	0.346	41.882	18.3
MIN	0.4	94	5.47	8.6	0.0	39	0.0	0.000	7.2	0.2	4.0	3.2	0.021	0.002	0.000	1.6
MEAN	3.8	2394	7.56	803.9	82.6	313	0.8	1.610	469.9	22.9	83.0	61.3	5.624	0.207	2.110	15.4
MAX	71.0	48764	8.59	19915.5	2341.8	2791	35.7	33.902	11661.0	448.0	487.4	1408.5	35.359	2.858	90.661	46.4
Cl <30	1.0	341	7.40	19.2	3.1	212	0.3	0.576	15.8	2.2	58.7	7.4	2.300	0.249	0.044	9.9
Cl = 30-150	2.7	571	7.56	67.5	8.5	281	0.2	1.034	43.9	5.0	75.7	12.2	6.497	0.208	0.176	16.8
Cl = 150-300	1.4	1138	7.69	224.4	30.8	348	1.0	2.581	144.2	16.1	61.7	37.5	5.880	0.124	0.061	15.3
Cl = 300-1000	1.8	1611	8.01	390.4	85.5	268	19.4	0.519	262.1	26.5	47.3	38.3	0.365	0.031	0.013	8.3
Cl = 1-10 k	0.9	9947	7.76	3689.2	528.7	314	0.0	0.720	2065.8	109.0	105.4	252.5	2.132	0.172	0.721	6.7
Cl = 10-20 k	40.5	38700	7.51	15592.1	1405.2	1285	0.0	16.613	9056.4	357.1	336.1	1034.6	9.108	0.276	49.898	23.2
Lipares high	0.8	511	7.59	55.9	11.3	252	0.2	0.153	34.4	3.1	73.5	9.6	3.136	0.133	0.057	9.8
Lipares medium	1.5	595	7.54	57.1	9.7	321	0.0	0.613	43.5	6.6	74.6	15.2	5.594	0.202	0.080	17.1
No Lipares	1.7	2058	7.42	653.4	52.7	300	2.0	2.281	382.3	20.4	69.8	49.3	4.161	0.311	2.864	12.5

Sample	EC lab	Al ug/L	As ug/L	B ug/L	Ba ug/L	Be ug/L	Br ug/L	Co ug/L	Cr ug/L	Cu ug/L	Li ug/L	Mo ug/L	Ni ug/L	Sr ug/L	V ug/L	Zn ug/L
B19_15	103	462	0.9	2	1.9	0.075		5.4	1.8	3.5	5.4	1.8	7.1	44	3.5	40.3
B8_150	410	31	5.3	25	0.9	0.006	198	0.2	1.7	0.6	7.2	0.2		226	1.0	16.7
B14_150	762	273	3.7	239	3.0	0.014	405	0.6	0.9	0.5	8.0	0.8	0.3	102	1.0	8.8
AB2_200	869	20	100.7	72	5.8	0.010	248	1.8	0.4	0.2	13.0	0.3	0.6	495	0.7	41.6
APB32	1440	20	106.4	227	11.3	0.001	421	0.9	0.6	0.5	41.0	0.3	4.9	873	0.5	31.2
B11_105	31860	66	3.0	2708	28.4		43668	14.4	0.3	0.7	142.3		0.4	6022		16.1
9D267_F5	48764	108		3511	101.9	0.033	68571	15.9	1.9	4.2	141.2	3.3	0.3	7710		76.0
MIN	94	8	0.1	1	0.7	0.000	35	0.1	0.0	0.0	1.6	0.0	0.1	38	0.0	1.1
MEAN	2394	59	21.5	313	8.6	0.020	2841	2.2	0.8	1.0	13.5	0.7	1.1	555	3.3	17.5
MAX	48764	1023	106.4	5649	349.7	0.865	69089	15.9	15.0	8.0	142.3	5.4	11.6	7898	91.0	80.6
Cl <30	341	153	9.2	19	2.2	0.033	87	3.2	1.2	1.8	3.8	1.0	3.2	220	5.4	21.7
Cl = 30-150	571	41	24.9	80	3.1	0.019	167	1.5	0.7	0.7	8.1	0.4	0.6	315	3.0	16.5
Cl = 150-300	1138	46	22.3	248	4.7	0.012	734	1.4	0.6	0.5	17.5	1.0	1.0	444	3.3	11.6
Cl = 300-1000	1611	25	14.2	450	2.0	0.009	1447	1.7	0.8	1.7	20.8	1.9	0.3	432	1.6	16.6
Cl = 1-10 k	9947	26	23.1	1253	17.3	0.007	11788	2.9	0.2	0.5	44.3	4.6	0.5	1642	0.8	16.4
Cl = 10-20 k	38700	72	4.6	4172	135.7	0.024	53111	11.3	2.6	3.8	113.4	1.9	1.6	5456	2.5	25.7
Lipares high	511	56	8.4	42	2.3	0.010	101	1.5	0.6	1.1	6.7	0.4	0.6	291	1.5	24.4
Lipares medium	595	34	24.4	92	3.9	0.007	124	1.3	0.3	0.8	12.7	0.6	1.1	352	0.7	16.3
No Lipares	2058	116	15.3	346	7.5	0.025	2806	3.1	1.1	1.8	12.1	1.0	2.3	459	3.8	23.2

Sample	Number samples	EC lab	Cd ug/L	Pb ug/L	BEX no	Chem.Wtype Code	Si-C calcite	Marine % TDS	Cont % Mix	Ocean N-limited	EPI meq/L	Σanions meq/L	F mg/L	Lipares present	
B19_15	1	103	0.05	6.1	0.50	g1CaHCO3o	-3.37	20.1	79.5	0.00	1.7	1.37	1.19	0.08	0.0
B8_150	1	410	0.03	1.0	0.05	F2CaHCO3o	0.29	34.1	62.6	0.17	1.6	4.63	4.71	0.10	10.0
B14_150	1	762	0.03	2.7	4.53	F3NaHCO3+	0.07	36.4	62.6	0.50	0.4	8.95	8.72	0.55	0.0
AB2_200	1	869	0.60	5.8	0.70	F3CaHCO3	0.30	26.1	73.8	0.43	1.8	12.00	9.73	0.11	0.0
APB32	1	1440	0.24	3.3	3.91	f4CaHCO3+	0.30	24.8	75.1	0.75	0.9	17.41	16.89	0.14	5.0
B11_105	1	31860	0.65	29.5	-27.06	S2NaCl	0.25	99.9	0.1	73.33	3.7	429.94	452.66	0.65	0.0
9D267_F5	1	48764	1.13	51.6	31.77	S4NaCl	0.28	98.0	1.9	100.56	5.9	661.18	617.78		0.0
MIN	179	94	0.00	0.0	-27.06		-3.37	4.8	0.1	0.00	0.0	1.37	0.95	0.01	0.0
MEAN	179	2394	0.14	4.7	1.77		0.13	28.8	70.1	3.92	1.8	30.54	29.55	0.19	2.6
MAX	179	48764	2.27	51.6	38.13		1.27	99.9	95.2	100.56	6.5	661.18	617.78	1.38	10.0
Cl <30	27	341	0.10	2.1	0.77	g2CaHCO3+	-0.14	10.5	89.1	0.00	1.8	4.40	4.10	0.10	1.4
Cl = 30-150	127	571	0.12	4.0	1.00	F3CaHCO3+	0.22	23.6	76.1	0.19	2.3	7.08	6.69	0.14	3.7
Cl = 150-300	7	1138	0.07	3.0	2.99	f3NaMix+	0.28	45.8	53.7	0.98	2.5	13.07	12.71	0.32	2.5
Cl = 300-1000	5	1611	0.05	3.3	3.43	B3NaCl+	0.32	61.7	33.8	1.82	4.0	17.61	17.51	0.43	0.0
Cl = 1-10 k	6	9947	0.23	8.1	1.93	b3NaCl	0.17	94.5	5.3	18.50	3.0	118.80	120.28	1.08	0.0
Cl = 10-20 k	7	38700	0.80	27.7	16.96	S5NaCl	0.76	96.9	2.8	78.70	6.1	508.05	490.20	0.65	0.0
Lipares high	9	511	0.09	2.2	0.67	F3CaHCO3+	0.20	22.4	76.7	0.13	1.7	6.16	5.95	0.09	10.0
Lipares medium	9	595	0.10	2.7	1.59	F3CaHCO3+	0.24	18.8	80.7	0.14	1.5	7.25	7.07	0.16	5.0
No Lipares	33	2058	0.19	4.0	1.46	B3NaCl+	-0.07	76.3	23.2	3.15	4.1	25.02	24.49	0.20	0.0

- **9D267_F5 = S4NaCl watertype**, zout, basisch, kalkrijk en neigend tot diep anoxisch. Dit water is op meerdere dieptes in boring 9D.267 aangetroffen, waar de Cl-concentratie hoger is dan huidig kustnabij Noordzeewater, vermoedelijk t.g.v. indamping. De zeer hoge NH₄ en HCO₃ concentraties en gedeeltelijke SO₄-reductie getuigen van veel oxidatie van organische stof in de bodem. Daardoor is ook EPI hoog.

De ruimtelijke verspreiding van chemische watertypen langs het diepe NW-S profiel is weergegeven in Fig.5.32. Het globale beeld is, dat de zoetwaterbel voor een groot deel bestaat uit verzoetingswatertypen met de klassieke opeenvolging richting zoetwaterintrusiefront van F2CaHCO₃ naar F3CaHCO₃+ naar F3MgHCO₃+ naar F3NaHCO₃+ en tenslotte f3NaCl+ watertypen (Stuyfzand, 1993). Het onderliggende zoute grondwater is grotendeels S3NaCl of S4NaCl, met verziltingstype S4NaCl- waar zoutwater omhoog komt of kwam tgv kusterosie of waterwinning.

Een zogenaamde Spider-plot in Fig.5.33 toont hoe de bovenste 7 monsters in Tabel 5.8 zich voor elk element verhouden tot standaard gemiddeld oceaانwater (SMOW). De zoute grondwatermonsters B11_105 en 9D267_F5 laten voor Mo, SO₄, F, B, Cl, Na, Mg, K, Sr, Br, Li en Ca een grote gelijkenis met SMOW zien (genormaliseerde concentratie ~1).

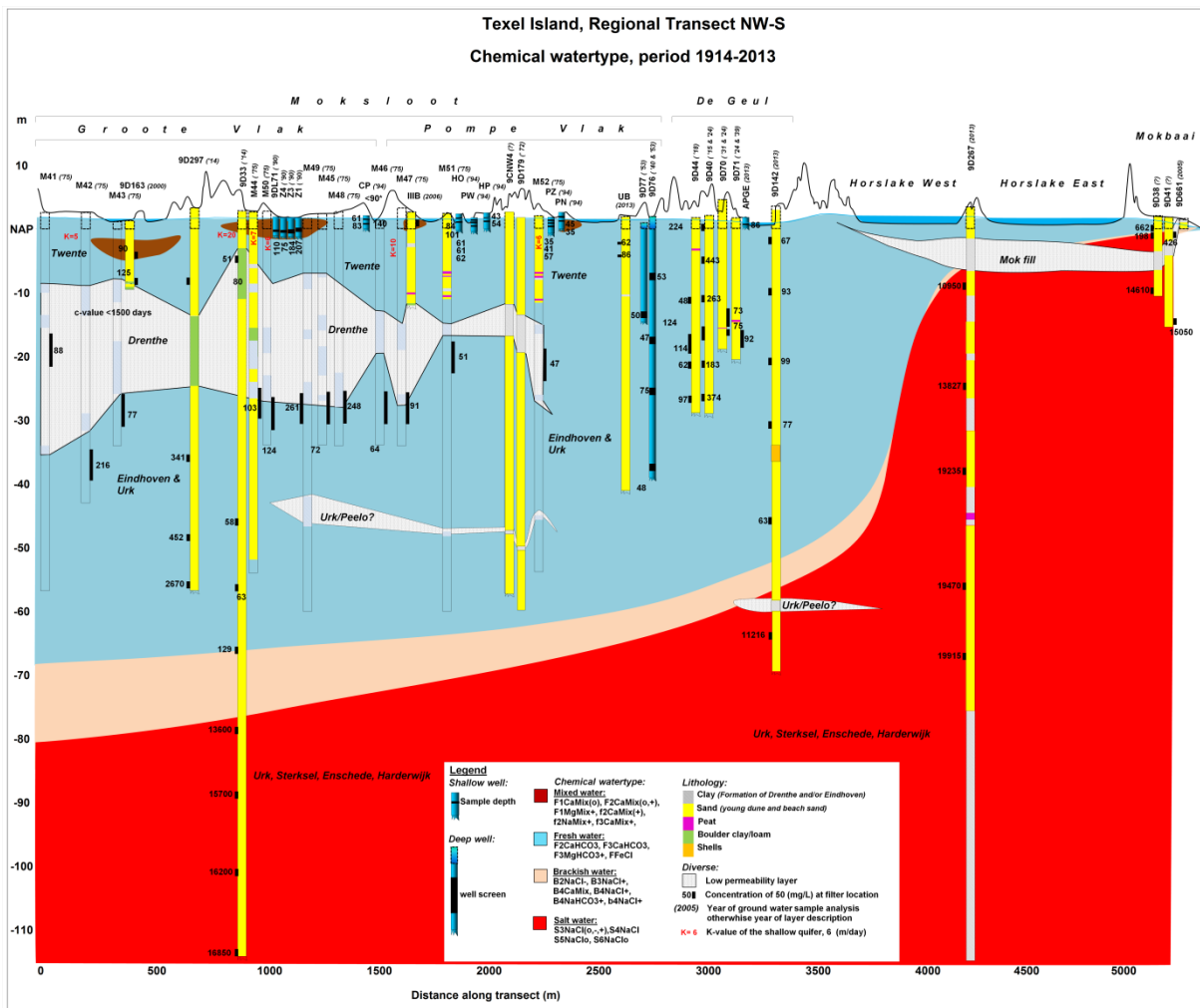


FIG. 5.32. Ruimtelijke verspreiding van chemische watertypen langs het diepe NW-S profiel. Voor ligging profiel zie Fig.5.11. Naar Amatsat (2014).

Deze bestanddelen vertonen voor zoet grondwater waarden ver beneden 1, en vrijwel alle overige bestanddelen vanaf SiO_2 naar rechts etaleren gemiddeld een genormaliseerde concentratie >1 of $\gg 1$. Waarden <1 duiden op verdunning door regenwater en/of immobilisatie in vaste fasen, waarden >1 wijzen vooral op geogene mobilisatie vanuit vaste fasen. De nutriënten PO_4 en NH_4 vertonen grote extremen, met opvallend hoge waarden voor het hypersaliniene grondwater van 9D267-F5.

Het voorkomen van de Groenknolorchis is blijkens Tabel 5.8 geassocieerd met locaties waar het bovenste grondwater zoet tot licht brak ($\text{Cl} < 300 \text{ mg/L}$) is. Verdere hydrochemische kengetallen van de standplaats zijn: anoxisch (vrijwel geen SO_4 -reductie, hoog Fe, geen NO_3), $\text{NH}_4 < 0,2$, hoog Ca en kalk(over)verzadigd, en meest dominante watertype $\text{F}_3\text{CaHCO}_3+$. PO_4 lijkt geen beperkende factor, totaal ionisch N ($\text{TIN} = \text{NO}_3 + \text{NO}_2 + \text{NH}_4$) wel.

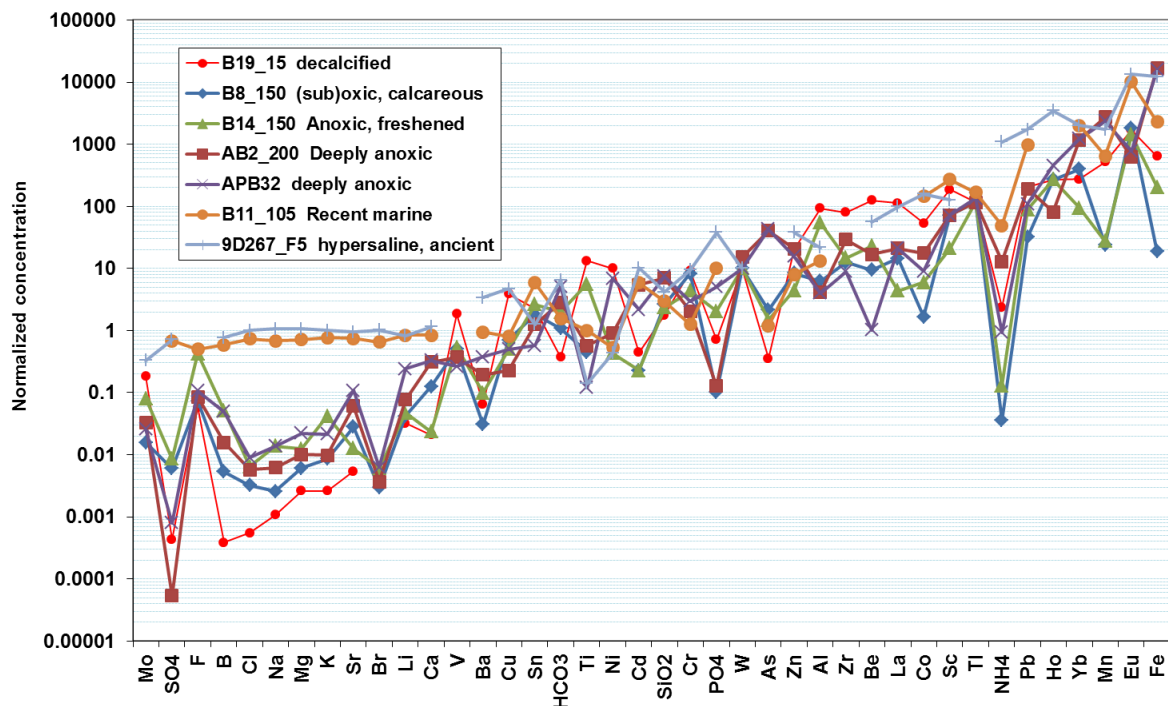


FIG. 5.33 Spiderplot van de op SMOW genormaliseerde grondwaterkwaliteit op 7 sterk uiteenlopende ondiepe meetpunten (zelfde 7 monsters als in Tabel 5.8). SMOW = Standard Mean Ocean Water. Genormaliseerde concentratie = $C_{N-SMOW} = C_M / C_{SMOW}$ (waarin C_M = concentratie in monster). Elementen of ionen >1 (rechterzijde grafiek) komen dus in lagere concentraties in SMOW voor, z

5.7.2 Snelle clustering via Pearson correlatiematrix

Van het ondiepe, (vrijwel) zoete grondwater ($<6 \text{ m-MV}$, $\text{Cl} < 500 \text{ mg/L}$) op 31 lokaties op de Hors en aangrenzend duingebied is een Pearson, lineaire correlatiematrix berekend met HGC in Excel. De resultaten staan in Tabel 5.9, terwijl Fig.5.34 toont met hoeveel parameters elke parameters correleert binnen een bepaalde klasse van correlatiecoëfficiënt R (boven 0,5 of onder -0,5). In Fig.5.34 zijn de parameters naar links opklimmend gesorteerd op hun correlatiescore CS (zie Eq.4.1).

De correlatiematrix in Tabel 5.9 toont de volgende clustering van parameters (-X houdt een negatieve correlatie in, X een positieve):

- (1) **zeezout** (Cl , EC , Na , B , Br , Li met $R > 0,7$, en K , Mg , SO_4 , F met $R = 0,5-0,7$). Genoemde elementen zijn belangrijke bestanddelen van zeewater en sea spray.
- (2) **reactieproducten bij relatief hoge pH ($>6,5$)**. Het betreft de onderling sterk correlerende parameters HCO_3 , Ca , Sr , Fe , As , SiO_2 , Yb en TIC . In deze groep zit dus kalkoplossing (Ca , Sr , HCO_3 , TIC), reductieve oplossing van ijzerhydroxiden (Fe , As), de oplossing van

SiO₂ vanuit biogeen opaal, kwarts en silicaat-mineralen, en vreemd genoeg Yb (nog geen verklaring). Oplossing van deze minerale fasen buffert de pH op relatief hoog niveau. Opmerkelijk is, dat Mg niet meedoet in dit cluster, waarschijnlijk omdat Mg zeer sterk betrokken is bij kationuitwisseling en bijmenging met zeewater.

- (3) **reactieproducten bij relatief lage pH (<6)**. Het gaat om Al, Be, Co, Cr, La, Ni, Sc, Ti, -Si-calciet met $R > 0,7$, en -pH, Eu, V, Zn, Zr met $R = 0.5-0.7$ of lager). In deze groep zitten parameters die verband houden met het oplossen van Al-houdende mineralen (zoals kleimineralen en zware mineralen), hetgeen pas geschiedt als kalk uitgeloozd is en de pH afneemt. In enkele gevallen kan ook sprake zijn van penetratie van ultrafijne kleideeltjes door het 0,45 µm membraanfilter, die tijdens de erop volgende aanzuring ter conservering oplossen, waardoor hun concentratie dus kunstmatig verhoogd is. De spore-elementen zijn ten behoeve van de correlatiematrix niet voor eventuele filtratiebias gecorrigeerd, omdat de meetwaarden slechts een geringe overschrijding toonden en correcties altijd onzekerheden kennen. Niettemin sluit dit cluster goed aan bij relatief zuur grondwater in Nederland (Stuyfzand, 1997).
- (4) **uitwisselende zeewaterionen t.g.v. zoet-zout verplaatsing**, voornamelijk Na, K, Mg, B, F en Li. De uitwisseling bij verzoeting domineert over uitwisseling door verzilting in het studiegebied. Daarom nemen de concentraties van deze elementen en BEX op veel plaatsen toe, omdat zij na adsorptie tijdens doorspoeling met zeewater desorberen bij doorspoeling met zoet grondwater.

Bovenstaande clusters zijn de belangrijkste (er zijn er meer maar met minder impact). Met een specifieke clusteranalyse is bovenstaande clustering geverifieerd door Bland (2014; zie Fig.5.35). Het resultaat komt goed overeen met de a priori indeling op basis van de correlatiematrix.

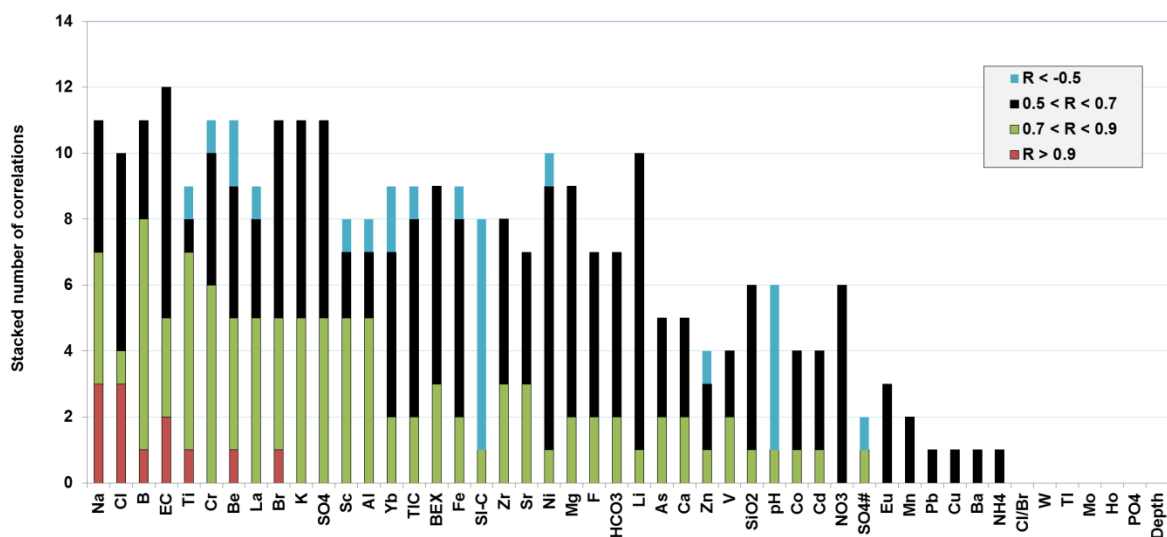


FIG. 5.34. Plot van parameters en het gestapelde aantal correlaties (>0.5 of <-0.5) van elk met alle andere parameters. De parameters zijn gerangschikt van hoogste naar laagste correlatiescore CS (zie tekst).

TABEL 5.9. Pearson lineaire correlatiematrix van ondiep grondwater (<6 m-MV, Cl <500 mg/L) op 31 lokaties op de Hors en aangrenzend duingebied van Zuid-Texel, in 2013. Correlatiecoëfficiënten (R) zijn als volgt gemarkeerd: oranje = >0.90; geel = 0.70-0.90; donker groen = 0.5-0.7; licht blauw = -0.7 - -0.5. Betrokken aantal monsters = 161 (eigen veldcampagnes).

Param	Depth	EC	pH	Cl	SO4	HCO3	NO3	PO4	F	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	NH4	SiO2	Al	As	B	Ba	Be	Br	Cd	
Depth	1.00																								
EC	0.07	1.00																							
pH	0.31	0.09	1.00																						
Cl	0.07	0.93	0.16	1.00																					
SO4	0.10	0.60	0.45	0.67	1.00																				
HCO3	-0.02	0.60	-0.18	0.28	-0.04	1.00																			
NO3	-0.02	0.49	0.23	0.59	0.70	-0.09	1.00																		
PO4	0.07	0.10	-0.16	0.11	-0.08	0.00	-0.06	1.00																	
F	0.12	0.54	0.20	0.55	0.39	0.20	0.19	0.15	1.00																
Na	0.07	0.91	0.21	0.93	0.71	0.33	0.55	0.12	0.70	1.00															
K	0.07	0.64	0.35	0.67	0.74	0.14	0.55	0.22	0.58	0.71	1.00														
Ca	-0.01	0.20	-0.39	-0.04	-0.38	0.70	-0.22	-0.08	-0.34	-0.16	-0.44	1.00													
Mg	0.00	0.70	0.23	0.69	0.63	0.32	0.41	0.09	0.44	0.62	0.87	-0.19	1.00												
Fe	0.00	0.24	-0.57	0.10	-0.31	0.53	-0.14	-0.04	-0.01	0.04	-0.17	0.61	-0.03	1.00											
Mn	-0.18	0.10	-0.38	-0.06	-0.23	0.43	-0.13	-0.06	-0.08	-0.07	-0.16	0.49	0.00	0.44	1.00										
NH4	0.20	0.05	-0.05	-0.03	-0.10	0.19	-0.16	0.04	0.11	-0.01	0.09	0.09	0.06	0.29	0.05	1.00									
SiO2	0.21	0.21	-0.21	0.03	-0.22	0.52	-0.21	0.11	0.23	0.05	0.07	0.34	0.16	0.59	0.18	0.50	1.00								
Al	-0.26	-0.29	-0.43	-0.17	-0.13	-0.40	-0.06	0.12	0.00	-0.12	-0.08	-0.37	-0.15	-0.06	-0.04	-0.18	-0.22	1.00							
As	0.06	0.30	-0.31	0.15	-0.21	0.52	-0.14	-0.04	0.18	0.16	-0.01	0.42	0.05	0.79	0.25	0.48	0.72	-0.19	1.00						
B	0.08	0.78	0.32	0.77	0.76	0.27	0.50	0.13	0.75	0.90	0.81	-0.37	0.66	-0.11	-0.12	0.05	0.04	-0.08	0.09	1.00					
Ba	-0.04	0.32	-0.41	0.20	-0.21	0.45	-0.15	0.47	0.14	0.16	0.18	0.31	0.25	0.40	0.23	0.13	0.35	0.07	0.33	0.09	1.00				
Be	-0.20	-0.25	-0.51	-0.15	-0.17	-0.32	-0.06	0.18	0.00	-0.13	-0.11	-0.24	-0.15	0.07	0.01	-0.13	-0.10	0.86	-0.08	-0.13	0.14	1.00			
Br	-0.01	0.86	0.18	0.95	0.71	0.14	0.68	-0.12	0.53	0.89	0.70	-0.19	0.68	-0.05	-0.08	-0.12	-0.11	-0.06	-0.01	0.76	0.11	-0.07	1.00		
Cd	-0.09	0.14	-0.45	0.07	-0.21	0.29	-0.09	-0.08	0.00	0.03	-0.12	0.35	-0.05	0.64	0.25	0.16	0.28	0.13	0.52	-0.07	0.38	0.18	-0.03	1.00	
Co	-0.28	-0.15	-0.34	-0.16	-0.09	-0.06	-0.03	-0.10	-0.17	-0.15	-0.13	0.02	-0.09	-0.02	0.50	-0.11	-0.28	0.52	-0.11	-0.09	-0.01	0.44	-0.05	0.10	
Cr	-0.23	-0.22	-0.43	-0.10	-0.17	-0.31	-0.02	-0.18	0.04	-0.11	-0.12	-0.19	-0.17	0.10	0.00	-0.21	-0.13	0.80	-0.06	-0.14	0.22	0.86	-0.03	0.21	
Cu	-0.19	-0.15	-0.17	-0.07	0.03	-0.27	0.17	-0.07	-0.15	-0.05	-0.07	-0.19	-0.12	-0.14	-0.11	-0.20	-0.40	0.48	-0.17	-0.05	0.04	0.32	0.02	0.19	
Eu	-0.21	-0.13	-0.26	-0.08	-0.10	-0.10	0.00	-0.12	0.09	-0.08	-0.06	-0.08	0.00	0.17	0.06	-0.10	0.08	0.43	0.03	-0.12	0.00	0.51	-0.05	0.20	
Ho	0.17	0.19	-0.12	0.12	0.03	0.21	-0.03	-0.03	0.01	0.11	-0.06	0.25	-0.03	0.13	0.09	0.02	0.13	-0.11	0.19	0.02	0.18	-0.06	0.05	0.17	
La	-0.21	-0.27	-0.39	-0.18	-0.12	-0.32	-0.04	-0.02	-0.08	-0.15	-0.12	-0.25	-0.16	0.01	0.05	-0.13	-0.18	0.87	-0.09	-0.11	0.03	0.85	-0.09	0.13	
Li	0.22	0.73	0.08	0.63	0.51	0.49	0.36	0.11	0.45	0.66	0.64	0.02	0.63	0.26	0.03	0.16	0.40	-0.13	0.34	0.70	0.32	-0.11	0.55	0.08	
Mo	-0.04	0.06	0.16	0.18	0.40	-0.32	0.39	-0.04	0.15	0.26	0.32	-0.50	0.16	-0.25	-0.25	-0.11	-0.28	0.21	-0.21	0.41	-0.24	0.17	0.35	-0.13	
Ni	-0.18	-0.25	-0.42	-0.23	-0.16	-0.16	-0.07	-0.03	-0.10	-0.19	-0.17	-0.11	-0.16	-0.04	0.26	-0.21	-0.25	0.69	-0.15	-0.16	0.14	0.67	-0.12	0.10	
Pb	0.04	0.15	-0.34	0.09	-0.20	0.26	-0.15	0.14	0.30	0.12	0.01	0.14	0.05	0.43	0.14	0.27	0.67	0.08	0.48	0.09	0.28	0.13	0.01	0.31	
Sc	-0.19	-0.24	-0.36	-0.15	-0.11	-0.30	-0.06	-0.05	-0.04	-0.12	-0.12	-0.25	-0.14	0.06	-0.03	-0.10	-0.10	0.84	-0.05	-0.07	0.02	0.85	-0.09	0.21	
Sr	0.04	0.63	-0.20	0.40	0.07	0.83	0.06	-0.03	0.02	0.30	0.12	0.74	0.38	0.55	0.38	0.09	0.41	-0.42	0.41	0.16	0.40	-0.32	0.26	0.28	
Ti	-0.27	-0.27	-0.47	-0.17	-0.22	-0.31	-0.08	0.25	0.01	-0.15	-0.14	-0.22	-0.18	0.04	0.03	-0.19	-0.16	0.80	-0.12	-0.15	0.19	0.90	-0.06	0.08	
Tl	-0.14	0.08	-0.10	0.06	0.01	0.08	0.04	0.00	0.01	0.08	0.04	0.01	0.09	0.03	0.11	0.05	0.01	0.05	-0.01	0.05	-0.03	0.04	0.09	0.00	
V	-0.19	-0.11	-0.43	-0.07	-0.24	-0.09	-0.06	0.20	0.03	-0.09	-0.15	0.04	-0.13	0.22	0.15	-0.14	-0.01	0.36	0.10	-0.13	0.22	0.61	0.00	0.11	
W	0.05	0.03	-0.10	-0.01	-0.06	0.14	-0.12	-0.05	-0.10	-0.05	-0.10	0.21	0.01	0.17	0.04	0.03	0.13	-0.05	0.17	-0.08	0.02	-0.02	-0.06	0.03	
Yb	-0.16	0.05	-0.68	-0.09	-0.46	0.46	-0.22	-0.04	-0.22	-0.19	-0.42	0.74	-0.20	0.81	0.50	0.04	0.37	0.15	0.49	-0.38	0.38	0.32	-0.19	0.55	
Zn	-0.38	-0.01	-0.60	-0.06	-0.25	0.16	-0.05	-0.10	-0.14	-0.10	-0.24	0.32	-0.16	0.46	0.26	-0.04	0.03	0.38	0.30	-0.18	0.35	0.44	-0.09	0.72	
Zr	-0.20	-0.20	-0.36	-0.16	-0.22	-0.13	-0.08	-0.07	0.05	-0.17	-0.20	0.00	-0.18	0.21	0.18	-0.14	-0.01	0.47	0.11	-0.19	0.11	0.69	-0.11	0.17	
BEX	0.00	0.58	0.31	0.49	0.62	0.33	0.31	0.13	0.69	0.70	0.83	-0.41	0.72	-0.15	-0.06	0.08	0.15	-0.03	0.05	0.86	0.14	-0.10	0.51	-0.11	
SO4#	0.08	0.12	0.48	0.16	0.84	-0.26	0.50	-0.18	0.11	0.25	0.50	-0.48	0.33	-0.49	-0.26	-0.11	-0.32	-0.05	-0.39	0.45	-0.43	-0.11	0.26	-0.33	
Si-C	0.29	0.25	0.77	0.14	0.20	0.34	0.06	-0.17	0.05	0.13	0.12	0.26	0.16	-0.18	-0.05	0.05	0.07	-0.77	-0.02	0.13	-0.16	-0.73	0.05	-0.24	
TIC	-0.09	0.50	-0.51	0.22	-0.15	0.90	-0.13	0.05	0.13	0.25	0.05	0.67	0.23	0.64	0.47	0.18	0.51	-0.18	0.54	0.16	0.52	-0.12	0.11	0.38	
Cl/Br	0.08	-0.09	0.12	-0.10	-0.09	0.01	-0.16	-0.16	-0.17	-0.15	-0.18	0.16	-0.14	0.12	-0.12	0.14	0.13	-0.31	0.15	-0.22	-0.09	-0.32	-0.31	0.06	

Param	Co	Cr	Cu	Eu	Ho	La	Li	Mo	Ni	Pb	Sc	Sr	Ti	Tl	V	W	Yb	Zr	BEX	SO4#	Si-C	TIC	Cl/Br	
Co	1.00																							
Cr	0.37	1.00																						
Cu	0.36	0.37	1.00																					
Eu	0.21	0.56	0.10	1.00																				
Ho	-0.07	-0.01	0.09	-0.23	1.00																			
La	0.58	0.72	0.44	0.37	-0.10	1.00																		
Li	-0.17	-0.12	-0.19	-0.08	0.09	-0.11	1.00																	
Mo	0.07	0.07	0.26	0.09	-0.13	0.19	0.11	1.00																
Ni	0.72	0.62	0.50	0.39	-0.04	0.69	-0.13	0.09	1.00															
Pb	-0.12	0.12	-0.18	0.25	0.02	0.02	0.21	-0.14	-0.11	1.00														
Sc	0.49	0.75	0.39	0.44	-0.11	0.89	-0.05	0.18	0.66	0.09	1.00													
Sr	-0.11	-0.30	-0.24	-0.07	0.21	-0.31	0.55	-0.30	-0.19	0.20	-0.29	1.00												
Ti	0.41	0.87	0.28	0.49	-0.07	0.74	-0.19	0.14	0.62	0.09	0.73	-0.34	1.00											
Tl	0.08	0.01	0.04	0.09	0.07	0.02	0.05	0.04	0.01	-0.01	0.1													

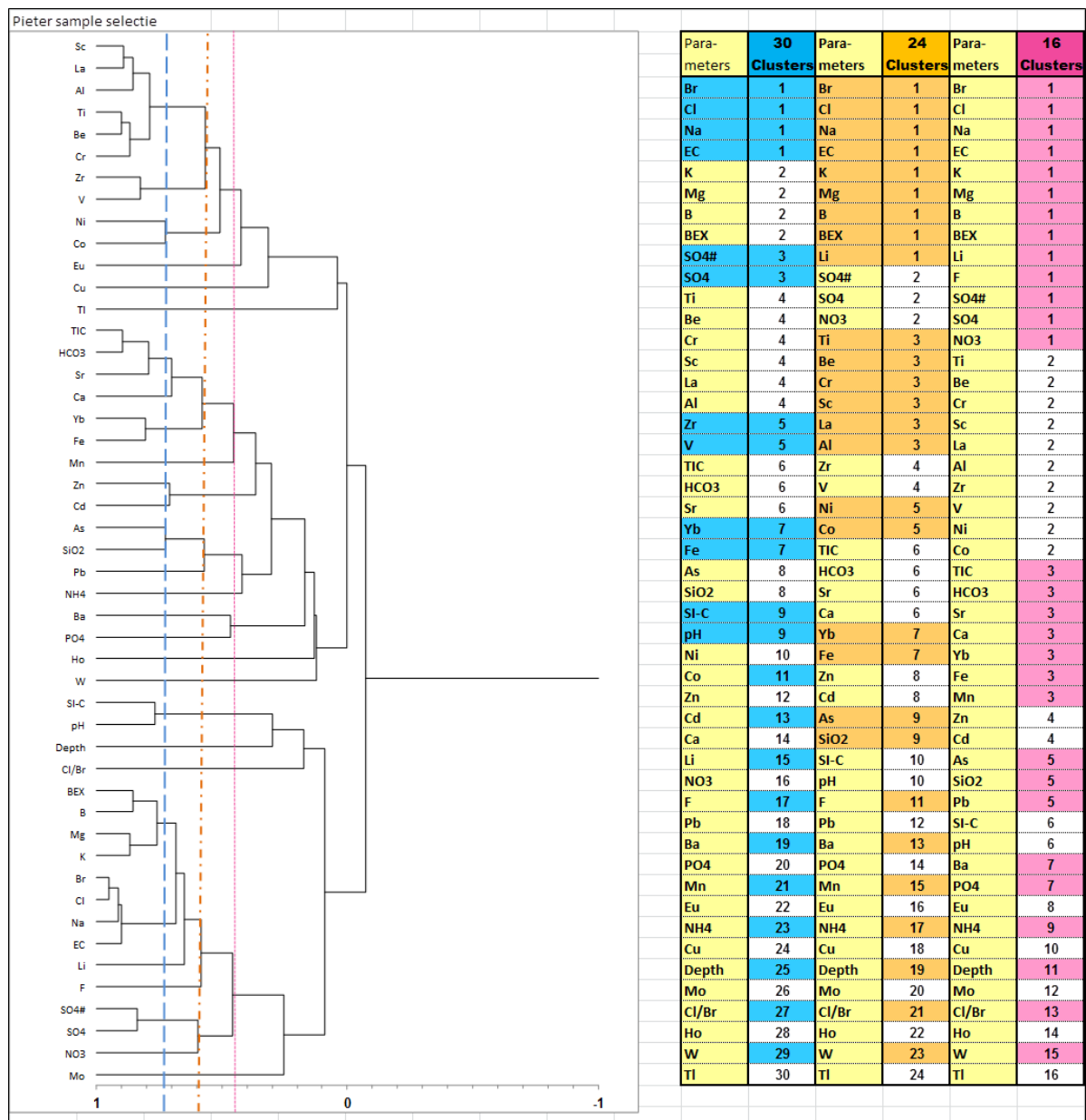


FIG. 5.35. Resultaat van clusteranalyse van dezelfde dataset als waarop Tabel 5.9 is gebaseerd. Voor details zie Bland (2014).

5.7.3 De ondiepe dwarsdoorsnedes nader beschouwd

Chemische patronen langs de 2 ondiepe dwarsdoorsnedes W-E en NW-SE zijn weergegeven in Fig.5.28-5.29 (Cl), Fig.5.36 en 5.38 (Ca), en Fig.5.37 en 5.39 (PO₄-totaal), voor zowel de winter- als zomeropname in 2013. De veelvoud aan factoren zorgt voor een complex patroon. Zo etaleerden de winteropnames i.h.a. lagere concentraties aan Cl, Fe, Ca en HCO₃ dankzij weinig zeezoutdepositie, veel regen en een lage temperatuur. Lokaties met een constant infiltratieregime vertoonden aanzienlijk lagere concentraties aan Fe, NH₄, SiO₂, HCO₃, Mn en PO₄, maar juist een hogere pH en concentratie NO₃ en SO₄. Landinwaarts waren toenames aan Cl, Ca en HCO₃ te zien t.g.v. een toenemende begroeiing, en op slechts enkele plekken was incidenteel kalkagressief grondwater aanwezig, gekenmerkt door lage Ca en HCO₃ concentraties. Voor meer details zie Bland (2014) en Amatsat (2014).

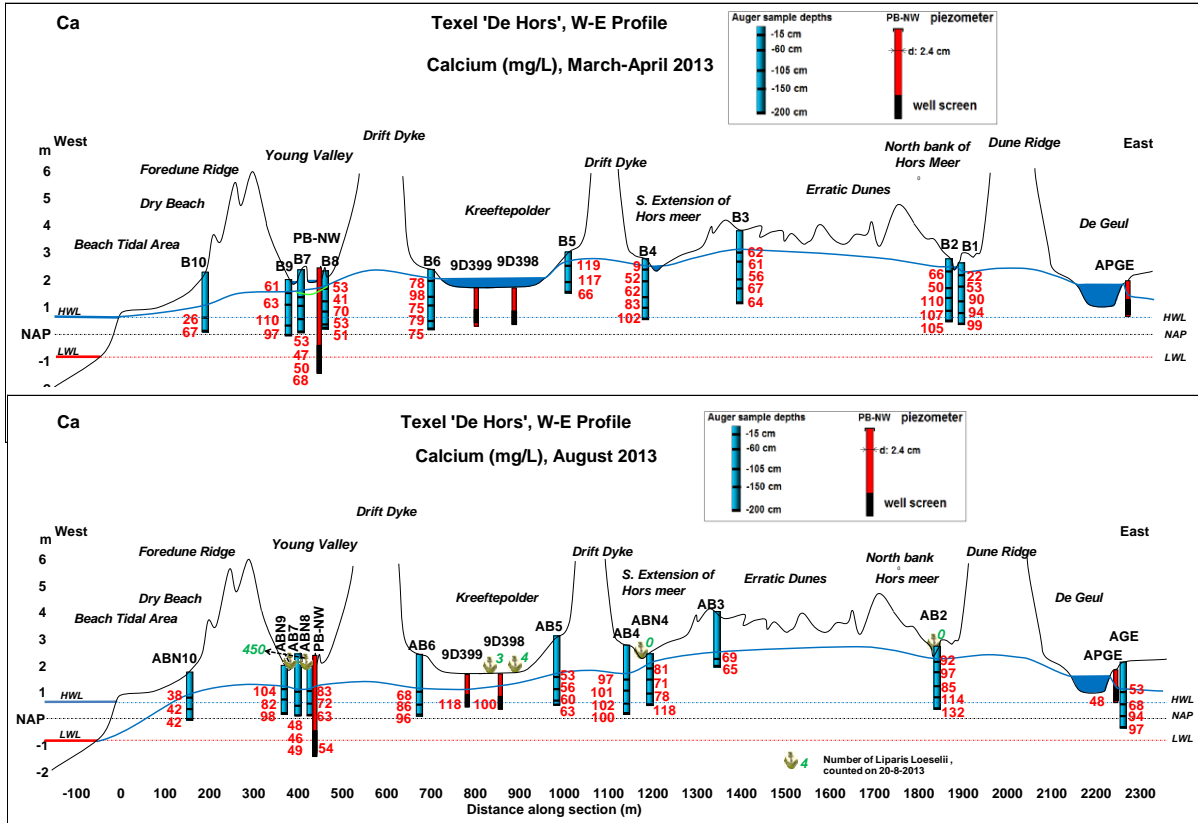


FIG. 5.36. Ruimtelijke verdeling van de Ca-concentratie in grondwater langs profiel W-E in winter en zomer 2013. Voor ligging profiel zie Fig.5.11. Naar Amatiřsat (2014).

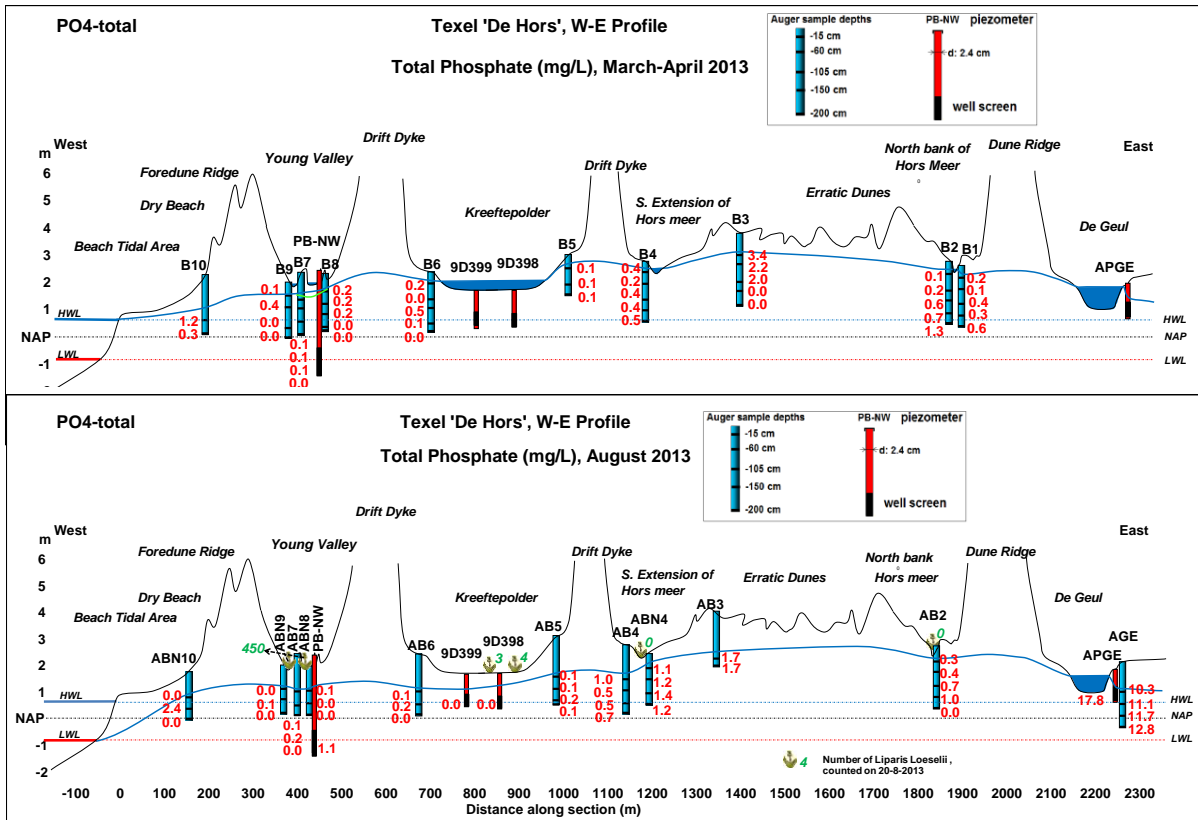


FIG. 5.37. Ruimtelijke verdeling van de PO₄-totaal-concentratie in grondwater langs profiel W-E in winter en zomer 2013. Voor ligging profiel zie Fig.5.11. Naar Amatiřsat (2014).

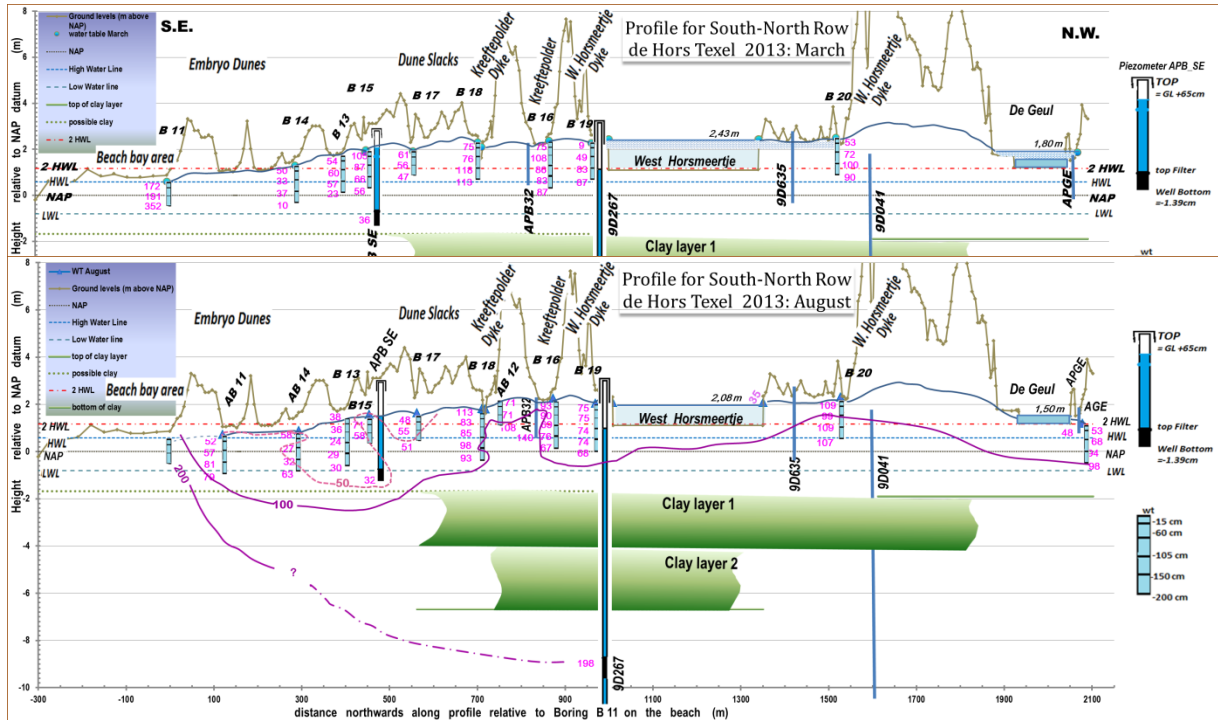


FIG. 5.38. Ruimtelijke verdeling van de Ca-concentratie in grondwater langs profiel NW-SE in winter en zomer 2013. Voor ligging profiel zie Fig.5.11. Naar Bland (2014).

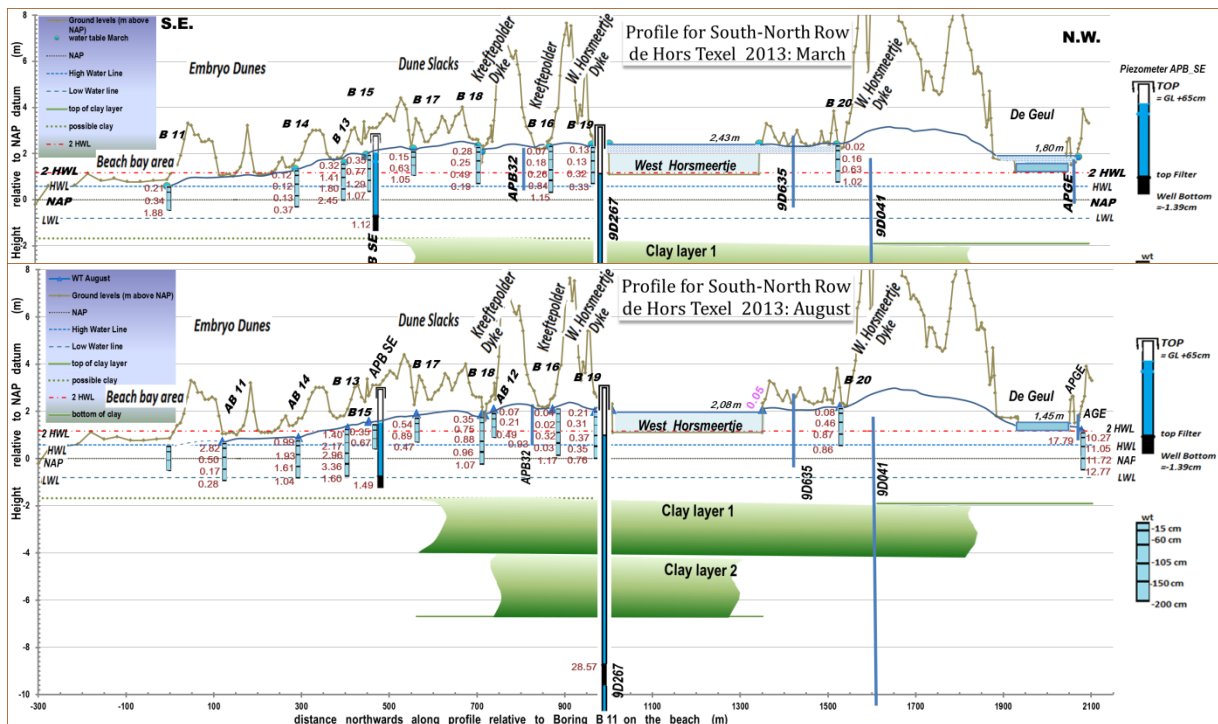


FIG. 5.39. Ruimtelijke verdeling van de PO₄-totaal-concentratie in grondwater langs profiel NW-SE in winter en zomer 2013. Voor ligging profiel zie Fig.5.11. Naar Bland (2014).

5.7.4 Vergelijking met Moksloot (onderzoek RUG)

Hartog et al. (1991) en Berg & Sagel (1995) verrichtten begin jaren 90 onderzoek in het noordelijke deel van de Mokslootvallei, over het Grootte Vlak (Grote raai W-E in Fig.5.11). Resultaten van hun metingen aan het kalkgehalte staan in Fig.5.40 (linker paneel), die van Cl en Ca in het grondwater in 1990 in Fig.5.40 (rechter paneel), en die van de Ca concentratie van het grondwater in 1994 in Fig.5.41. De ontkalking blijkt onder het drainerende Grootte Vlak minder diep dan in de grondwater toeleverende duingebieden, waar ontkalking zich ook uit in de met diepte of zijdelings toenemende Ca concentraties in het grondwater. Rond de Hors zijn deze patronen minder duidelijk omdat het duingebied veel jonger is en dus minder diep ontkalkt. De zoutconcentraties rond het Grootte Vlak in de jaren 90 waren bovendien hoger dan die rond de Hors in 2013. Dat verklaart zich deels door de dichtere begroeiing en deels door zoutrijkere jaren (met meer seaspray input).

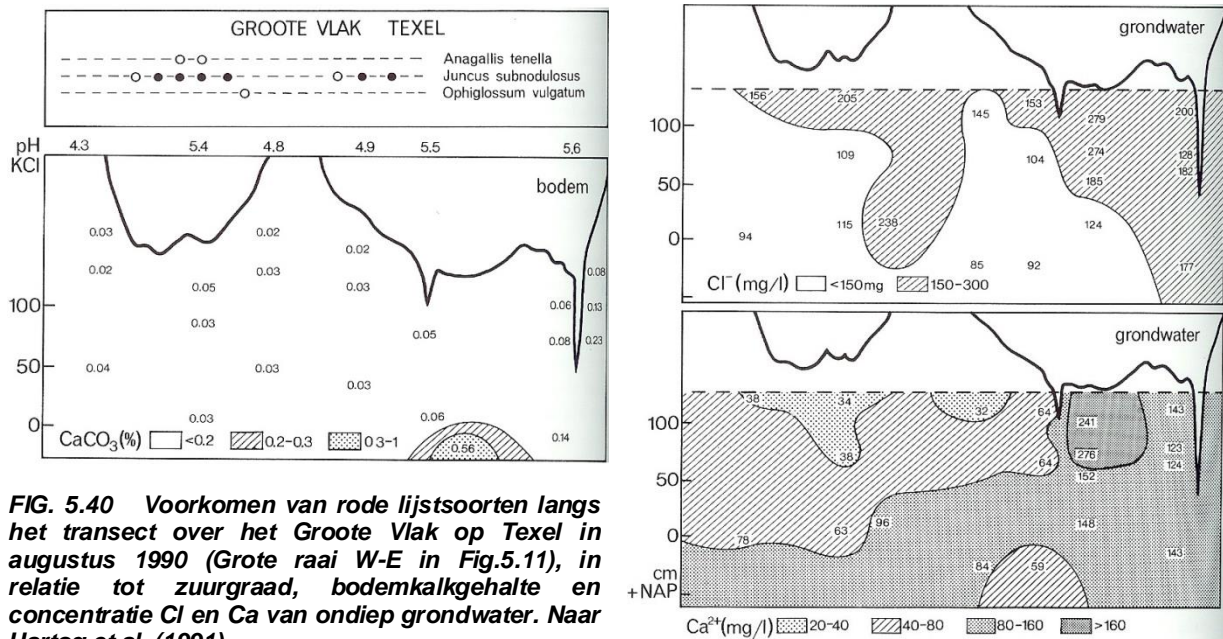


FIG. 5.40 Voorkomen van rode lijstsoorten langs het transect over het Grootte Vlak op Texel in augustus 1990 (Grote raai W-E in Fig.5.11), in relatie tot zuurgraad, bodemkalkgehalte en concentratie Cl en Ca van ondiep grondwater. Naar Hartog et al. (1991).

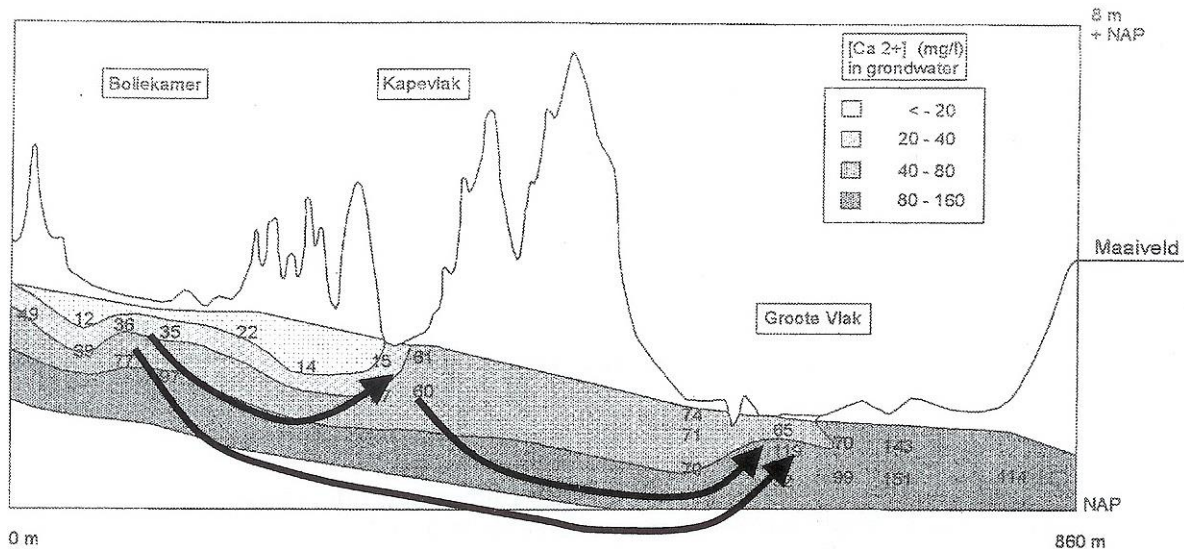


FIG. 5.41. Ca concentratie van ondiep grondwater en daaruit afgeleid grondwaterstromingspatroon langs het transect over het Grootte Vlak op Texel in juni 1994 (Grote raai W-E in Fig.5.11). Naar Berg & Sagel (1995).

5.7.5 *Relaties met chloride nader beschouwd*

De sterke lineaire relaties van diverse elementen met Cl zijn voor de hele populatie aan waarnemingen (dus nu incl. de brakke en zoute grondwateren van grotere diepte) weergegeven in Fig.5.42 (hoofdelementen SO₄, Na, K, Ca en Mg) en Fig.5.43 (sporelementen B, Br, Li, Mo en Sr). Daarnaast zijn de relaties uitvergroet voor het bereik van 0-1.000 mg Cl/L in Fig.5.44.

In deze figuren is de belangrijke menglijn van regenwater met Standard Mean Ocean Water (SMOW) doorgetrokken, waarbij de concentraties in regenwater het punt X=0, Y=0 benaderen (op de gehanteerde schaal) en de lijn voorbij SMOW het effect van indamping weergeeft. We noemen deze lijn kortweg de 'SMOW-menglijn'. De Cl concentratie van het Marsdiep, de kustnabije Noordzee en Waddenzee is beduidend lager dan die van SMOW t.g.v. de bijmenging van vooral Rijnwater via de uitmondingen in Zuid-Holland en via de uitsroom van IJsselmeerwater.

De Na-Cl, K-Cl en Mg-Cl relaties wijzen erop dat de concentraties van Na, K en Mg grotendeels bepaald worden door zeewaterbijmenging, maar bij lagere concentraties een structurele extra bron kennen. Die bron bestaat zeer waarschijnlijk hoofdzakelijk uit kationuitwisseling door verzoeting (zie verder § 6.5.3).

Wat SO₄ betreft zien we bij Cl<1.000 mg/L (Fig.5.44) zowel een significante SO₄-mobilisatie tgv pyrietoxidatie (meetpunten boven SMOW-menglijn) als een significante SO₄-immobilisatie door pyrietvorming (meetpunten onder SMOW-menglijn). Bovendien is SO₄ in geïnfiltreerd regenwater niet nul vanwege atmosferisch SO_x en SO₄ van sea spray, zodat de regressielijn bij Cl=10 mg/L niet uitkomt op 1,4 mg SO₄/L maar dikwijls daar ruim boven (10-25 mg/L). In het zoute traject (>10.000 mg Cl/L) is duidelijk sprake van structurele SO₄-immobilisatie t.g.v. pyrietvorming (Fig.5.42).

De Br-Cl relatie (Fig.5.43) wijst erop dat zeewater voor 100% de bron is van Cl en Br. De concentraties Sr, B en Li laten een geheel ander patroon zien in hun relatie met Cl (Fig.5.43). Zij vertonen gemiddeld hogere concentraties dan de SMOW-menglijn, ten teken van mobilisatie, en alleen Sr vertoont bij Cl > 15.000 mg/L juist lagere concentraties wijzend op immobilisatie. De Sr (en Ca) toenames bij lagere concentraties verklaren zich door dominantie van kalkoplossing over menging met zeewater. Hun adsorptie tijdens verzoeting wordt ruimschoots gecompenseerd door kalkoplossing. De B toenames hangen vermoedelijk samen met desorptie tijdens verzoeting (Stuyfzand, 2014).

Lithium vertoont hogere concentraties dan de SMOW-menglijn tot Cl = 10.000 mg/L, waarna lagere concentraties optreden. De toename sluit goed aan bij de geconstateerde kationuitwisseling tgv verzoeting, de afname getuigt van adsorptie.

Molybdeen, dat relatief hoge concentraties kent in SMOW, vertoont geen duidelijke relaties met de Cl-concentratie (Fig.5.43). Er is wel sprake van een overschot t.o.v. de SMOW-menglijn tot Cl = 10.000 mg/L, duidend op overwegend desorptie door verzoeting. Bij hogere Cl concentraties daalt Mo sterk onder de menglijn t.g.v. sulfaatreductie in dat zoute water waarbij Mo coprecipiteert met pyriet.

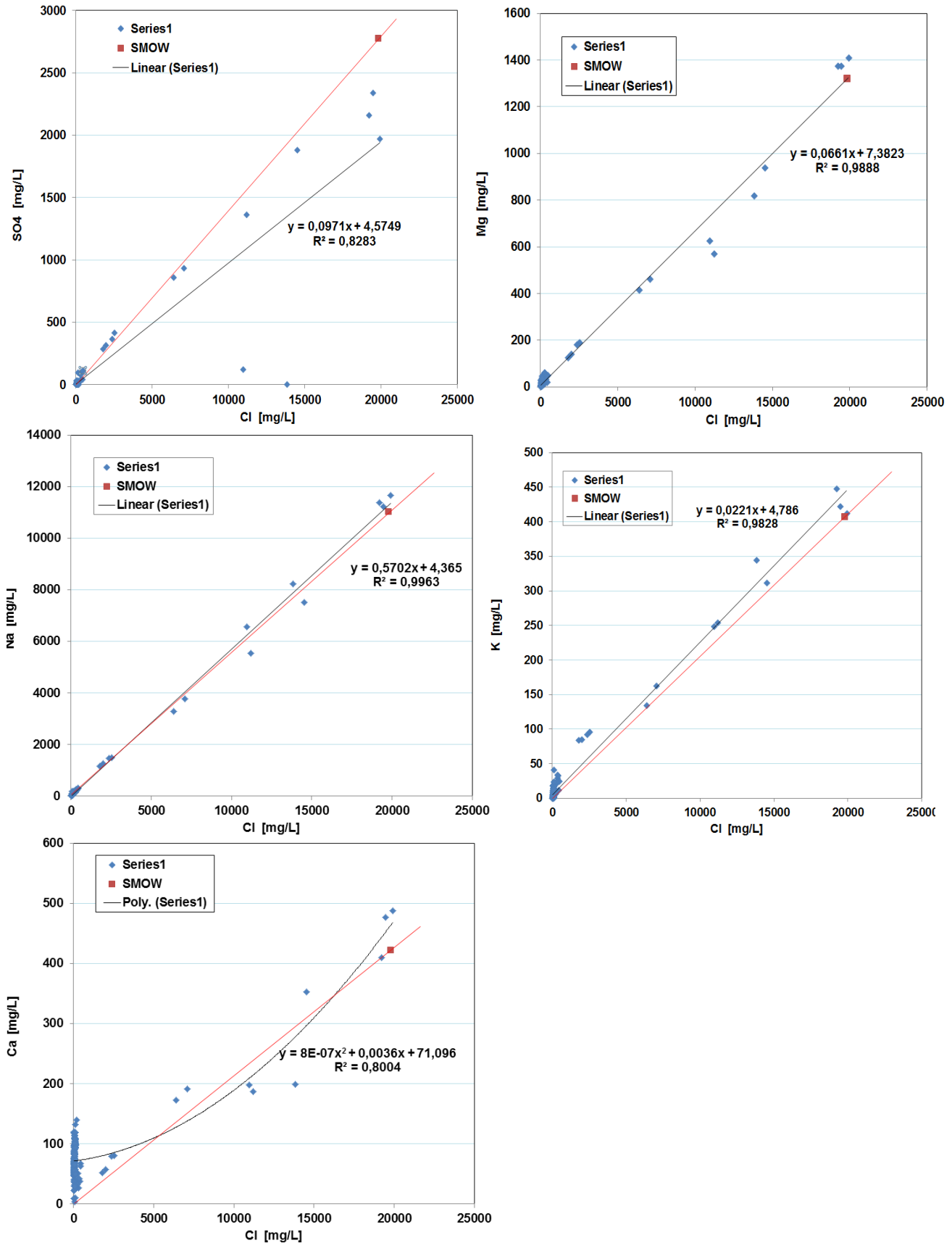


FIG. 5.42. Plot van SO₄, Na, K, Ca en Mg concentraties als functie van Cl. SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie. Naar Bland (2014).

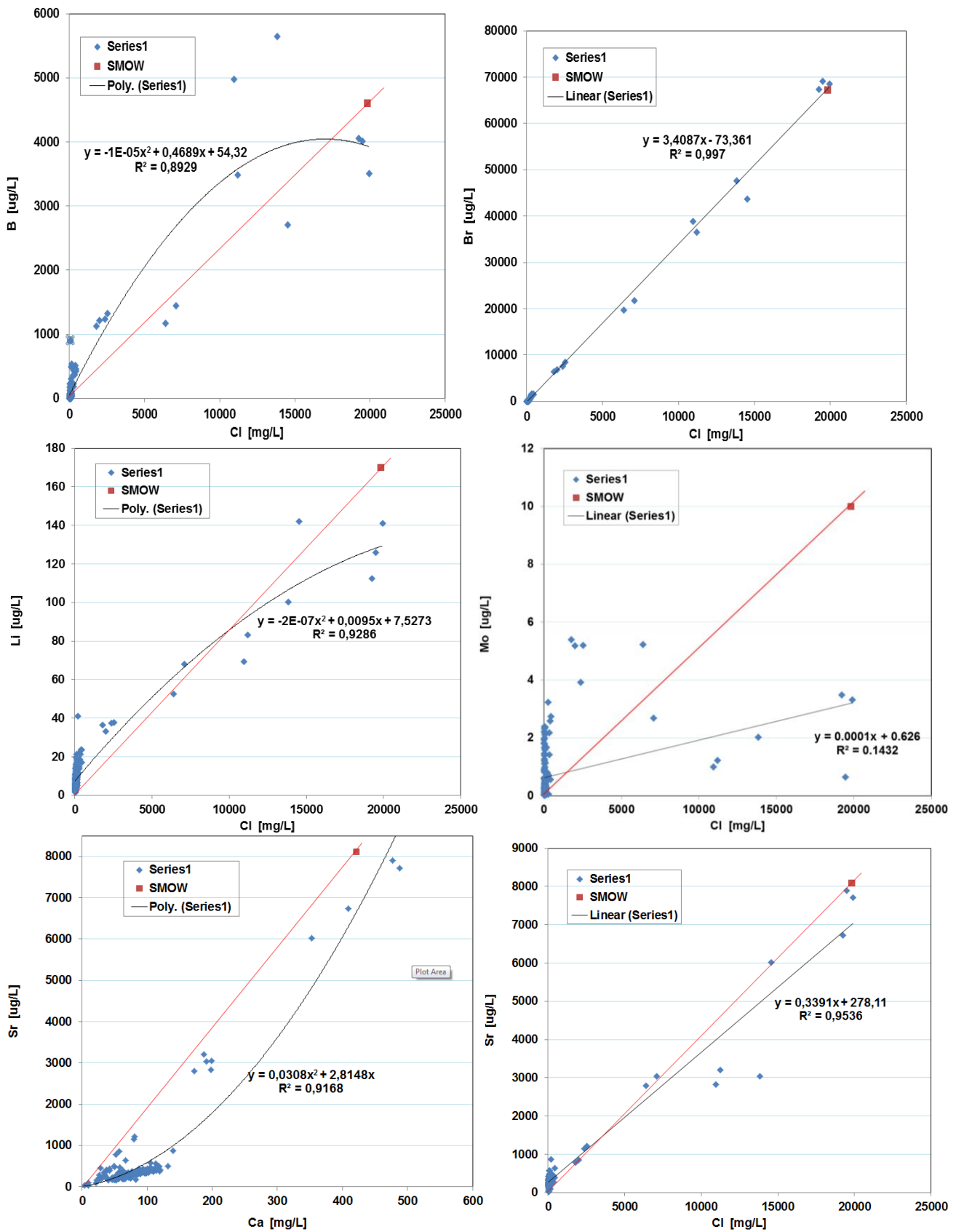


FIG. 5.43. Plot van B, Br, Li, Mo en Sr concentraties als functie van Cl, en van Sr als functie van Ca. SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie. Gewijzigd naar Bland (2014).

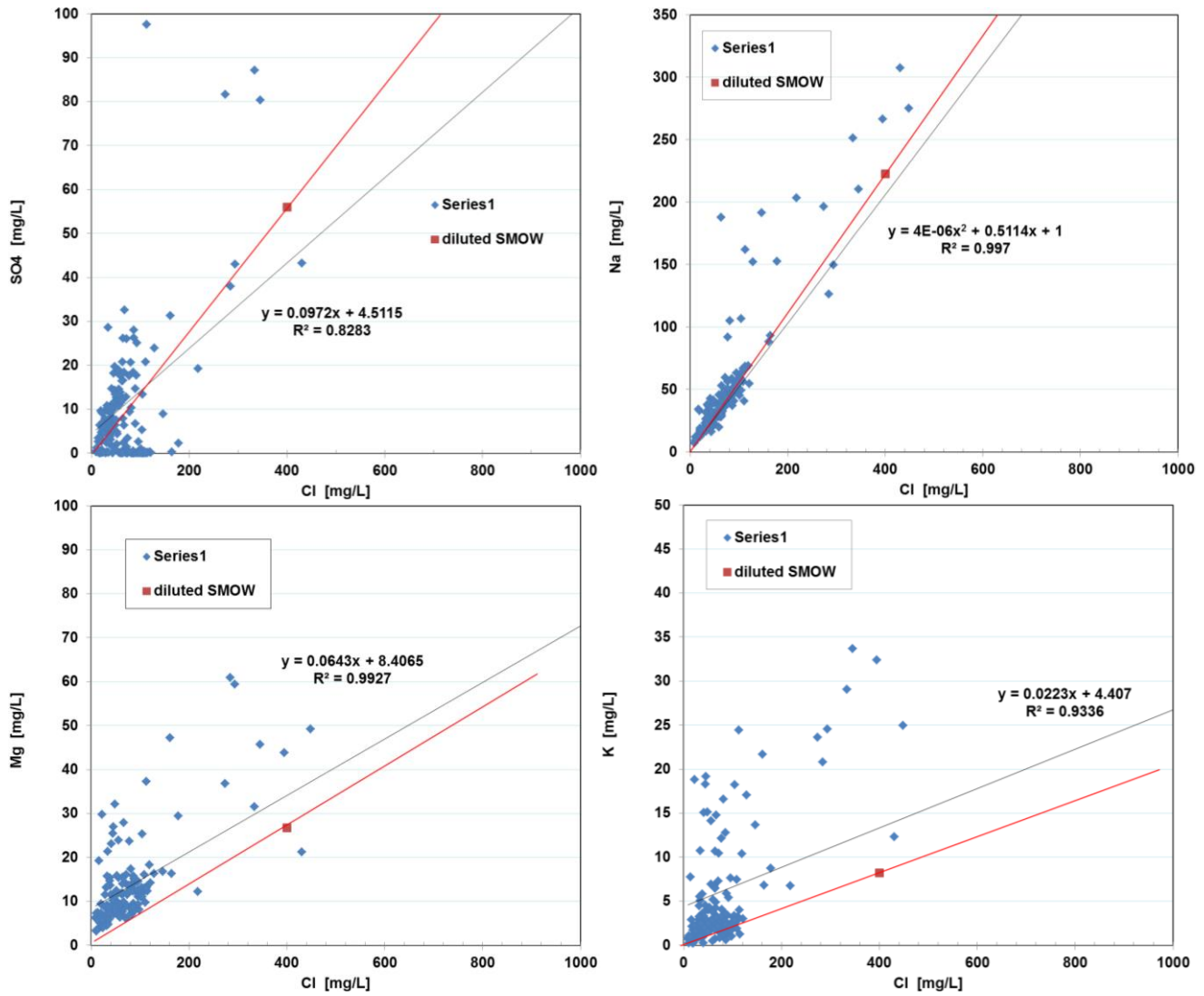


FIG. 5.44. Plot van SO4, Na, K en Mg concentraties als functie van Cl in lage bereik (<1.000 mg/L). SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie. Gewijzigd naar Bland (2014).

6 Veermansplaat

Pieter J. Stuyfzand, Birgit Oskam en Danny van Loon

6.1 Fysiografie

Het onderzoek vond plaats op de Noordkop van de Veermansplaat, een onbewoond eiland in het zoute Grevelingenmeer in Zeeland (Fig. 2.1; 6.2). Het is een vlakke zandplaat, waarin ook enkele silt- en kleilagen voorkomen (Slager en Visser, 1990). Het eiland is ongeveer 4000 meter lang, 530 tot 1400 meter breed en heeft een oppervlakte van ca. 370 ha. De maaiveldhoogte op de plaat varieert tussen ~20 cm-NAP, wat het standaardpeil van het Grevelingenmeer is (van de Haterd, 2010), en ~65 cm+NAP (Slager en Visser, 1990). Binnen het onderzoeksgebied is de maximale hoogte van het maaiveld geschat op 1 m+NAP. Het Grevelingenmeer is het grootste zoutwater meer in Europa.

6.1.1 *Klimaat*

Op de Veermansplaat heerst een zeeklimaat. Dit betekent dat het gebied zachte winters en milde zomers kent. Het gebied heeft over het gehele jaar een gemiddelde temperatuur van 10,5 tot 10,8°C (KNMI,2013). De gemiddelde minimumtemperatuur is 6.9 tot 7.2°C en de gemiddelde maximumtemperatuur is 13,8 tot 14,1°C (Fig. 2.4). De neerslag kende een jaargemiddelde van 736 mm in de periode 1951-1980 en van 797 mm in de periode 1981-2010 (gemiddelde voor de 3 regenstations in Fig.6.7). Vanwege de ligging dicht aan zee, is de gemiddelde windsnelheid vrij hoog, 5-6 m/s. (KNMI, 2013).

6.1.2 *Invloeden van de mens*

Door het verdwijnen van het getij (ca. 2.5 m verschil) in het huidige Grevelingenmeer sinds afsluiting in 1971, is de Veermansplaat samen met de andere platen droog komen te liggen. Daardoor veranderden zandplaten in eilanden in het Grevelingenmeer met een vast meerpeil van ca. 0.2 m-NAP. Dit meerpeil kent echter nog wel enkele fluctuaties, enerzijds door verlaging van het meerpeil met 6 centimeter in het broedseizoen, en anderzijds door peilfluctuaties als gevolg van windinvloeden (tussen ongeveer 0,1 en 0,3 m-NAP (van de Haterd, 2010). Door stormen kan deze fluctuatie nog iets groter zijn.

Om kustafslag van de platen in de Grevelingen door golfwerking te voorkomen zijn de oevers versterkt met een zogenaamde vooroeververdediging (golfbrekende grinddam in het water op korte afstand van de oever) en een directe oeververdediging (grinddek op de oever; Fig. 6.1). Door aanhoudende oeverafslag zouden de vlakke platen namelijk langzamerhand geheel onder het waterpeil worden teruggebracht (Visser, 1995).

Over het gehele eiland zijn na het droogvallen eerst stuifschermen geplaatst om verstuiwing van het zand op de platen tegen te gaan (Slager en Visser, 1990). Later zijn deze beplant met helm en zijn de laagtes tussen de ontstane lage stuifrichels ingezaaid. Het resultaat is nog steeds zichtbaar aan de aanwezigheid van stuifrichels (Fig. 6.1).

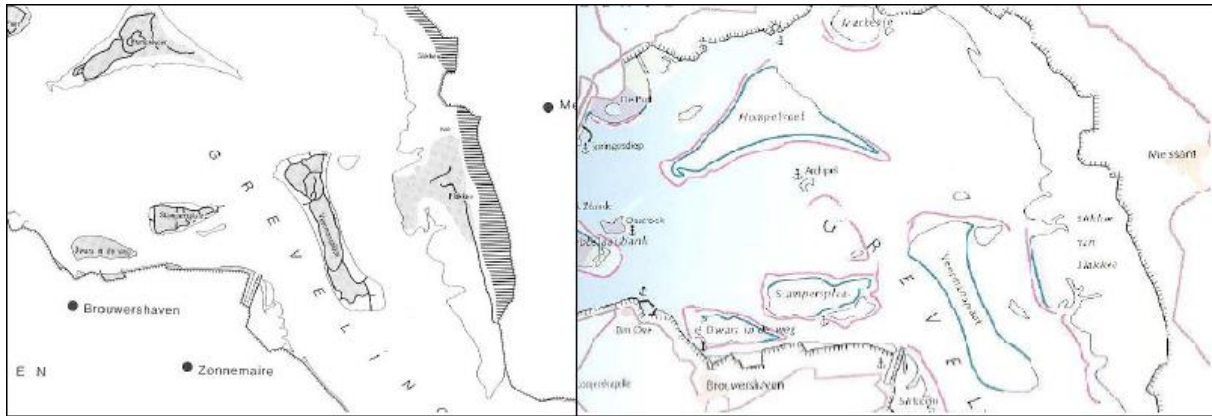


FIG. 6.1. Links: Locatie van stuifruggen op de Veermansplaat, aangegeven met zwarte lijnen (naar: Slager en Visser, 1990). Rechts: Locatie van oeververdediging, aangegeven met roze (vooroeververdediging) en blauw (directe oeververdediging). Naar: Visser (1995).

6.1.3 Bodems

De bodemvorming beperkt zich vooralsnog tot ontkalking en ophoping van biomassa. Het oorspronkelijke kalkgehalte varieerde van ca. 4.2 – 5.5 % in de bovenste 15 cm (Visser, 1995). Op de zeer natte centrale delen tussen stuifruggen lijkt sprake te zijn van veenvorming.

6.1.4 Vegetatie en beheersmaatregelen

De begroeiing op de plaat kan ruwweg ingedeeld worden in twee verschillende vegetatietypes. Op de vlakke koppen aan de noord- en zuidkant van de Veermansplaat zien we lage, zilte pioniersvegetatie (de Kraker, 2012). In het middendeel is zoetwaterminnend, hoog struweel aanwezig, dat langzamerhand verandert van lage kruipwilgen tot hoog opgaand bos (de Kraker, 2012). De twee koppen met lage vegetatie worden gescheiden van het struweel in het midden van het eiland door een stuifrug (de Kraker, 2012).

Van laag naar hoog zien we de volgende zonerings op het eiland (Van de Haterd et al. 2010): zilte pioniersbegroeiing (21,6 ha tussen 5 en 15 cm–NAP), zilte graslanden (36,2 ha tussen 5 cm–NAP en 5 cm+NAP), overstromend grasland (2,5 ha tussen 0 en 10 cm+NAP), en duinvalleivegetatie (100,3 ha grotendeels tussen 15 en 35 cm+NAP).

Begrazing en maaien zijn belangrijke beheersmaatregelen op de Veermansplaat om de lage begroeiing op de koppen van de plaat te behouden. Anders zou zij volgens natuurlijke successie overgaan in hogere begroeiing met tenslotte bosvorming. De begrazing gebeurt thans door 25 Shetland pony's, het hele jaar door. Voorheen is dit ook geprobeerd met seizoensbegrazing door runderen, maar deze bleken snel schuw te worden en hierdoor lastig te vangen (de Kraker, 2012). In de Grevelingen komt de Groenknolorchis voornamelijk voor op de Veermansplaat. De verspreiding is weergegeven in Fig.6.25.

6.2 Meetpunten op de Noordkop in 2013

In totaal zijn tijdens het onderzoek 21 boringen met een spiraalboor gezet en 2 puls-boringen ter plaatsing van een ondiepe peilbuis. De spiraalboringen zijn verspreid over het noordelijke deel van de Veermansplaat, min of meer langs 3 meettraaien (Fig. 6.2). Daarnaast zijn ook enkele geïsoleerde boringen geplaatst. Enkele impressies van het veldwerk en landschap op de Noordkop zijn in Fig.6.3 weergegeven.

Er zijn ook 2 peilbuizen geplaatst, waarvan alleen PB-1 werd uitgerust met een diver plus barodiver, alsmede met een beschermkoker (Fig.6.3A).



FIG. 6.2. Locatie van de 21 spiraalboringen op de Veermansplaat, 2 peilbuizen (PB-1 en PB-2) en 3 profielen (A-C). Gewijzigd naar Oskam (2013).

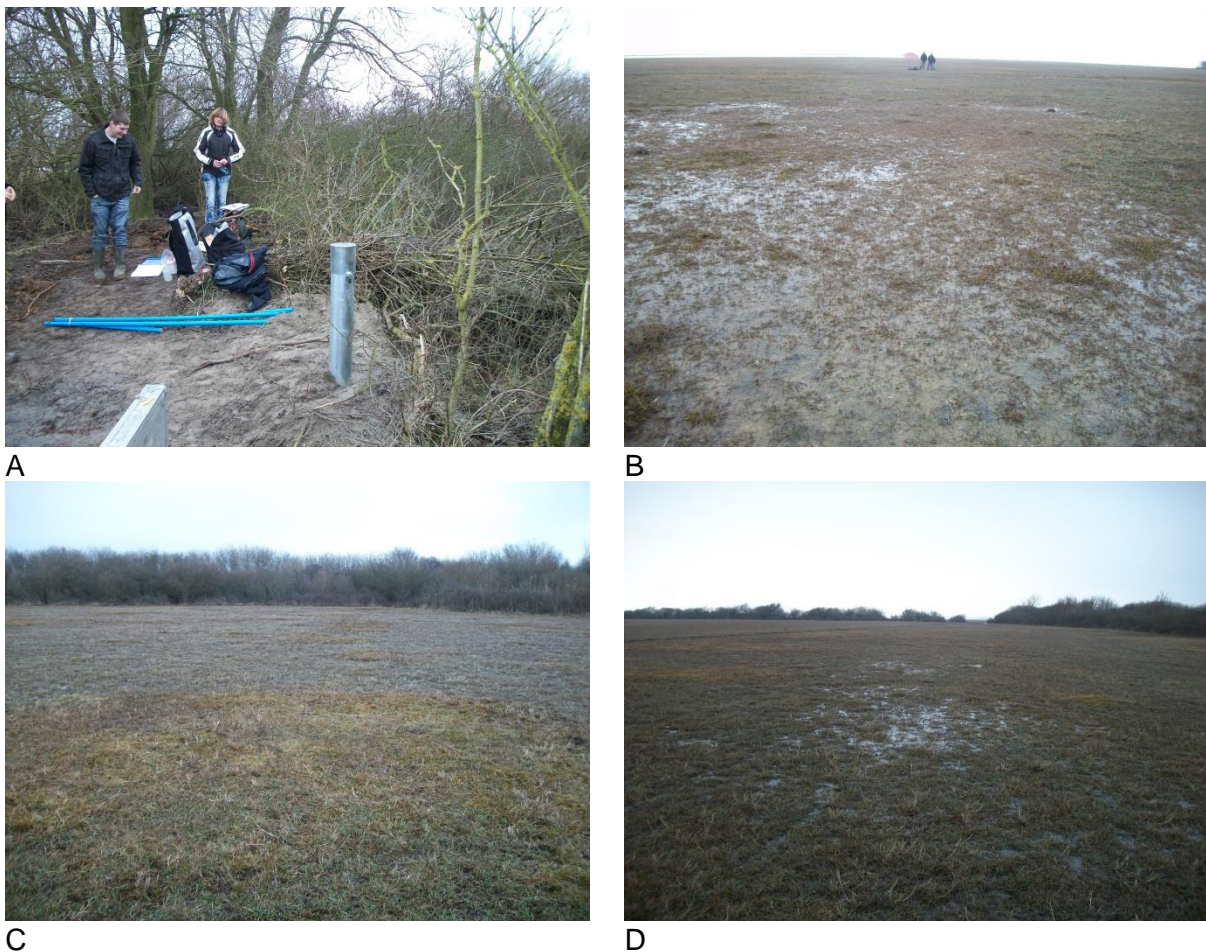


FIG. 6.3. Enkele impressies van de Noordkop van Veermansplaat en het verrichte veldwerk op 19 maart 2013. A: Danny van Loon en Brigit Oskam bij de zojuist geplaatste VU-peilbuis PB-1 op een stuifrichel; B: de schraal begroeide noordkop vanaf boring 1 in noordwestelijke richting; C: de schraal begroeide noordkop vanaf boring 2 in zuidoostelijke richting, met op achtergrond het struweel op en achter de stuifrichel; D: de schraal begroeide noordkop vanaf boring 6 in oostelijke richting, met op achtergrond het smalle strookje struweel op de stuifrichel alwaar boring 20.

6.3 Hydrologische waarnemingen

6.3.1 Hydrogeologische opbouw

De ondergrond van de Veermansplaat kan worden afgeleid uit de 216 m diepe boring 42F23/30 (~7 km ten zuiden), twee ~30 m diepe steekboringen op de plaat (42F.72-73) en de TNO-grondwaterkaart van Cornelissen (1984). We vinden de hydrologische basis op 215 m-NAP waar zich de top van de Rupelklei bevindt. Daarboven van ~90 tot 215 m-NAP een slecht-doorlatend pakket van mariene slibhoudende zand- en kleilagen behorende tot de Formaties van Oosterhout en Breda. En daarop bevindt zich vermoedelijk een watervoerend pakket van maaiveld tot 90 m-NAP, dat op enkele diepten onderbroken is door discontinue leem/kleilagen, zowel bovenin (Westland Formatie) als op 30-35 en 50-60 m-NAP (Eem, Tegelen of Maassluis Formatie). De twee 30 m diepe boringen vertonen een afwisseling van fijn en matig grof zand, met als gemiddelde koorelengte 245 μm .

De Veermansplaat is ontstaan als plaat in een estuariumgebied. Omdat de plaat vrij ver landinwaarts ligt, is er voornamelijk matig fijn tot fijn zand afgezet. Daarnaast kent de plaat ook enkele ondiepe klei en siltlagen (Fig. 6.4). Uit Fig. 6.4 blijkt dat deze lagen zich vooral langs de randen van het eiland bevinden. Dit is bevestigd tijdens dit onderzoek, waarin klei- of siltrijke lagen voornamelijk op de noordelijke vlakte (gebied met lage begroeiing) zijn aangetroffen (Fig.6.5).

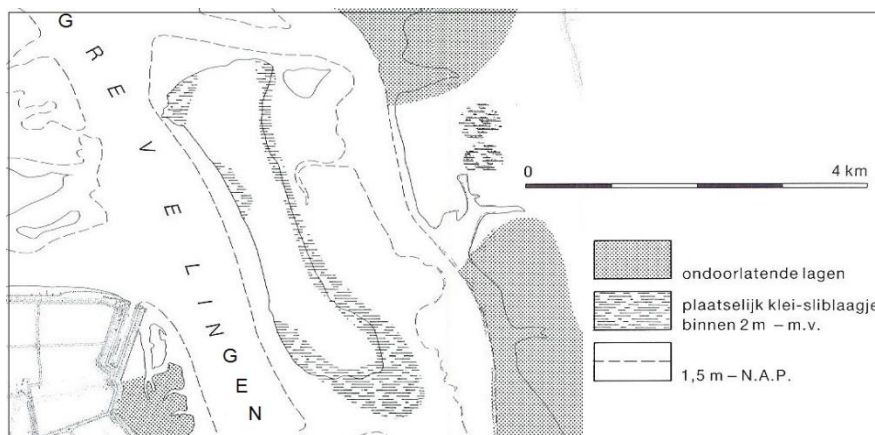


FIG. 6.4. Locaties van plaatselijke kleilagen op de Veermansplaat. (Slager en Visser, 1990)

6.3.2 Grondwateraanvulling

Met een gemiddelde jaarlijkse regenval van 797 mm/j (§ 6.1.1) komen we uit op de in Tabel 6.1 gegeven schatting van de grondwateraanvulling van zandgrond zonder oppervlakkige afvoer, als functie van de begroeiing.

Voor de Veermansplaat moeten we echter wel rekening houden met 3 belangrijke aspecten: (i) de begroeiing is in de loop der tijd vooral binnen de buitenste stuifrichels toegenomen (van kaal tot vergelijkbaar met een vochtige duinvallei met loofbos); (ii) de bulk van de grondwateraanvulling geschiedt binnen de buitenste stuifrichels, waar periodiek plasmvorming ontstaat met oppervlakkige afvoer naar lage delen, zonder dat er veel water ontsnapt naar het buitenwater; en (iii) buiten de buitenste stuifrichels, dus in de schraal begroeide oeverzone, vindt vooral kwel plaats met periodieke inundatie door hetzij zoet kwelwater hetzij zout Grevelingen water.



FIG. 6.5. Kaart met de diepteligging van een kleilaag per meetpunt in de bovenste 1,5 meter onder de grondwaterstand. Naar Van Loon (2013).

TABEL. 6.1. Grondwateraanvulling (R) als functie van de begroeiing, bij een jaarlijkse regenval (P) van 0.797 m. Berekeningen volgens DUVELCHEM (Stuyfzand, 2010). E = evapotranspiratie.

VEGETATION		EVAP			Conc.	R	
Type	Code	$R = (p \ln(P-c)/1000$			factor Evap	m/a	
	Prec (P) m/a =	p	c	E/P	$f_E = P/R$		
Bare	1	750.0	4330	0.144	1.171	0.681	
Bare + some mosses/grasses	Lys 1	741.6	4338	0.223	1.293	0.616	
Mosses	Mosses-1	3	730.0	4360	0.344	1.542	0.517
Poor dry dune veg, mix of mosses+grasses+bare	4	720.0	4370	0.438	1.810	0.440	
Dry shrubs (open), <50% mosses/grasses	5	710.0	4383	0.536	2.211	0.360	
Rich dry dune veg, Heather, Dry deciduous	Lys 2	6	702.4	4398	0.617	2.708	0.294
Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks	Lys 3	7	641.6	3977	0.601	2.578	0.309
Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	600.0	3750	0.664	3.083	0.259	
Pines, dense dry	9	550.0	3500	0.768	4.568	0.174	
Pines	Lys 4	9.5	504.3	3251	0.838	6.730	0.118
Pines, wet and dense	10	475.0	3100	0.894	10.857	0.073	

Fig.6.6 toont hoe hoge grondwaterstanden op een plaat de grondwateraanvulling kunnen verminderen, en dat de doorlatendheid van de ondergrond daarbij een cruciale rol speelt.

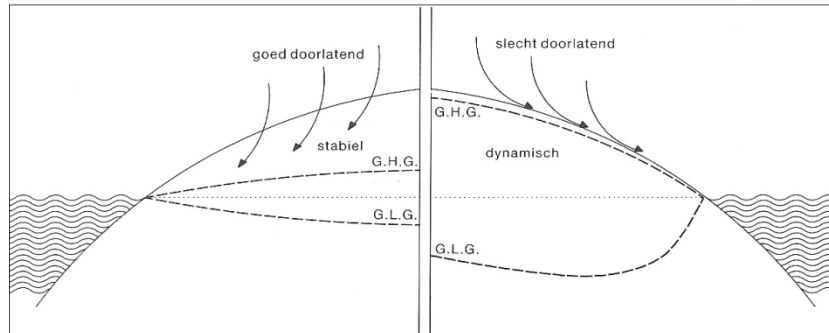


Fig. 6.6. Rol van de doorlatendheid van de ondergrond op de positie van GHG en GLG en op de grondwateraanvulling. Laatstgenoemde neemt af als een hoge grondwaterstand regenwater verhindert te infiltreren zodat het oppervlakkig moet afstromen. Naar Slager & Visser (1990).

6.3.3 Waterstanden en waterkwaliteit in de Grevelingen

Waterstanden

De voor Veermansplaat meest relevante meetpunten van de oppervlaktewaterstand zijn weergegeven in Fig.6.7: Bommenede (BOM1, 20 oktober 1987 t/m heden), Grevelingendam hevel West (HEWW, 13 januari 1999 t/m heden), Brouwershavensche Gat 8 (Brouwerssluis Binnen = BRBI, 25 mei 1998 t/m heden).

Gegevens over het peilverloop in het Grevelingenmeer zijn afkomstig uit het meetnet ZEGE, te vinden op www.hmcz.nl. Uit Fig.6.8 blijkt dat het peil gemiddeld op 19.6 cm - NAP uitkomt en dat het peil fluctueert tussen ca. 10 en 30 cm - NAP. In de figuur is tevens zichtbaar dat vanaf 2005 ten behoeve van broedende vogels het peil in de zomer iets wordt verlaagd en na het broedseizoen weer omhoog wordt gebracht.

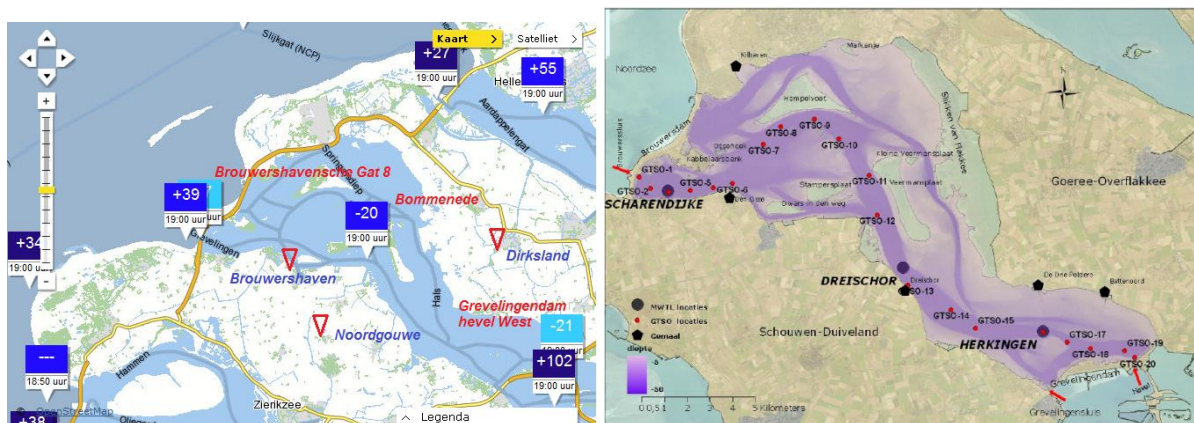


FIG. 6.7. Meest relevante RWS-metpunten in en rond het Grevelingenmeer. Links: meetnet van de zeewaterstand en Grevelingenstand voor de Veermansplaat: Bommenede, Grevelingendam hevel West en Brouwershavensche Gat 8. Tevens aangegeven de ligging van KNMI-regenstations Dirksland, Brouwershaven en Noordgouwe. De getoonde meetwaarden in cm+NAP zijn een momentopname op 20 November 2013.

Rechts: Meetlocaties oppervlaktewaterkwaliteit: de MWTL-locaties, de GTSO-locaties en de vijf op het Grevelingenmeer afwaterende gemalen. Naar Wetsteijn (2011).

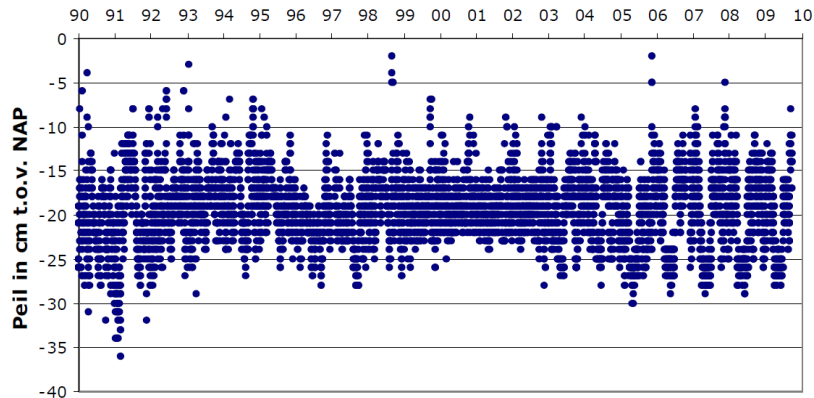


FIG. 6.8. Waterpeil in cm t.o.v. NAP (daggemiddelden) op de locatie Bommenede in de periode 1990 t/m 14 oktober 2009. Naar Wetsteijn (2011).

Waterkwaliteit

De meest relevante meetstations zijn Dreischor (meetnet MTWL) en GTSO-11 (Fig.6.7). Voor een overzicht van metingen in de periode 1990-2010 zij verwezen naar Wetsteijn (2011). Een samenvatting van data voor meetpunt Dreischor staat in Tabel 6.2, het Cl-verloop in de periode 1990-2008 is weergegeven in Fig.6.9. De Cl concentratie van het Grevelingenmeer in de periode 1990-2008 bedroeg gemiddeld 16.565 mg Cl/L.

TABEL 6.2. Overzicht van de kwaliteit van het Grevelingenmeer aan de oppervlakte op meetpunt Drieschor. Gebaseerd op data in Wetsteijn (2011). Oranje = stijgende trend; Groen = dalende trend.

Parameter	Unit	1990-2008			mean	
		min	mean	max	1990-1999	2000-2008
Temperatuur	oC	10.6	11.8	12.8	11.6	12.1
Saliniteit	psu	27.7	29.9	31.6	30.0	29.8
Cl	mg/L	15333	16563	17492	16601	16520
Zuurstof	mg O2/L	8.6	9.2	9.7	9.2	9.2
pH		8.06	8.18	8.33	8.20	8.15
Doorzicht	m	2.1	3.0	5.2	3.5	2.5
NH4-N	mg N/L	0.04	0.05	0.07	0.05	0.04
NO3-N	mg N/L	0.07	0.13	0.21	0.14	0.13
NO2-N	mg N/L	0.007	0.010	0.014	0.011	0.009
DIN	mg N/L	0.11	0.19	0.28	0.20	0.18
N-totaal	mg N/L	0.49	0.57	0.66	0.59	0.55
PO4-P	mg P/L	0.02	0.06	0.14	0.09	0.03
P-totaal	mg P/L	0.04	0.07	0.18	0.11	0.05
SiO2-Si	mg Si/L	0.16	0.22	0.30	0.24	0.20
DOC	mg/L	2.3	2.8	3.3	3.0	2.6
POC	mg/L	0.3	0.4	0.6	0.4	0.4
Zwevend stof	mg/L	1.9	3.4	8.2	3.1	3.8
Chlorofyl-a	µg/L	2.5	5.6	11.8	6.1	5.0

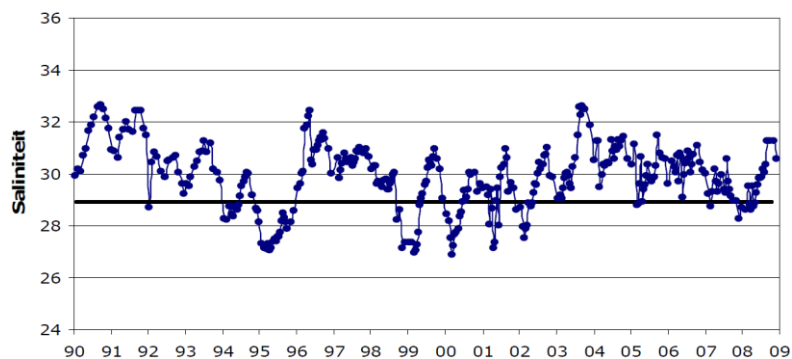


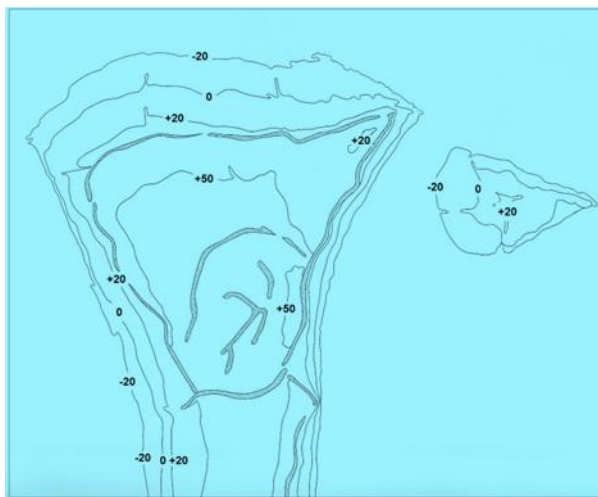
FIG. 6.9. Saliniteit (Total Dissolved Solids) in het Grevelingenmeer aan de oppervlakte bij Dreischor, in de periode 1990-2008. Naar Wetsteijn (2011).

6.3.4 Grondwaterstanden

In de periode 1972-1984

Slager en Visser (1990) hebben voor onder andere de Veermansplaat de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG) en gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) bepaald, voor de periode 1972-1984. De resultaten hiervan, samen met de maaiveldshoogte, staan in Fig.6.10. Deze resultaten zijn vervolgens gecombineerd met elkaar, met het lutumgehalte in de bovenlaag en met het zoutgehalte. Aan de hand van deze kenmerken maakten zij de milieutypekaart weergegeven in Fig. 6.11.

Deze kaart toont dat de Veermansplaat over het algemeen geen vochttekorten kent. Alleen in het noordelijk midden van het eiland (licht groene gebied in Fig. 6.11) is een dynamisch gebied aanwezig met relatief grote verschillen tussen GLG en GHG. Hier is het eiland ook iets hoger, waardoor dit gebied meer regen- en verdampingafhankelijk is. Daarnaast zijn ook de stuifruggen goed te zien op de kaart. Ook deze hoger gelegen delen van het eiland kunnen in de zomer tijdelijk vochttekort laten zien door verdamping.

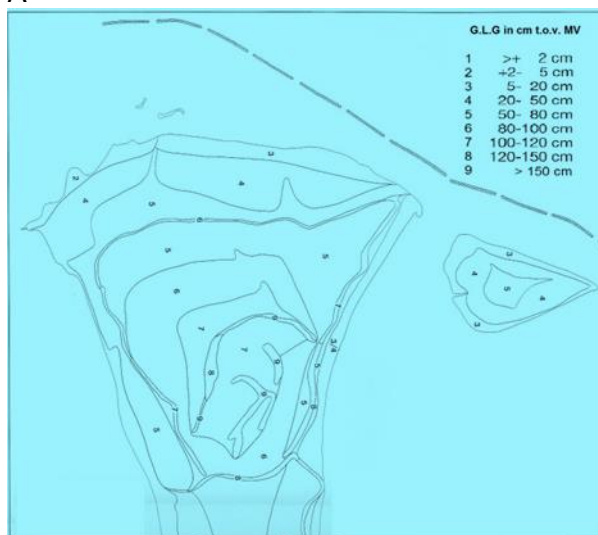


A

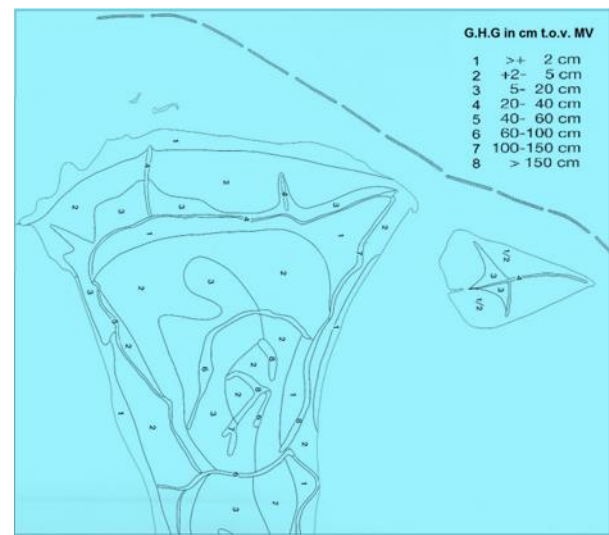
FIG. 6.10. Hoogteligging van maaiveld en de grondwaterstand op de Veermansplaat in de periode 1971-1984. De smalle gearceerde richel is de stuifrichel, die iets boven 1 m+NAP uitsteekt.

A: Hoogteligging van maaiveld in cm + NAP in 1974; **B:** Gemiddeld Laagste Grondwaterstand in periode 1971-1984; **C:** Gemiddeld Hoogste Grondwaterstand in periode 1971-1984.

Fragmenten van kaarten door Slager & Visser (1990).



B



C

Opvallend zijn de lichtblauwe delen aan de binnenkant van de stuifruggen. Hier verhinderen de stuifruggen dat het water direct over maaiveld afstroomt, waardoor op deze locaties het water tijdelijk op maaiveld kan blijven staan. Verder is het lutumgehalte op bijna de gehele plaat zeer laag (<1,5%), alleen aan de oostkant bevinden zich enkele delen met hogere gehalten. Het zoutgehalte is alleen hoog aan de kust, voornamelijk op de plaatsen waar de plaat af en toe nog overspoeld wordt (in Fig. 6.11 de lichtblauwe delen langs de kust).

Het verloop van de grondwaterstand op de Noordkop in meetput 42F.77 (Fig.6.12) toont aanvankelijk een snelle stijging als gevolg van de opbouw van een zoetwaterlens. Hierover meer in § 6.3.5 en in Ch.7.

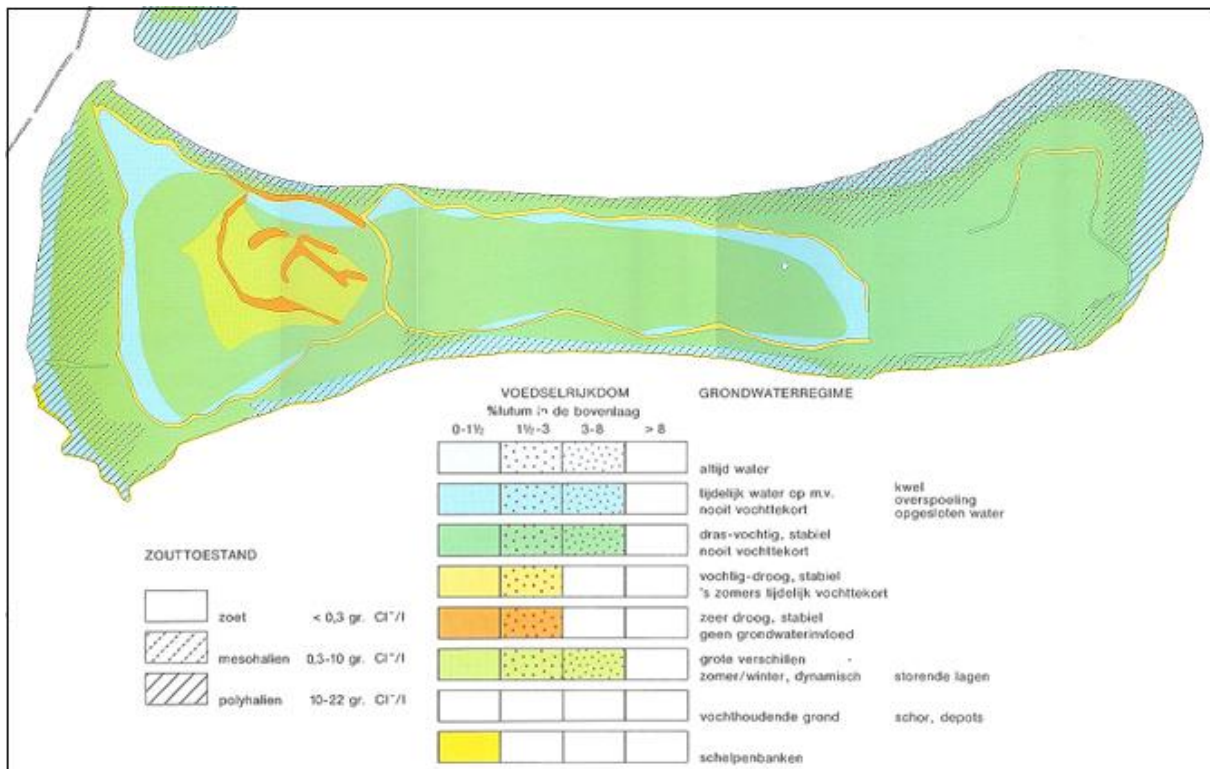


FIG. 6.11. Milieutypekaart van de Veermansplaat, met daarop aangegeven: het grondwater regime, het lutumgehalte en de zouttoestand. (Slager en Visser, 1990)

In 2013

Alleen in PB-1 zijn grondwaterstanden gemeten in 2013 met een diver plus barodiver (Fig.6.13). De meetwaarden zijn gemeten in cm beneden de bovenkant van de stijgbuis, die niet is ingemeten. De meetwaarden in Fig.6.13 zijn vertaald in een grondwaterstand t.o.v. NAP door de bovenkant van de stijgbuis te schatten op 1.1 m+NAP.

Het verloop etaleert een sterke daling in de periode maart t/m eind augustus, welke vooral het gevolg is van netto verdamping in de zomer. In het verloop is ook een kleine zaagtand te zien die in de winter zeer klein en in augustus vrij groot is. Dit betreft een dagelijkse schommeling ten gevolge van verdampingsverliezen, die in augustus groter zijn dan in de winter.

Uit deze dagelijkse schommelingen kan de dagelijkse evapotranspiratie (ET; mm/d) worden berekend, b.v. volgens de methode van White (1932). De te hanteren formule is als volgt (zie ook Fig.6.14):

$$ET = f S_Y (G_{REC} + \Delta S) \quad (6.1)$$

Waarin: S_Y = opbrengstcoëfficiënt nabij de grondwaterspiegel (specific yield); G_{REC} = de netto grondwaterstroming in een 24 uren periode [mm/d], zoals geëxtrapoleerd uit de helling van grondwaterstand van middernacht (00.00 h) tot 04.00 h; ΔS = dagelijkse daling van grondwaterstand [mm/d]; f = correctiefactor, volgens Meyboom (1967) ~ 0.5 .

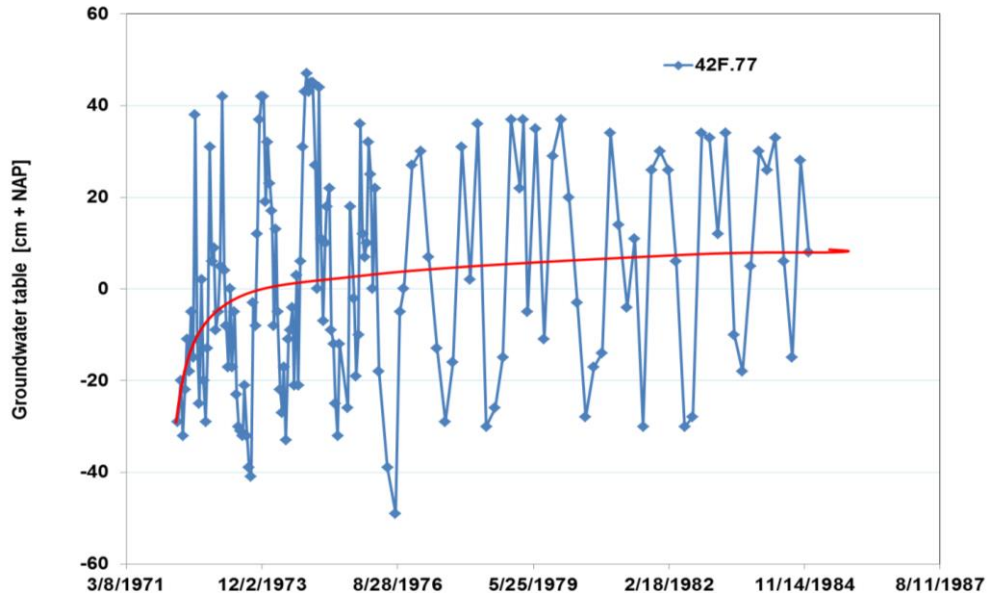


FIG. 6.12. Verloop van de grondwaterstand op meetpunt 42F.77 in de noordkop van Veermansplaat. Data ontleend aan Dinoloket. MV = ~ 55 cm+NAP.

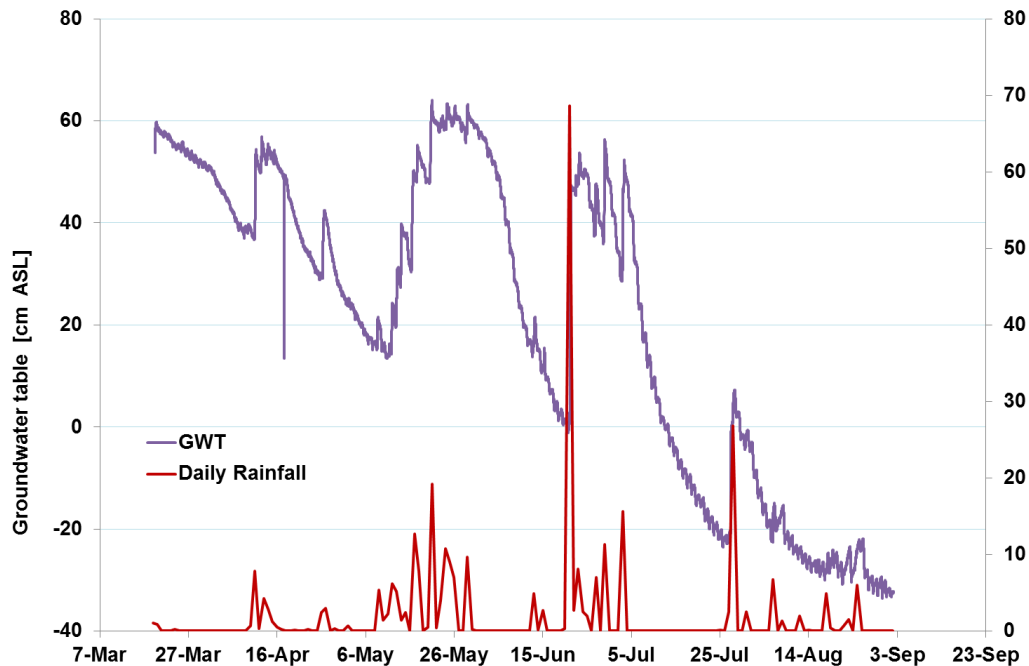


FIG. 6.13. Verloop van de grondwaterstand en dagelijkse regenval op de Noordkop van Veermansplaat, in peilbuis PB-1, van medio maart 2013 t/m 31 augustus 2013. Maaiveld op ca. 80 cm +NAP. ASL = Above Sea Level.

Uit Fig.6.15 volgt een dagwaarde voor 21 en 23 juli 2013, bij $S_V = 0.30$, van resp. $0.5 \cdot 0.3 \cdot (2.8+2)$ cm en $0.5 \cdot 0.3 \cdot (1.4+1.4)$ cm = 7.2 en 4.2 mm/d. Geen onrealistische waarden voor de zomer. Loheide (2008), Gribovszki et al. (2010) en Carlson Mazur et al. (2014) bespreken de diverse complicaties en enkele oplossingen bij het toepassen van deze bepalingsmethode van de ET.

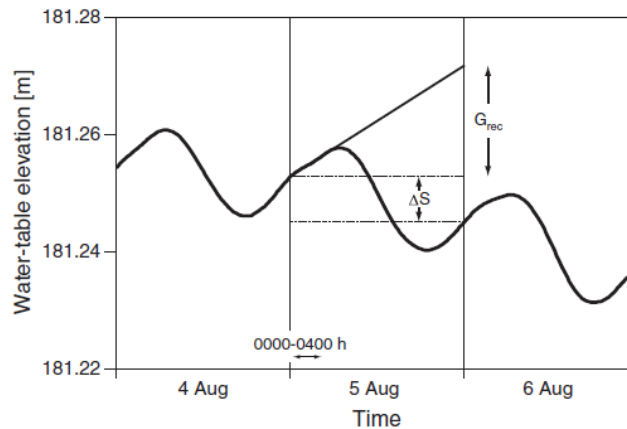


FIG. 6.14. White's (1932) empirische methode voor berekening van de dagelijkse evapotranspiratie uit het dagelijkse, bij benadering sinusoidale grondwaterstandsverloop in een gebied met ondiepe grondwaterstand waar freatofyten bij kunnen. Voor verdere uitleg zie Eq.6.1.

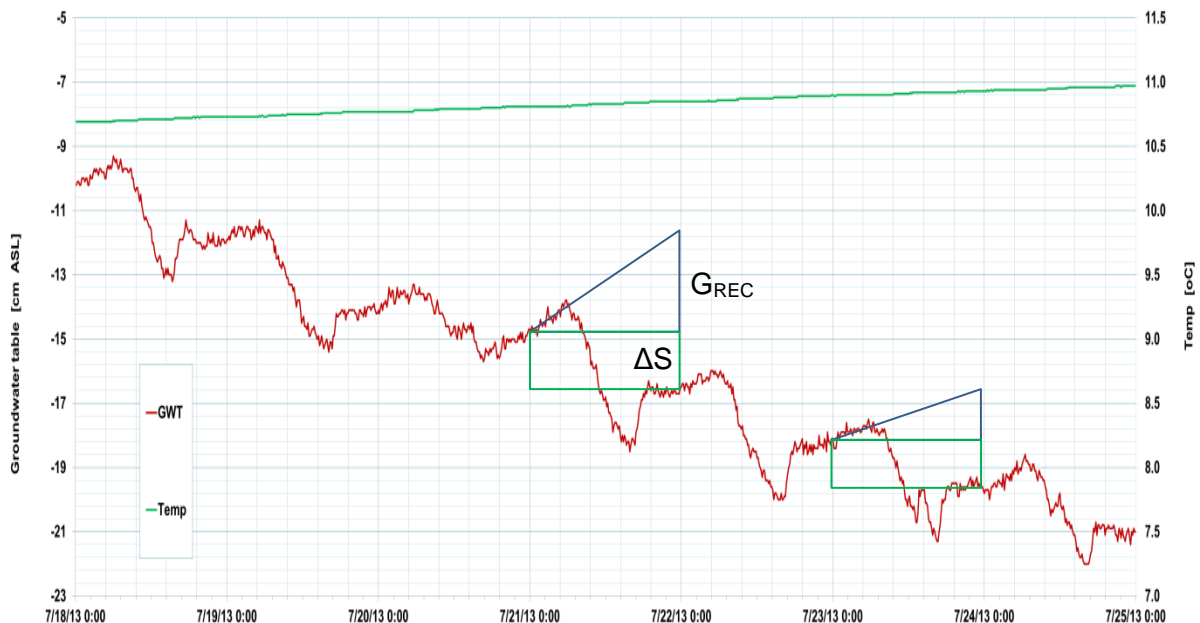


FIG. 6.15. Voorbeeld van de bepaling van de dagelijkse evapotranspiratie uit het bij benadering sinusoidale grondwaterstandsverloop op de Veermansplaat, waar de ondiepe grondwaterstand door freatofyten bereikt kan worden. Groene stijgende lijn is temperatuur grondwater in waarnemingsfilter.

6.3.5 Diepteligging van het zoet-zout grensvlak

Onder de Veermansplaat heeft zich in de afgelopen 42 jaar, sedert het verdwijnen van het getijde, een zoetwaterlens gevormd. Gegevens uit 1980 tonen dat de Veermansplaat 9 jaar na afsluiting een zoetwaterlens had van ruim 6 meter dikte op enkele plaatsen (Fig.6.16; Slager en Visser, 1990). Gegevens van 1992-1994 uit Dinoloket laten een lensdikte zien van

maximaal 14 meter in 1993 (Figuur 6.16-6.17 en Tabel 6.3). In Fig.6.17 zijn de Cl⁻ diepteprofielen weergegeven, en in Fig.6.18 staat een lengteprofiel over het eiland met de isoconcentratielijnen voor chloride.

Uit Figuur 6.16 volgt dat de zoetwaterlens in het noorden een grotere dikte heeft dan in het midden en zuiden van de plaat. De plaat is in het noorden breder en hoger ten opzichte van de andere twee locaties. Uit Tabel 6.3 volgt dat de lensdikte in de periode 1980-1993/4 met 2 tot 8.7 m is toegenomen, en dat de overgangszone van zoet naar zout (150 of 300 naar 15.000 mg Cl/L) 4.4-7.5 m bedraagt. Dit zijn belangrijke cijfers waarop het model HYDROLENS gecalibreerd kan worden (→ §.7.?).

De snelle stijging van Cl⁻ concentraties aan de randen van de plaat komt overeen met de gegevens uit het huidige onderzoek. De Cl⁻ concentraties zijn alleen ruim 2 maal hoger op de plekken waar de oeverzoom periodiek overstroomt.

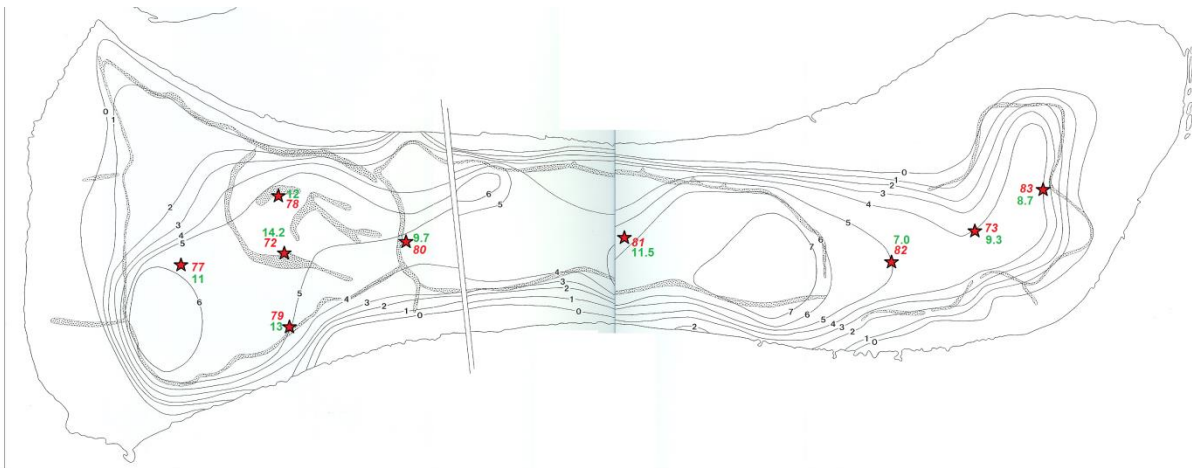


FIG. 6.16. Diepteligging in m-NAP van het 9.000 mg Cl/L grensvlak op de Veermansplaat in 1980, met de meetpunten (rode ster) en diepteligging (groen getal) in 1992-1994. Gewijzigd naar Slager & Visser (1990).

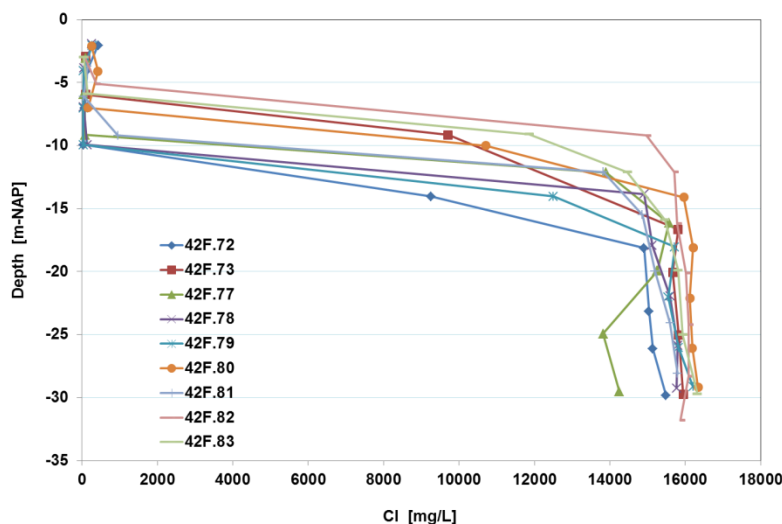


FIG. 6.17. Verticale chloride-profielen op 9 meetpunten op de Veermansplaat in 1993-1994. Gebaseerd op data verkregen van Dinoloket. Kengetallen van de ligging van het zoet-zout grensvlak op de 9 meetlocaties zijn gebaseerd op deze diepteprofielen en vermeld in Tabel 6.3.

TABEL 6.3. Kengetallen van de ligging van het zoet-zout grensvlak op de 9 in Fig.6.13 aangegeven meetpunten, in 1980 en 1993-1994. 150, 300, 10000 en 15000 = Cl-concentraties in mg/L. Overgang = dikte zone tussen 150 of 300 mg Cl/L en 15000 mg Cl/L. Expansie = verdieping 10000 isohaline in periode 1980-1994. Rose = maximum; Groen = minimum waarde.

Boring Nr	X m	Y m	MV m+NAP	1980 10000	1993-1994				Overgang m	Expansie m
					<150	300	10000	15000		
42F0072	58582	418960	1.05	5.5	11.0	11.5	14.2	18.3	7.3	8.7
42F0073	59660	416574	0.35	4.0	6.0	6.5	9.3	12.5	6.5	5.3
42F0077	58381	419295	0.55	5.5	9.3	9.8	11.0	15.5	6.2	5.5
42F0078	58760	419045	0.65	5.5	9.6	10.1	12.0	14.0	4.4	6.5
42F0079	58409	418861	0.65	5.0	10.8	11.3	13.0	16.0	5.2	8.0
42F0080	58791	418606	0.7	5.0	1.0	7.5	9.7	13.5	6.5	4.7
42F0081	59109	417790	0.6	6.0	7.5	8.5	11.5	15.0	7.5	5.5
42F0082	59463	416920	0.3	5.0	3.5	4.5	7.0	9.3	5.8	2.0
42F0083	59758	416403	0.3	4.0	5.5	6.5	8.7	11.8	6.3	4.7

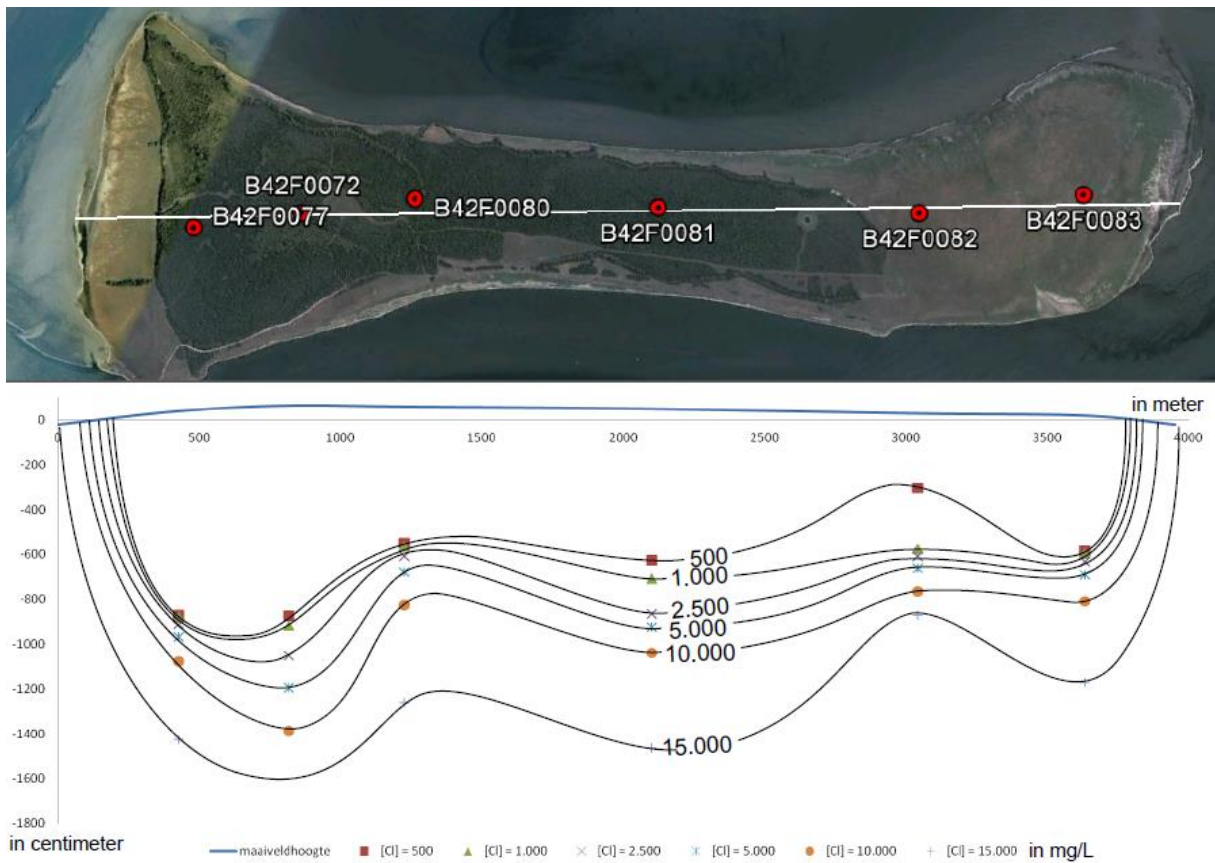


FIG. 6.18. Lengteprofiel van de zoetwaterlens onder de Veermansplaat in 1993. De punten zijn geïnterpoleerde Cl concentraties op basis van meetwaarden (in mg/L).

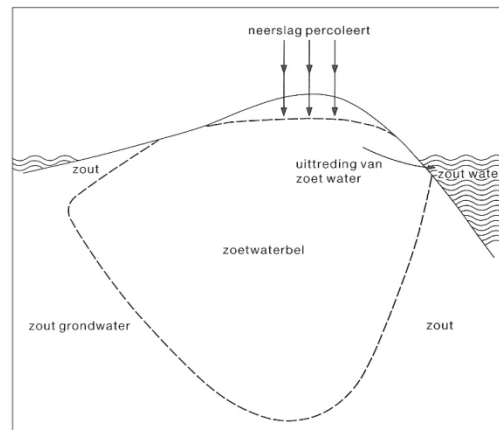


Fig. 6.19. *Typische dwarsdoorsnede van een langwerpige plaat die aan de ene zijde een flauwe helling vertoont en aan de andere zijde een steile helling t.g.v. de aanwezigheid van een geul. De invloed op de vorm van de zoetwaterlens is groot. Naar Slager & Visser (1990).*

6.3.6 Ontziltig

De ontziltingssnelheid blijkt volgens Deelman (1975) en Slager & de Visser (1990) afhankelijk van: (i) het neerslagoverschot ($P - E$); (ii) de verticale en horizontale doorlatendheid van de ondergrond (K_v en K_h); (iii) de overspoelingsfrequentie (n_{INUN}) welke afhangt van de hoogteligging van het maaiveld en de fluctuaties in oppervlaktewaterstand (o.a. bepaald door peilbeheer, windstuwning en golfwerking); en (iv) de afstand tot de oever (bepalend voor de overspoelingsfrequentie en het verhang van de grondwaterstand en daarmee de stroomsnelheid).

Bovenstaande conclusies zijn gebaseerd op vele metingen in de drooggevallen delen van het Grevelingenmeer. Fig.6.20 toont de invloed van het microrelief, en Fig.6.21-6.22 de invloed en omvang van de overspoelingsfrequentie.

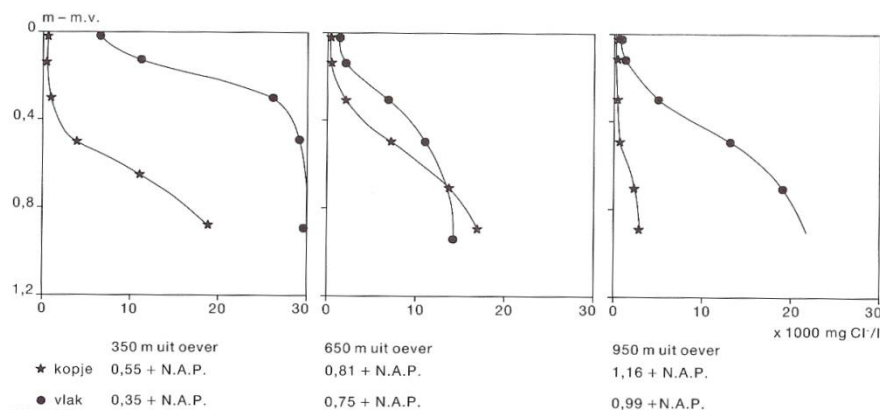


Fig. 6.20. *Invloed van microrelief op de ontziltingssnelheid op drooggevallen zandplaten in de Grevelingen (naar Slager & Visser 1990). Kopjes ontziltten sneller dan vlakke lagere delen.*

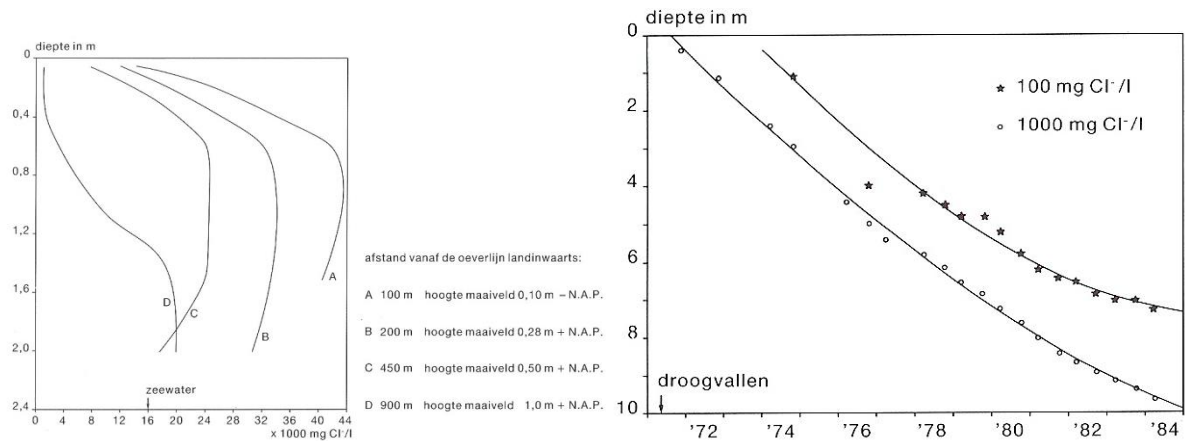


Fig. 6.21. Links: Effect van overspoelingsfrequentie op zoutgehalte grondwater (A = zeer frequent; D = geen). Rechts: Verloop van de ontzilting met de diepte in de der jaren sinds droogvallen zandplaat Hompelvoet in Grevelingen. Naar Slager & Visser (1990).

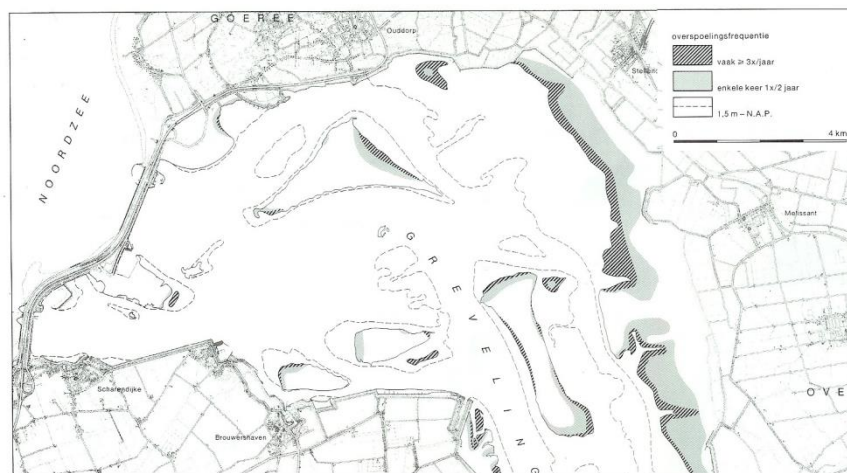


Fig. 6.22. Overspoelingsfrequentie van drooggevallen slikken en schorren in de Grevelingen, in de periode 1971-1984. Naar Slager & Visser (1990).

6.4 Ondiepe zoet-zout kartering op de Noordkop

Om de zoet-zout gradiënten van het grondwater via spiraalboringen te bepalen is van elk meetpunt op alle dieptes (7-10 vanaf grondwaterstand tot einddiepte van 1.5-2.2 m-MV) het EGV bepaald. De metingen zijn in beeld gebracht via een bovenaanzicht op 45 cm onder de grondwaterstand (Fig.6.23), en via 2 profielen (Fig.6.24). Voor bovenaanzichten op 15, 45, 90 en 105cm onder de grondwaterstand zij verwezen naar Oskam (2013).

In zowel kaarten als profielen van het EGV zijn overeenkomstige patronen te zien. Deze patronen betreffen een algemene toename van het EGV met toenemende diepte en met afnemende afstand tot de kust. De toename met de diepte wordt voornamelijk duidelijk in de profielen, maar ook op de verschillende kaarten is zichtbaar dat de waarden over het algemeen het hoogst zijn bij een diepte van 105 cm en het laagst bij een diepte van 15 cm. Deze toename met de diepte speelt aan de randen van het eiland een veel kleinere rol. Dit is goed te zien in profiel B bij boring 10 (Fig.6.24).

De enige plaatsen waar EGV inversies duidelijk voorkomen, zijn de wat drogere plaatsen, n.l. 17 en 18 (meer centrale deel van de zoetwaterlens) en 20 (op een beboste stuifrichel). Deze inversies getuigen van variaties in atmosferische depositie en evapotranspiratie.

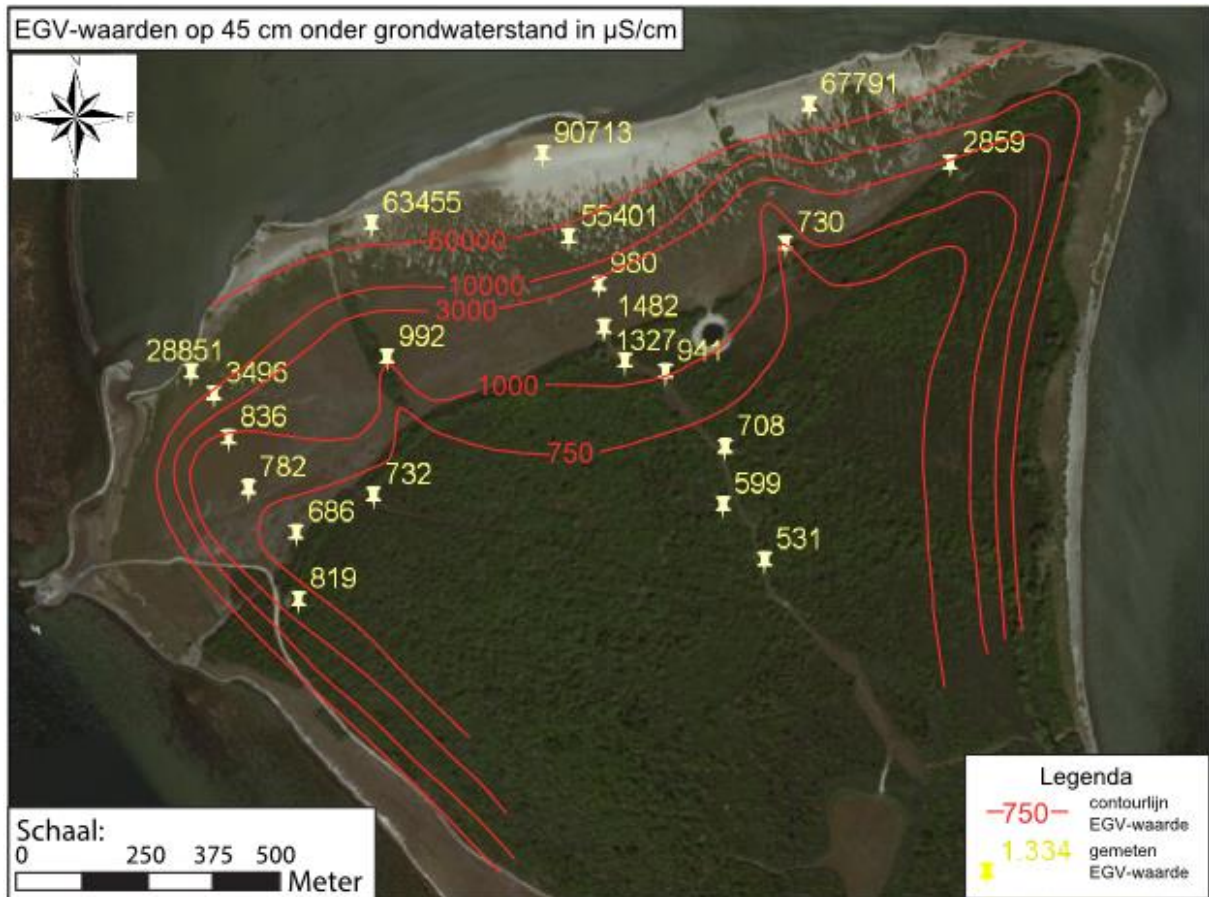


FIG. 6.23. EGV-contourenkaart op 45 cm onder de grondwaterstand in het onderzoeksgebied, met meetwaarden in $\mu\text{S}/\text{cm}$ bij 20°C. Opnamedatum: 19 maart t/m 17 april 2013. Naar Van Loon (2013).

Het EGV bereikt dicht bij de oever waarden die maximaal 2.2x hoger uitkomen dan de waarden van gemiddeld zeewater in de Grevelingen (43.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Dit is het gevolg van verdamping van overspoeld Grevelingenwater.

Bij de meetpunten 1, 2 en 6, aan de westkant van het onderzoeksgebied blijft het grondwater tot vrij dicht aan de kust redelijk zoet. Dit wordt veroorzaakt doordat hier minder periodieke inundatie plaatsvindt en de zoete kwel sterker is.

De invloed van microrelief op de zoet-zout verdeling is zichtbaar bij boringen 6 en 12, waar tot iets grotere diepte lagere EGV-waarden zijn gemeten. Deze meetpunten lagen ten opzichte van hun zeer nabije omgeving <10 cm hoger. Ook de stuifrichels bij boring 8 en 20 hadden een dergelijk effect.

Voor de verspreiding van de groenknolorchis is de saliniteit van het zeer ondiepe grondwater blijkbaar belangrijk. In Fig.6.25 is te zien waar de groenknolorchis voornamelijk voorkomt en hoe dat zich verhoudt tot het EGV op 15 cm onder de grondwaterspiegel. De groenknolorchis lijkt zich in het onderzoeksgebied voornamelijk te vestigen in gebieden met zoet tot licht brak grondwater. Dit zijn de locaties op de laag begroeide vlakte, vlak buiten de stuifrug die het grootste deel van het eiland omringt.

In gebieden met (zeer) zout grondwater vestigt de plant zich niet. In het westelijk deel van het onderzoeksgebied is een verlaging van het EGV te zien ten opzichte van andere locaties op ongeveer gelijke afstand van de kust. Dit is ook de locatie waar de groenknolorchis veel voorkomt (Fig.6.25). In het leefgebied van de groenknolorchis variëren de EGV waarden 600 tot 2.000 μS op 15 cm onder de grondwaterstand. Deze waarden kunnen oplopen tot ca. 10.000 μS op één meter daaronder !

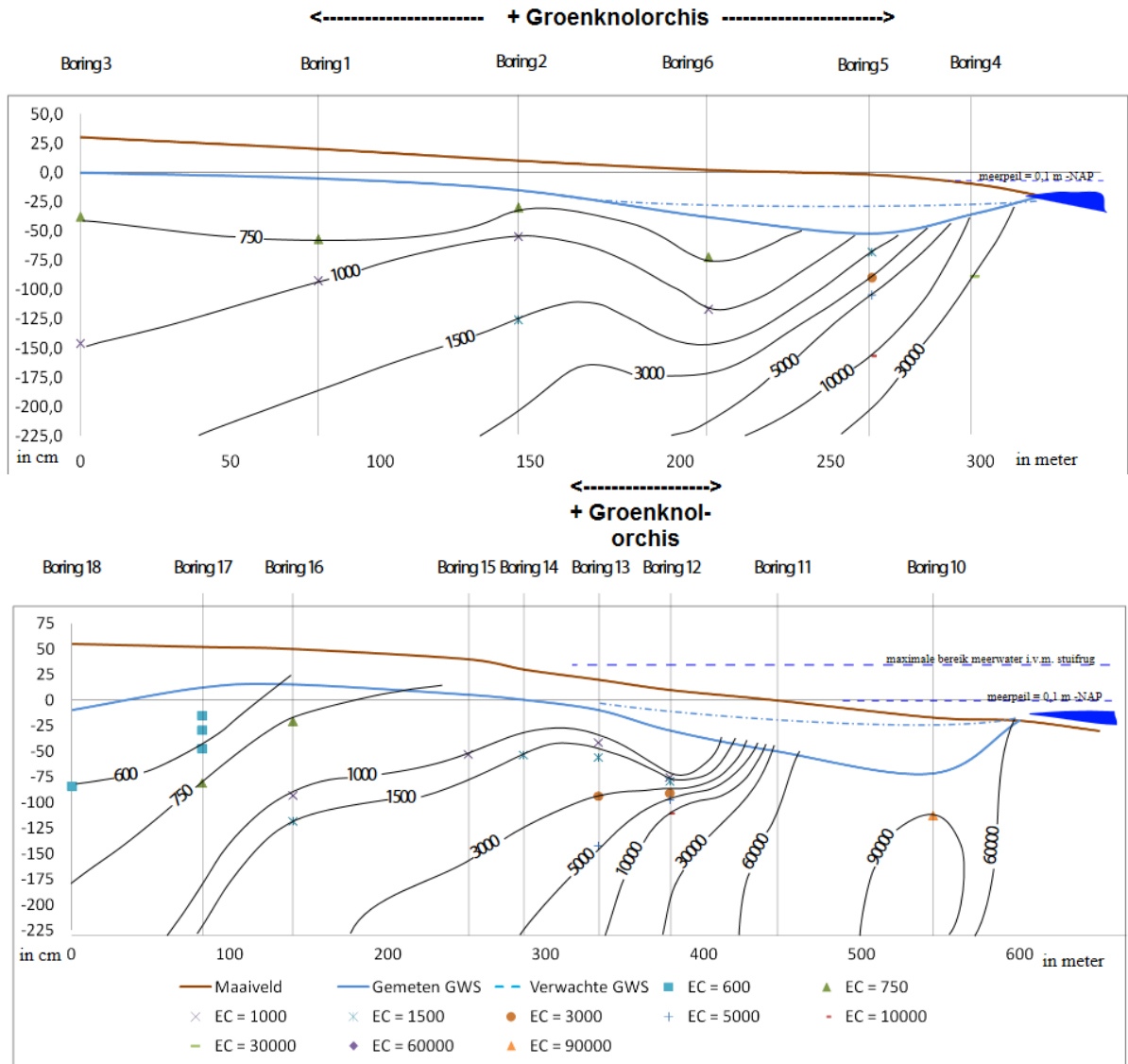


FIG. 6.24. Profiel A (boven) en B (onder), met de EGV-waarden (in $\mu\text{S}/\text{cm}$ bij 20°C) van het grondwater. Opnamedatums: 10, 15 en 16 april 2013. NB: grondwaterstand is te diep bemeten t.g.v. trage toestroming in boorgat. Gewijzigd naar Van Loon (2013).

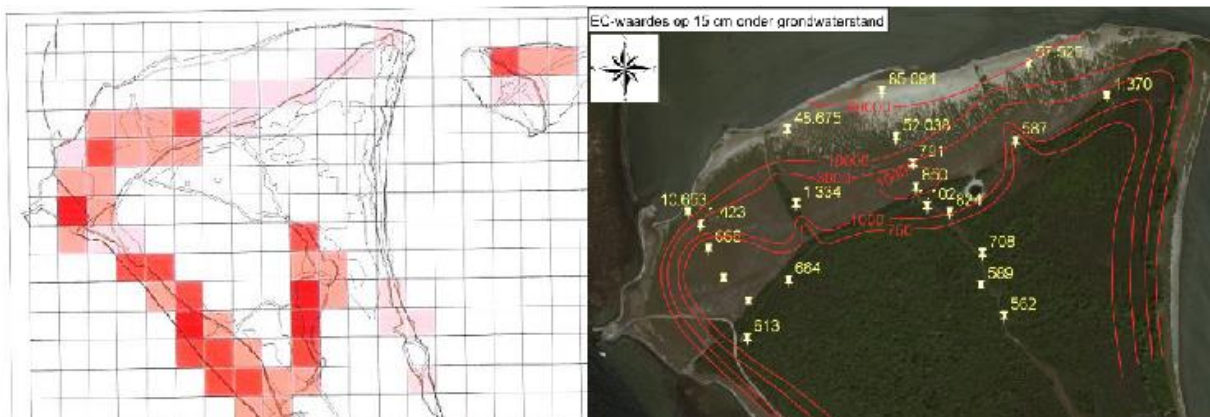


FIG. 6.25. Links het voorkomen van de groenknolorchis op een gedeelte van de Veermansplaat (Kraker, 2012) en rechts het EGV (in $\mu\text{S}/\text{cm}$) op 15 cm onder de grondwaterstand (Oskam, 2013).

6.5 Patronen in grondwaterkwaliteit

6.5.1 Globaal overzicht

De grondwaterkwaliteit op de 21 ondiepe meetpunten ($\leq 2,2$ m-MV) op de noordkop van Veermansplaat in maart-april 2013 is samengevat in Tabel 6.4. Zij vertoont een enorme variatie, van oligohalien-zoet (Cl < 30 mg/L) t/m hypersalien (Cl > 20.000 mg/L), van nitraathoudend ((sub)oxisch) t/m sulfaatloos (methanogeen), en van atroof (EPI < 0.5) t/m sterk eutroof (EPI 4,5-5,5), altijd met stikstof beperking. Het grondwater is overal kalkrijk en kalk(over)verzadigd (SI-calciet > 0), en bevat relatief veel SiO_2 ten gevolge van het oplossen van vooral biogeen opaal (diatomeeën e.d.).

De laagste saliniteit treffen we aan op zekere afstand van de oever, waar overspoeling zelden of nooit optreedt, en de hoogste dicht bij de oever (Fig.6.24-6.25).

De groenknolorchis komt voornamelijk voor waar het bovenste grondwater zoet tot licht brak (Cl < 300 mg/L) was in de winter. Omdat zich daaronder brak grondwater (Cl = 300-1.000 mg/L) bevond, is de kans groot dat die grondwaterkwaliteit ook periodiek te vinden is op de standplaats van de Groenknolorchis. Verdere kengetallen van de standplaats zijn: anoxisch (geen SO_4 -reductie, hoog Fe, geen NO_3), $\text{NH}_4 < 0,2$, $\text{PO}_4 < 0,2$, $\text{SO}_4 < 150$, hoog Ca en kalk(over)verzadigd, en meest dominante watertype $\text{F}_4\text{CaHCO}_3+$.

TABEL 6.4. Samenvatting van de grondwaterkwaliteit op de 21 ondiepe meetpunten ($\leq 2,2$ m-MV) op de noordkop van Veermansplaat in maart-april 2013. Groene regels = met groenknolorchis; BLS = Below Land Surface. Vegetatie beoordeeld op basis van kaart door de Kraker (2012). 10 k = 10.000. NB: Monsters met $> 20 \mu\text{g Al/L}$ zijn gecorrigeerd voor filtratiefouten t.a.v. Al, Ba, Cr, Pb, V en Zn.

Sample	Depth	EC	pH	Cl	SO4	HCO3	NO3	PO4	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn	NH4	SiO2
	m BLS	lab	lab	mg/L	mg/L	mg/L	mg NO3/L	tot	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg NH4/L	mg SiO2/L
MIN	0.4	531	7.03	8	0	406	0.0	0.019	5.4	1.1	30.4	3.5	0.04	0.01	0.001	9.7
MEAN	1.0	13900	7.58	6027	855.3	687	0.2	1.901	3555.3	156.3	230.2	482.5	6.68	0.54	1.041	30.5
MAX	2.2	94872	8.36	46910	6090.8	2387	4.0	16.339	28026.0	1094	667.9	3867.9	38.29	3.11	19.320	86.4
Cl < 30	1.1	650	7.58	15	13.6	491	0.0	0.075	12.3	5.4	149.0	8.7	3.20	0.48	0.064	17.9
Cl = 30-150	1.0	953	7.49	70	37.8	604	0.0	0.148	58.6	20.5	146.6	28.7	7.86	0.55	0.146	29.3
Cl = 150-300	0.8	1554	7.43	190	160.7	755	0.1	1.588	162	28.9	212.7	40.8	13.04	1.06	0.065	30.6
Cl = 0.3-1 k	1.0	2669	7.73	570	62.9	971	0.3	3.899	540.1	48.6	80.8	58.6	3.19	0.25	0.400	50.3
Cl = 1-10 k	1.3	11109	7.96	3807	629.3	1427	1.1	5.310	2445.8	123.4	136.9	251.7	1.75	0.13	4.605	52.0
Cl = 10-20 k	0.9	31285	7.33	11948	2038.9	898	1.2	1.298	7016.6	292.7	526.6	951.7	24.03	0.43	1.841	32.3
Cl > 20 k	1.0	68901	7.72	32261	4339.3	550	0.5	5.977	18782.7	748.4	588.7	2523.0	4.50	0.64	3.259	26.3
Lipares high	0.5	889	7.33	87	18.7	567	0.1	0.056	91.3	16.4	131.3	21.3	4.64	0.37	0.060	19.8
Lipares low	0.5	944	7.39	110	17.0	563	0.1	0.157	80.0	15.0	125.5	23.4	12.83	0.60	0.156	23.0
No Lipares	0.6	20033	7.52	8869	1259.1	552	0.2	1.701	5151.9	205.2	276.6	687.3	6.60	0.75	1.145	17.7

Sample	Depth	EC	Al	As	B	Ba	Br	Co	Cr	Cu	Li	Mo	Ni	Sr	V	Zn
	m BLS	lab	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L	ug/L
MIN	0.4	531	0	0.1	1	1.6	15	0.4	0	0.1	4.1	0	0	303	0.1	4.4
MEAN	1.0	13900	1	6.5	1385	27.8	20329	6.3	0.8	2.3	84.8	2.6	3.7	2580	2.8	32.7
MAX	2.2	94872	20	72.1	6659	219.4	165957	33.9	6.6	21.8	445.9	13.1	36.8	12844	26.7	127.6
Cl < 30	1.1	650	< 20	5	38	5.8	74	4.9	0.6	1.6	9.7	2.1	4	627	3.1	27.1
Cl = 30-150	1.0	953	1	6.8	231	8.9	257	3.6	0.8	2.1	24	2.4	4.2	797	2.9	29.7
Cl = 150-300	0.8	1554	< 20	8.2	433	16.8	523	3.4	1.2	1.5	36.5	2.9	3.6	1257	2.7	33.8
Cl = 0.3-1 k	1.0	2669	< 20	2.7	1042	22.5	1985	1.7	1.1	1.1	36.4	0.5	1	701	2.8	12.9
Cl = 1-10 k	1.3	11109	4	3.5	2461	79.8	12145	3.4	0.9	1.7	85.3	1.6	0.3	1729	0.9	15.6
Cl = 10-20 k	0.9	31285	< 20	1.3	2635	62.8	34876	9.2	0.0	5	208	0.4		6454		31.8
Cl > 20 k	1.0	68901	< 20	11.5	5528	74.8	110072	18.7	0.3	4.3	334.6	5.9	4.7	10192		62.3
Lipares high	0.5	889	< 20	10.1	216	4.5	409	3.3	0.5	1.4	14.5	1.8	2.5	772	0.9	18.7
Lipares low	0.5	944	2	12.4	186	17.5	351	6.3	1	6.5	14.5	4.6	6	671	3	47.6
No Lipares	0.6	20033	< 20	13.3	1655	27.7	29789	10.9	1.4	4.9	97.7	3.6	8.9	3381	7.4	54.8

Sample	Number	EC	Cd	Pb	BEX	Chem.Wtype	SI	Marine	Cont	Ocean	EPI	E cations	Σ anions	F	Lipares
	samples	lab	ug/L	ug/L	meq/L	Code	calcite	% TDS		% Mix	N-limited	meq/L	meq/L	mg/L	present
MIN	67.0	531	0.00	0.1	-3.47		0.07	2.4	0.1	0.0	0	7.0	7.1	0.11	
MEAN	67.0	13900	0.35	13.4	16.21		0.68	35.4	62.5	30.3	2.1	210.1	199.1	0.69	
MAX	67.0	94872	1.92	91	147.59		1.57	99.9	96.9	100.0	5.4	1598.8	1458.5	1.68	
Cl < 30	10.0	650	0.16	1.7	0.93	g4CaHCO3+	0.76	3.9	94.4	0.0	1.4	9.0	8.8	0.28	2.5
Cl = 30-150	29.0	953	0.24	4.3	3.31	F4CaHCO3+	0.68	12.7	84.5	0.2	1.9	13.1	12.7	0.65	3.9
Cl = 150-300	5.0	1554	0.33	5.6	5.41	f4CaHCO3+	0.76	21.6	69.9	0.8	1.4	22.3	21.1	1.06	7.5
Cl = 0.3-1 k	5.0	2669	0.17	3.2	12.33	B4NaMix+	0.72	43.3	56.5	2.7	2.7	33.7	33.4	0.84	0
Cl = 1-10 k	5.0	11109	0.29	11.4	15.18	b5NaCl+	1.04	77.8	21	19.1	4.4	137.4	144.0	0.85	0
Cl = 10-20 k	2.0	31285	0.29	21.4	29.9	S4NaCl	0.56	91.4	7	60.3	3.8	418.2	394.2	0.48	0
Cl > 20 k	11.0	68901	1.02	55.6	68.75	H4NaCl	0.66	97.9	2.1	100.0	4.1	1073.4	1009.4	0.92	0
Lipares high	4.0	889	0.06	5.2	3.51	F4CaHCO3+	0.4	16.5	82.7	0.3	1.5	12.9	12.2	0.87	10
Lipares low	4.0	944	0.35	4.7	2.47	F4CaHCO3+	0.45	20.5	79.2	0.4	2	12.5	12.7	0.77	5
No Lipares	13.0	20033	0.55	18.6	17.85	b4NaCl	0.44	94.6	5.3	44.7	3.4	300.0	285.5	0.68	0

6.5.2 Snelle clustering via Pearson correlatiematrix

Van het ondiepe grondwater op 21 lokaties op de noordkop van de Veermansplaat is een Pearson, lineaire correlatiematrix berekend met HGC in Excel. De resultaten staan in Tabel 6.5, terwijl Fig.6.26 toont met hoeveel parameters elke parameters correleert binnen een bepaalde klasse van correlatiecoëfficiënt R (boven 0,5 of onder -0,5). In Fig.6.26 zijn de parameters naar links opklimmend gesorteerd op hun correlatiescore CS (zie Eq.4.1).

De correlatiematrix in Tabel 6.5 toont de volgende clustering van parameters (-X houdt een negatieve correlatie in, X een positieve):

- (1) **zeezout** (Cl, EC, Na, K, Ca, Mg, SO₄, B, Br, Li, Sr en BEX, alle met R>0,9). Het voorkomen van Ca en BEX in deze groep is relatief bijzonder. De extreme zoutgehalten tgv indamping trekken Ca binnen deze groep, waar Ca anders alleen binnen een groep van kalkoplossing (Ca, Sr, HCO₃, -pH) valt. De basen uitwissel index BEX valt binnen deze groep omdat bij hoge saliniteit de VU-analyses structureel meer kationen dan anionen opleveren (~5%; Tabel 6.4). Dit wijst op een analyseprobleem, ook al is de resulterende ionenbalans zeer goed te noemen. De zeezoutgroep correleert negatief met X-MSL (afstand van meetpunt tot gemiddelde positie oever Grevelingenmeer), conform verwachting (zie ook Fig.7.6).
- (2) **zeezout en klei** (voorgaande groep + Al, Co, Eu, La, Pb, Tl en Yb met R>0,7; voorgaande groep + Ba, Cd, Sc en Sn met R = 0.5-0.7). Het is zeer opmerkelijk dat deze elementen positief correleren met zeezouten. Blijkbaar gaat een hogere saliniteit gepaard met een grotere kans op penetratie van ultrafijne kleideeltjes door het 0,45 µm membraanfilter. Tijdens de erop volgende aanzuring ter conservering lossen deze deeltjes (gedeeltelijk) op, en wordt hun concentratie dus kunstmatig verhoogd. De sporelementen zijn ten behoeve van de correlatiematrix niet voor eventuele filtratiebias gecorrigeerd, omdat de meetwaarden slechts een geringe overschrijding toonden en correcties altijd onzekerheden kennen. Het vermoeden bestaat dat Cd en Pb in zouter water kampen met corrosie van de spiraalboor.
- (3) **de zware mineralen groep**. Het betreft de onderling sterk correlerende elementen Be, Cr, Ti, V en Zr, die duidelijk niet gecorreleerd zijn met zeezout, in tegenstelling tot groep 2.
- (4) **oxidatie van organisch materiaal** (NH₄, PO₄, HCO₃, Ba en -SO₄C). Omdat vrijwel alle monsters nitraatloos zijn, is een negatieve waarde van SO₄ gecorrigeerd voor zeezout (SO₄C) een goede indicator van sulfaatreducerende omstandigheden. Omdat organisch materiaal vooral bestaat uit C, N en P is het logisch dat mineralisatie leidt tot concentratieverhoging van anorganisch C (HCO₃), NH₄ en PO₄, terwijl de oxidator SO₄ afneemt in concentratie. De Ba toename dient anders verklaard te worden, namelijk door oplossing van bariet (BaSO₄) tijdens sulfaatreducerende omstandigheden.
- (5) **bemonsteringsdiepte** (diepte, SiO₂ en HCO₃ met R=0.5-0.6; diepte, -Fe, -Mn, -Al, -As, -Cd, -Co, -Cu, -Mo, -Ni en -Zn met R=0.3-0.5). De positieve relatie met de diepte getuigt van voortgaande oplossing bij toenemende diepte, de negatieve relatie (wel zwak) wijst op toenemende vastlegging met de diepte b.v. in ijzersulfiden en op atmosferische inputs van met name Cd, Cu, Ni en Zn.

Bovenstaande clusters dienen met een specifieke cluster analyse geverifieerd en geëvalueerd te worden, maar zijn plausibel genoeg om zonder die bewerking te presenteren.

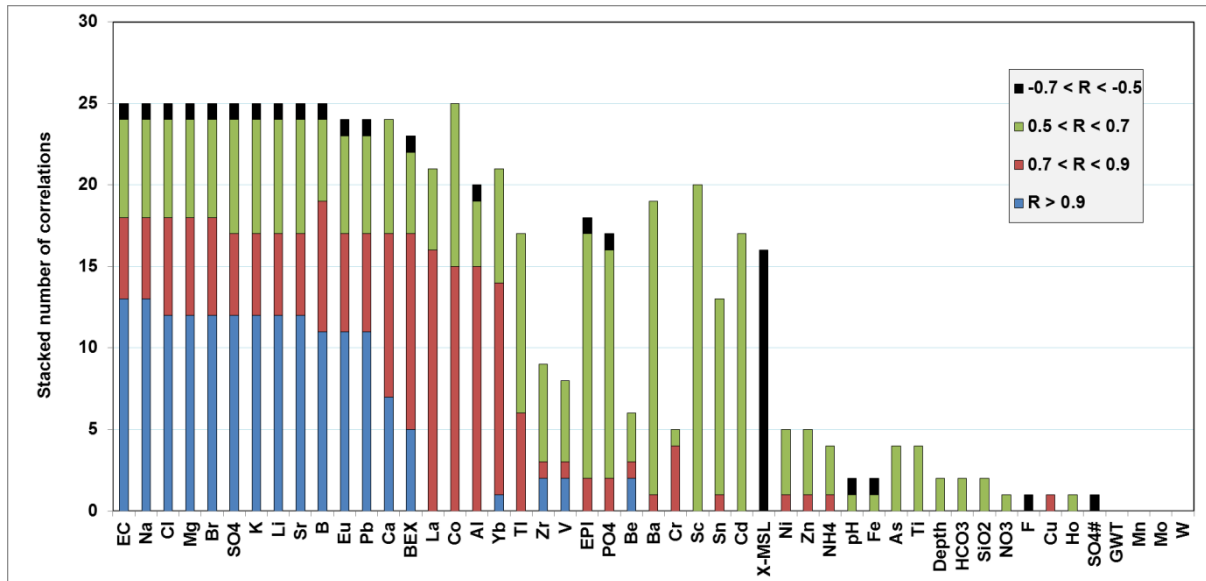


FIG. 6.26. Plot van parameters en het gestapelde aantal correlaties (>0.5 of <-0.5) van elk met alle andere parameters. De parameters zijn gerangschikt van een hoge naar een lage correlatiescore CS (zie tekst).

6.5.3 Relaties met chloride nader beschouwd

De sterke lineaire relaties van diverse elementen met Cl zijn weergegeven in Fig.6.27 (hoofdelementen SO₄, Na, K, Ca en Mg) en Fig.6.28 (spore-elementen B, Br, Li, Mo en Sr). In de figuren 6.27-6.28 is de belangrijke menglijn van regenwater met Standard Mean Ocean Water (SMOW) doorgetrokken, waarbij de concentraties in regenwater het punt X=0, Y=0 benaderen (op de gehanteerde schaal) en de lijn voorbij SMOW het effect van indamping weergeeft. We noemen deze lijn kortweg de 'SMOW-menglijn'. De Cl concentratie van het Grevelingenmeer in de periode 1990-2008 bedroeg gemiddeld 16.565 mg Cl/L; Tabel 6.2). We zien voor SO₄, Na, K, Mg en Br een vrijwel lineair verband met Cl, waarbij de regressielijn van Br-Cl vrijwel samenvalt met de SMOW-menglijn, die van Na-Cl, K-Cl en Mg-Cl er iets onder ligt en die van SO₄-Cl eerst erboven en dan eronder verkeert. De Br-Cl relatie wijst erop dat zeewater voor 100% de bron is van Cl en Br, en dat er bij het indampen van zeewater geen fractionering van Cl en Br is opgetreden.

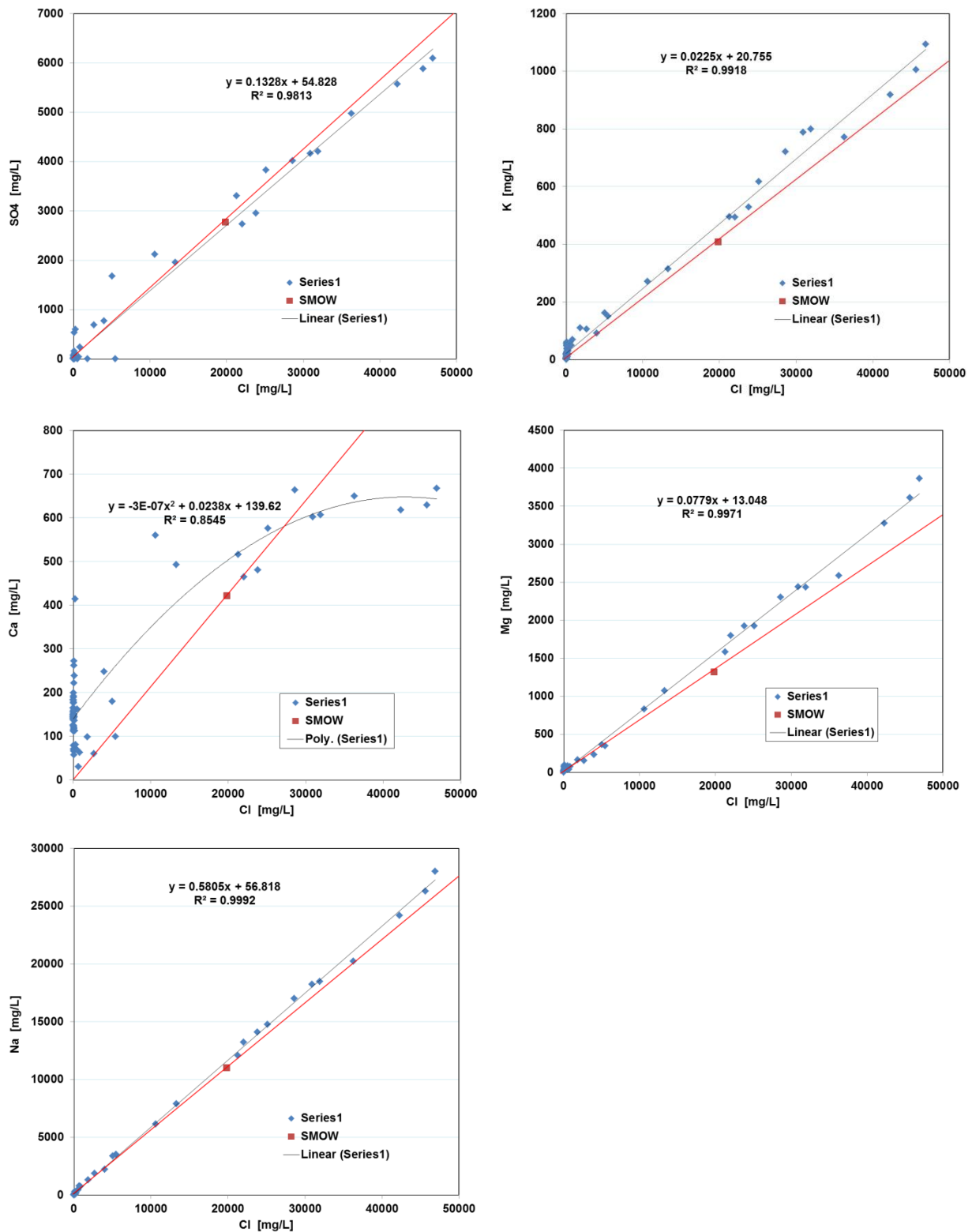


FIG. 6.27. Plot van SO₄, Na, K, Ca en Mg concentraties als functie van Cl. SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie. NB: Cl concentratie van Grevelingenmeer ca. 16.600 mg/L.

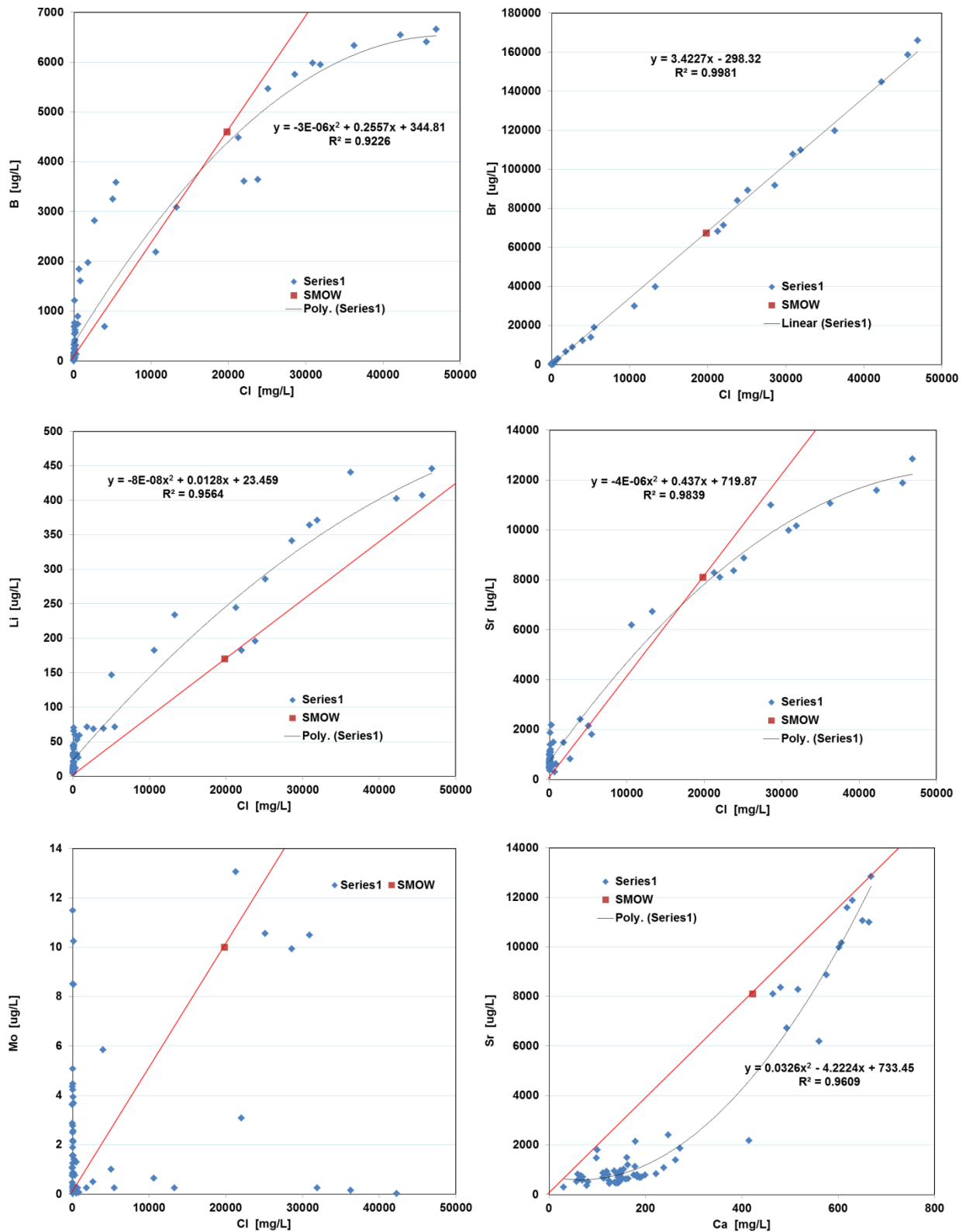


FIG. 6.28. Plot van B, Br, Li, Mo en Sr concentraties als functie van Cl, en van Sr als functie van Ca. SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie.
NB: Cl concentratie van Grevelingenmeer ca. 16.600 mg/L.

De Na-Cl, K-Cl en Mg-Cl regressielijnen wijzen erop dat de concentraties van Na, K en Mg grotendeels bepaald worden door zeewaterbijmenging en verdamping, maar wel een structurele extra bron kennen. Die bron kan kationuitwisseling door verzoeting zijn of oplossing van silicaatmineralen of een analysefout. In dit soort basische milieus stelt de bijdrage van de oplossing van silicaatmineralen kwantitatief weinig tot niets voor (Stuyfzand, 1993). Bij lage zoutgehalten is de bijdrage van kationuitwisseling door verzoeting zeer significant (Fig.6.29) en is er geen sprake van een structurele analysefout met ~5% teveel kationen. De kationuitwisseling door verzoeting kan worden voorgesteld als een verdringing van mariene kationen (Na, K en Mg; hoge concentratie in zeewater) door Ca (hoge concentratie in zoet grondwater) volgens de reactie aangegeven in Fig.6.30. Dit proces leidt tot een positieve BEX (Fig.6.30) en het ontstaan van chemische watertypen die zich richting verdringingsfront van zoet naar zout ontwikkelen volgens de volgende reeks: CaHCO_3^+ , MgHCO_3^+ , NaHCO_3^+ en NaCl^+ , waarbij de 'plus' staat voor een significant positieve BEX. Bij hogere zoutgehalten (ongeveer >10.000 mg Cl/L) lijkt de analysefout de dominante rol over te nemen van de kationuitwisseling tgv verzoeting. Wat SO_4 betreft zien we bij $\text{Cl} < 1.000$ mg/L (Fig.6.29) zowel een significante SO_4 -mobilisatie tgv pyrietoxidatie (meetpunten boven SMOW-menglijn) als een significante SO_4 -immobilisatie door pyrietvorming (meetpunten onder SMOW-menglijn).

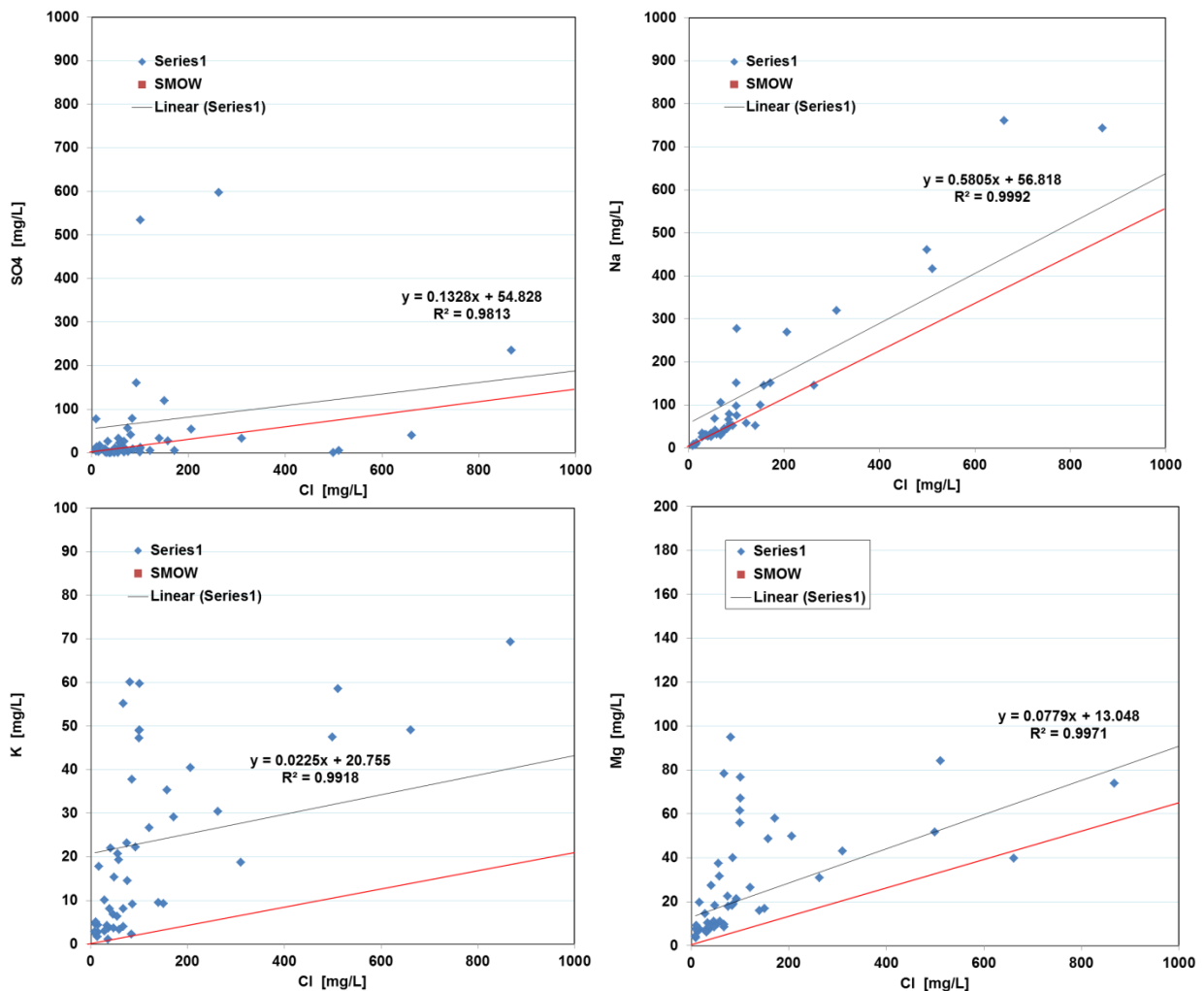


FIG. 6.29. Plot van SO_4 , Na, K en Mg concentraties als functie van Cl in lage bereik (<1.000 mg/L). SMOW = Standard Mean Ocean Water. Meetpunten boven de rode menglijn van regen- met oceaanwater, getuigen van oplossing of desorptie van het betreffende element. De elementen onder deze lijn zijn onderhevig aan precipitatie of adsorptie.

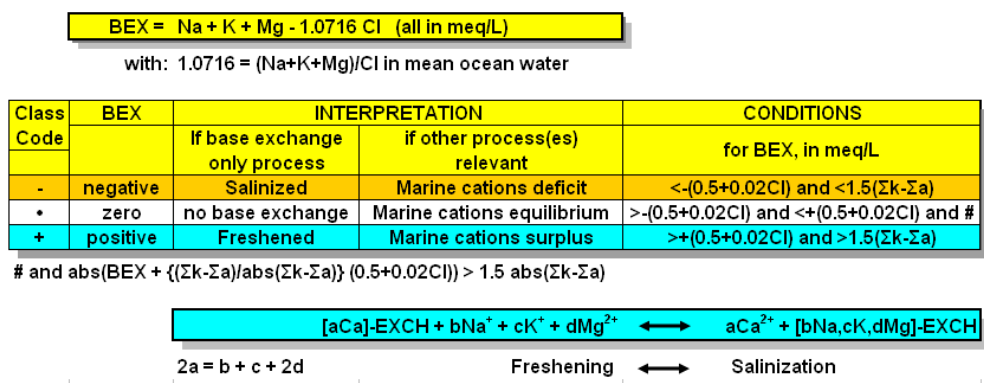


FIG. 6.30. Geschematiseerde kationuitwisselingsreactie tijdens zoet of zout water intrusie in de ondergrond (turquoise kader) en de definitie en interpretatie van BEX (Base Exchange Index). Naar Stuyfzand (1993, 2007).

Bovendien is SO_4 in geïnfiltrerd regenwater niet nul vanwege atmosferisch SO_x en SO_4 van sea spray, zodat de regressielijn bij $Cl=10$ mg/L niet uitkomt op 1,4 mg SO_4/L maar op 10-25 mg/L. In het traject tot ongeveer 25.000 mg Cl/L plotten de metingen redelijk nabij de SMOW-menglijn, bij hogere concentraties lijkt sprake van structurele SO_4 -immobilisatie. Deze SO_4 -afname kan verband houden met SO_4 -reductie, de neerslag van gips ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) of een structureel analyseprobleem waarbij SO_4 via IC te laag wordt gemeten. De concentraties Ca, Sr, B en Li laten een geheel ander patroon zien in hun relatie met Cl (Fig.6.27-6.28). Ca, Sr en B vertonen tot SMOW gemiddeld hogere concentraties dan de SMOW-menglijn, ten teken van mobilisatie, en bij $Cl > 16.000-26.000$ mg/L juist lagere wijzend op immobilisatie. De Ca en Sr toenames bij lagere concentraties verklaren zich door menging met zeewater en kalkoplossing. Hun adsorptie tijdens verzoeting (Fig.6.29; Sr volgt Ca) wordt ruimschoots gecompenseerd door kalkoplossing. De B toenames hangen vermoedelijk samen met desorptie tijdens verzoeting (Stuyfzand, 2014).

De afnames van Ca, Sr en B bij hogere concentraties (wanneer indampingseffecten gaan domineren, bij $Cl > 16.000$ mg/L) kunnen wijzen op gipsneerslag (Ca, Sr en SO_4 nemen dan af), en sorptie of neerslag van B.

Lithium vertoont over de volle Cl-breedte hogere concentraties dan de SMOW-menglijn. Dit is opmerkelijk omdat het beeld afwijkt van dat van de andere getoonde elementen. Bij de lagere Cl-concentraties sluit het beeld wel goed aan bij de geconstateerde kationuitwisseling tgv verzoeting. Li gedraagt zich het meest vergelijkbaar met K. Bij de hogere Cl-concentraties zou de analysefout een rol kunnen spelen.

Molybdeen, dat relatief hoge concentraties kent in SMOW, vertoont geen duidelijke relaties met de Cl-concentratie (Fig.6.28).

6.5.4 Andere patronen

De data etaleren nog vele interessante patronen. Vermeldenswaardig in dit verband zijn processen als de uitloging van pyriet, kalk en biogeen opaal (diatomeeën skeletjes) vooral binnen de hogere delen van de plaat waar infiltratie domineert over zowel kwel als laterale afstroming. Meer hierover in § 8.2.

7 Modelling van de zoetwaterlens met HYDROLENS

Pieter J. Stuyfzand

7.1 HYDROLENS 3.2

Het model 'HYDROLENS 3.2' (Stuyfzand, 2009 met belangrijke updates in 2013 en 2014) is reeds in § 2.7 geïntroduceerd. Het is geprogrammeerd in MS EXCEL spreadsheet, met als doel om zeer snel en eenvoudig de hydrologische consequenties te berekenen van diverse scenario's voor kustduinsystemen of drooggevallen zandplaten met of zonder Sea Level Rise (SLR) of kusterosie, en met of zonder kustaangroei (b.v. door zandsuppleties). Het model is gebaseerd op analytische oplossingen die door Stuyfzand (1993, 2014) en in Bijlage 1 nader worden toegelicht.

De volgende variabelen kunnen worden aangepast, naast de normale zoals grondwateraanvulling, permeabiliteit, verticale weerstand, porositeit, duinbreedte of breedte van infiltratiegebied: systeemtype (langgerekte zandige kuststrook aan landzijde begrensd door polder of droogmakerij; cirkelvormig of langgerekte eiland, langgerekte haakwal), saliniteit (EC of Cl) en temperatuur van zoet en zout grondwater, de transversale dispersiviteit van het poreuze medium, het drainageniveau in polder of droogmakerij (indien aanwezig), de verandering in duinbreedte en SLR.

ELONGATE: INFINITE DUNE STRIP (either mainland or island)				yellow = fill in	white = formula or text	blue = text							
Fresh		Salt		Aquifer CEC									
temp =	11	oC	10	temp =	11	oC	10	Clay %	1				
EC =	750	uS/cm	500	EC =	38400	uS/cm	45500	Main land = 1	C-org %	0.1			
Cl =	35	mg/L		Cl =	16500	mg/L		Barrier Island = 2	pH	7.5			
TDS =	523	mg/kg		TDS =	26795	mg/kg							
ρ -F =	1.0000	kg/L	1.0000	ρ -S =	1.0200	kg/L	1.0239		Clay = < 2um				
μ -F =	0.001271	kg m ⁻¹ s ⁻¹	0.001307	μ -S =	0.001327	kg m ⁻¹ s ⁻¹	0.001376	ACSL,BCSL = Above/Below Current Sea Level					
γ =	51.0												
Dune strip		Scenario		A	B	C	D	E	F	G	H		
B =	2000	m	Sand Suppletion	Δ pol =	0	0	0	0	0	0	0	m BCSL	
R =	0.45	m/a	Sea Level Rise	SS =	0	0	0	0	0	0	0	m	
α =	0.02000	49.997		SLR =	0	0.35	0.35	0.5	0.8	0.35	0.5	0.8	m ACSL
Kh 10oC =	6	m/d		Slope =	0.0017	0.0017	0.0041	0.0041	0.0041	0.0070	0.0070	0.0070	-
Kh temp =	6.2	m/d	at temp fresh	R(etreat) =	0	420	170	243	389	100	143	229	m
ϵ =	0.35	porosity		B-SLR =	2000.0	1580.0	1830.0	1757.143	1611.4	1900.0	1857.1	1771.4	m
D =	125	m-NAP		Δ BL =	0	0.35	0.35	0.5	0.8	0.35	0.5	0.8	m
α_T =	0.0025	m		D-S =	64.7	47.2	34.8	38.6	46.1	31.4	33.6	38.2	m
c =	1500	d	1.64	q-S =	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	m3/d m-1
Iso-Cl above 50%/mix	150	mg/L		v-S =	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	m/d
				H-max =	3.25	2.92	3.32	3.35	3.42	3.44	3.52	3.68	m ACSL
				Z-max =	-60.26	-47.25	-54.79	-52.44	-47.75	-56.89	-55.45	-52.57	m ACSL

FIG. 7.1. Screen dump van het belangrijkste invoerveld van HYDROLENS (worksheet Elongate). Daarin wordt in de gele cellen input verlangd tav de kenmerken van het zoete en zoute grondwater, de kustduinstrip en 8 scenario's (A-H) die gedefinieerd worden op basis van het drainagepeil in de polder (Δ pol; ten opzichte van het huidige zeeniveau), kustverbreding door zandsuppletie of spontane aangroei (SS), zeespiegelrijzing (SLR) en de helling van de zeebodem en strand (Slope).

Een extra scenariosplit, in geval van een oneindig lange duin/strand-strook, bestaat uit wel/geen connectie met het achterland. In geval van connectie betreft het mainland (keuze = 1), indien daarmee niet verbonden dan betreft het een barrier island (keuze = 2).

B = breedte duinstrook of zandplaat; R = grondwateraanvulling; Kh = horizontale doorlatendheid; D = diepte tot ondoorlatende basis; α_T = transversale dispersiviteit; c = verticale weerstand tegen stroming.

Een screen dump of HYDROLENS in Fig.7.1 toont de belangrijkste input data en een klein deel van de output. Grondwater dichtheid wordt in eerste instantie berekend op basis van de temperatuur en EC, maar als EC of Cl mist dan kan de EC of Cl berekend worden met een speciale subroutine in HYDROLENS.

Met de analytische oplossingen voor ideale geometrieën komen we niet altijd goed uit de voeten, vanwege afwijkende landvormen. In zo'n geval zijn er meerdere opties zoals Fig.7.2 laat zien.

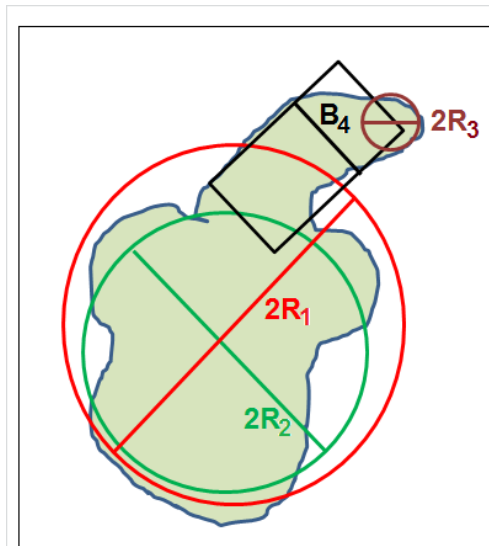


FIG. 7.2. Een willekeurig eiland met grillige vorm, waarop HYDROLENS op verschillende manieren toch kan worden toegepast.

De eenvoudigste doch grootste benadering is die van de grootste cirkel met $2R_1$ (rood), waarbij het oppervlak van de cirkel gelijk dient te zijn aan die van het hele eiland.

Een betere benadering is die door het eiland in 3 vormen op te delen: de groene cirkel met $2R_2$, zwarte rechthoek met B_4 en kleine paarse cirkel met $2R_3$. Voor elk afzonderlijk wordt de zoetwaterlens met HYDROLENS uitgerekend, en vervolgens worden de afzonderlijke beelden aan elkaar gefast met middeling op overlap zones.

B = breedte rechthoek; $2R$ = diameter cirkel.

Terugkoppelingsmechanismen

Enkele mechanismen werken de voorspelde effecten volgens HYDROLENS tegen. Zo wordt b.v. de voorspelling van een sterke grondwaterstijging bij een zeespiegelstijging of zandsuppletie tegengewerkt door: (i) de ontwikkeling van meer begroeiing die meer verdampt, zodat de natuurlijke grondwateraanvulling afneemt; (ii) het ontstaan van (meer) open water, leidend tot meer verdamping en het zogenaamde open-water-effect (waterstand daalt omdat porositeit toeneemt tot 100%); en (iii) drainage van oppervlaktewater uit het gebied, naar zee of achterland.

Deze mechanismen werken in omgekeerde richting ook een voorspelde grondwaterstandsverlaging tegen.

Een zeespiegelstijging kan ook tot kusterosie leiden hetgeen de effecten van inundatie versterkt, maar er kan ook sprake zijn van meer zandafzetting (kustuitbreiding) indien de zeestromingen en wind gunstig hiervoor zijn. Tektonische bewegingen en zettingen door compactie van klei en veen of zelfs ontkalking zijn doorgaans in het voordeel van de zeespiegelstijging.

7.2 Voorspelling in geval van periodieke zoutwater inundatie

Op stranden en lage zandplaten met periodieke overstroming met zeewater verschilt de situatie zeer aanzienlijk van die in een duinstrook achter een zeereep die tegen overstroming beschermt. HYDROLENS werkt daar dus niet of slechts in beperkte mate.

De eerste afwijking bestaat eruit dat de golfwerking en die van het getijde leiden tot een zekere opstuwing ('*overheight*') van de grondwaterspiegel (Fig.7.3). Tijdens overspoeling door een golf of een vloedperiode infiltreert het hoogstaande water op het strand en zakt met vertraging terug tijdens een golfdal en eb. Die vertraging veroorzaakt de opstuwing. De opstuwing laat zich niet makkelijk vangen in een empirische relatie met b.v. de getijde amplitude, strandhelling, grondwaterhelling richting strand vanuit achterland, golfhoogte en golflengte (Sous et al. 2013).

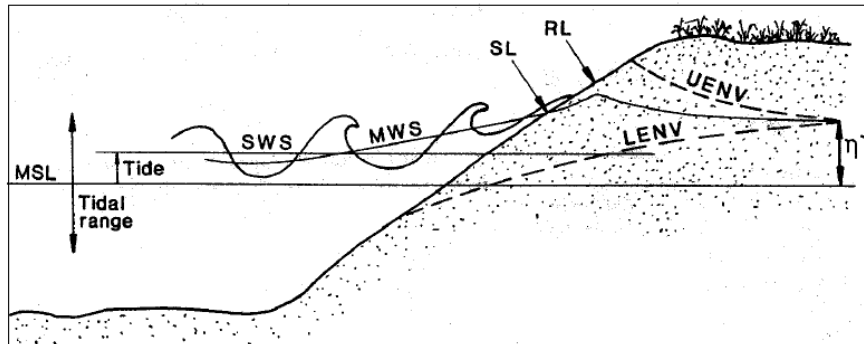


FIG.7.3. Schematische voorstelling van de opstuwende werking van oceanische golven en getijde op de grondwaterstand in een kustaquifer (naar: Nielsen 1999).
 MSL = Mean Sea Level, SWS = Still Water Surface, MWS = Mean Water Surface, SL = ShoreLine, RL = Runup Limit. LENV and UENV are the lower and upper bounds of the water table oscillation envelope. η^+ = water table overheight above MSL generated by oceanic forcing.

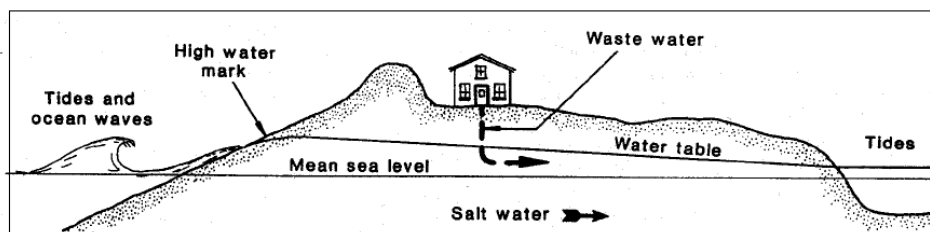


FIG. 7.4. Illustration of the landward sloping water table and groundwater flow as a result of infiltration from wave run-up and tides at the exposed coast. [From Nielsen, 1999].

Maar de orde van grootte zou ca. 0,1-0,3 m bedragen (Nielsen 1999). Op smalle zandplaten of stranden met achterliggend zwin kan dat in extreme gevallen leiden tot de scheefstelling van de grondwaterspiegel zoals aangegeven in Fig.7.4. Op stranden met brede duinen erachter en een strandwaarts steil-hellende grondwaterspiegel is het effect gering en de exacte opstuwingsgrootte onduidelijk (De Groot, 2000; Pauw, 2009).

Veel belangrijker dan het 'overheight-effect' is het chemische effect van zeewaterinundatie tijdens hetzij gewoon hoogwater (frequentie 12 uur en 25 minuten; dus 706x/jaar), hoogwater tijdens springtij (26x/jaar) en tijdens stormvloed met bepaalde herhalingsstijd (return period), vooral op brede lage stranden, zandplaten en wash-overs.

Op basis van de metingen op het Groene strand van Schiermonnikoog (\rightarrow § 7.4) en op de Veermansplaat in het Grevelingenmeer (deze §) is gezocht naar een eenvoudige, empirische benadering van het effect van zeewaterinundatie op de Cl-concentratie van het zeer ondiepe grondwater (<2 m-MV) zoals op veel lokaties aldaar gemeten. De volgende relatie voldoet redelijk, maar verdient verdere uitwerking op onderdelen:

$$Cl = (1 - f_2 f_3 f_4 f_5) Cl_F + f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 Cl_S \quad (7.1)$$

Waarin:

Cl_F , Cl_S = chloride concentratie in zoete en zoute end member [mg/L];

f_1 = evapoconcentratiefactor voor zoute inundatiewater conform Tabel 7.1 [-];

f_2 = correctiefactor voor frequentie van inundatie met zeewater [-], zijnde $n/4$ als $n < 4$, anders 1, waarbij n = inundatiefrequentie [aantal/jaar];

- $f_3 =$ correctiefactor voor laterale toestroming van zoet grondwater sinds laatste inundatie met zeewater [-], zijnde 1 als $L-X > \Delta X$, 0 als $L-X < 2\Delta X$, en anders 0.5, waarbij $L =$ totale breedte van sectie [m], $X =$ afstand langs sectie vanaf MSL (gemiddelde zeeniveau), $\Delta X = t_L K_h \beta_{H_2O} / \varepsilon =$ afgelegde afstand van zoete grondwater komend van landinwaartse rand van sectie, sinds laatste inundatie, met $t_L =$ tijd verstreken sinds laatste inundatie [d]; $K_h =$ horizontale doorlatendheid [m/d]; $\beta_{H_2O} =$ grondwaterverhang [m/m].
- $f_4 =$ correctiefactor voor verticale toestroming van zoet grondwater sinds laatste inundatie met zeewater [-], zijnde 0 als $t_L P / (4\varepsilon) > 2$ m, 1 als $t_L P / (4\varepsilon) < 1$ m, anders 0.5.
- $f_5 =$ correctiefactor voor dikte onverzadigde zone vóór inundatie met zeewater [-], zijnde 1 als $t_L = 0$, anders $0.1 + \sqrt{D_{UNS}}$, met $D_{UNS} =$ dikte onverzadigde zone [m]. Gedachte hierachter is dat een dikkere onverzadigde zone meer ruimte biedt voor zoutwaterinfiltratie.

De waarden van Cl_F en Cl_S hangen af van de lokale situatie en kennen tijdsafhankelijke variaties binnen beperkte grenzen (Stuyfzand, 1993, 2014).

Resultaten met Eq.7.1 voor de noordkop van de Veermansplaat zijn gepresenteerd in Fig.7.5 en kunnen in Fig.7.6 vergeleken worden met meetwaarden. De match is niet perfect, maar qua orde van grootte OK. De verschillen zijn te verklaren met o.a. afwijkingen per meetpunt van de gemiddeld aangenomen helling van het maaiveld en dikte van de onverzadigde zone, en met vooralsnog grotendeels hypothetische inundatie-waterstanden van het Grevelingenmeer.

Water level	Now m ACSL	Future m ACSL	Freq n/y	t-Last year BP	f-evap f1	X (MSL) m	D-uns m	ΔX m	Cl mg/L
flood 10	0.2	0.4	0.1	8	1	235	0.12	60.1	35
flood 5	0.1	0.35	0.2	3	1	176	0.09	22.5	199
flood 1	0.05	0.3	1	1	1	147	0.07	7.5	1565
flood 0.5	0	0.25	2	0.3	1	118	0.06	2.3	2860
S-HT	-0.05	0.2	26	0	2.5	88	0.04	0	41281
HT	-0.1	0.15	706	0	2	59	0.03	0	33033
MSL	-0.2	-0.2	706	0	1	0	0.00	0	16535
LT	-0.25	-0.55	706	0	1	-29	0.00	0	16535
S-LT	-0.3	-0.6	26	0	1	-59	0.00	0	16535
							Cl salt	mg/L	16500
Width (L)	m	300					Cl Fresh	mg/L	35
Slope of land		0.0017					K	m/d	6
Slope of GWT		0.0012		P-average	m/y	0.84	por		0.35

FIG. 7.5. Screen dump van Worksheet 'Inundation' van HYDROLENS ter voorspelling van de Cl-concentratie van de bovenste meter grondwater op een zandplaat of een flauw hellend strand met of zonder embryoduinen, als functie van de zeewaterstanden met bijbehorende inundaties. Gele cellen = input; witte cellen = output of tekst.

Flood 0.5-10 = zeewaterinundatie 1 maal per 0,5-10 jaar; S-HT, S-LT = gemiddeld hoog en laag water tijdens springvloed; HT, LT = gemiddeld hoog- en laagwater; MSL = gemiddeld zeeniveau.

Voor deze niveaus zijn berekend (wit) of in te typen (geel): de behorende waterstand (nu of in toekomst), frequentie (Freq), laatste optreden (t-Last), en overstromingsafstand gerekend vanaf waterlijn bij gemiddeld zeeniveau (X).

ACSL = Above Actual Sea Level; D-uns = dikte onverzadigde zone; f-evap = evapoconcentratiefactor voor zoute inundatiewater; width = breedte van potentieel onderlopende kuststrook; P-average = gemiddelde jaartotaal regenval; K = doorlaatvermogen bovenste pakket.

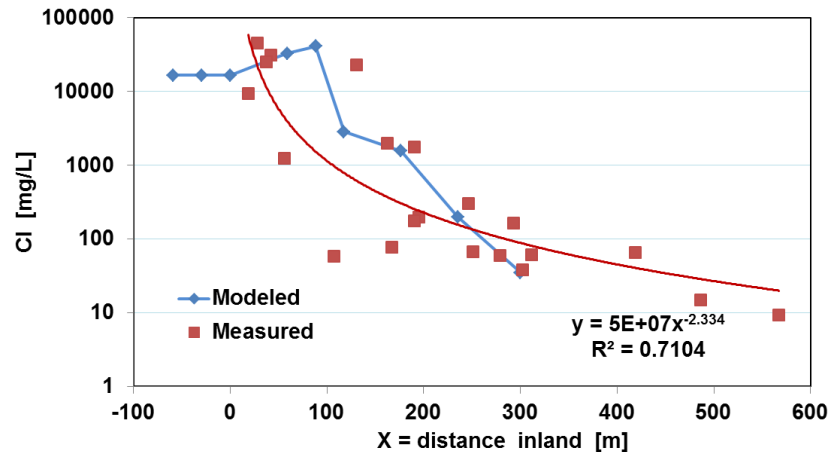


FIG. 7.6. Berekende en gemeten Cl-concentratie van de bovenste meter grondwater op de noordkop van de Veermansplaat, als functie van de afstand tot de zeewaterlijn (X-MSL). Regressieformule voor meetwaarden.

7.3 Veermansplaat in het Grevelingenmeer

In deze sectie worden de hydrologische consequenties van enkele scenario's voor de Veermansplaat doorgerekend met HYDROLENS, uitgaande van een langwerpig eiland met gemiddelde breedte van 475 m (waarbij niet inbegrepen de lage vlakke oevers waar kwel domineert in de winter). Aan de noordkop van het eiland wordt zodoende de zoetwaterlens iets onderschat, omdat de breedte daar aanzienlijk groter (ca. 750 m) is maar oneindige voortzetting mist. Vergelijking met een op het uiteinde toegepaste cirkelvorm met diameter 750 m (Van Roon, 2013) leert dat we zodoende de lensomvang onderschatten met slechts 12%, wat voor het gestelde doel aanvaardbaar is. De overige modelparameters, zoals saliniteit van het zoete en zoute grondwater, grondwateraanvulling, permeabiliteit, porositeit en transversale dispersiviteit, zijn constant gehouden en staan in Fig.7.5.

De in Fig.7.5 gepresenteerde scenario's A-H zijn doorgerekend voor de noordkop, waarbij onderscheid tussen de noord-, west- en oostzijde vanwege een verschillende helling van het maaiveld: A-B gering (0.0017), C-E matig (0.0041) en F-H steil (0.007). In de berekeningen gaan we er gemakshalve van uit dat deze hellingen dan uniform overal op de Veermansplaat aanwezig zijn. In werkelijkheid is dat dus geenszins het geval; de helling verschilt van plaats tot plaats. In de keuze van de stijging van het meerpeil baseren wij ons op de hoogwater niveaus van de getijvarianten zoals voorgelegd door Van de Haterd et al. (2010): T50 (met gemiddeld peil van 10 cm-NAP, laagste peil van 35 cm-NAP en hoogste peil van 15 cm+NAP), T70 (met gemiddeld peil van 20 cm-NAP, laagste peil van 55 cm-NAP en hoogste peil van 15 cm+NAP) en T100 (met gemiddeld peil van 20 cm-NAP, laagste peil van 70 cm-NAP en hoogste peil van 30 cm+NAP). Daaraan is nog een extreme variant toegevoegd met max. 80 cm boven huidig peil.

Scenario A: huidige situatie op noordkop

Dit scenario vertegenwoordigt de huidige situatie (zonder SLR) op de noordkop. De modelresultaten zijn weergegeven in Tabel 7.1 middels enkele kengetallen van de lens. Het betreft de volgende informatie:

- De maximale omvang na voltooiing van de groei sinds het droogvallen van de plaat in 1971. De lens is 16 m dik in het middendeel, met een hoogte H boven meerpeil van 0,31 m en een diepte Z eronder van 15,7 m.

- Hoe de lens zich in de loop der tijd ontwikkeld heeft en nog ontwikkelt. De ontwikkeling wordt door 2 parameters gedefinieerd: t_X zijnde de tijd nodig voor vorming van X% van de volgroeide zoetwaterlens; en $Z_{MAX,tX}$ zijnde de diepteligging van het zoet/zout grensvlak (8.300 mg Cl/L) bij t_X .
- De omvang van de drinkbare zoetwatervoorraad ($Vol_{Cl<150mg/L}$) binnen de hele lens (Vol_{LENS}). Het verschil tussen beide is de helft van het volume aan mengwater (Cl = 150-16.365 mg/L).

De vorm van de lens is weergegeven in Fig.7.9.

TABEL 7.1. Input en output van HYDROLENS met gefixeerde condities tav zoet en zout groundwater, en 8 scenario's waarbij variaties in maaiveldshelling (Slope) en zeespiegelstijging (SLR).

B-SLR = breedte infiltratiestrook; H-max = grondwaterspiegel bij X=0 (midden); Z-max = diepteligging zoet/zout grensvlak (8.300 mg Cl/L) bij X=0; Vol. Lens = volume van zoetwaterlens (grensvlak 8.300 mg Cl/L) per meter kustlijn; Vol. Cl<150 = dito, maar grensvlak 150 mg Cl/L; t_X = tijd nodig voor vorming X% van zoetwaterlens; Z-max t_X = diepteligging zoet/zout grensvlak (8.300 mg Cl/L) bij t_X .

Par.	Unit	Fresh	Salt	Par.	Unit	Aquifer	Par.	Unit	Aquifer
temp	oC	11.0	11.0	B	m	475	ε	-	0.35
EC	uS/cm	750	38400	R	m/a	0.2	D	m	125
Cl	mg/L	35	16500	Kh 10oC	m/d	6	αT	m	0.0025

Scenario	Unit	Noordkop			West side			East side	
		A	B	C	D	E	F	G	H
Δpol	m	0	0	0	0	0	0	0	0
SS	m	0	0	0	0	0	0	0	0
SLR	m	0	0.35	0.35	0.5	0.8	0.35	0.5	0.8
Slope	m/m	0.0017	0.0017	0.0041	0.0041	0.0041	0.0070	0.0070	0.0070
R(etreat)	m	0	420	170	243	389	100	143	229
B-SLR	m	475	55	305	232	86	375	332	246
H-max	m	0.31	0.39	0.55	0.65	0.86	0.60	0.72	0.96
Z-max	m	-15.7	-1.5	-9.7	-7.2	-2.0	-12.0	-10.5	-7.3
Vol. lens	m3/m	2086	23	862	466	50	1264	974	561
Vol. Cl<150	m3/m	1520	8	554	290	21	881	662	355
t25	year	5.6	0.6	3.6	2.7	1.0	4.4	3.9	2.9
t50	year	12.1	1.4	7.7	5.9	2.2	9.5	8.4	6.3
t76	year	21.9	2.5	14.0	10.7	4.0	17.3	15.3	11.3
t90	year	32.3	3.7	20.8	15.8	5.9	25.5	22.6	16.8
t95	year	40.2	4.7	25.8	19.7	7.3	31.8	28.1	20.9
t99	year	58.1	6.7	37.3	28.4	10.6	45.9	40.6	30.2
Z-max t25	m	-3.92	-0.37	-2.43	-1.79	-0.51	-3.00	-2.61	-1.83
Z-max t50	m	-7.83	-0.73	-4.85	-3.58	-1.02	-6.01	-5.23	-3.66
Z-max t76	m	-11.90	-1.11	-7.38	-5.44	-1.56	-9.13	-7.94	-5.57
Z-max t90	m	-14.10	-1.32	-8.74	-6.44	-1.84	-10.81	-9.41	-6.59
Z-max t95	m	-14.88	-1.39	-9.22	-6.80	-1.95	-11.41	-9.93	-6.96
Z-max t99.9	m	-15.65	-1.46	-9.70	-7.15	-2.05	-12.00	-10.44	-7.32

De meest waardevolle toetsing van de berekende kengetallen aan meetwaarden, is die van de lensgroei zoals weergegeven in Fig.7.7. De overeenkomst met meetwaarden op meetpunt 42F0077 in 1980 en 1993 is frappant. Ook de gemeten en berekende totale diktes van de mengzone komen goed overeen (Fig.7.8). Daarbij moest wel de transversale dispersiviteit lager gezet worden ($\alpha_T = 0.0025$ m) dan gevonden bij grote zoetwaterlenzen langs het Noordzeestrand ($\alpha_T = 0,01$ m; Stuyfzand, 1993). Dat verklaart zich deels door de veel geringere dynamiek van de waterspiegel in het Grevelingenmeer, en de tamelijk uniforme bodemopbouw van de zandplaat.

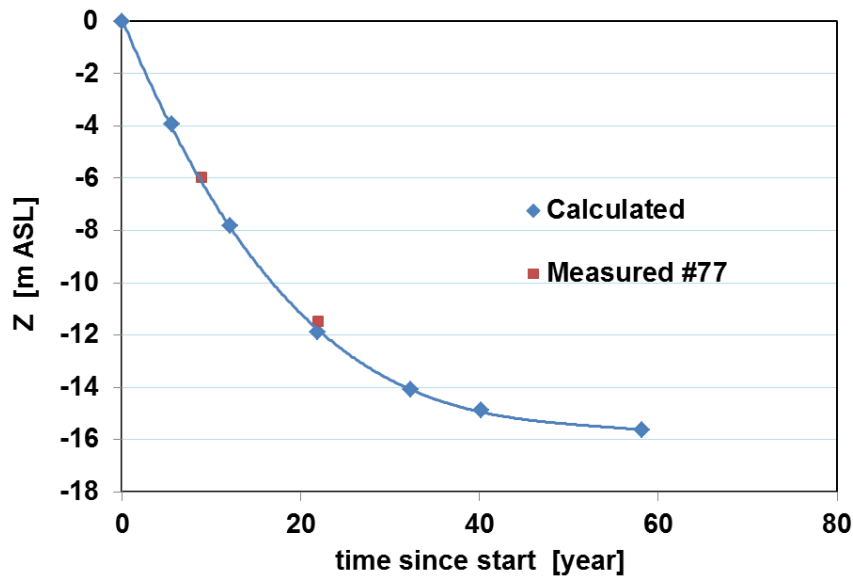


FIG. 7.7. Berekende en gemeten groei van de zoetwaterlens op de Veermansplaat aan de noordkop, sinds permanent droogvallen van de plaat in 1971. Berekening met HYDROLENS scenario A, meetwaarden uit Tabel 6.3 en Fig.6.13.

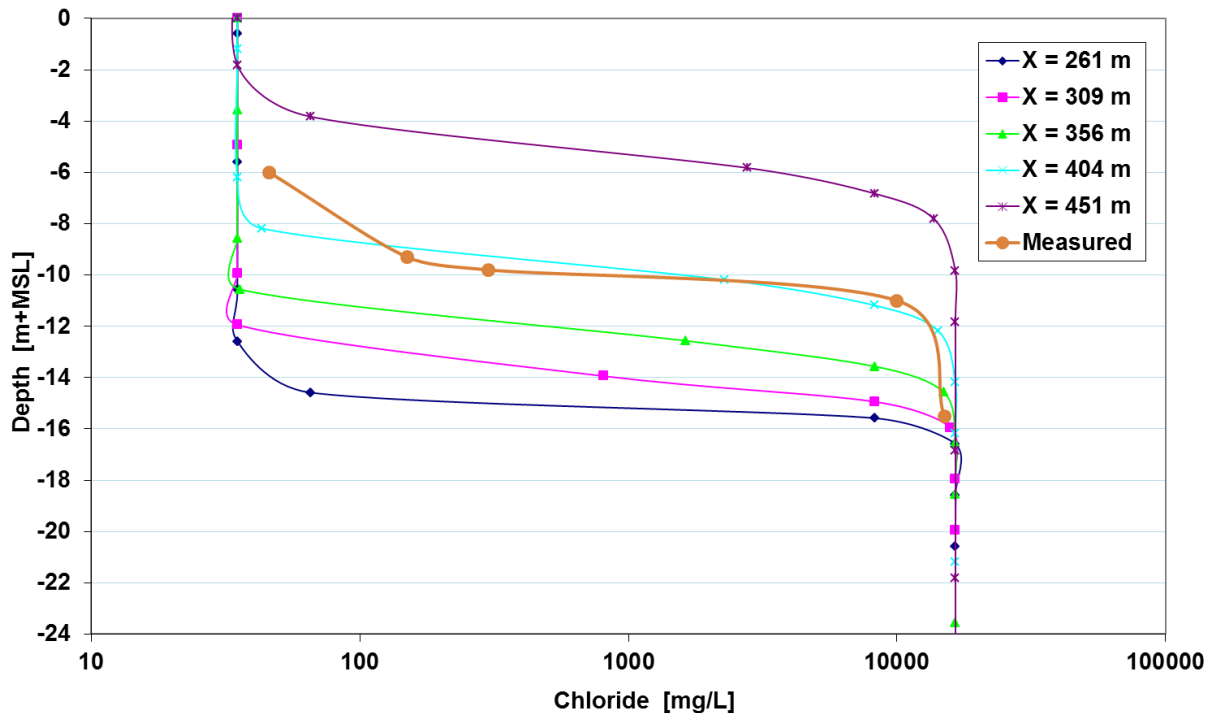


FIG. 7.8. Berekende en gemeten verticale Cl-profiel op punten binnen het infiltratiegebied van de zoetwaterlens op de Veermansplaat aan de noordkop, na voltooiing van de groei. Berekening met HYDROLENS scenario A, meetwaarden op 42F0077 in 1993 uit Tabel 6.3. X261 bevindt zich op $261 - 475/2 = 24$ m uit het centrum van de lens. De meetwaarden suggereren een positie van het meetpunt op $356 - 475/2 = 119$ m uit het centrum van de lens.

Scenario B: noordzijde noordkop met SLR = 35 cm

Ook dit scenario heeft betrekking op de noordzijde van de Noordkop waar het landoppervlak een geringe helling kent (0.0017 m/m), maar nu met een gecontroleerde zeespiegelrijzing (SLR) van 0,35 m boven huidig meerpeil van 0,2 m-NAP. De 0.35 m SLR komt overeen met de door Van de Haterd et al. (2010) genoemde getijvariant T50 met een max. 35 cm hoger peil dan het gemiddelde huidige peil.

Door de flauwe helling van het maaiveld wordt een zeer breed gebied overstroomd, zodat het infiltratiegebied van de zoetwaterlens zeer aanzienlijk slinkt (slechts ~10% blijft over) en daardoor ook de zoetwaterlens (vrijwel alle parameters ook naar ~10% van de huidige waarde). Het verschil met de oorspronkelijke toestand is extreem en niet realistisch maar wel illustratief voor bepaalde delen van het eiland (Tabel 7.1).

De overige scenario's C-H

De overige scenario's hebben betrekking op de Noordkop waar het landoppervlak een relatief grote helling kent (0.0041-0.0070 t.o.v. 0.0017 m/m), maar nu met een gecontroleerde zeespiegelrijzing (SLR) van 0,35-0,80 m boven huidig meerpeil van 0,2 m-NAP.

Door de steilere helling van het maaiveld wordt een minder breed gebied overstroomd, zodat het infiltratiegebied van de zoetwaterlens minder slinkt en daardoor ook de zoetwaterlens (Tabel 7.1). De resultaten voor scenario C zijn mogelijk het meest realistisch en representatief voor het hele eiland (Fig.7.9).

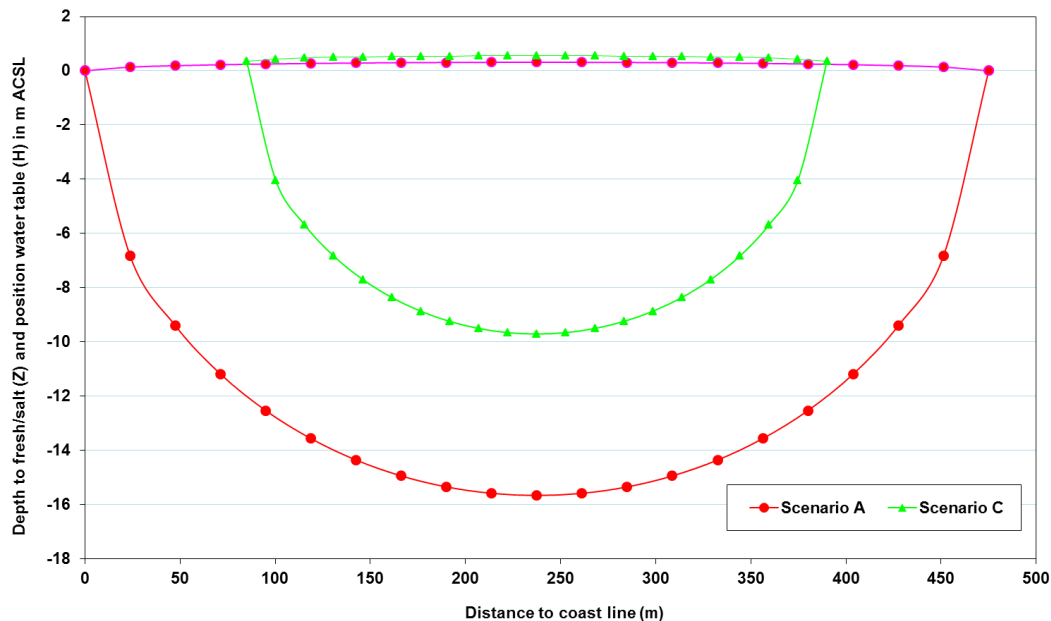


FIG. 7.9. Berekende vorm van de zoetwaterlens op de noordkop van de Veermansplaat voor scenario C (zie Tabel 7.1), in een ZW-NO profiel (loodrecht op lengte-as van eiland).

7.4 De Waddeneilanden

7.4.1 Verschillende schalen: van embryoduin via stuifdijk tot eilandkern

Op de Waddeneilanden, in het bijzonder Schiermonnikoog en Texel, komen zoetwaterlenzen in allerlei soorten en maten voor: van klein tot zeer groot (embryoduin versus hele duinboogcomplex of duinengordel), van cirkelvormig tot langwerpig, van tijdelijk tot semipermanent, van aangroeiend tot inkrimpend, van zeer zoet tot licht brak etc.

Hoe de grootte en vorm van de zoetwaterlens afhangen van duinbreedte, verticale weerstand van de ondergrond en het systeem (langwerpig of cirkelvormig), is weergegeven in Fig.7.10 voor de in Fig.7.1 aangegeven parameterwaarden van het zoete en zoute grondwater, eiland of duinstrip, en met verticale weerstand $c = 0$ of $c = 1500$ dagen.

We zien in Fig.7.10 een vrijwel lineaire toename van de maximale hoogte van de grondwaterstand (H), maximale diepte van de onderkant van de zoetwaterlens (Z), vormingstijd van de lens (t_{99}) en lengte van de zoetwatertong onder zee (L). Een toename van de verticale weerstand (van 0 tot 1500 dagen) leidt tot een aanzienlijke verhoging van H , t_{99} en L , en verlaging van Z . En tenslotte, een cirkelvormig eiland levert logischerwijs een kleinere lens (ca. 30% kleiner) op dan een langwerpige (in principe oneindig lange) lens.

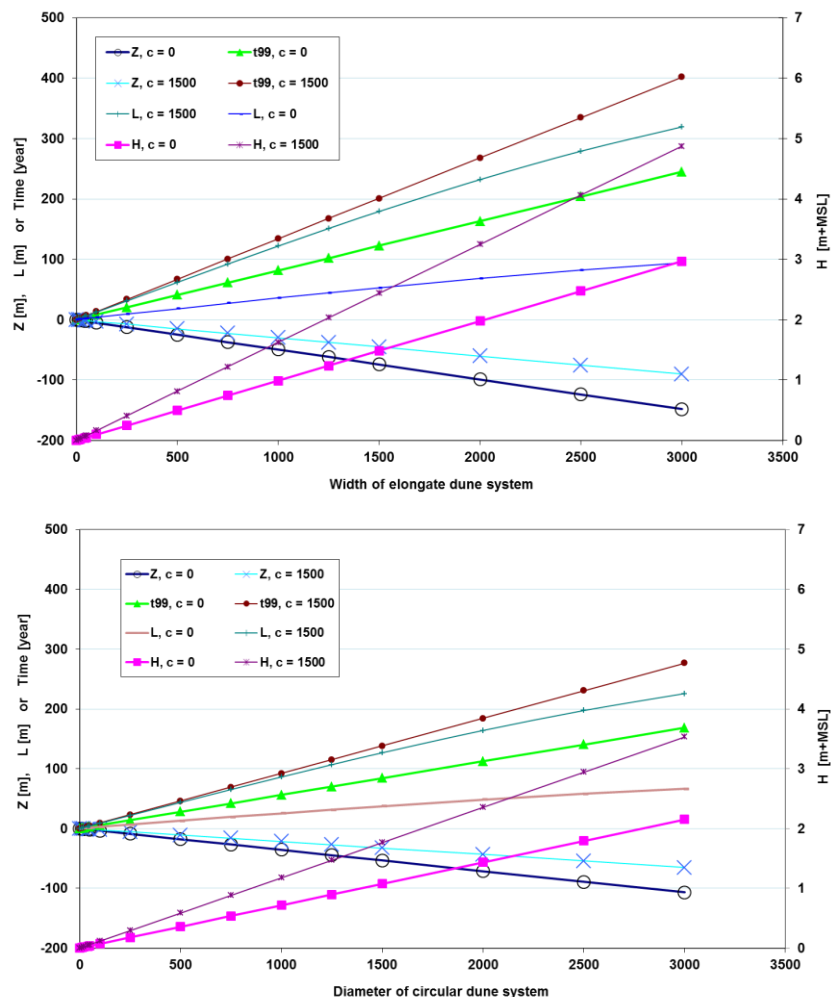


FIG. 7.10. Hoogte van de grondwaterspiegel (H), diepte van onderzijde zoetwaterlens (Z), vormingstijd ($t_{0.99}$) en lengte zoetwatertong onder zee (L), met en zonder kleilaag (met weerstand $c = 1500$ d), als functie van de breedte van een langwerpige duinsysteem aan 1 zijde grenzend aan zee (boven) en diameter van een cirkelvormig eiland (onder). Berekeningen met het programma HYDROLENS met standaard randvoorwaarden zoals afgebeeld in Fig.7.1.

TABEL 7.2. Output van HYDROLENS berekeningen voor zoetwaterlenzen na bereiken evenwicht, met variabele doorsnede (2R) of breedte (B), met verschil in verticale weerstand van de ondergrond (c), en met verschil in zoutconcentratie van het onderliggende brakke/zoute grondwater.

De condities komen overeen met die in Fig.7.1. Grondwateraanvulling $R = 0,45$ m/j.

H = maximale grondwaterspiegel bij $X=0$ (midden); Z = maximale diepteligging zoet/zout gensvlak (8.300 mg Cl/L) bij $X=0$; t_{99} = tijd nodig voor vorming van 99% van zoetwaterlens; L = lengte van zoetwatertong onder zee.

c = 0 days					c = 1500 days			
2R or B	Z	H	t99	L	Z	H	t99	L
m	m+MSL	m+MSL	years	m	m+MSL	m+MSL	years	m
<i>Circular, R = 0.45 m/y, Cl-S = 16500 mg/L</i>								
5	-0.18	0.004	0.3	0.1	-0.1	0.01	0.5	0.4
20	-0.71	0.014	1.1	0.5	-0.4	0.02	1.8	1.8
50	-1.78	0.036	2.8	1.3	-1.1	0.06	4.6	4.4
100	-3.56	0.07	5.6	2.6	-2.2	0.12	9.2	8.8
1000	-35.6	0.72	56.1	25.3	-21.7	1.18	92.2	86.2
2000	-71.3	1.44	112.3	48.2	-43.4	2.36	184.3	164.0
<i>Elongated, R = 0.45 m/y, Cl-S = 16500 mg/L</i>								
50	-2.5	0.049	4.1	1.8	-1.5	0.08	6.7	6.2
100	-4.9	0.10	8.2	4	-3.0	0.16	13.4	12
1000	-49.5	0.99	81.6	36	-30.1	1.62	133.9	122
2000	-98.9	1.98	163.1	68	-60.3	3.25	267.8	232
<i>Circular, R = 0.45 m/y, Cl-S = 2250 mg/L</i>								
5	-0.45	0.001	0.7	0.1	-0.3	0.00	1.1	0.4
20	-1.80	0.006	2.8	0.5	-1.1	0.01	4.6	1.8
50	-4.50	0.014	7.0	1.3	-2.7	0.02	11.4	4.4
100	-9.00	0.029	13.9	2.6	-5.5	0.05	22.9	8.8
1000	-90.0	0.289	139.3	25.3	-54.8	0.47	228.8	86.2
2000	-179.9	0.578	278.7	48.2	-109.6	0.95	457.5	164.0
<i>Elongated, R = 0.45 m/y, Cl-S = 2250 mg/L</i>								
50	-6.4	0.02	10.3	2	-3.9	0.03	16.9	6
100	-12.7	0.04	20.6	4	-7.7	0.06	33.8	12
1000	-127.1	0.39	206.1	36	-77.4	0.64	338.3	122
2000	-254.1	0.78	412.1	68	-154.8	1.29	676.6	232

In Tabel 7.2 wordt een indruk gegeven van de grootte en vormingstijd van de zoetwaterlens voor verschillende schalen zoals frequent voorkomend op Texel en Schiermonnikoog.

Wanneer de grondwateraanvulling (R) afwijkt van de waarde 0,45 m/j waarmee gerekend is in Tabel 7.2, dan dienen de waarden van H en Z vermenigvuldigd te worden met $\sqrt{(R/0,45)}$, en de vormingstijd t_{99} met $1/\sqrt{(R/0,45)}$.

Embryoduintjes

Voor individuele, schraal begroeide embryoduintjes met $R = 0,6$ m/j, een cirkelvorm en diameter van 5 m wordt zo een zoetwaterlens berekend van $1,155 \times 0,18 = 0,21$ m dikte met een opbolling van 0,5 cm. Uit Tabel 7.2 volgt ook, dat het veel uitmaakt hoe zout het onderliggende grondwater is. Een afnemend zoet/zout-contrast betekent een toenemende dikte van de zoetwaterlens, ongeveer met een factor 2,5 bij 2250 in plaats van 16500 mg Cl/L.

Op de lagere delen van de Hors, die dagelijks overstromen met zeewater, is het grondwater rond de geïsoleerd voorkomende embryoduinen zout (ca. 15000 mg Cl/L), zoals bij B11 (Fig.5.X). Op het Groene Strand van Schiermonnikoog is het grondwater onder de zoetwaterlenzen van de embryoduinen van de 2^e generatie veel minder zout (ca. 2250-5000 mg Cl/L). De vormingstijd van de kleine zoetwaterlenzen onder embryoduintjes is gering (<1 jaar), maar zo ook de stabiliteit t.g.v. een grote kans op overstrooming of erosie van het duintje. De berekeningen sluiten goed aan bij de veldmetingen op Schiermonnikoog, waar in het gebied met embryoduintjes van de 2^e generatie alleen zeer ondiepe zoetwaterlenzen zijn aangetroffen (<2 m; Fig.4.X).

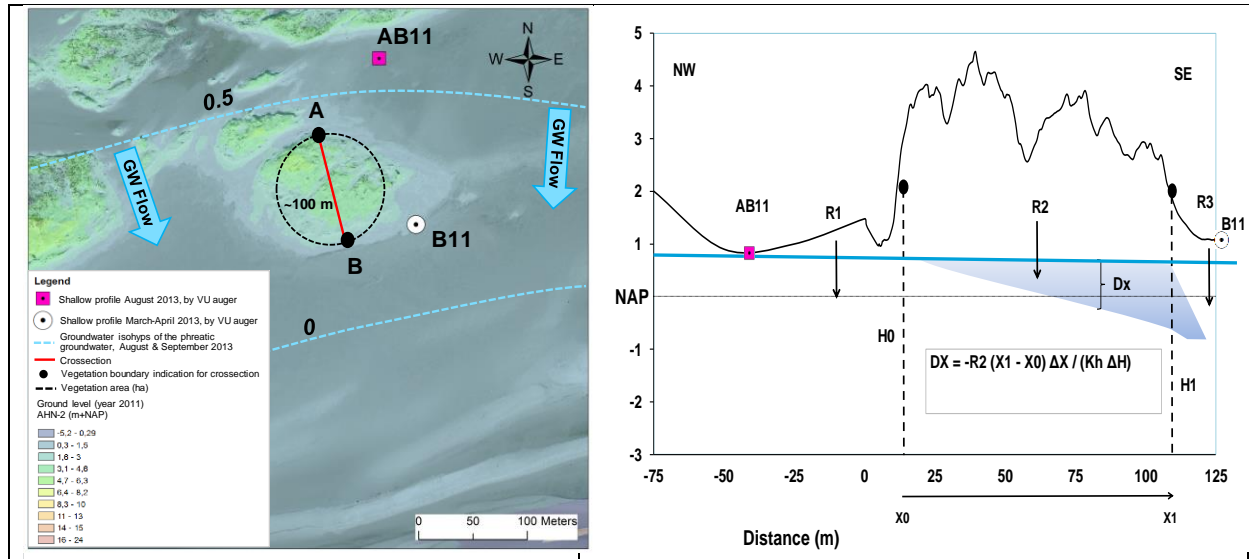


FIG. 7.11. Afwijkende hydrologische situatie met een zoetwaterlens onder een embryoduincomplex op de Hors, met hellende grondwaterspiegel. De lensvorm kan benaderd worden met een cirkelvormig eiland of met een lens, waarvan de berekeningswijze is aangegeven. In beide gevallen komen we uit op een maximale dikte van de zoetwaterlens van ~3,5 m. De vorm wijkt natuurlijk wel af tussen beide benaderingen.

Wanneer embryodünen aaneengroeien neemt de kans op overstroming en erosie af, zodat de zoetwaterlens kan doorgroeien, b.v. naar enkele meters dikte (Tabel 7.2).

Een iets afwijkende situatie ontstaat waar een embryoduin(complex) zich bevindt op een locatie met duidelijk hellende grondwaterspiegel, zoals op de Hors (Fig.7.11). Ook dan kan de lens berekend worden, namelijk zoals aangegeven in Fig.7.11.

Stuifdijken

De meeste stuifdijken, waaronder die op Schiermonnikoog en op/achter de Hors van Texel zijn 50-120 m breed. Voor een 100 m brede stuifdijk met redelijk dichte begroeiing zoals die op Schiermonnikoog ($R=0,45$ m/j) komen we via Tabel 7.2 uit op een 3-13 m dikke zoetwaterlens, afhankelijk van (a) het zoutgehalte onder de lens en (b) de c-waarde (verticale weerstand) van het aquifersysteem. De meetgegevens suggereren een Cl-concentratie van 2250 mg Cl/L op Schiermonnikoog, zodat een ~13 m dikke zoetwaterlens waarschijnlijk is indien $c = 0$ dagen (en ~8 m indien $c = 2250$ d, wat onwaarschijnlijk is). Daarbij hoort een smalle zone van kwel, met minimale breedte vergelijkbaar met parameter L (orde 4 m). Door afzetting van slibhoudend materiaal aan de voet van de stuifdijk en een hogere c-waarde kan deze zoete kwelzone zich verbreden, waarbij tijdens hoge grondwaterstanden oppervlakkige afvoer van zoet kwelwater kan optreden.

De dikte van de overgangszone onder de zoetwaterlens (van ~50 naar 2250 mg Cl/L) bedraagt gemiddeld slechts 1,9 m volgens berekening.

Het verwijderen van de stuifdijk ten zuiden van het oostelijke deel van het Groene Strand op Schiermonnikoog heeft natuurlijk tot gevolg dat de zoetwaterlens onder de stuifdijk verdwijnt en daarmee ook de kwelzone aan zijn noordzijde. Daar profiteert de Groenknolorchis van deze zoete kwel, en zal derhalve verdwijnen als de stuifdijk verdwijnt.

De zoetwaterlens onder de Kobbeduinen, ten zuiden van de westhoek van de strandvlakte aldaar, is waarschijnlijk 20 m dik en zorgt dankzij een duinbreedte van 250 m voor een minimaal ~10 m brede zoete kwelzone. Deze zone blijft behouden, is daadwerkelijk in het veld gemeten en was ook zichtbaar aan afwijkende vegetatie.

Meer westelijk, waar de stuifdijk ontbreekt en het brede duingebied zoet grondwater naar het strand doet stromen, wordt een minimaal 68 m brede zoete kwel zone voorspeld (bij een duinbreedte van 2000 m).

7.4.2 Effecten van zeespiegelstijging, erosie en kustaanwas

Wat de effecten zijn van zeespiegelstijging, kusterosie en kustaanwas laat zich illustreren aan de hand van berekeningen voor het duingebied ten noorden van de Hors, ongeveer ten noorden van Y=559 (dus ter hoogte van het Grootte Vlak). We kunnen de duingordel daar opvatten als een langgerekt systeem, en de zoetwaterlens modelleren met de in Tabel 7.3 aangegeven parameters. Met deze combinatie van invoergegevens komen we voor de huidige situatie (scenario A) goed uit: De berekende maximale diepte van 60 m-NAP en een maximale grondwaterstand van 3,2 m+NAP komen uitstekend overeen met de waarden in Fig.5.X en 5.XX.

Voor 8 scenario's met verschillen in zeespiegelstijging (SLR), maaiveldshelling (Slope) en kustuitbreiding door zandsuppletie (SS) zijn vervolgens de evenwichtsvorm, zoetwatervolume, groei en brakwaterzone berekend. Het resultaat is voor scenario A (= huidige situatie), scenario E (= 1 m SLR zonder SS, en scenario H (= 1 m SLR met 600 m SS) gepresenteerd in Fig.7.12. We zien daarin dat 1 m zeespiegelstijging de zoetwaterlens flink doet inkrimpen, en dat een grootschalige zandsuppletie (800 m kustaanwas) voor een aanzienlijke expansie van de zoetwaterlens kan zorgen.

TABEL 7.3. Input en output van HYDROLENS voor het Grootte Vlak op Texel, met gefixeerde condities tav zoet en zout grondwater, en 8 scenario's waarbij variaties in maaiveldshelling (Slope), zeespiegelstijging (SLR) en zandsuppletie (SS).

B-SLR = breedte infiltratiestrook; Retreat = netto kustwijking (positief = aangroei); H-max = grondwaterspiegel bij X=0 (midden); Z-max = diepteligging zoet/zout grensvlak (8.300 mg Cl/L) bij X=0; Vol. Lens = volume van zoetwaterlens (grensvlak 8.300 mg Cl/L) per meter kustlijn; Vol. Cl<150 = dito, maar grensvlak 150 mg Cl/L; tX = tijd nodig voor vorming X% van zoetwaterlens; Z-max tX = diepteligging zoet/zout grensvlak (8.300 mg Cl/L) bij tX.

Par.	Unit	Fresh	Salt	Par.	Unit	Aquifer	Par.	Unit	Aquifer
temp	oC	11.0	11.0	B	m	2000	ε	-	0.35
EC	uS/cm	750	38400	R	m/a	0.45	D	m	125
Cl	mg/L	35	16500	Kh 10oC	m/d	6	αT	m	0.0025
				c	d	1500			
Scenario	Unit	Grootte Vlak							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Δpol	m	0	0	0	0	0	0	0	0
SS	m	0	0	0	0	0	200	400	800
SLR	m/m	0	0.35	0.35	0.5	1	1	1	1
Slope	m/m	0.0017	0.0017	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041	0.0041
R(etreat)	m	0	210	85	121	243	43	-157	-557
B-SLR	m	2000	1790	1915	1879	1757	1957	2157	2557
H-max	m	3.25	3.08	3.29	3.30	3.35	3.68	4.00	4.65
Z-max	m	-60.3	-53.8	-57.5	-56.3	-52.4	-58.5	-64.5	-76.5
Vol. lens	m ³ /m	34914	27709	32065	30416	26225	32627	39727	56373
Vol. Cl<150	m ³ /m	29769	23335	25134	25727	21996	27639	34003	48907
t25	year	25.8	23.1	24.7	24.3	22.7	25.3	27.9	33.0
t50	year	55.6	49.7	53.2	52.2	48.8	54.4	60.0	71.1
t76	year	100.8	90.2	96.5	94.7	88.6	98.6	108.7	128.9
t90	year	149.0	133.3	142.6	139.9	130.9	145.8	160.7	190.5
t95	year	185.4	165.9	177.5	174.1	162.9	181.4	199.9	237.0
t99	year	267.8	239.7	256.4	251.6	235.3	262.1	288.9	342.4
Z-max t25	m	-15.06	-13.44	-14.38	-14.09	-13.11	-14.62	-16.12	-19.14
Z-max t50	m	-30.13	-26.88	-28.76	-28.17	-26.22	-29.23	-32.25	-38.27
Z-max t76	m	-45.80	-40.85	-43.72	-42.83	-39.85	-44.43	-49.01	-58.17
Z-max t90	m	-54.23	-48.38	-51.77	-50.71	-47.20	-52.62	-58.04	-68.89
Z-max t95	m	-57.24	-51.07	-54.65	-53.53	-49.82	-55.54	-61.27	-72.72
Z-max t99	m	-60.20	-53.70	-57.46	-56.29	-52.39	-58.41	-64.43	-76.47

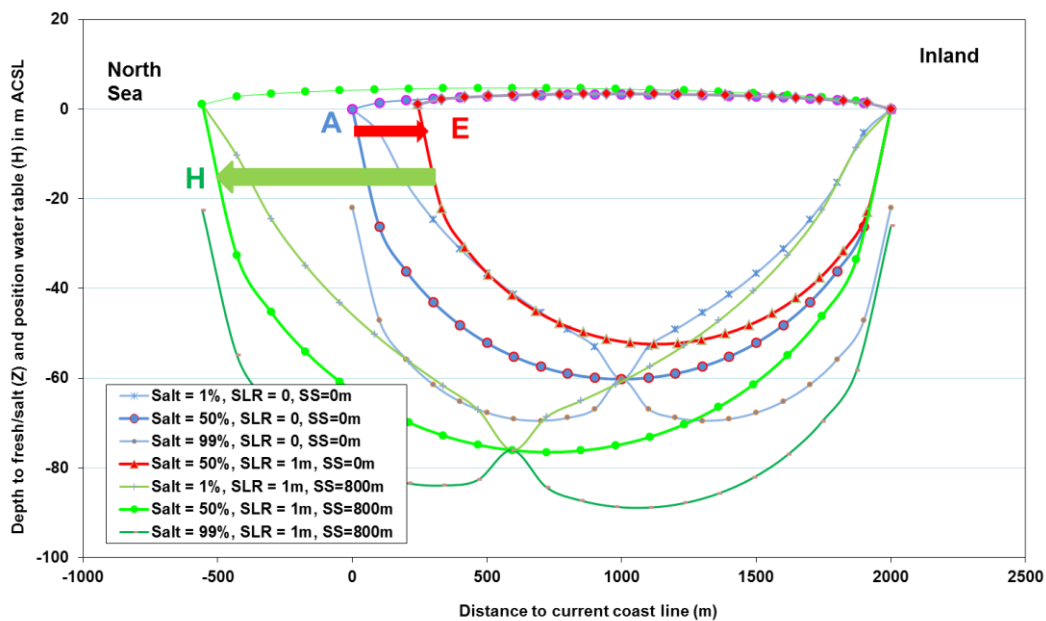


FIG. 7.12. Berekende vorm van de zoetwaterlens ter hoogte van het Grootte Vlak op Texel voor scenario A, E en H (zie Tabel 7.3), in een W-O profiel. Voor scenario's A en H zijn naast het zoet/zout-grensvlak (50% salt) tevens de boven (1% salt) en onderzijde (99% salt) van de mengzone berekend. Scenario A = huidige situatie; Scenario E = 1 m SLR (Sea Level Rise) zonder SS (Zand Suppletie); Scenario H = 1 m SLR met 800 m SS.

Klimaatverandering incl. zeespiegelstijging

Klimaatverandering bestaat o.a. uit een toename van de temperatuur en neerslag. Of de toename van de neerslag ook leidt tot een toename van de grondwateraanvulling (R) is zeer onzeker omdat de begroeiing zowel kan toenemen als afnemen en dat heeft een beslissend effect op R.

Als we uitgaan van alleen een temperatuurstijging van het zoete grondwater in de periode 1990-2100 van 9,8 tot 13,3 °C (KNMI-scenario W voor lucht), dan krimpt volgens het model HYDROLENS de zoetwaterlens met 10% (Z en t99) en blijven H en L vrijwel gelijk. Als we uitgaan van 13% meer regenval (KNMI-scenario W) en 13% meer grondwateraanvulling, in combinatie met genoemde temperatuurstijging, dan krimpen de zoetwaterlensen minder (6% in plaats van 10%).

Een veel grotere impact heeft een zeespiegelstijging (SLR) wanneer deze **niet** wordt tegengewerkt door kustaangroei (hetzij natuurlijk dan wel door zandsuppleties). Zo wordt berekend dat een SLR van 0,35 en 1,00 m, bij een oneindig lange duinenrij van 2 km breedte met $R=0,45$ m/j, een helling van het land van 0,0041 en een dichtheidsverschil van 0,02 kg/L tussen zoet en zout grondwater, tot de volgende lensinkrimping leidt: terugwijking van de kust en dus versmalling van de lens met resp. 85 en 243 m, stijging van het zoet/zout grensvlak van 60.3 naar resp. 57,5 en 52.4 m-NAP, en een geringe toename van de maximale grondwaterstand van 3,25 naar resp. 3,29 en 3,35 m+NAP..

Kustuitbouw via zandsuppleties

Vergelijking van scenario's E t/m H levert het beeld op van een zeespiegelstijging van 1 m, zonder en met resp. 200, 400 en 800 m kustuitbouw dankzij zandsuppleties. De resulterende groei van de lens blijkt uit Tabel 7.3 en Fig.7.12.

8 Modelling van grondwaterkwaliteit en ontkalking met DUVELCHEM

Pieter J. Stuyfzand

8.1 DUVELCHEM

Het model 'DUVELCHEM' (versie 1.5, Stuyfzand, 2010, 2014) is reeds in § 2.8 geïntroduceerd. Het is geprogrammeerd in MS Excel spreadsheet, met als doel om zeer snel en eenvoudig de hydrogeochemische consequenties te berekenen van diverse scenario's voor relatief droge kustduinsystemen of drooggevallen zandplaten (Tabel 2.3).

Het model kent 2 met elkaar verbonden onderdelen, die verschillende output genereren en waarbij deel 1 de meeste input vergt. Deel 1 is geconcentreerd op rijen 1-21 en levert een voorspelling op van de 'actuele' chemische samenstelling van bodemvocht of ondiep grondwater, 1 maal de berekende reistijd na de geselecteerde datum van regenwaterinfiltratie, voor alle 11 locaties (begroeiingstypen). Hier dient de actuele ontkalkingsdiepte te worden ingevoerd omdat deze niet berekend wordt.

Deel 2 is geconcentreerd op rijen 72-222 en produceert een voorspelling van de hydrogeochemische evolutie op 1 van de 11 locaties. Deze omvat de chemische samenstelling van water en bodem op de gekozen observatiediepte, sinds de start van landschaps(de)formatie tot en met 5.000 – 20.000 jaar na Chr. (met inzoeming op de periode 1900-2100). Tevens wordt hun diepteprofiel (0,05-5 m-MV) geconstrueerd voor 2 te selecteren jaren (b.v. 2010 en 5.000 na Chr.). De actuele ontkalkingsdiepte wordt niet beschouwd in deel 2, omdat het ontkalkingsverloop in diepte en tijd berekend wordt.

Als deel 1 ontkalkingsdata moet ontberen, dan kunnen deze eerst geschat worden voor deel 1, en na het runnen van deel 2 voor elke site, kunnen de daar berekende waarden in deel 1 worden ingevuld.

Een screen dump van DUVELCHEM in Fig.8.1 toont de belangrijkste input data in deel 1.

	A	B	C	D	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	AA	AB	AC	AD	AE	AG	AI
4	VEGETATION	Vege-	Precip.	Air	N2	Uptake	Region	Seawate	Width	Distance	Start of	Year	Altitude	Depth to	Primary	Local				
5	TYPE	tation	P	Temp	fixation	Ca	No.	Cl	dune	to HWL	factor	Landsca	Survey	Land sur	GWT	Decalcif	Screen	Root	CaCO3	Cl-depos
6		Code	m/year	oC	mol/m2/d	mg/m2/d		mg/L	belt m	m	N260oE	year AD	m-NAP	m-LS	% d.w.	factor				
7	Rain, bulk	0	0.797	11			4	16600	500	1.20	1971	2013	1.0							0.33
11	Bare	1	0.797	11	0.01	0	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.01	4.9	0.33
12	Bare + some mosses/grasses (Lys.1)	2	0.797	11	0.02	0.1	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.1	4.9	0.33
13	Mosses	3	0.797	11	0.04	0.2	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.1	4.9	0.33
14	Poor dry dune: mix of mosses,grasses,bare	4	0.797	11	0.02	0.4	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.4	4.9	0.33
15	Dry shrubs (open), <50% moss/grass	5	0.797	11	0.15	1.5	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33
16	Rich dry dune veg. Heather, Dry decid (Lys.2)	6	0.797	11	0.3	2	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33
17	Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks (Lys.3)	7	0.797	11	0	6	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33
18	Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	0.797	11	0	4	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33
19	Pines, dense dry	9	0.797	11	0	2.5	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33
20	Pines, dense medium wet (Lys.4)	9.5	0.797	11	0	2.5	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33
21	Pines, wet and dense	10	0.797	11	0	2.5	4	16600	1400	500	1.20	1971	2013	1.0	0.50	0.05	1.5	0.5	4.9	0.33

FIG. 8.1. Screen dump van de belangrijkste invoervelden van DUVELCHEM (worksheet Model) In Excel spreadsheet, voor regenwater en 11 verschillende vegetatietypen. In de gele cellen wordt input verlangd tav achtereenvolgens (kolom C t/m AI): jaarlijkse regenval (P), gemiddelde luchttemperatuur, N2-fixatie door begroeiing, Ca-opname door begroeiing, Regio nr (4 = Zeeland), Cl-concentratie kustnabij zeewater, breedte van duinstrook, afstand meetpunt tot hoogwaterlijn (HWL), exponentiefactor mbt dominante windrichting N260°E, jaar van vorming of stabilisatie landschap, jaar van modelvoorspelling, hoogteligging maaiveld, diepte tot grondwaterspiegel (GWT), ontkalkingsdiepte, diepte waarnemingspunt in grondwater en bewortelingsdiepte (alle tov maaiveld (LS), oorspronkelijke kalkgehalte moedermateriaal en lokale afwijkings factor Cl-depositie.

De belangrijkste voorwaarden voor toepassing van DUVELCHEM zijn de volgende (voor een vollediger overzicht zie Stuyfzand 2010):

- Alleen zandige infiltratiegebieden met natuurlijke vegetatie, met aanvullende voorwaarden dat (a) de gemiddelde grondwaterspiegel dieper staat dan 0,5 m-MV, (b) kwel komt niet voor, en (c) de bodem bevat altijd een (sub)oxische onverzadigde zone.
- De vegetatie komt overeen met 1 van de 11 onderscheiden typen (uitbreidbaar) en blijft in principe constant (een stapsgewijze verandering van het ene in andere type is toegestaan indien trendmatige ontwikkelingen worden gemodelleerd in deel 2).
- Afgezien van ontkalking en verzuring van de bovenste bodem, zijn andere bodemheterogeniteiten afwezig, zoals b.v. lagen met meer of minder kalk, lagen met inspoeling, veenlagen of overstoven duinbodems. Processen als podzolering en kalkaccumulatie zijn uitgesloten.
- Mineralen als pyriet, sideriet, dolomiet en marien opaal (diatomeeën e.d.) komen niet voor en worden niet gevormd.

8.2 Scenario's voor de Veermansplaat in het Grevelingenmeer

In deze sectie worden de hydrogeochemische consequenties gepresenteerd van enkele scenario's voor de Veermansplaat zoals doorgerekend met DUVELCHEM. Dit gebeurt voor de infiltratiezone aan de noordkop binnen de ringvormige stuifrichel. Alleen daar overheerst infiltratie over exfiltratie, en ontstaat vooral in de zomerperiode een redelijk dikke onverzadigde zone die voorwaarde is voor toepassing van DUVELCHEM. De basisgegevens voor de modellering zijn in Tabel 8.1 samengevat.

TABEL 8.1. Basisgegevens voor de modellering van de ondiepe grondwaterkwaliteit en ontkalking op de noordkop van de Veermansplaat binnen de ringvormige stuifrichel. De vermelde parameterwaarden gelden voor alle 11 locaties (vegetatietypen). Tabel 8.1 kent 3 extra parameters tov Fig.8.1: dikte volcapillaire zoom, extra CO₂ en porositeit.

Parameter	Unit	Input	Parameter	Unit	Input
Precipitation	m/a	0.797	Full capillary zone	m	0.25
Temp	oC	11.0	Screen depth	m BLS	1.5
Region	-	4	Start landscape	year	1971
Distance HWL	m	500	Quality survey	year	2013
f-Cl dep	-	0.33	Rooting depth	m BLS	0.01-0.5
Seawater Cl	mg/L	16600	Extra CO ₂	log PCO ₂	0.75
Land surface	m ASL	1.0	CaCO ₃ content	% d.w.	4.85
Groundwater table	m ASL	0.50	Porosity	-	0.37

Gevolgen van veranderingen in begroeiingsdichtheid

Uit Tabel 8.2 valt af te leiden hoe de grondwatersamenstelling op 1,5 m-MV verandert op de plaat als de begroeiing toe- of afneemt. We zien in het algemeen dat de concentratie opgeloste stoffen van grondwater toeneemt volgens de reeks: kaal < mossen < grassen < duindoorn < eiken < dennen. Dit wordt verklaard door de toenemende verdampingsverliezen (evapoconcentratie), toenemende hoeveelheid interceptie van atmosferische aërosolen en gassen (meer sterke zuren), toenemende opslag van nutriënten in biomassa (vooral N en P), en toenemende productie van CO₂, HCO₃ en DOC.

Sedert het droogvallen van de plaat is de begroeiing fors toegenomen van type 1 (kaal) naar type 4 (sporadisch) tot type 8 (dominant op de noordkop). Door kappen, maai-beheer en begrazing zou de vegetatie teruggezet kunnen worden, waardoor de grondwaterkwaliteit 'grosso modo' zal veranderen conform berekeningen in Tabel 8.2.

TABEL 8.2. Voor droge duinen berekende chemische samenstelling van ondiep grondwater op 1,5 m-MV, en de op Veermansplaat gemeten samenstelling binnen de ringvormige stuifrichel (lokatie 14 en 16-18), beide anno 2013.

Vegetation type	Veg. Code	Temp oC	EC 20d uS/cm	pH	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	PO ₄	Na	K	Ca	Mg	NH ₄	Fe	Mn	Al	SiO ₂
										mg/L								
CALCULATED																		
Rain, bulk	0	10.7	47	5.00	12.1	4.0	0.0	2.3	0.02	6.7	0.2	0.3	0.8	1.25	0.007	0.001	0.07	0.2
Bare	1	10.7	309	7.89	12.8	7.5	150	15.6	0.07	7.6	0.5	55.4	1.4	0.05	0.004	0.000	0.01	4.1
Bare + some mosses/grasses	2	10.5	393	7.61	14.9	8.4	216	16.6	0.10	8.8	0.5	77.8	1.6	0.05	0.014	0.001	0.01	4.3
Mosses	3	10.3	465	7.46	19.4	10.5	264	17.8	0.12	11.3	0.6	94.0	1.9	0.05	0.031	0.003	0.01	5.0
Poor dry, mix of mosses+grasses+bare	4	10.1	575	7.26	24.6	12.8	344	16.1	0.15	14.3	0.7	120.3	2.4	0.05	0.047	0.005	0.01	5.6
Dry shrubs (open), <50% moss/grass	5	9.9	685	7.14	33.3	16.4	406	21.9	0.18	19.2	0.7	142.3	2.9	0.05	0.067	0.007	0.01	6.5
Rich dry dune veg	6	9.7	801	7.04	45.1	21.2	458	31.6	0.21	25.9	0.8	163.2	3.7	0.05	0.089	0.009	0.01	7.3
Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks	7	9.8	724	7.13	41.9	19.9	423	9.6	0.19	24.1	0.8	139.4	2.9	0.05	0.082	0.008	0.01	7.1
Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	9.6	802	7.08	54.7	25.2	452	5.5	0.21	31.4	0.9	150.3	4.0	0.05	0.100	0.010	0.01	8.2
Pines, dense dry	9	9.4	1032	7.00	98.7	42.7	508	0.0	0.28	56.2	1.4	173.1	7.4	0.25	1.380	0.138	0.01	11.0
Pines, dense medium wet	10	9.3	1407	6.92	176.6	73.1	570	0.0	0.36	99.8	2.2	201.3	12.6	0.31	1.765	0.176	0.01	14.1
MEASURED																		
<i>Depth</i>																		
Mix of mosses+grasses, dry (17+18)	4	1.3	638	7.70	12.1	15.9	492	0.0	0.07	8.0	5.2	150.8	8.2	2.07	0.531	0.071	0.04	18.8
Dense shrubs and deciduous, dry (16)	7	0.5	708	7.60	47.9	10.9	465	0.0	0.05	32.5	15.4	114.0	18.3	0.21	0.377	0.008	0.04	10.8
	7	0.8	789	7.63	58.0	22.4	487	0.0	0.05	33.6	19.3	111.5	31.6	2.19	0.533	0.033	0.03	16.2
	7	1.3	880	7.79	33.0		569	0.0	0.13	41.6	20.8	122.5	37.5	2.39	0.531	0.065	0.03	32.2
	7	1.9	1616	7.95	101.2	533.8	532	0.0	0.19	74.8	49.1	272.1	67.1	1.10	0.158	0.355	0.03	65.0
Wet shrubs and deciduous trees (14)	8	0.5	1102	7.25	83.8	78.6	683	0.0	0.37	65.8	2.3	222.1	18.3	18.49	1.546	0.018	0.05	21.0
	8	0.8	1327	7.25	150.4	119.5	666	0.1	0.10	99.6	9.3	238.2	16.9	18.24	1.723	0.028	0.03	16.1
	8	1.2	2168	7.48	262.6	597.8	636	0.0	0.23	144.8	30.4	414.4	30.8	6.68	1.952	0.050	0.03	40.4

Uit Tabel 8.2 volgt echter, dat de meetresultaten onder 3 typen begroeiing duidelijk afwijken op diverse punten van de berekende hydrochemie voor die vegetatietypen. Die afwijkingen zijn significant en belangrijk genoeg voor een toelichting:

- De gemeten Ca concentraties zijn in 2 van 3 gevallen hoger dan berekend, ondanks een kunstgreep in DUVELCHEM om via extra CO₂ (Tabel 8.2) de oorspronkelijk berekende niveaus op te krikken. Die extra CO₂ was nodig om in DUVELCHEM niet-verdisconteerde processen als pyrietoxidatie en oxidatie van veel organische stof te simuleren.
- SO₄ is op grotere diepte (beneden 1-1,5 m-MV) zeer aanzienlijk toegenomen, ten teken van pyrietoxidatie. Pyrietoxidatie wordt in DUVELCHEM niet meegenomen maar treedt in werkelijkheid vanaf zekere diepte dus wel degelijk op. Pyriet oxideert vooral in de zomerperiode wanneer de grondwaterstand fors daalt en evapoconcentratie ook de Cl-concentratie doet toenemen. Door zuurvorming tijdens pyrietoxidatie lost er tevens meer kalk op, hetgeen de afwijkend hoge Ca concentratie verklaart.
- De gemeten concentraties HCO₃, Fe, Mn, NH₄ zijn ook hoger dan berekend, terwijl de gemeten concentraties NO₃ en O₂ nul zijn en aanzienlijk boven nul berekend. Dit getuigt van (diepe) anaërobie in het systeem t.g.v. een ondiepe grondwaterstand en onevenredig veel interactie met organische stof. Deze situatie druist in tegen de voorwaarden voor toepassing van DUVELCHEM.
- De gemeten concentraties SiO₂, K en Mg zijn duidelijk hoger dan berekend. Dit wordt verklaard door het voorkomen van relatief veel biogeen opaal (o.a. diatomeeën) in de mariene plaatafzetting (SiO₂), kationuitwisseling t.g.v. verzoeting (K en Mg), en eventueel het voorkomen van een geringe hoeveelheid dolomiet of dolomitische kalksteen (Mg).
- Ionen die hoofdzakelijk via seaspray worden aangerijkt (Na, K, Mg en Cl) zijn in 2 van de 3 gevallen iets hoger gemeten dan berekend. Dit houdt deels verband met de afwijkende seaspray ontwikkeling op het Grevelingenmeer in vergelijking met die langs de Noordzeekust, en deels met verzoetingsverschijnselen.

Ontkalking en bijkomende gevolgen

Hoewel DUVELCHEM volgens bovenstaande in een aantal opzichten niet voldoet, is de Ca-concentratie voldoende dichtbij de werkelijkheid (zoals in 2013 gemeten) om de ontkalkingsmodule wel toe te passen. Daarbij zij opgemerkt dat de Ca-concentratie in de periode 1971-2013 toegenomen moet zijn, maar dat de infiltratiesnelheid waarschijnlijk is

afgenomen door de toegenomen begroeiing. In de toekomst zal de Ca-concentratie verder afnemen door uitloging van pyriet, waardoor de extra zuurproductie hierdoor afneemt. Het voorspelde ontkalkingsverloop, onder aanname dat de begroeiing niet verandert en de grondwaterstand evenmin, is weergegeven in Fig.8.2. Daarin zijn tevens getoond het geochemische diepteprofiel omstreeks 5.000 na Chr. (met de ontkalkingsdiepte en uitwisselbare kationen) en het verloop van de concentraties Cl, SO₄, NO₃ en Ca in grondwater op 1,5 m-MV van 1970 tot 3900 na Chr.

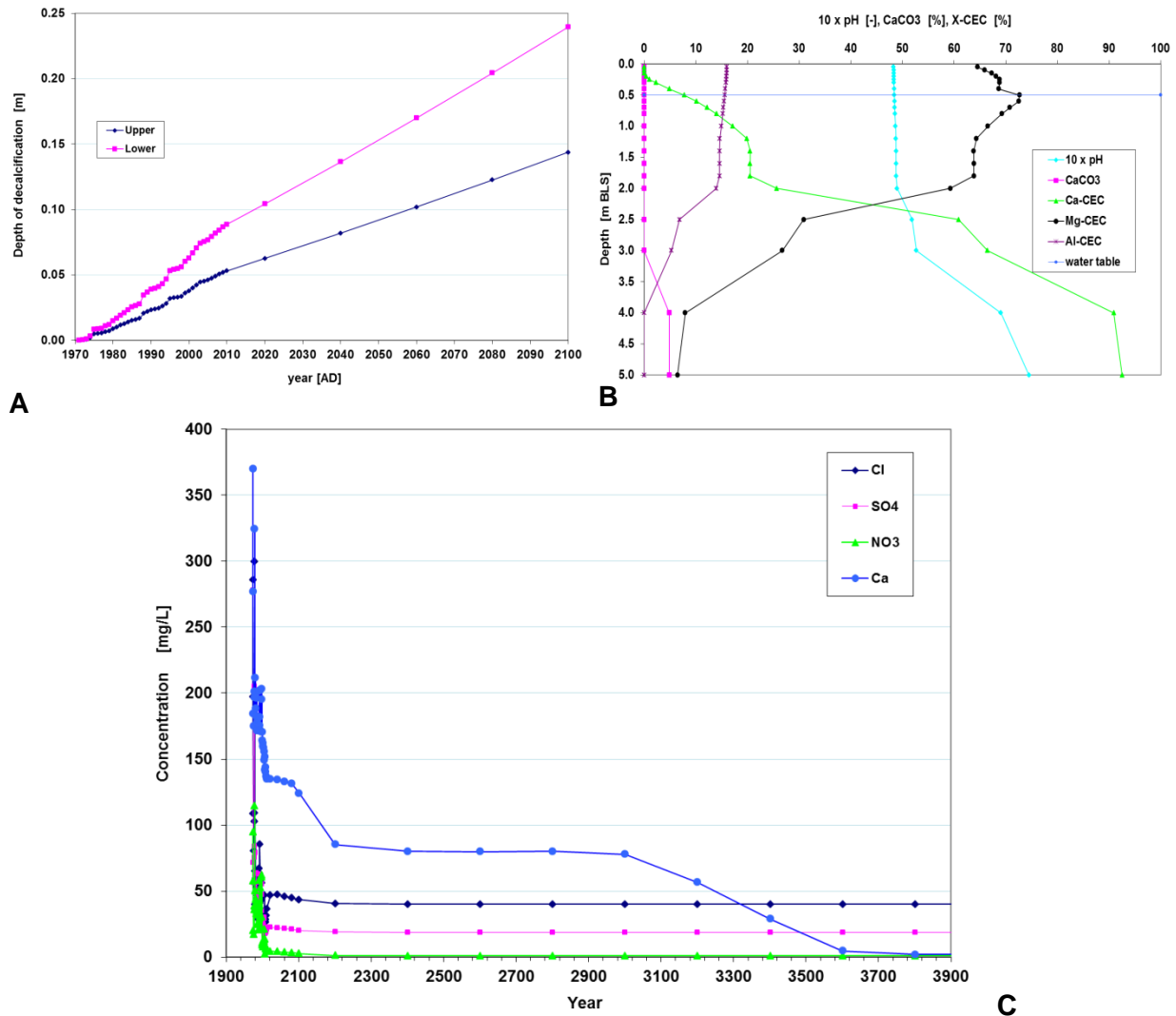


FIG. 8.2. Het voorspelde ontkalkingsverloop op de Veermansplaat (A), met voorspelde geochemische veranderingen omstreeks 5.000 na Chr (B) en hydrochemische veranderingen in de periode 1970-3900 na Chr. (C). Het ontkalkingsverloop in A toont zowel boven- als onderzijde van de ontkalkingszone. Volgens Fig.B bevindt de ontkalkingszone zich tussen 3 en 4 m-MV omstreeks 5.000 na Chr. (dus na ca. 3000 jaar bestaan van de plaat). Volgens Fig.C daalt de Ca-concentratie in de loop der tijd sprongsgewijs tgv eerst een afnemende atmosferische input van sterke zuren, dan omstreeks 2100 tgv het dalen van het ontkalkingsfront onder de top van de vol-capillaire zone (overgang van open naar gesloten systeem), en vanaf 3.000 door ontkalking ter hoogte van het waarnemingsfilter op 1,5 m-MV.

8.3 Scenario's voor de Waddeneilanden

In deze sectie worden de hydrogeochemische consequenties gepresenteerd van enkele scenario's voor Texel en/of Schiermonnikoog zoals doorgerekend met DUVELCHEM. Dit gebeurt voor de infiltratiezone op een groot embryoduin of een stuifdijk. Alleen daar overheerst infiltratie over exfiltratie, en ontstaat vooral in de zomerperiode een redelijk dikke onverzadigde zone die nodig is voor toepassing van DUVELCHEM. De basisgegevens voor de modellering zijn in Tabel 8.3 samengevat.

TABEL 8.3. Basisgegevens voor de modellering van de ondiepe grondwaterkwaliteit en ontkalking op een groot embryoduin of een stuifdijk op een Waddeneiland, met name Texel. De vermelde parameterwaarden gelden voor alle 10 locaties (vegetatietypen). Tabel 8.3 kent 3 extra parameters tov Fig.8.1: dikte vol-capillaire zoom, extra CO₂ en porositeit.

Parameter	Unit	Input	Parameter	Unit	Input
Precipitation	m/a	0.845	Full capillary zone	m	0.25
Temp	oC	10.5	Screen depth	m BLS	2.5
Region	-	1	Start landscape	year	1994
Distance HWL	m	500	Quality survey	year	2013
f-Cl dep	-	0.50	Rooting depth	m BLS	0.01-0.5
Seawater Cl	mg/L	16600	Extra CO ₂	log PCO ₂	0
Land surface	m ASL	2.0	CaCO ₃ content	% d.w.	0.5
Groundwater table	m ASL	1.00	Porosity	-	0.4

Gevolgen van veranderingen in begroeiingsdichtheid

Uit Tabel 8.4 valt af te leiden hoe de grondwatersamenstelling op 2,5 m-MV verandert op een embryoduin of stuifdijk als de begroeiing toe- of afneemt. We zien in het algemeen dat de concentratie opgeloste stoffen van grondwater toeneemt volgens de reeks: kaal < mossen < grassen < duindoorn < eiken < dennen. Dit wordt verklaard door de toenemende verdampingsverliezen (evapoconcentratie), toenemende hoeveelheid interceptie van atmosferische aerosolen en gassen (meer sterke zuren), toenemende opslag van nutriënten in biomassa (vooral N en P), en toenemende productie van CO₂, HCO₃ en DOC.

TABEL 8.4. Voor droge duinen berekende chemische samenstelling van ondiep grondwater op 2,5 m-MV, en de op Texel gemeten samenstelling op niet geïnundeerde embryoduin (locaties B7 en AB7), beide anno 2013.

Vegetation type	Veg. Code	Temp oC	EC 20c uS/cm	pH	Cl	SO ₄	HCO ₃	NO ₃	PO ₄	Na	K	Ca	Mg	NH ₄	Fe	Mn	Al	SiO ₂
					mg/L					mg/L								
CALCULATED																		
Rain, bulk	0	10.5	95.2	5.00	27.4	6.2	0.0	2.3	0.02	15.3	0.6	0.6	1.8	1.3	0.060	0.020	0.07	0.2
Bare	1	10.2	258.7	8.49	29.0	7.7	73.4	6.4	0.0	16.5	0.8	26.9	2.4	0.1	0.002	0.000	0.01	3.9
Bare + some mosses/grasses	2	10.5	310	8.20	33.3	8.7	106	6.2	0.06	19.0	0.9	37.8	2.7	0.05	0.008	0.001	0.01	4.2
Mosses	3	10.3	365	8.07	42.6	10.8	128	4.7	0.07	24.3	1.1	44.7	3.4	0.05	0.018	0.002	0.01	4.8
Poor dry, mix of mosses+grasses+bare	4	10.1	441	7.86	53.3	13.1	169	0.3	0.09	30.2	1.2	57.8	4.2	0.05	0.273	0.027	0.01	5.3
Dry shrubs (open), <50% moss/grass	5	9.9	530	7.75	70.1	16.6	196	1.1	0.10	39.6	1.5	66.3	5.3	0.05	0.039	0.004	0.01	6.0
Rich dry dune veg	6	9.7	630	7.68	91.9	21.1	217	3.9	0.12	51.9	1.8	74.0	6.7	0.05	0.050	0.005	0.01	6.7
Dense shrubs, Wet tall grasses, Oaks	7	9.8	605	7.72	87.5	20.2	212	0.0	0.12	49.4	1.8	67.2	5.9	0.05	0.479	0.048	0.01	6.6
Wet dune slack, Deciduous forest (wet)	8	9.6	707	7.66	112.2	25.3	228	0.0	0.14	63.3	2.1	74.8	7.8	0.05	0.583	0.058	0.01	7.3
Pines, dense dry	9	9.4	1004	7.57	190.1	41.2	260	0.0	0.18	106.8	3.3	89.2	13.3	0.15	0.802	0.080	0.01	9.3
Pines, dense medium wet	10	9.3	1456	7.50	313.8	66.4	290	0.0	0.23	175.9	5.2	103.7	21.6	0.18	1.011	0.101	0.01	11.7
MEASURED																		
		Depth																
Mix of mosses+grasses, dry (B7+AB7)	4	1.7	429	7.96	59.5	15.1	177	0.7	0.10	35.7	3.0	51.5	8.6	0.01	0.07	0.01	0.06	7.8

Uit Tabel 8.4 volgt, dat de meetresultaten onder een arme droge begroeiing bestaande uit grassen, mossen en weinig kale plekken goed overeenkomt met de berekende hydrochemie voor dat vegetatietype. De afwijkingen zijn insignificant.

Ontkalking en bijkomende gevolgen

Omdat de met DUVELCHEM voorspelde Ca-concentratie voldoende dichtbij de werkelijkheid (zoals in 2013 gemeten) is, kunnen we de ontkalkingsmodule zonder optimalisaties toepassen. Daarbij zij opgemerkt dat de Ca-concentratie in de periode 1994-2013 iets toegenomen moet zijn, maar dat de infiltratiesnelheid waarschijnlijk is afgenomen door de toegenomen begroeiing. In de toekomst zal de Ca-concentratie verder afnemen (Fig.8.3C) t.g.v. eerst een afnemende atmosferische input van sterke zuren, dan omstreeks 2100 tgv het dalen van het ontkalkingsfront onder de top van de vol-capillaire zone (overgang van open naar gesloten systeem), en vanaf 2600 door ontkalking ter hoogte van het waarnemingsfilter op 2,5 m-MV.

Het voorspelde ontkalkingsverloop, onder aanname dat de begroeiing niet verandert en de grondwaterstand evenmin, is weergegeven in Fig.8.3A. We zien derhalve een aanzienlijk snellere ontkalking dan op de Veermansplaat, vooral omdat het (primaire) kalkgehalte zo laag is (0,5 versus ca. 5 %).

In Fig.8.3 zijn tevens getoond het geochemische diepteprofiel omstreeks 2.050 na Chr. (met de ontkalkingsdiepte en uitwisselbare kationen) en het verloop van de concentraties Cl, SO₄, NO₃ en Ca in grondwater op 1,5 m-MV van 1994 tot 3900 na Chr.

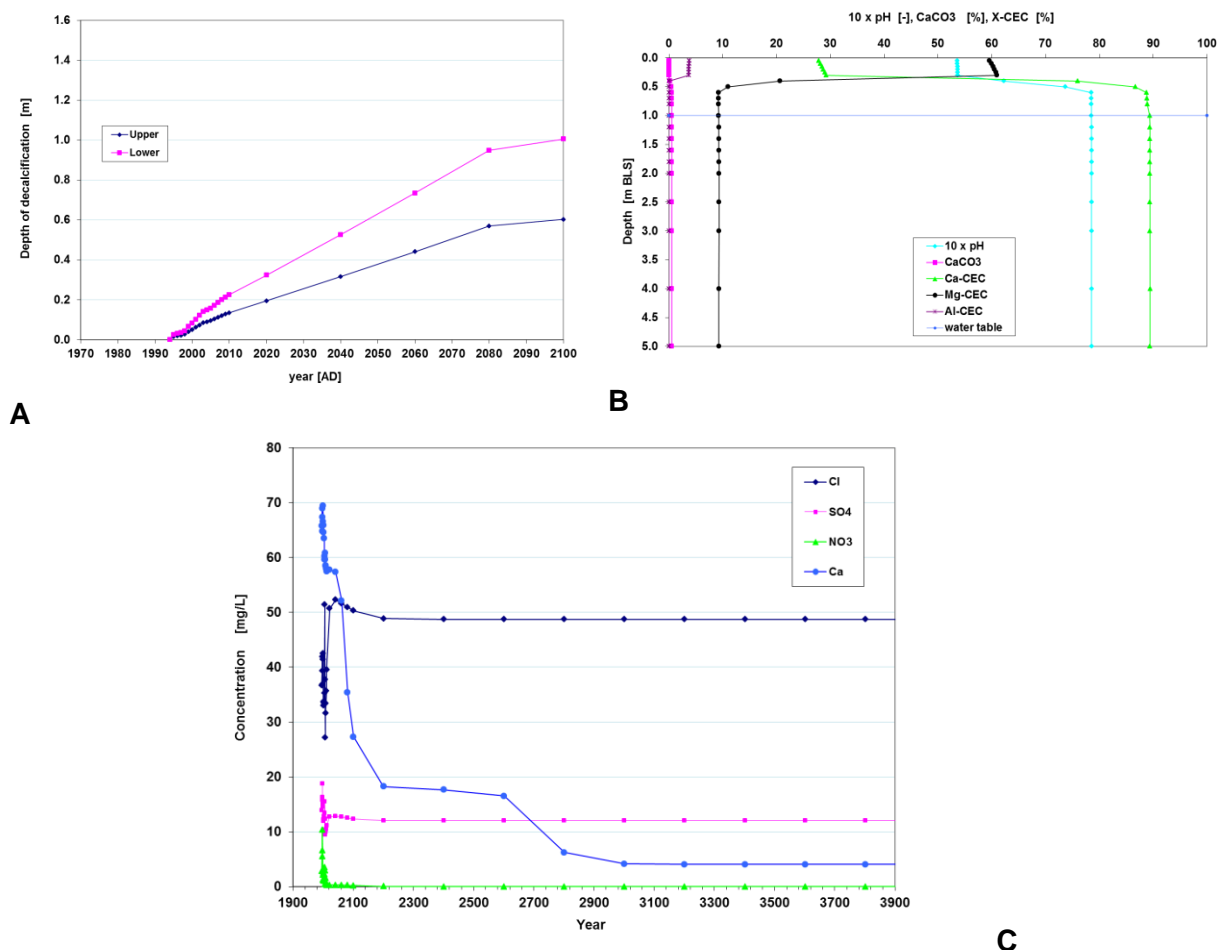


FIG. 8.3. Het voorspelde ontkalkingsverloop op Texel (A), met voorspelde geochemische veranderingen omstreeks 2050 na Chr (B) en hydrochemische veranderingen in de periode 1994-3900 na Chr. (C). Het ontkalkingsverloop in A toont zowel boven- als onderzijde van de ontkalkingszone. Volgens Fig.B bevond de ontkalkingszone zich op ca. 0.2 m -MV in 2013 na Chr. (dus na ca. 19 jaar bestaan van het embryoduin). Volgens Fig.C daalt de Ca-concentratie in de loop der tijd sprongsgewijs tgv eerst een afnemende atmosferische input van sterke zuren, dan omstreeks 2100 tgv het dalen van het ontkalkingsfront onder de top van de vol-capillaire zone (overgang van open naar gesloten systeem), en vanaf 2.600 door ontkalking ter hoogte van het waarnemingsfilter op 2,5 m-MV.

9 Referenties

- Amatirsat, D. 2014. Hydrology of a dynamic coastal dune area on the southwest part of Texel Island, the Netherlands. MSc thesis VU University Amsterdam, 163p.
- Arens, S.M., A.B. van den Burg, P. Esselink, A.P. Grootjans, P.D. Jungerius, A.M. Kooijman, C. de Leeuw, M. Löffler, M. Nijssen, A.P. Oost, H.H. van Oosten, P.J. Stuyfzand, C.A.M. van Turnhout, J.J. Vogels, M. Wolters 2009. Preadvies Duin- en Kustlandschap. Directie Kennis, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Rapport DK nr. 2009/dk113-O, 171p.
- Berg, G. & M. Sagel 1995. Natuurontwikkeling door middel van plaggen in de valleien langs de Moksloot op Texel. Doctoraalverslag RUG, Lab. Voor Plantenoecologie, Biol. Centrum Haren, 94p.
- Beukeboom, Th.J. 1976. The hydrology of the Frisian islands. PhD Vrije Universiteit Amsterdam, Rodopi, 121p.
- Braat, C. 2011. Nationaal Park Schiermonnikoog, Beheer- en inrichtingsplan 'plus' 2011-2022, 133p.
- Carlson Mazur, M.L., M.J. Wiley and D.A. Wilcox 2014. Estimating evapotranspiration and groundwater flow from water-table fluctuations for a general wetland scenario. *Ecohydrol.* 7, 378–390.
- Cornelissen, C.M.L. 1984. Grondwaterkaart van Nederland; Goedereede, Zierikzee, Willemstad (36H, 42W+O, 43W). Dienst Grondwaterverkenning TNO, Rapport GWK 36, 76p.
- De Groot, A.V. 2001. Tidal groundwater fluctuations in a beach with swash bars. M.Sc. thesis Univ. Utrecht, 97p.
- De Kraker, K. (2005) *Kartering Meetsoorten De Grevelingen*. Uitgave Ecologisch adviesbureau Sandvicensis/SBB, 144 pp.
- De Leeuw, C.C., Grootjans, A.P., Lammerts, E.J., Esselink, P., Stuyfzand, P.J., Stal, L. & van Turnhout, C.C. (2008). *Ecologische effecten van Duinboog- en Washoverherstel op de Waddeneilanden*. Rapport IVEM (RU-Groningen), 130 pp.
- De Zanger, F.A.P. 1981. Exceptional Groundwater Level Fluctuations at the Dutch Island of Schiermonnikoog. *Nordic Hydrology*, 111-118.
- EGG Consult 2014. *Vegetatie-trends van N-depositie gevoelige duinhabitats op de Waddeneilanden*. Concept rapport 28-11-2013 onder begeleiding van het OBN-deskundigenteam Duin en Kust.
- Estrada de Wagt, I. 2014.
- Gribovski, Z., J. Szilágyi, P. Kalicz 2010. Diurnal fluctuations in shallow groundwater levels and streamflow rates and their interpretation – A review. *Journal of Hydrology* 385, 371–383.
- Grootjans, A.P. 1993. Regeneratie van verzuurde duinvalleien in het bijzonder op Schiermonnikoog. RUG Laboratorium voor Plantenoecologie, 73p.
- Grootjans, A.P., Lammerts, E.J. & Van Beusekom, F. 1995. *Kalkrijke Duinvalleien op de Waddeneilanden; Ecologie en regeneratiemogelijkheden*. KNNV, Utrecht, 176 pp.
- Grootjans, A.P., P.J. Stuyfzand, H. Everts, N. de Vries, A. Kooijman, G. Oostermeijer, M. Nijssen, B. Wouters, J. Petersen & R. Shahrudin 2014. *Ontwikkeling van zoet-zoutgradiënten met en zonder dynamisch kustbeheer; een onderzoek naar de mogelijkheden voor meer natuurlijke ontwikkelingen in het kustgebied*. VBNE-rapport 2014/OBN193-DK in druk.
- Hartog, P.S., F.H. Everts & A.P. Grootjans 1991. *Vegetatiekartering van de Mokslootvallei (Texel)*. Rapport EV 91/8, Oecologisch advies & onderzoeksbureau Groningen, 74p.
- KNMI 2011. *Klimaatatlas, Langjarige gemiddelden 1981-2010*. Errata atlas .
- Kraker de, K. 2012. *Vegetatie van de Grevelingen, kartering meetsoorten 2009-2011*. 206p.
- Loheide, S.P., 2008. A method for estimating subdaily evapotranspiration of shallow groundwater using diurnal water table fluctuations. *Ecohydrology* 1, 59–66. doi:10.1002/eco.7.
- Meyboom, P., 1965. Three observations on streamflow depletion by phreatophytes. *Journal of Hydrology* 2 (3), 248–261.
- Nielsen, P. 1999. Groundwater Dynamics and Salinity in Coastal Barriers, *Journal of Coastal Research*, 15(3), 732-740.
- Oskam, B. 2013. *De chemische samenstelling van het grondwater op de Veermansplaat; een voorbeeld van extreme zoet-zout gradiënten*. B.Sc. Thesis FALW VU University Amsterdam, 47p, 8 bijlagen.
- Oude Essink, G.H.P. 1996. Impact of sea level rise on groundwater flow regimes; a sensitivity analysis for the Netherlands. PhD TU Delft, Delft Studies in Integrated Water Management No.7, 41 1p.
- Pauw, P.S. 2009. *The onshore and offshore groundwater salinity distribution between Egmond aan Zee and Castricum aan Zee*. Master Thesis Hydrogeology VU Univ. Amsterdam, 60p.
- Rus, J.S., H. Bakker & C. Steinweg 2011. *Hydrologische systeemanalyse Waddeneilanden; Schiermonnikoog*. Royal Haskoning Rapport 9V8127, 108p.
- RWS 20???. http://www.rijkswaterstaat.nl/images/Referentiewaarden%20waterstanden_tcm174-326696.pdf
- SBB 1975. *Notitie betreffende de Waterhuishouding Mokslootvallei, reservaat Geul en Westerduinen, boswachterij Texel*. Rapport Afd. T.Z.-N.B. Staatsbosbeheer Utrecht, 6p.
- Shahrudin, R., A. van de Craats, A. Grootjans, A.P., & A.M. Kooijman (2014). *Window of opportunity of Liparis loeselii in relation to the coastal dune slack succession (in prep)*. Shahrudin, R.B. 2014. *Proefschrift RU-Groningen*.
- Siemon, B., A.V. Christiansen and E. Auken 2009. A review of helicopter-borne electromagnetic methods for groundwater exploration. *Near Surface Geophysics*, 2009 (7), 629-646.

- Slager, H. en J. Visser 1990. Abiotische kenmerken van de drooggevallen gebieden in de Grevelingen. Flevobericht nr. 312, 80p, 39 bijlagen.
- Sous D., L. Campmas, S. Meulé, F. Bouchette, J. Yih Liou, V. Rey and J. Touboul 2013. Wave setup and watertable overheight in the Cigu sand barrier (Taiwan) during the Talim tropical storm. *Coastal Dynamics* 1517-1526.
- Streefkerk, J.G. & J.A. Woerlee 1995. Evaluatie en herziening hydrologisch meetnet Duinen-Zuid in Texel, Regio 10 (Hollands Noorden). Rapport Staatsbosbeheer, Driebergen, 32p.
- Stuyfzand, P.J. 1993. Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Ph.D Thesis Vrije Univ. Amsterdam, published by KIWA, ISBN 90-74741-01-0, 366 p.
- Stuyfzand, P.J. 1998. Decalcification and acidification of coastal dune sands in the Netherlands. *Water-Rock Interaction, Proc. 9th Intern. Symp. on WRI, Taupo New Zealand*, G.B. Arehart & J.R. Hulston (eds), Balkema, 79-82.
- Stuyfzand, P.J. 2009. HYDROLENS 3.1: A 2D hydrological model for analytical approximation of the size and shape of either fresh groundwater lenses on saline water, or rain water lenses on infiltrated river water. Set in Excel spreadsheet. Open source.
- Stuyfzand, P.J. 2010. Modelling kwaliteit ondiep (duin)grondwater en ontkalking, inclusief effecten van klimaatverandering en kustuitbreiding: DUVELCHEM. KWR-rapport BTO 2010.031(s), 86p.
- Stuyfzand, P.J. 2012. Hydrogeochemical (HGC 2.1), for storage, management, control, correction and interpretation of water quality data in Excel (R) spread sheet. KWR Watercycle Research Institute, KWR-report BTO.2012.244(s), 76p.
- Stuyfzand, P.J. 2013. Handleiding voor veldwerk met spiraalboor en water analyses in veld en lab. VU University Amsterdam, manual versie maart 2013, 6p.
- Stuyfzand, P.J. 2014. Reservoiranalyse van PWN's duininfiltratiesystemen ter bepaling van de overbruggingsmogelijkheden en effecten van langdurige innamestops. KWR-rapport KWR 2014.074, 56p.
- Stuyfzand, P.J. 2015. Effects of climate and environmental change on shallow groundwater quality and quantity in Dutch coastal dunes. KRW report KWR BTO.2015.0?? (s) in prep.
- Stuyfzand, P.J. & G.A. Bruggeman 1994. Analytical approximations for fresh water lenses in coastal dunes. *Proc. 13th Salt Water Intrusion Meeting, June 1994, Cagliari Italy*, G. Barrocu (ed), Univ. Cagliari, Fac. Engineering, 15-33.
- Stuyfzand, P.J., F. Lüers & A.P. Grootjans 1992. Hydrochemie en hydrologie van het Kapenglop, een natte duinvallei op Schiermonnikoog. KIWA-rapport SWE-92.-038, 126p.
- Sulzbacher, H., H. Wiederhold, B. Siemon, M. Grinat, J. Igel, T. Burschil, T. Günther, and K. Hinsby 2012. Numerical modelling of climate change impacts on freshwater lenses on the North Sea Island of Borkum using hydrological and geophysical methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 3621–3643.
- Ten Haaf, M.E. & P.H. Buijs 2008. Morfologie en dynamiek van washoversystemen; verkennende studie voor de Nederlandse Waddeneilanden. Rapport Univ. Utrechtin opdracht van RWS, 124p.
- Van Bloemendal – Bland, Ch. 2014. Groundwater Hydrochemistry in a Dynamic Dunes System: South Texel, The Netherlands. MSc thesis VU University Amsterdam.
- Van de Haterd, R.J.W., Lengkeek, W., Bouma, S. en Collombon M.T. 2010. Herintroductie getij in de Grevelingen en effecten op natuur in intergetijdengebieden. rapport nr. 10-079, 70p.
- Van der Craats (2012), Window of opportunity of Liparis loeselii in relation to dune slack development on Texel. M.Sc. thesis, IBED, University of Amsterdam.
- Van Loon, D.R. 2013. Vorm en chemie van de zoetwaterlens op de Veermansplaat. B.Sc. Thesis FALW VU University Amsterdam, 49p, 4 bijlagen.
- Visser, J. 1995. Het Grevelingenmeer, natuurlijk ingericht; Achtergronden van 25 jaar inrichting en beheer. Flevobericht nr. 378, 85p.
- Vugts, H.F. 2002. Weerzien op de Wadden; dertig jaar weer en klimaatonderzoek in het Waddengebied. Pirola, 232p.
- Weijers, E.P. & H.F. Vugts 1990. The composition of bulk precipitation on a coastal island with agriculture compared to an urban region. *Atmospheric Environment* 24A (12), 3021-3031.
- Wetsteijn, L.P.M.J. 2011. Grevelingenmeer: meer kwetsbaar? Een beschrijving van de ecologische ontwikkelingen voor de periode 1999 t/m 2008-2010 in vergelijking met de periode 1990 t/m 1998. Rapport RWS Waterdienst, Lelystad, 163p.
- White, W.N., 1932. Method of Estimating Groundwater Supplies Based on Discharge by Plants and Evaporation from Soil – Results of Investigation in Escalante Valley. Tech. Rep., Utah – US Geological Survey. Water Supply Paper 659-A.
- Wiertsema & Partners 2012. Geotechnisch onderzoek ecohydrologisch project Schiermonnikoog. Rapport VN-56848-1, Doc nr = R20717, 22p.

Bijlage 1: Berekening van de vorm en vorming van zoetwaterlenzen

Onderstaande informatie is ontleend aan § 3.1. in Stuyfzand (2014).

Veranderingen in nuttige neerslag, regionale en lokale drainagebasis (resp. zeeniveau en niet afwaterende plassen), zoutgehalte Noordzee en Waddenzee, duinsysteemgrootte en tijd sinds de verandering hebben gevolgen voor de grootte van een zich op zout grondwater vormende zoetwaterlens, zoals die algemeen op de Waddeneilanden voorkomen (Beukeboom, 1976).

Deze gevolgen zijn met analytische oplossingen te berekenen voor eenvoudige situaties die zich laten schematiseren met een homogeen, isotroop watervoerend pakket (WVP) waarbinnen de lens ruimschoots past, ruimtelijk uniforme en constante nuttige neerslag, een scherpe zoet-zout overgang en homogeen stilstaand zout grondwater. In de praktijk pakt het meestal anders uit (Fig.1), maar voor orde van grootte bepalingen zijn de analytische oplossingen voor bovenstaande eenvoudige situatie, die Beukeboom (1976; let op fouten in zijn formules!) en Oude Essink (1996) geven, zeer bruikbaar.

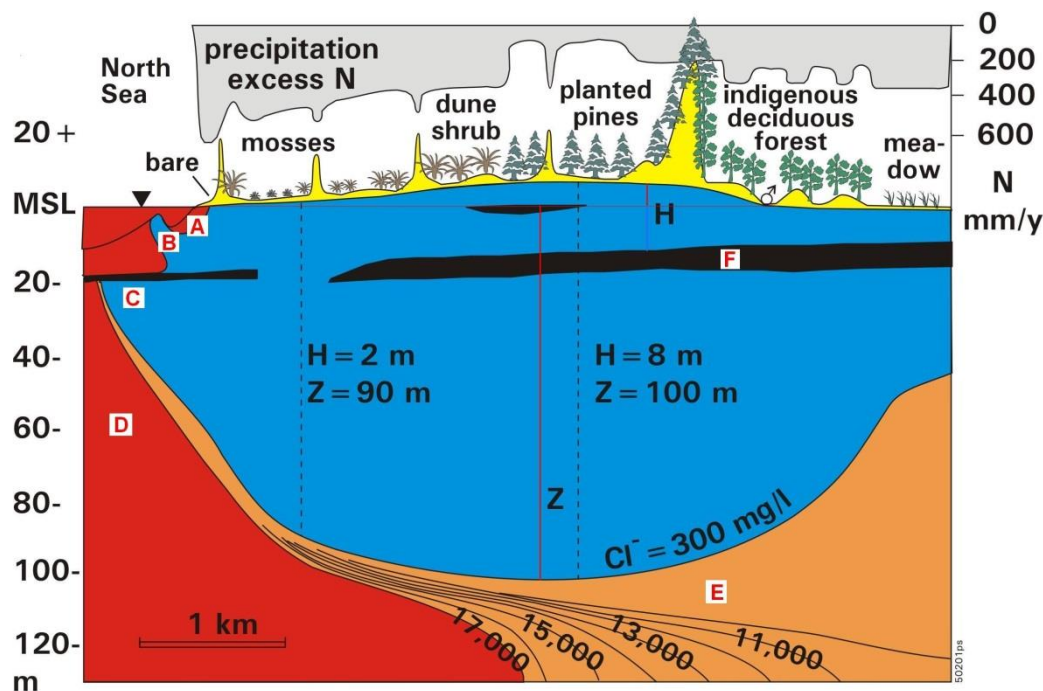


FIG. B.1. Afwijkingen in een natuurlijke zoetwaterlens, van het ideale symmetrische geval, door: ruimtelijke variaties in grondwateraanvulling, een heterogeen, anisotroop poreus medium, geen scherpe zoet-zout overgang en heterogeen, stromend zout grondwater (gewijzigd naar Stuyfzand & Bruggeman, 1994).

A = ondiep Noordzee systeem aangedreven door getij; B = zoetwater exfiltratie bij laagwaterlijn; C = zoetwatertong onder zee als gevolg van SDP; D = diepe Noordzee systeem aangedreven door dichtheidsverschillen en/of polders achter duinen; F = Slecht-doorlatend pakket (SDP).

Er worden 2 situaties onderscheiden met relevantie voor de Waddeneilanden of strukturelementen daarbinnen: een oneindig lang, langwerpig eiland (of geïsoleerd duinboogstelsel) en een circelvormig eiland (of geïsoleerd duinboogstelsel).

Voor een langwerpig en circelvormig stelsel zijn de formules voor de diepteligging van de onderzijde van de zoetwaterlens na 100% vorming (Z in m-GZN; GZN = Gemiddeld ZeeNiveau), de hoogte van de grondwaterstand na 100% vorming (opbolling; H in m+GZN), het volume zoet grondwater in de lens na 100% vorming (V in m^3) en vormingstijd van de zoetwaterlens (t_p in dagen) als volgt:

$$Z = \sqrt{\{(N (0.25 B^2 - X^2) / (K (1 + \alpha) \alpha)\}} \quad \text{Langwerpig} \quad (1A)$$

$$Z = \sqrt{\{(0.5 N (R^2 - X^2) / (K (1 + \alpha) \alpha)\}} \quad \text{Circelvormig} \quad (1B)$$

$$H = \alpha Z \quad \text{Langwerpig en circelvormig} \quad (2)$$

$$V = 0.25 \pi \varepsilon B (H_{MAX} + Z_{MAX}) \quad \text{Langwerpig [m}^3 \text{ / m]} \quad (3A)$$

$$V = \frac{2}{3} \pi \varepsilon R^2 (H_{MAX} + Z_{MAX}) \quad \text{Circelvormig [m}^3 \text{]} \quad (3B)$$

$$t_p = \text{Atanh}(P) / \sqrt{\{(4 K N) / [(0.25 \pi \varepsilon B)^2 \rho_S / (\rho_S - \rho_F)]\}} \quad \text{Langwerpig} \quad (4A)$$

$$t_p = \text{Atanh}(P) / \sqrt{\{(4.5 K N) / [(\varepsilon R)^2 \rho_S / (\rho_S - \rho_F)]\}} \quad \text{Circelvormig} \quad (4B)$$

met:

$\text{Atanh}(P) =$ inverse van tangens hyperbolicus van $P = \ln \{(1 + P) / (1 - P)\}$

$\alpha = (\rho_S - \rho_F) / \rho_F$

$\rho_S =$ dichtheid zoute water onder lens [kg/L];

$\rho_F =$ dichtheid zoete water in lens [kg/L];

$H_{MAX}, Z_{MAX} = H, Z$ bij $X = 0$ [resp. m+GZN en m-GZN];

$N =$ nuttige neerslag [m/d];

$B =$ breedte duinmassief [m];

$R =$ straal van circelvormig eiland [m];

$X =$ afstand vanaf centrum duinmassief [m];

$K =$ horizontaal doorlaatvermogen watervoerende pakket WVP [m/d]

$\varepsilon =$ effectieve porositeit WVP [-].

$P =$ fractie groei van zoetwaterlens $= Z_{t=t} / Z_{t=\infty}$ ($0 < 1$)

Als voorbeeld staat in Fig.7.10B weergegeven de afhankelijkheid van H, Z en $t_{0.99}$ van de diameter van een circelvormig duinsysteem, uitgaande van $N = 0,4$ m/j, $K = 6$ m/d, $\varepsilon = 0,4$ en $\alpha = 0,02121$. De verbanden zijn bijna lineair.

In werkelijkheid zijn er echter diverse complicaties (Fig.B1), waarvan de aanwezigheid van horizontaal gelaagde stoorlagen (Slecht Doorlatende Pakketten; SDPs) bijzondere aandacht verdient. Daardoor neemt bij een stabiele lens (in de tijd) de waarde van H en $t_{0.99}$ toe, en die van Z af, terwijl zich tevens een zoetwatertong vormt met lengte $L_{C,B}$, voorbij het uiteinde van de lens op GZN, zich uitstrekkende onder het SDP. De lengte van deze zoetwatertong kan als volgt worden geschat op basis van uitkomsten met een geavanceerder analytisch model door Stuyfzand (1993):

$$L_{C,B} = 500 (0.232 + 3.844 \cdot 10^{-4} C - 8.53 \cdot 10^{-9} C^2) \sin(10^{-4} \pi B) \quad \text{[m]} \quad (5)$$

met:

$C =$ weerstand van het SDP [dagen].

De toename van H en t_p , en afname van Z als functie van de c -waarde van een SDP kunnen als volgt worden geschat, op basis van waarnemingen aan zoetwaterlensen in het Nederlandse kustduingebied (zie b.v. Bakker 1981 en Stuyfzand 1993):

$$H_{CORR} = (5 - 4 E^{-C/9000}) H \quad (6)$$

$$Z_{\text{CORR}} = Z / (5 - 4 E^{-C/9000}) \quad (7)$$

$$t_{\text{P,CORR}} = (5 - 4 E^{-C/9000}) t_{\text{P}} \quad (8)$$

De effecten van deze correcties staan in Fig.7.10, waarbij een C-waarde van het SDP van 1500 d is aangehouden.

N.B.: Een volgende versie van HYDROLENS is kort na afronding van de berekeningen voor dit rapport verschenen, en wordt uitgebreid toegelicht in Stuyfzand (2014).