
De oorsprong van het brakke en zoute grondwater in het Nederlandse kustgebied

Vincent Post

Inleiding

Dat er zout water in de bodem van het Nederlandse kustgebied voorkomt is al eeuwen bekend. Van die kennis werd handig gebruik gemaakt in de Middeleeuwen, toen op grote schaal veen werd afgegraven en verbrand voor de zoutwinning. Het wetenschappelijk onderzoek naar het brakke en zoute grondwater kwam echter pas serieus op gang in de tweede helft van de 19^e eeuw toen men op zoek was naar een geschikte locatie voor de drinkwaterwinning voor Amsterdam (De Vries, 1982). Men bemerkte dat het zoutgehalte over het algemeen met de diepte en in de richting van de kust toenam.

De herkomst van het brakke en zoute grondwater was het onderwerp van een groot aantal publicaties (o.a. Versluys, 1931; Volker, 1961; Geirnaert, 1972; De Vries, 1981; Meinardi, 1974; Beekman, 1991; Gieske, 1991; Stuyfzand, 1993; Oude Essink, 1996). Deze hebben echter nog niet tot een volledig beeld geleid van de genese van de huidige zoet-zoutverdeling in laag Nederland omdat de meeste studies kwalitatief van aard waren of zich beperkten tot een bepaald gebied. Het promotieonderzoek waar ik de afgelopen jaren aan heb gewerkt had daarom tot doel om tot een meer kwantitatief onderbouwde hypothese te komen ten aanzien van de ontstaanswijze van de zoet-zoutverdeling in het Nederlandse kustgebied. In deze bijdrage aan Stromingen sta ik stil bij de herkomst en ouderdom van het zoute grondwater. De volledige tekst van het proefschrift is te vinden op: <http://home.hccnet.nl/vincentpost>.

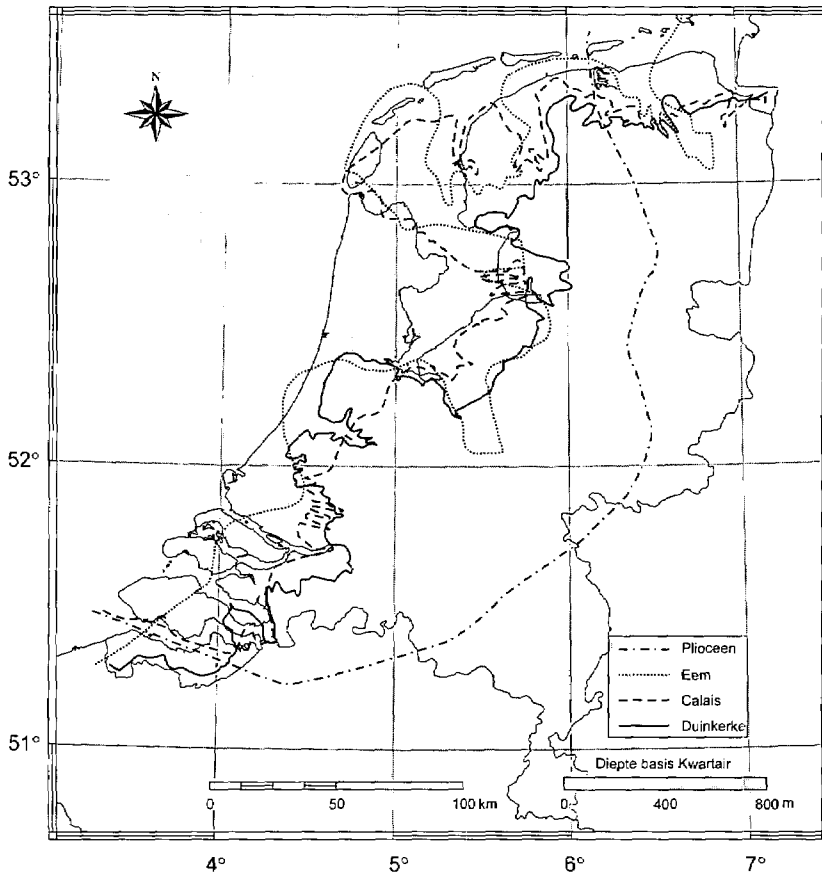
In wat volgt wordt de term zoet gebruikt voor grondwater met een chloride (Cl) concentratie < 300 mg/l, brak grondwater heeft $300 \leq \text{Cl} < 10.000$ mg/l en zout grondwater heeft $\text{Cl} \geq 10.000$ mg/l.

Geologische geschiedenis

In het verleden heeft de zee tijdens zogenaamde transgressies het Nederlandse kustgebied herhaaldelijk overstroomd. De vroegste mariene bedekkingsfase die in dit kader relevant is, was gedurende het Pliocen en Vroeg-Pleistoceen toen de kustlijn grofweg samenviel met de huidige landsgrenzen (zie figuur 1). Deze fase duurde tot ongeveer 1,6 miljoen jaar geleden. In de honderdduizenden jaren die volgden trok de zee zich ver terug, wel tot bij de

Vincent Post is werkzaam bij de Vrije Universiteit, Faculteit der Aard- en Levenswetenschappen, De Boelelaan 1085, 1081 HV Amsterdam. E-mail: vincent.post@falw.vu.nl.

Doggersbank. In West-Nederland werden in deze periode dikke pakketten fluviatiele gronden, zanden en kleien afgezet. Tijdens de Elster (380–360 ka BP) en Saale (180–130 ka BP) ijstijden reikten de ijskappen tot in ons land en vonden ingrijpende veranderingen in de morfologie plaats: diepe glaciale bekkens en stuwwallen werden gevormd tot meer dan 100 meter hoog. Grootschalige binnendringing van de zee vond voor het eerst sinds het Vroeg-Pleistoceen weer plaats gedurende het Eem (130–110 ka BP, zie figuur 1). Gedurende de op het Eem volgende Weichsel ijstijd (110–10 ka BP) werd ons land niet door het ijs bedekt maar was er wel sprake van permafrost.



Figuur 1: Diepte van de onderkant van de kwartaire afzettingen (Zagwijn en Doppert, 1978) en landwaartse uitbreiding van de Noordzee gedurende het Pliocceen en drie Kwartaire transgressies (Zagwijn, 1974; Zagwijn en Doppert, 1978; Zagwijn, 1986).

Ongeveer 10.000 jaar geleden begon de temperatuur wereldwijd te stijgen. De daarmee gepaarde zeespiegelstijging resulteerde rond 7.500 jaar geleden in het binnendringen van de zee in de huidige kustprovincies. Het waddemilieu dat daardoor ontstond begon vanaf 5.500 jaar geleden geleidelijk dicht te slibben waardoor veengroei mogelijk werd en het gebied verzoette. De zee drong echter nog herhaaldelijk het gebied binnen en in grote

gebieden werd het veen weggeslagen. Op deze manier werd in de Middeleeuwen het IJsselmeer gevormd. Langs de kust ontstonden in dezelfde periode de duinen en begon de mens het landschap ingrijpend te veranderen door de ontginning en afgraving van veengebieden, bedijking en inpoldering. Op die manier ontstond het karakteristieke polderlandschap zoals we het vandaag de dag kennen.

De huidige situatie

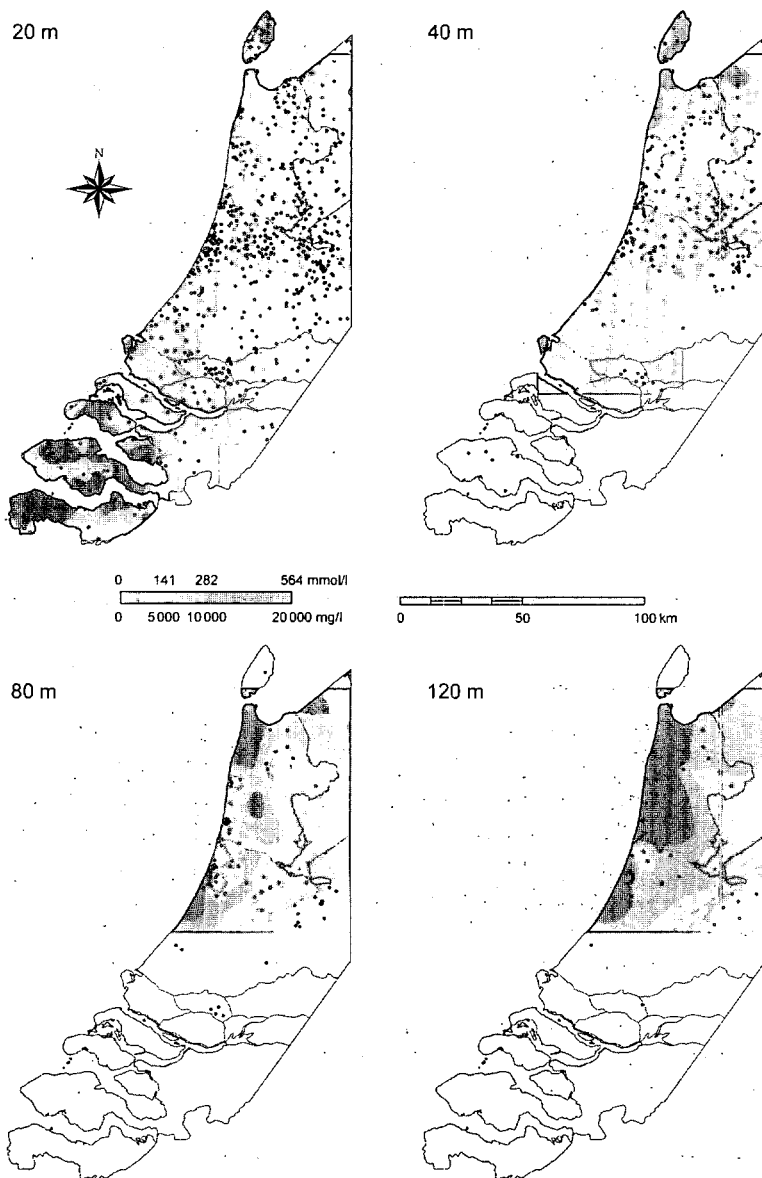
Figuur 2 toont de ruimtelijke verdeling van Cl-concentraties in west Nederland op vier verschillende dieptes. De zoetwatervoorkomens onder de duinen en de hoger gelegen Pleistocene gebieden en in West-Friesland zijn duidelijk te herkennen. De grilligheid van het patroon in de bovenste delen van de ondergrond wordt veroorzaakt door de vele stroomsystemen die gerelateerd zijn aan door de mens gecreëerde hoogteverschillen. Grof-weg infiltreert zoet water in de hoger gelegen gebieden en kwelt zout grondwater op in de diepste polders. Op grotere diepte (> 100 m) komt vrijwel alleen brak en zout grondwater voor, waarbij het zoutgehalte vanaf de kustlijn landinwaarts afneemt.

De watervoerende pakketten waarin het brakke en zoute grondwater voorkomt zijn voornamelijk van fluviatiele oorsprong en bevatten dus oorspronkelijk zoet water.

Hypothese over de herkomst

Mogelijke bronnen van zout grondwater in kustgebieden zijn weergegeven in tabel 1. Op grond van theoretische overwegingen en gegevens uit de literatuur kunnen oplossingen van steenzout, droge depositie van aerosolen, antropogene bronnen, omgekeerde osmose en bevriezing worden uitgesloten als oorzaak van de hoge zoutgehalten (Post, 2004). Zeewaterintrusie door de aanleg van de diepe droogmakerijen speelt alleen vlak langs de kust een rol. Stuyfzand (1993) maakte met eenvoudige berekeningen en hydrochemische waarnemingen aannemelijk dat zeewater tot een afstand van maximaal 6 km landinwaarts van de huidige kustlijn kan zijn binnengedrongen.

Hieruit volgt dat het brakke grondwater in de Pleistocene watervoerende pakketten afkomstig moet zijn uit oudere mariene afzettingen (connaat zeewater) of veroorzaakt is door overstromingen tijdens het geologische verleden (tabel 1). De eerste mogelijkheid werd door Meinardi (1974) aangevoerd en wordt in de literatuur ook wel aangeduid met de 'dispersie-theorie'. Het idee achter zijn theorie is dat zout vanuit de mariene afzettingen van Vroeg-Pleistocene en Pliocene ouderdom door diffusie omhoog beweegt naar de van oorsprong zoete Pleistocene fluviatiele afzettingen. Door horizontale grondwaterstroming vindt in het Pleistocene watervoerende pakket menging (dispersie) plaats en op deze manier ontstaat een verticaal profiel waarin het zoutgehalte van het grondwater geleidelijk toeneemt met toenemende diepte.



Figuur 2: De ruimtelijke verbreiding van de Cl-concentraties op 20, 40, 80 en 120 meter -N.A.P. De locaties van de meetlocaties binnen 5 meter onder en boven het weergegeven diepteinterval zijn ook weergegeven. De interpolatie is niet uitgevoerd in gebieden met te weinig observaties. Gebaseerd op gegevens van de provincie Noord-Holland, TNO-NITG en Ouwerkerk (1993).

Tabel 1: Bronnen en processen die leiden tot een hoog zoutgehalte van het grondwater in kustgebieden met bijbehorende Cl-concentratie (orde van grootte).

Bron of proces	Cl-concentratie (mg/l)	Opmerkingen
Zeewater (huidige Noordzee)	20.000	Concentratie vaak lager door bijmenging van rivierwater
Transgressies, overstromingen	20.000	Concentratie vaak lager door bijmenging van rivierwater of zoet grondwater
Connaat zeewater	20.000	Concentratie vaak lager door bijmenging van rivierwater of zoet grondwater
Aerosolen	70	Neerslag langs de kust (Stuyfzand, 1993)
Steenzout	70.000	Glasbergen (1981)
antropogene bronnen (vuilstorten, strooizout, landbouw)	< 350	
Evapo(trans)piratie	< 350	Verdampt regenwater
Hyperfiltratie	< 3.500	Concentratie hangt af van oorspronkelijke samenstelling
Bevriezing	?	Concentratie hangt af van oorspronkelijke samenstelling

Het connate zeewater in de Vroeg-Pleistocene en Pliocene mariene afzettingen heeft een ouderdom van ten minste 1,6 miljoen jaar. Versluys (1931), Van der Molen (1989) en Gieske (1991) meenden echter dat het zoute grondwater in de Pleistocene watervoerende pakketten veel jonger is en uit het Holoceen stamt. Zoals hierboven beschreven drong de zee gedurende deze periode meerdere malen binnen. De ondergrond bevatte oorspronkelijk zoet grondwater dat een lagere dichtheid heeft dan het zeewater dat bovenop kwam te liggen. Bij een hoge doorlatendheid van de ondergrond is deze situatie instabiel en heeft het zeewater de neiging naar beneden te zakken, een proces dat wordt aangeduid met dichtheidsstroming of vrije convectie (zie figuur 5).

Een andere verklaring is ook nog mogelijk. Waarnemingen door Volker (1961) en Beekman (1991) in het IJsselmeergebied duiden er echter op dat verzilting daar niet door dichtheidsstroming plaatsvond maar door diffusie. Dit proces verloopt veel trager dan dichtheidsstroming.

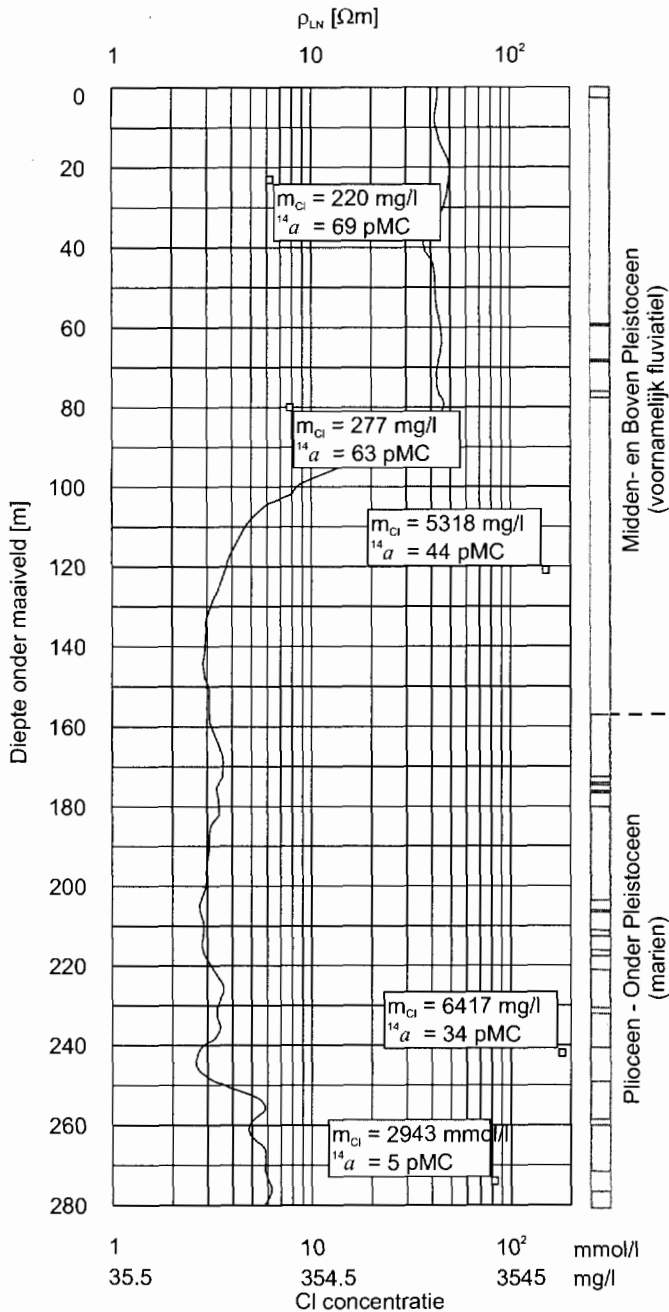
Op basis van de huidige verdeling van zoet- en zout grondwater en ¹⁴C-activiteiten is het mogelijk het meest waarschijnlijke verziltingsmechanisme aan te wijzen en de ouderdom van het brakke- en zoute grondwater te bepalen. Hieruit volgt dat het grootste deel van het brakke- tot zoute grondwater in het Nederlandse kustgebied stamt uit het Holoceen, wat in de volgende paragraaf zal worden onderbouwd.

Aanwijzingen voor een Holocene herkomst

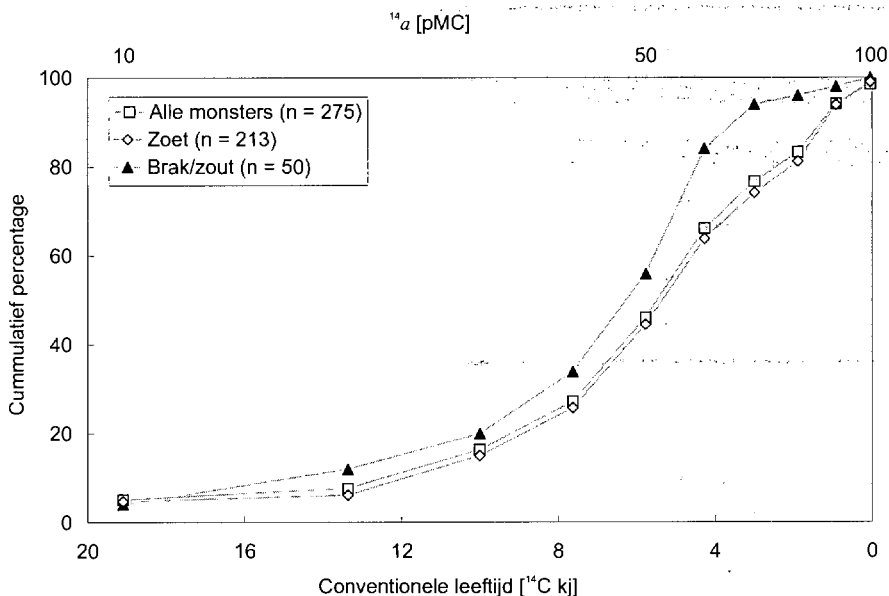
Indien het brakke- en zoute grondwater in de Pleistocene fluviaatiele watervoerende pakketten afkomstig is uit de onderliggende marine Pliocene- en Vroeg-Pleistocene mariene

afzettingen dan dient het zoutgehalte in eerstgenoemde pakketten lager te zijn. Immers, het zout wordt verondersteld naar boven te bewegen door diffusie en dit vereist een afname van het zoutgehalte naar boven toe. Echter, alle peilbuizen in het Nederlandse kustgebied die tot in de Pliocene en Vroeg-Pleistocene mariene afzettingen reiken laten het omgekeerde beeld zien. In figuur 3 is ter illustratie het verloop van de schijnbare elektrische weerstand (een maat voor het zoutgehalte) in peilbuis 31E-0176 (in polder Groot-Mijdrecht) weergegeven. De afname van het zoutgehalte in de diepte is duidelijk zichtbaar (1) als een toename van de weerstand op ongeveer 250 meter diepte en (2) in de Cl-concentratie van de watermonsters uit de filters op 242 en 274 meter diep. Deze lagere concentraties in de diepte maken diffusie naar boven toe onmogelijk en weerleggen de dispersie-theorie van Meinardi (1974).

Het brakke water uit het onderste filter in peilbuis 31E-0176 heeft dus een andere oorsprong dan het brakke water uit de twee bovenliggende filters. Hetzelfde valt op te maken uit de ^{14}C -activiteit. ^{14}C is het radioactieve isotoop van het koolstof atoom en heeft een halfwaardetijd van 5730 jaar. Per definitie dateert een watermonster met een ^{14}C -activiteit van 100 pMC (percent Modern Carbon) uit 1950. Is het grondwater ouder 1950 dan is de ^{14}C -activiteit lager dan 100 pMC door radioactief verval. Grondwater uit het begin van het Holoceen zou een ^{14}C -activiteit van ongeveer 20 pMC moeten hebben maar door verschillende hydrochemische processen en menging van watertypen in de ondergrond treedt verandering van de ^{14}C -activiteit op. Dit maakt een precieze datering van het grondwater lastig, maar de ^{14}C -activiteit kan wel gebruikt worden om kwalitatieve uitspraken te doen. De brakke monsters uit de filters op 121 en 242 meter diepte hebben een hoge ^{14}C -activiteit, die er op duidt dat ze uit het Holoceen dateren (zie figuur 3). Indien het monster op 274 meter diepte Pliocene tot Vroeg-Pleistoocene (verdund) zeewater (dus met een ouderdom van minimaal 1.6 miljoen jaar) vertegenwoordigt, dan zou de ^{14}C -activiteit gelijk aan 0 moeten zijn. De activiteit is echter 5 pMC, wat kan duiden op bijmenging van jonger (zoet) water of verontreiniging tijdens installatie van de peilbuis of monsternamen. Het betreft hier in ieder geval geen Holoceen zout water.



Figuur 3: Cl-concentraties (vierkante symbolen) en schijnbare weerstand (ρ_{LN} , doorgetrokken lijn) tegen de diepte in peilbuis 31E-0176 (polder Groot-Mijdrecht). De lithologie is weergegeven in de kolom aan de rechterkant: wit geeft zandige afzettingen aan, grijze tinten vertegenwoordigen kleiige lagen. Koolstof-14 gegevens afkomstig van R. Boekelman (TU Delft).

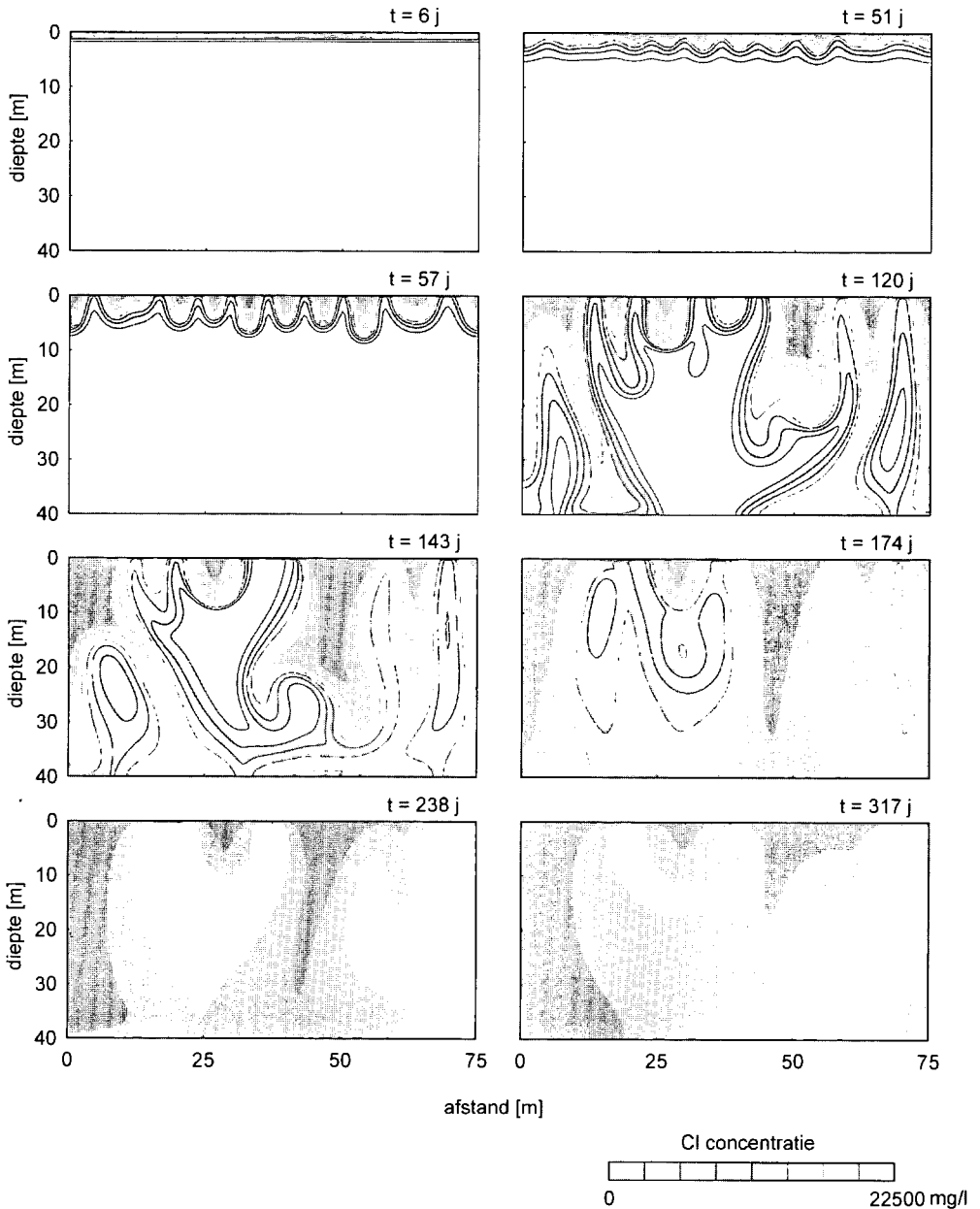


Figuur 4: Cumulatieve frequentie verdeling van ^{14}C -activiteit en bijbehorende conventionele leeftijden van grondwatermonsters in het Nederlandse kustgebied. Gegevens beschikbaar gesteld door het Centrum voor Isotopenonderzoek in Groningen.

Bovenstaande analyse toont aan dat een hoge ^{14}C -activiteit indicatief is voor een Holocene oorsprong van het brakke- en zoute grondwater. In de loop der jaren zijn in het Nederlandse kustgebied vele grondwatermonsters geanalyseerd op ^{14}C door het Centrum voor Isotopenonderzoek in Groningen. In figuur 4 is te zien dat ongeveer 80 procent hiervan een conventionele ouderdom heeft van minder dan 10.000 jaar. Een conventionele ouderdom wil zeggen dat er geen correctie is uitgevoerd voor veranderingen van de ^{14}C -activiteit door hydrochemische processen of menging. Deze correctie is onmogelijk uit te voeren (Post, 2004) maar leidt bijna zeker tot nog jongere leeftijden. Deze resultaten wijzen er dus op dat het grootste gedeelte van het brakke- en zoute grondwater in het Nederlandse kustgebied uit het Holoceen dateert.

Verziltingsmechanisme

Uit de voorgaande analyse blijkt (o.a. uit de hoge ^{14}C -activiteit van het monster op 242 m in peilbuis 31E-0176) dat het Holocene zeewater tot op honderden meters diep de ondergrond is binnengedrongen. Gegeven de maximale duur van het verziltingsproces (ongeveer 7.500 jaar zoals volgt uit de geologische ontstaansgeschiedenis) kan dit niet het gevolg zijn van diffusie zoals door Volker (1961) en Beekman (1991) in het IJsselmeergebied werd gevonden omdat dat proces zeer traag verloopt. Het door Versluys (1931), Van der Molen (1989) en Gieske (1991) gesuggereerde proces van dichtheidsstroming of vrije convectie verloopt echter veel sneller.



Figuur 5: Modellsimulatie van verzilting door vrije convectie op 8 verschillende tijdstippen vanaf het moment van overstroming door de zee.

Vrije convectie kan optreden wanneer de zee een gebied overstroomt waar zich zoet water in de ondergrond bevindt. Aanvankelijk treedt neerwaartse diffusie van opgeloste zouten vanuit het zeewater op in het zoete grondwater en ontstaat een grenslaag. Bij een bepaalde dikte, die afhankelijk is van de doorlatendheid van de ondergrond, wordt de grenslaag instabiel en breekt op. Hierbij ontstaan karakteristieke pluimen van zout

grondwater die naar beneden zakken. Het oorspronkelijk zoete grondwater beweegt hier-tussen omhoog.

In figuur 5 is ter illustratie hiervan een modelsimulatie weergegeven waarin te zien is dat de ondergrond binnen enkele honderden jaren tot op tientallen meters diepte verzilt kan raken. Bij deze simulatie is een doorlatendheid van 0,1 m/d aangenomen. In werke-lijkheid is de doorlatendheid veel hoger en zal het proces nog veel sneller verlopen. Deze situatie is echter niet te simuleren op de schaal van watervoerende pakketten vanwege de zeer strenge discretisatie-eisen voor numerieke modellen. Voor meer details, zie Kooi e.a. (2000) en Post (2004).

Conclusies

Uit een beschouwing van mogelijke processen die tot een toename van het zoutgehalte van grondwater hebben geleid, volgt dat het voorkomen van brak en zout grondwater in het Nederlandse kustgebied samenhangt met transgressies uit het geologische verleden. Een Holocene herkomst van het brakke en zoute grondwater is afgeleid uit (1) het lagere zout-gehalte van grondwater in de Pliocene tot Vroeg-Pleistocene mariene pakketten dan in de bovenliggende fluviatiele pakketten en (2) de hoge ^{14}C -activiteit van het grootste deel van het grondwater in het kustgebied. Numerieke modellen tonen aan dat vrije convectie ofwel dichtheidsstroming snel genoeg verloopt om binnen een tijdsspanne van enkele tientallen tot honderden jaren voor verzilting tot op enkele honderden meters diepte te zorgen.

Dankbetuiging

Het promotieonderzoek is deels gefinancierd door TNO-NITG. Victor Bense becommenta-rieerde dit manuscript.

Referenties

- Beekman, H.E.** (1991) Ion chromatography of fresh- and seawater intrusion; Faculty of Earth Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam: 198 pag.
- Geirnaert, W.** (1972) The hydrogeology and hydrochemistry of the lower Rhine fluvial plain; in: *Leidse geologische mededelingen* 49(1), pag 59–84.
- Gieske, J.M.J.** (1991) De oorsprong van het brakke grondwater in het IJsselmeergebied: diffusie, dispersie, of dichtheidsstroming; in: *H₂O* 24(7): pag 189–193.
- Glasbergen, P.** (1981) Extreme salt concentrations in deep aquifers in the Netherlands; in: *Quality of groundwater, Proceedings of an International Symposium, Noordwijkerhout, The Netherlands, 23-27 March 1981, Noordwijkerhout, The Netherlands*: pag 687–695.
- Kooi, H., J. Groen en A. Leijnse** (2000) Modes of seawater intrusion during transgres-sions; in: *Water Resources Research* 36(12): pag 3581–3589.
- Meinardi, C.R.** (1974) The origin of brackish groundwater in the lower parts of the Netherlands; in: *R.I.D.-mededelingen* 74-6: 16 pag.
- Molen, W.H. van der** (1989) Het zoute grondwater in West-Nederland: een gevolg van dichtheidsstromingen?; in: *H₂O* 22(11): pag 330–346.

- Oude Essink, G.H.P.** (1996) Impact of sea level rise on groundwater flow regimes; Delft, Technische Universiteit Delft: 410 pag.
- Vries, J.J. de** (1981) Fresh and salt groundwater in the Dutch coastal area in relation to geomorphological evolution; in: *Geologie en mijnbouw* 60: pag 363–368.
- Vries, J.J. de** (1982) Anderhalve eeuw hydrologisch onderzoek in Nederland; Amsterdam, Rodopi, 195 pag.
- Ouwerkerk, J.** (1993) Beschrijving van de chemie van het grondwater van Zeeland en van Walcheren en Zuid-Beveland in het bijzonder; Middelburg, Provincie Zeeland, directie Milieu en Waterstaat: 89 pag.
- Post, V.E.A.** (2004) Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene; Faculty of Earth- and Life Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam: 138 pag.
- Stuyfzand, P.J.** (1993) Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the western Netherlands; Faculty of Earth Sciences, Vrije Universiteit, Amsterdam: 366 pag.
- Versluys, J.** (1931) Subterranean water conditions in the coastal regions of the Netherlands; in: *Economic geology* 26: 65-95.
- Volker, A.** (1961) Source of brackish ground water in Pleistocene formations beneath the Dutch polderland; *Economic geology* 56: 1045-1057.
- Zagwijn, W.H.** (1974) The paleogeographic evolution of the Netherlands during the Quaternary; in: *Geologie en mijnbouw* 53(6): 369-385.
- Zagwijn, W.H. en J.W. C. Doppert** (1978) Upper Cenozoic of the southern North Sea basin: paleoclimatic and paleogeographic evolution; in: *Geologie en mijnbouw* 57: 577-588.
- Zagwijn, W.H.** (1986) Nederland in het Holoceen; 's-Gravenhage, Sdu uitgeverij: 46 pag.