



Arjen Kok, Vitens  
Jan Siem Rus, Royal Haskoning

# Verziltning boven zeeniveau op de Friese waddeneilanden

De verdeling van zoet en zout grondwater op de waddeneilanden is een complex geheel. Geohydrologisch onderzoek van de afgelopen 15 jaar op de Friese eilanden, onder andere op Vlieland en Terschelling, toonde dit aan. Met dit onderzoek is meer inzicht ontstaan in de verticale ontwikkeling van de zoetwaterbel en de horizontale verbreiding ervan. Daarnaast speelt een meer oppervlakkig verziltingsmechanisme een rol in de verdeling van zoet en zout grondwater op de eilanden. Het betreft het invangen van zeezouten door het aanwezige bos, het zogeheten saltspray-effect. Lokaal worden door dit fenomeen hoge chloridegehalten aangetroffen in het ondiepe, freatische grondwater.

Als gevolg van het heersende neerslagoverschot en het verschil in soortelijk gewicht tussen zoet (regen)water en zout (zee)water is onder de waddeneilanden voor de kust van Nederland, Duitsland en Denemarken een zoetwaterbel ontstaan.

## De verticale zoet-zoutverdeling

Dit fenomeen is niet nieuw en werd reeds ontdekt en beschreven door de Nederlander Badon Ghijben in 1888 en later door de Duitser Herzberg (in 1901). Aanvullend hydrologisch onderzoek, boringen en metingen de afgelopen 50 jaar hebben het Ghijben/Herzberg-principe verder gedetailleerd en genuanceerd.

De duinen langs de Nederlandse, Duitse en Deense kust verheffen zich tot maximaal

enkele tientallen meters boven zeeniveau. Als gevolg van het heersende neerslagoverschot kan het grondwater in het duinmassief uitstijgen (opbollen) tot boven het zeeniveau. De hierdoor gevormde hydrostatische druk is in staat het zoute grondwater weg te drukken.

In het Ghijben/Herzberg-principe wordt er van uitgegaan dat de verticale stroming van het grondwater te verwaarlozen is en dat het duinmassief uit een homogeen zandpakket bestaat (zie afbeelding 1).

In een evenwichtssituatie geldt de volgende formule van Ghijben-Herzberg:

$$H = \rho_f / \rho_s - \rho_f * h.$$

Uitgaande van een dichtheid van 1.025 kilo per kubieke meter voor zeeewater en 1.000

kilo per kubieke meter voor zoet water, betekent dit dat H gelijk is aan 40h. In de praktijk wordt voor de waarden van H en h slechts zelden de theoretische verhouding van 40:1 gevonden. In de ondergrond van de duinen op de eilanden komen vaak slecht doorlatende klei-, leem- of veenlagen voor. Deze verstoren het hierboven beschreven principe van Ghijben-Herzberg. Op de Friese waddeneilanden wordt een verhouding aangetroffen van maximaal 25:1 (zie tabel 1).

Hoe scheidende lagen de zoetwaterbel kunnen opdelen toont een dwarsdoorsnede van het eiland Vlieland (zie afbeelding 2).

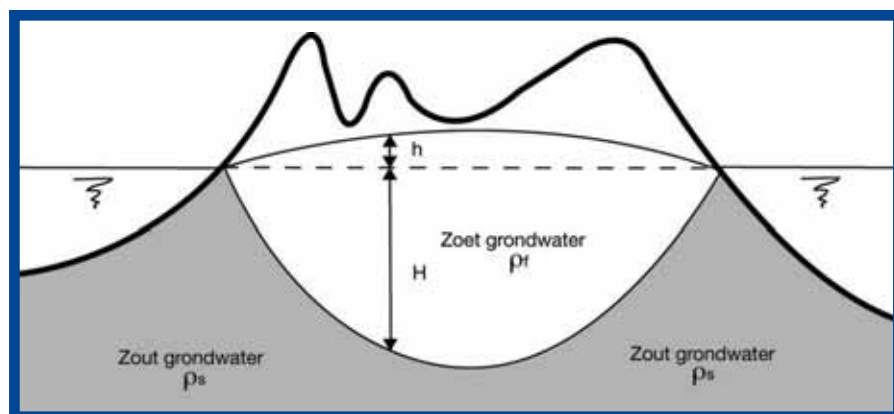
## De horizontale zoet-zoutverdeling

Algemeen wordt aangenomen dat de zoetwaterbel richting kustlijn (de randen van het eiland) uitwigt en in diepte afneemt. In zijn algemeenheid is dat natuurlijk ook zo. Boringen en geleidbaarheidsonderzoeken tonen echter aan dat de diepte van de zoetwaterbel aan de rand van het eiland toch groter is dan verwacht op basis van bijvoorbeeld TNO-grondwaterkaarten. Zo

Tabel 1: De verhouding tussen de diepte van de zoetwaterbel (H) en de hoogte van de grondwaterstand (h) in het midden van het duingebied.

eiland	h (m)	H (m)	H/h
Vlieland	4	60	15
Terschelling	5/3	95/80	19/27
Ameland	2,5	60	27
Schiermonnikoog	3	85	28

Afb. 1: Het Ghijben/Herzberg-principe.



H = diepte van de zoetwaterbel h = grootte van de zoetwateropbolling  
ρ<sub>s</sub> = dichtheid van zout grondwater ρ<sub>f</sub> = dichtheid van zoet grondwater

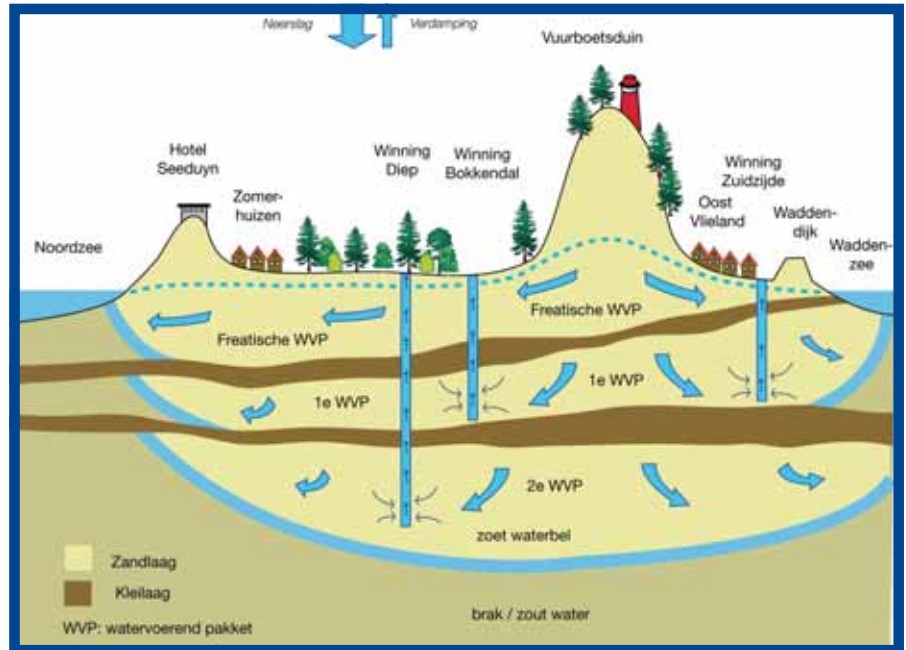
wordt op het strand van Vlieland tot zeker 24 meter diepte zoet grondwater aangetroffen. En bij de strandopgang van Formerum op Terschelling is de zoetwaterbel nog zo'n 60 meter diep. Hiermee kan geconcludeerd worden dat op Terschelling geen sprake is van twee zoetwaterbellen met in het midden een depressie, zoals eerder werd aangenomen, maar van één grote zoetwaterbel.

De aanwezigheid van zoet water tot buiten de huidige kustlijn is een interessant fenomeen. De vraag is of dit systeem is ontstaan door het huidige hydrostatische evenwicht onder scheidende lagen, waardoor de zoetwatertong 'zeewaarts' wordt weggedrukt. Eén en ander kan ook een gevolg zijn van het verplaatsen van de kern van het duinmassief door de eeuwen heen (wandellende eilanden) naar het zuiden, waardoor 'fossiel' zoet grondwater is achtergebleven aan de noordzijde van het eiland.

### Brak freatisch grondwater boven de zeespiegel

Voor de drinkwatervoorziening op de eilanden wordt het zoete grondwater uit de zoetwaterbel gebruikt. De jaarlijkse onttrekking op Vlieland bedraagt circa 200.000 kubieke meter per jaar. Winning vindt, van oudsher, plaats uit het eerste watervoerende pakket (zie afbeelding 2). De filters van de pompputten bevinden zich in het midden van dit watervoerende pakket. Aangezien veel minder water wordt onttrokken dan via het neerslagoverschot wordt aangevoerd, is verzilting door laterale aantrekking van het zoet-zoutgrensvlak niet logisch. Ook 'upconing' is uitgesloten. De onderzijde van het eerste watervoerende pakket wordt immers begrensd door een weerstandbiedende keileemlaag, met daaronder weer een zoet watervoerend pakket.

Toch is in alle afzonderlijke pompputten een lichte verzilting te constateren. Vanaf de start van de winning is het chloridegehalte van het onttrokken grondwater gemiddeld toegenomen van 40 mg/l in 1953 naar 100 mg/l in 2004. Uit oogpunt van de drinkwatervoorziening vormt deze toename geen direct probleem. Toch is reeds in 1987 een eerste onderzoek uitgevoerd naar de oorzaak van deze verzilting. Toen bracht een chloridebepaling van het freatische en diepere grondwater aan het licht dat vooral in het freatische, ondiepe grondwater in het bosgebied hogere chlorideconcentraties werden aangetroffen. Als mogelijke oorzaak werd toen aangegeven het invangen van zeezouten door het aanwezige naaldbos op Vlieland: het zogeheten saltspray-effect. Later is bij aanvullend geohydrologisch onderzoek naar alternatieve winlocaties, in het kader van het Project Integraal Waterbeheer Vlieland, het fenomeen van verhoogde chlorideconcentraties van het ondiepe grondwater in het bosgebied wederom geconstateerd. Voor Vitens was dit een aanleiding om meer in detail aandacht te schenken aan de werking van dit verzilting-mechanisme, niet alleen op Vlieland, maar ook op Terschelling.



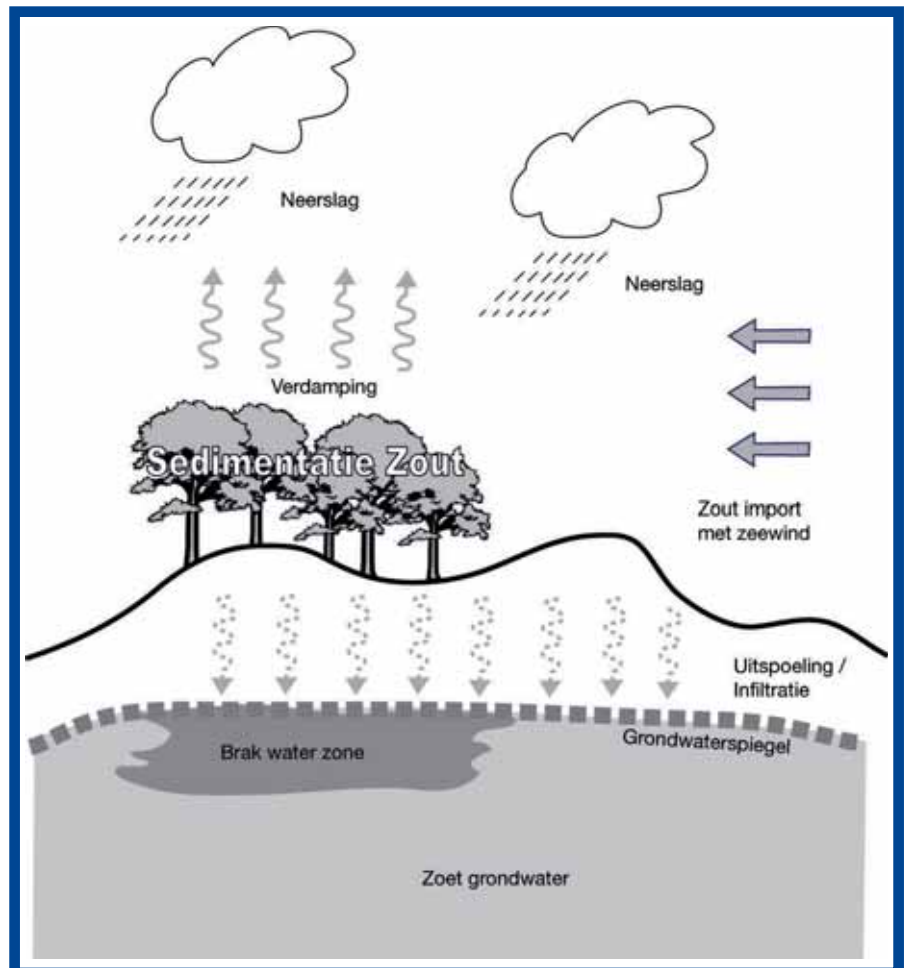
Afb. 2: Geohydrologische dwarsdoorsnede van Vlieland.

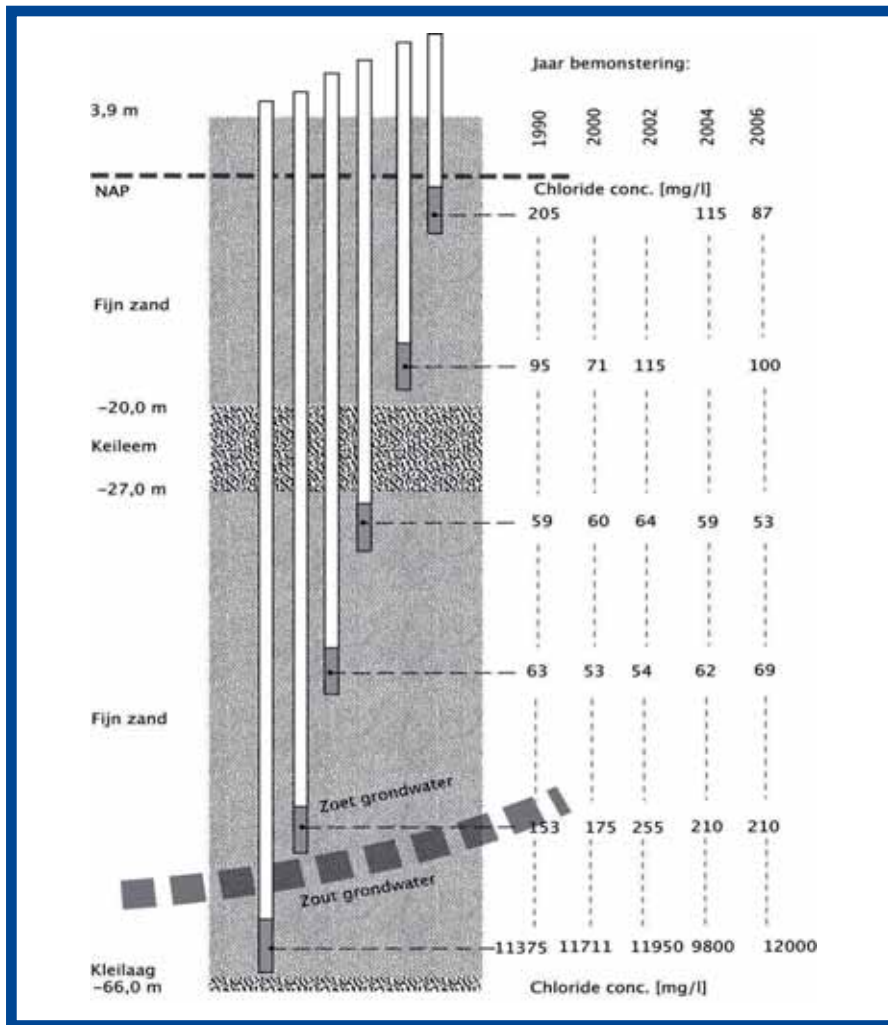
### Het 'saltspray'-effect

Het 'saltspray'-effect gaat uit van het principe dat door de algemeen westelijke zeewinden een continue aanvoer van zout plaatsvindt. De zeewind komt in contact met het op de duinen aanwezige naaldbos, waardoor afzetting van zout plaatsvindt. Dit proces gaat bij naaldbos het gehele jaar door. Bovendien is het contactoppervlak groot

door het relatief grote bladoppervlak van het naaldbos. Als gevolg van de neerslag lost het afgezette zout gedeeltelijk op en spoelt af, infiltreert in de bodem en bereikt het grondwater. Daar vooral sprake is van verticale grondwaterstroming (neergaande infiltratie) treedt zeer langzaam vermenging op met het onderliggende zoete grondwater. Resultaat is een licht brakke zone in het

Afb. 3: Het 'saltspray'-principe.





Afb. 4: Verticale verdeling chloride in waarnemingsput 04FP0044.

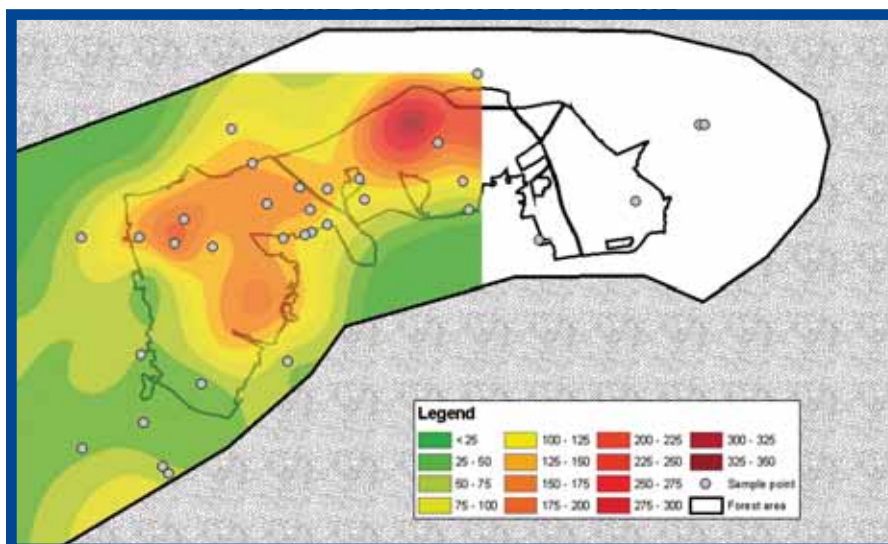
freatische pakket, direct onder de grondwaterspiegel. Meer naar de diepte toe neemt het chloridegehalte geleidelijk af tot 'normale' waarden van zoet grondwater op de eilanden. Afbeelding 3 geeft het principe van de werking van het 'saltspray'-effect weer.

In werkelijkheid ligt de oorzaak van het toenemen van het chloridegehalte onder het bos waarschijnlijk nog wat complexer. Ook

de verdamping- en interceptieverschillen tussen bos en open duinvegetatie spelen een rol in de uiteindelijke kwaliteit van het ondiepe grondwater.

Meer in detail komt de verticale zoet-zoutverdeling tot uiting bij diepe waarnemingsputten met filters tot in het zoute grondwater (zie afbeelding 4). Hier bevindt zich het zoet-zoutgrensvlak op circa 60 meter beneden NAP. Een brede overgangszone

Afb. 5: Chlorideverdeling freatisch grondwater Vlieland in de periode 1990-2000.



van brak grondwater van het zoete naar het zoute grondwater wordt niet aangetroffen. Deze overgang is vrij scherp, hetgeen wordt ondersteund door resultaten van uitgevoerde fysische boorgatmetingen. Bovenin het profiel worden in het freatische waarnemingsfilter hogere chlorideconcentraties aangetroffen dan meer naar onderen. Dit is het gevolg van het 'saltspray'-effect.

### 'Saltspray' en de freatische grondwaterkwaliteit op Vlieland

In aanvulling op het onderzoek van 1987 verrichtte Vitens in 2004 nieuw onderzoek naar het effect van 'saltspray' op Vlieland. Hiervoor zijn 33 filters van verschillende waarnemingsputten bemonsterd en geanalyseerd. Met de analysegegevens uit het verleden stonden in totaal 220 chlorideanalyses ter beschikking. Voor drie verschillende tijdvakken (1985-1990, 1990-2000 en 2000-2004) is de chlorideverdeling in het open duingebied en het bosgebied onderzocht. Door middel van interpolatie zijn de resultaten vertaald naar een ruimtelijk beeld. Het resultaat van de periode 1990-2000 is weergegeven in afbeelding 5.

De algemene conclusie die getrokken kan worden uit dit onderzoek, is dat het chloridegehalte van het freatische grondwater in het bos voor alle tijdvakken hoger is dan in het open duingebied. Dit wordt veroorzaakt door het 'saltspray'-effect. Het neerslagwater op Vlieland had tijdens de meetperiode in 2004 een chloridegehalte van 33 milligram per liter. Dus ook in het open duingebied vangt de lagere vegetatie zeezouten in en is sprake van een geringe mate van 'saltspray'. Wanneer de tijdvakken onderling worden vergeleken, zijn er wel verschillen te constateren. Deze verschillen zijn niet bij alle meetpunten consistent en eenduidig. Ook de hoeveelheid neerslag zal zijn invloed hebben op de mate van uitspoeling en verdunning van de ingevangen zeezouten én dus op de concentratie chloride van het freatische grondwater. Daarnaast speelt het uitdunnen van het naaldbos een rol.

Er kan echter wel gesteld worden dat in het tijdvak 1990-2000 gemiddeld genomen de hoogste chloridegehalten werden aangetroffen. In deze periode trof men een maximumconcentratie aan van 340 milligram chloride per liter op vier meter diepte.

Tabel 2: Gemiddelde chlorideconcentraties van het freatische grondwater op Vlieland, binnen en buiten het bosgebied.

periode	gemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) in het bos	gemiddelde chlorideconcentratie (mg/l) in het duin
1985-1990	194*	57
1990-2000	182	66
2000-2004	125	50

\* In de periode 1985-1990 waren in het bos slechts vijf monsters ter beschikking.



