Erik de Bruine, Witteveen+Bos
Annika Hesselink, RWS Waterdienst
Bas Jonkman, TU Delft / RWS Waterdienst

Kansen voor compartimentering in de Randstad

De Randstad is kwetsbaar in het geval van overstromingen. Het huidige veiligheidsbeleid heeft zich met name geconcentreerd op het voorkomen van overstromingen door de bouw van stevige dijken en waterkeringen. Maar wat als het dan toch een keer mis gaat? In dat geval kan compartimentering van het achterland ervoor zorgen dat het gebied dat overstroomt, beperkt blijft. Vooral het toepassen van kleine compartimenten langs de primaire waterkeringen is kansrijk en voorkomt veel economische schade.

Nederland is wereldwijd bekend om zijn strijd tegen het (hoge) water. We houden ons land droog door de aanleg van waterkeringen en dijken in combinatie met een uitgebreid bemalingsysteem. Dit is nog altijd het belangrijkste uitgangspunt van ons veiligheidsbeleid tegen overstromingen (kabinetsstandpunt Rampenbeheersing Overstromingen). Langzaam verschuift de aandacht echter van bescherming door waterkeringen naar het minimaliseren van de gevolgen van een potentiële overstroming. De natuur is immers onvoorspelbaar. Er is altijd een restrisico, omdat onze dijken geen 100 procent garantie bieden voor droge voeten. Maatregelen om de gevolgen van een overstroming te beperken, zijn bijvoorbeeld goed voorbereide en geoefende evacuatieplannen of rekening houden met een overstroming bij de bouw van woningen: drijvende woningen of bouwen op terpen. Maar ook de aanleg van compartimenteringsdijken kan uitkomst bieden[1),2)]. Het toepassen van compartimentering heeft ook bestuurlijk een groeiende aandacht. Zo is in het kabinetsstandpunt Rampenbeheersing een landsdekkende studie aangekondigd naar compartimentering. Deze studie is inmiddels begonnen. Binnen dit project wordt een deelstudie voor het dijkringgebied Centraal Holland (dijkring 14) uitgevoerd. De resulaten van het in dit artikel beschreven onderzoek[3)] hebben ook betrekking op Centraal Holland en kunnen worden benut voor de landelijke studie.

Compartimentering is een concept dat eigenlijk al wordt toegepast in Nederland. Het gebied langs de kust en de grote rivieren is verdeeld in iets meer dan 50 dijkringgebieden die ieder geheel door een primaire waterkering omringd zijn. Als een dijk langs één van de rivieren of zee bezwijkt, zal slechts één van de dijkringgebieden overstromen. Hierdoor blijft de schade beperkt tot slechts dat ene gebied (mits de dijk op slechts die locatie doorbreekt). De huidige dijkringgebieden zijn in sommige gevallen echter zo groot dat de schade bij een overstroming alsnog aanzienlijk kan zijn. Zo omvat dijkringgebied 14 een groot deel van de Randstad, waaronder Den Haag, het noorden van Rotterdam en het zuiden van Amsterdam (zie afbeelding 1). Uit modelberekeningen volgt overigens dat zelfs bij zeer extreme omstandigheden niet het gehele dijkringgebied onder water zal komen te staan. Daarnaast loopt langs de Oude Rijn, op de lijn Leiden-Utrecht, een natuurlijke barrière die voorkomt dat water van noord naar zuid stroomt en andersom. Maar ook als slechts een deel van dit gebied overstroomt, zijn de gevolgen zeer groot: nergens in Nederland wonen zoveel mensen en is zoveel economische waarde geconcentreerd als in de Randstad.

***Afb. 1:* Dijkringgebied 14.**

Aanpak

Door modelonderzoek zijn de mogelijkheden voor een verdere compartimentering van dijkringgebied 14 onderzocht. Het gebied wordt hierbij opgedeeld in veel meer kleinere compartimenten door de aanleg van dijken in het gebied. Er is zoveel mogelijk gebruik gemaakt van al bestaande dijken en andere verhogingen in het landschap, zoals (spoor)wegen en slaperdijken. Het is onbekend of al deze verhogingen in het landschap bestand zullen zijn tegen de waterdruk. Spoorwegen en wegen zijn niet ontworpen om water te keren en oude dijken zijn al tijden niet meer getoetst aan de normen. Ook zijn deze verhogingen in het landschap doorsneden met tunnels en viaducten. Het sluiten van deze gaten is kostbaar indien het een permanente afsluiting betreft, bijvoorbeeld door het weghalen van tunnels. Als de gaten met een tijdelijke constructie worden afgesloten door noodkeringen, is het de vraag of al deze keringen tijdig sluiten. In welke mate het haalbaar is om de genoemde verhogingen in het landschap waterdicht te maken, zal in vervolgstudies verder onderzocht moeten worden.

In het onderzoek is gebruik gemaakt van het basismodel van de dijkring, zoals deze is opgesteld in het project 'Veiligheid Nederland in Kaart' door Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde (sinds kort Waterdienst). Dit is een model waarmee overstromingen tweedimensionaal berekend kunnen worden. Vervolgens zijn de maatgevende waterhoogten in de Maas en Noordzee bepaald voor verschillende combinaties van factoren: de rivierafvoeren, een storm op zee en het al dan niet sluiten van de Deltawerken.

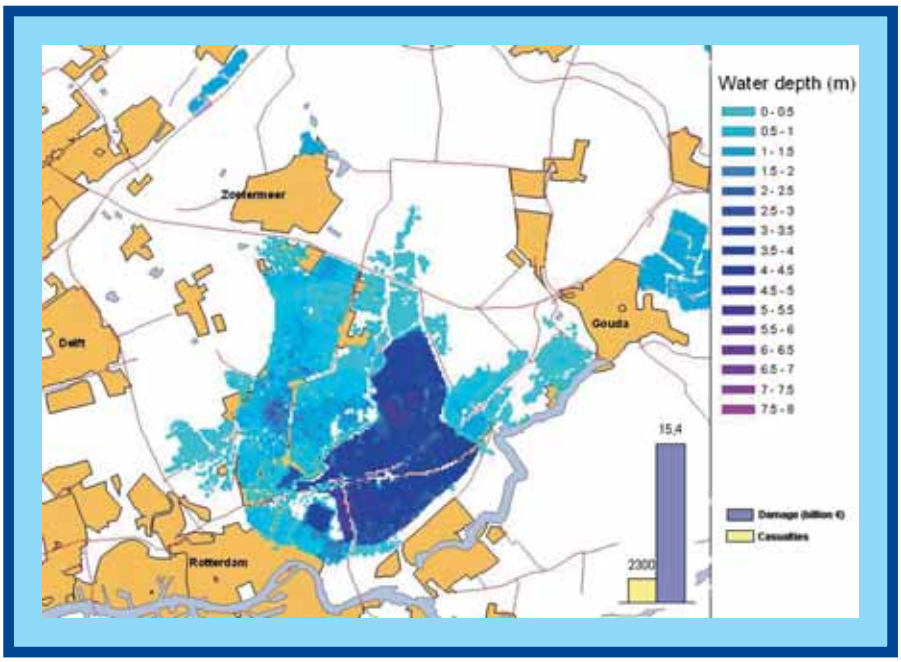
De overstromingsberekeningen geven per tijdstap de stroomsnelheden en waterstanden weer. Deze informatie kan weer worden gebruikt om het aantal slachtoffers en de hoeveelheid schade te berekenen. Hiervoor is gebruik gemaakt van een speciaal door RWS-DWW ontwikkeld programma dat door middel van rekenregels de schade en slachtoffers berekent (het Hoogwater Informatie Systeem, Schade- en Slachtoffermodule). Hierbij wordt niet alleen gekeken naar de stroomsnelheid en de waterdiepte, maar ook naar de stijgsnelheid van het water. Mensen kunnen namelijk verrast worden door het water en verdrinken als er niet genoeg tijd is om zichzelf nog in veiligheid te brengen binnen het gebied. Met evacuatie naar buiten het gebied is in de studie geen rekening gehouden: in de simulaties is sprake van een zeer plotselinge overstroming.

Voor vier verschillende dijkdoorbraaklocaties en 15 inrichtingsvarianten van het dijkringgebied zijn overstromingsberekeningen gemaakt. Deze zijn in te delen in compartimenteringssommen waarbij het water wordt vastgehouden in de verschillende compartimenten en sommen waarbij het water juist niet wordt vastgehouden maar geleid wordt naar een locatie waar minder schade kan worden aangericht.

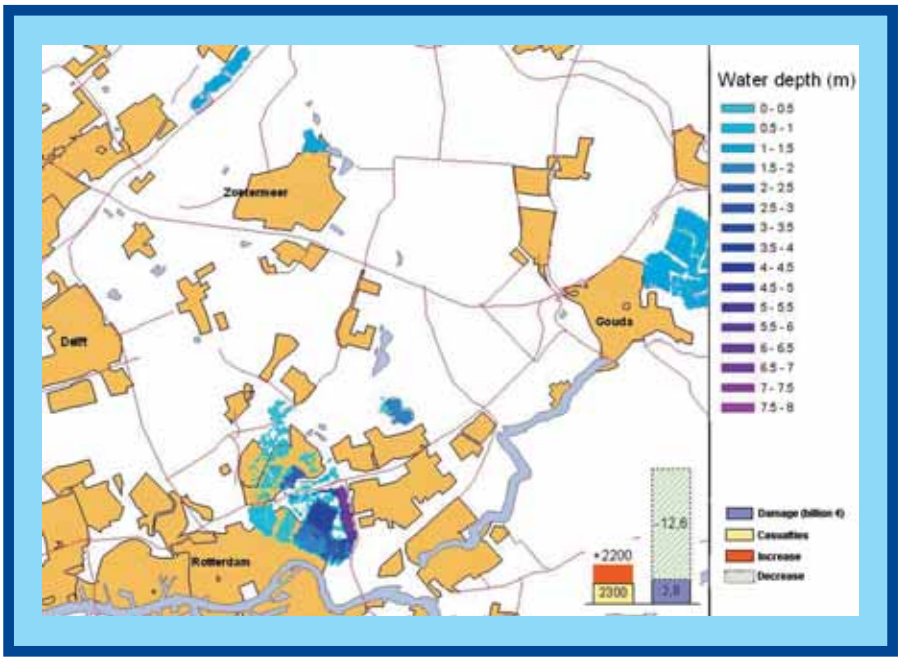
Compartimenteren

Bij compartimenteren is het zaak om de juiste afmeting van het compartiment te bepalen. Is deze te groot, dan zal het compartiment weinig effect hebben. Is deze te klein, dan zal het water bij een overstroming zeer snel stijgen en zullen in een dichtbevolkt gebied veel mensen verrast worden door het snel stijgende water en omkomen. Diverse vormen en afmetingen zijn getest in de studie. Een resultaat van de studie is dat een compartiment van ongeveer 10 km^2 hierbij het hydraulische optimum lijkt voor een grootschalige overstroming in dijkringgebied 14. Cruciaal is de bevolkingsdichtheid van het beoogde compartiment. Dit blijkt uit het volgende voorbeeld: een dijkdoorbraak bij de Maasboulevard in Rotterdam bij waterstanden die eens in de 10.000 jaar voorkomen. Afbeelding 2 laat de overstroming zien in de huidige situatie en in afbeelding 3 indien er een compartiment van ongeveer 10 km^2 direct aan de Maasboulevard ligt. De schade in de huidige situatie wordt geraamd op 15,4 miljard euro. Indien een compartiment van ongeveer 10 km^2 aanwezig is, wordt de schade gereduceerd tot 2,8 miljard euro. Het aantal verwachte slachtoffers in de huidige situatie bedraagt 2.300, terwijl dat bij toepassing van het compartiment zal stijgen naar 4.500.

Daarnaast blijkt dat het gunstig is om het water vlak bij de rivier of zee in een compartiment te bergen, omdat het droogmaken van het gebied eenvoudiger is. Het volume water dat moet worden weggepompt, is beperkt doordat slechts één compartiment overstroomt. Een deel van het water kan weer vrij terugstromen naar de rivier of zee door het dijkdoorbraakgat of door het bewust doorsteken van de dijk als het waterniveau buitendijks weer gezakt is. Het water is dan namelijk nog niet afgestroomd naar de diepste delen van het dijkringgebied. En het water dat teruggepompt moet worden, bevindt zich al dicht bij de rivier of zee waarnaar het terug moet stromen.



Afb. 2: ***Waterdiepten na tien dagen bij een dijkdoorbraak bij de Maasboulevard in de huidige situatie.***

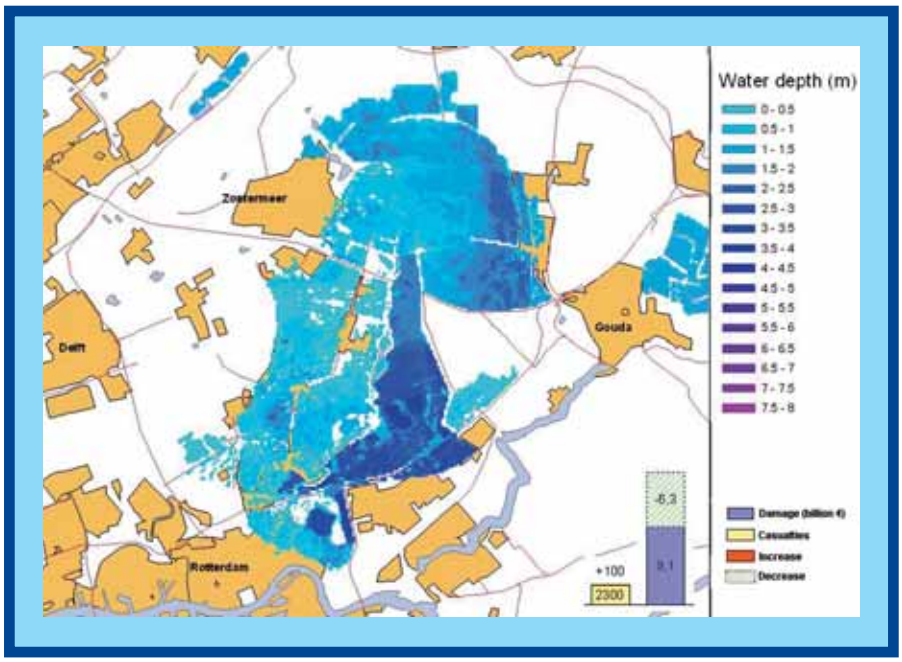


Afb. 3: ***Waterdiepten na tien dagen bij een dijkdoorbraak bij de Maasboulevard bij toepassing van een compartiment.***

Leiden van water

Naast compartimentering kunnen waterkeringen ook gebruikt worden om het overstromingswater te leiden naar gebieden met minder inwoners en economische waarde. Dit kan worden bereikt door het weghalen van barrières voor het water. Hierdoor zal het water het achterland sneller bereiken. Het water zal sneller stromen, maar minder snel stijgen omdat het zich over een groter oppervlak verspreidt. Bij deze strategie blijft de veroorzaakte schade vaak ongeveer gelijk ten opzichte van de oorspronkelijke situatie: het beïnvloede gebied is weliswaar groter, maar de schade per overstroomde km^2 is lager omdat het water lager staat. Alleen als voorkomen kan worden dat een klein maar zeer waardevol gebied niet overstroomt, wordt de totale schade gereduceerd. In dat geval blijven de 'afgewentelde' hoeveelheden water beperkt en zal de schade elders niet veel toenemen. Opvallend bij deze strategie is dat het aantal slachtoffers nauwelijks toe- of afneemt door hogere stroomsnelheden. Fatale stroomsnelheden treden vrijwel alleen op bij de doorbraaklocatie en niet in het achterland.

Deze strategie is vooral waardevol bij een klein gebied met veel inwoners vlak bij de dijk, waar het water snel dreigt te gaan stijgen bij een dijkdoorbraak. Door barrières in de polder weg te nemen, kan het water snel wegstromen van het dichtbevolkte



***Afb. 4:* Waterdiepten na tien dagen met toepassing 'leiden van water'.**

gebied naar het achterland. Hierdoor neemt de schade en het aantal slachtoffers in het dichtbevolkte gebied af, omdat het water hier minder snel minder hoog komt te staan. Dit blijkt uit het voorbeeld getoond in afbeelding 4. Hierbij zijn de A16 en A20 bij Rotterdam en de A12 bij Gouda waterdicht gemaakt en zijn drie aanwezige barrières verwijderd. In dit overstromingsscenario blijft Rotterdam Alexanderpolder daardoor droog en wordt 6,2 miljard euro aan economische schade voorkomen. Het aantal slachtoffers neemt toe met 100, doordat er nu ook slachtoffers vallen in het gebied ten oosten van Zoetermeer door een grote waterdiepte in diepe delen van de polder. Het aantal slachtoffers in Rotterdam door een hoge stijgsnelheid van het water neemt af.

Conclusies

Compartimentering van het achterland is een maatregel met potentie. Vooral de toepassing van kleine compartimenten nabij de primaire dijken kan veel economische schade voorkomen, doordat een veel kleiner gebied overstroomt. Daarnaast zal de opgave om het overstroomde gebied weer droog te maken kleiner zijn. Het toepassen van kleine compartimenten in dichtbevolkte gebieden kan in sommige situaties echter ook leiden tot een toename van het aantal slachtoffers door de hogere stijgsnelheid van het water. Locatiegebonden inzet van de maatregel compartimenteren is daarom erg belangrijk. Het leiden van overstromingswater door waterkeringen en/of door het wegnemen van barrières in de polder kan leiden tot minder slachtoffers en lagere schade. Het water zal minder snel stijgen, maar zich wel snel over een groter gebied verspreiden. Hierdoor kan een grotere groep inwoners verrast worden door het water. Deze strategie heeft daarom alleen een positief resultaat indien voorkomen kan worden dat een dichtbevolkt gebied met een hoge economische waarde niet overstroomt.

De studie heeft meer inzicht verschaft in de hydraulische effecten van compartimenteren en het leiden van water. Beide strategieën hebben zowel een positieve als een negatieve uitwerking op de gevolgen van een overstroming. Voor de toepassing ervan zal een groot aantal overstromingsscenario's doorgerekend moeten worden om een gebiedsgerichte conclusie te kunnen trekken. De precieze locatie en grootte van een dijkdoorbraak heeft namelijk een grote invloed op het overstromingspatroon en daarmee ook op de te nemen maatregelen. De nationale en lokale overheid kunnen door verder onderzoek een optimalisatie van compartimenteringstrategieën mogelijk maken en daarmee de veiligheid tegen overstromingen vergroten.

LITERATUUR

1) De Koning R. en F. Alberts (2006). Compartimentering om de gevolgen van rampen te beperken. Landwerk nr. 6.
2) Oost J. en A. Hoekstra. (2007). Schadereductie door verschillende compartimenteringsstrategiën in een dijkringgebied. H_2O nr. 16, pag. 44-47.
3) De Bruine E. (2006). The influence of compartmentalisation on flooding in Central Holland. MSc-thesis TU Delft en RWS-RIZA.

advertentie

Jasper Fiselier, DHV
Jarl Kind, RWS Waterdienst
Siemen Prins, DHV

Financiële onderbouwing robuust ontwerp dijken

De primaire keringen in Nederland worden elke vijf jaar getoetst. Bij onvoldoende hoogte of stabiliteit wordt de dijk verbeterd en daarbij zo nodig verhoogd. Bij het bepalen van de ontwerphoogte wordt doorgaans rekening gehouden met ontwikkelingen in de maatgevende waterstand over de komende 50 jaar. Bij het bepalen van deze ontwerphoogte en -periode wordt geen rekening gehouden met onzekerheden ten aanzien van de ontwikkeling in rivierafvoer en peilen en ook niet met een eventuele aanpassing van de veiligheidsnorm. In de laatste Leidraad voor de Rivieren wordt wel geadviseerd een ontwerptoeslag van circa 30 centimeter mee te nemen in verband met modelonzekerheden.

In deze studie wordt aangegeven hoe onzekerheden kunnen worden doorvertaald in een ontwerphoogte van dijken door hierbij een financieel-economische invalshoek te hanteren. Impliciet wordt hiermee ook de onderbouwing gegeven voor een, uit oogpunt van de kosten, zo robuust mogelijk ontwerp. De resulterende ontwerphoogten laten opmerkelijke verschillen zien, afhankelijk van de locale situatie. Ook is het opmerkelijk dat, vergeleken met de gangbare praktijk, vanuit financieel-economische optiek vaak gekozen kan worden voor een robuustere aanpak. Of daar ook daadwerkelijk voor gekozen wordt, hangt echter niet zozeer af van de centen, maar vooral van effecten op natuur, landschap en aanwezige bebouwing.

Bij dijkversterking wordt uitgegaan van een toets- en een ontwerphoogte. De toetshoogte geeft aan hoe hoog de dijk, gegeven een veiligheidsnorm en maatgevende afvoer, minimaal moet zijn. Als een dijk te laag blijkt, dan moet deze worden verhoogd. De ontwerphoogte die hierbij wordt aangehouden, hangt vooral af van de gewenste functionele levensduur van de dijk. Bij het bepalen van de ontwerphoogte kan men kiezen voor een kortere of langere functionele levensduur, bijvoorbeeld voor 50 jaar of voor 100 jaar. Meestal wordt om maatschappelijke redenen al niet gekozen voor een levensduur korter dan 50 jaar. Een ontwerphoogte passend bij een functionele levensduur van 100 jaar brengt natuurlijk meer kosten met zich mee. Beschouwt men echter een langere periode, bijvoorbeeld 100 jaar, dan moet men bij een ontwerphoogte passend bij 50 jaar al twee keer verhogen.

Bij het verhogen van een dijk maakt men al relatief veel kosten voor slopen van de oude bekleding en aanbrengen van de nieuwe bekleding, ook bij een kleine verhoging. Elke volgende centimeter verhoging is verhoudingsgewijs goedkoper. Twee keer een halve meter verhogen is daardoor in absolute zin - dus zonder disconteren - fors duurder dan één keer een meter. Daar staat weer tegenover dat vanuit het perspectief van de totale kosten het altijd gunstiger is om investeringen uit te stellen. Een investering van 100 euro over 50 jaar komt bij een discontovoet van 4% overeen met minder dan tien euro nu. Toch is elke 20 jaar verhogen, verdisconteerd, dat wil zeggen, uitgedrukt in euro's van nu, toch al gauw duurder dan elke 50 jaar verhogen, en er zijn situaties waarbij elke 50 jaar verhogen duurder is dan eenmaal in de 100 jaar.

De benadering die in deze werkwijze wordt gevolgd, kent een aanvliegroute via de financieel-economische invalshoek. Wat

Bij het bepalen van de optimale ontwerphorizont en -hoogte spelen de volgende begrippen een rol:

- De toetshoogte oftewel de hoogte waaraan de dijk minimaal moet voldoen om niet te worden afgekeurd. De toetshoogte wordt afgeleid van de maatgevende waterstand, zoals die optreedt bij een afvoerpiek die volgens de veiligheidsnorm nog moet kunnen worden gekeerd;
- De ontwerphoogte oftewel de hoogte waarop de te versterken dijk wordt ontworpen. De ontwerphoogte ligt altijd hoger dan de toetshoogte. Hoeveel hoger hangt af van de gewenste functionele levensduur;
- De technische levensduur oftewel de periode dat een ontwerp of onderdelen hiervan nog technisch goed functioneren. De technische levensduur kan verschillend zijn voor verschillende onderdelen. Zo gaat het grondlichaam van een dijk veel langer mee dan de bekleding;
- De functionele levensduur oftewel de periode waarin een ontwerp nog voldoet aan de functionele eisen, die bijvoorbeeld samenhangen met de trendmatig oplopende maatgevende waterhoogte. Hoe lang is de dijk nog hoog genoeg?
- De economische optimale ontwerpperiode, die afhankelijk is van de maatregelkosten en de vermeden schade. Er bestaat een optimaal ontwerp waarbij de totale maatschappelijke kosten over een langere periode het kleinste zijn. Deze benadering staat aan de basis van de veiligheidsnormering in Nederland;
- De financieel-economische optimale ontwerpperiode, die afhankelijk is van de ontwikkeling in functionele eisen en kosten. Er bestaat een ontwerp dat op langere termijn de minste totale kosten met zich meebrengt. In deze benadering wordt niet gekeken naar maatschappelijke baten in de vorm van vermeden schade.

financieel-economisch het meest optimale ontwerp is, hangt af van de totale kosten die samenhangen met versterken en verhogen en het beheer en onderhoud van de dijk. Er wordt daarbij uitgegaan van een periode van 100 jaar waarover de kosten berekend worden. De totale kosten omvatten alle investeringen in (opeenvolgende) versterkingen en beheer en onderhoud uitgedrukt in euro's van nu. Er wordt daarbij alleen gekeken naar de kosten en niet naar de economische baten van versterking, zoals een lagere schadeverwachting. De financieel economische invalshoek geeft daarmee - uitgaande van de situatie dat een dijkverbetering dient te worden uitgevoerd - een onderbouwing van de ontwerphoogte, maar niet van de toetshoogte.

Onzekere ontwikkelingen in toetshoogte

In de voorgaande redenering wordt nog uitgegaan van een lineair toenemende ontwerpopgave, bijvoorbeeld als gevolg van het toenemen van de maatgevende afvoer op de Rijn. Deze toename is gebaseerd op één van de vier KNMI-scenario's (doorgaans een gemiddelde). Er zijn echter ook andere, meer en minder extreme scenario's mogelijk. Zo kan de toename sneller gaan dan verwacht. Dit kan betekenen dat men al na 30 jaar opnieuw moet verhogen in plaats van na 50 jaar, waarop de dijk oorspronkelijk is ontworpen. Het is ook mogelijk dat de toename minder snel gaat. In dat geval kan men veel langer toe dan de 50 jaar welke het uitgangspunt voor het aanvankelijke ontwerp vormde. Hoe sneller de toename van de toetshoogte, des te eerder een langere ontwerpperiode ook financieel-economisch het meest gunstig kan blijken.

De veranderingen in de afvoer en daarmee in de maatgevende waterstand verschillen tussen boven- en benedenrivieren. Zo moet in het benedenrivierengebied ook rekening worden gehouden met zeespiegelstijging, maar is anderzijds het karakter van de rivieren ook heel verschillend (brede rivieren). Er is daarom in deze studie onderscheid gemaakt naar beide type gebieden.

De toetshoogte (of ontwerpopgave) hangt echter niet alleen af van de ontwikkelingen in de afvoer maar, in ieder geval in theorie, ook af van mogelijke ontwikkelingen ten aanzien van de veiligheidsnorm. Zo vinden de huidige normen hun oorsprong in de jaren 60 (Deltacommissie). Op dit moment loopt bij Rijkswaterstaat het programma 'Waterveiligheid 21e eeuw', waarin onder andere de huidige veiligheidsnormen van primaire waterkeringen tegen het licht gehouden worden. Dit wordt gedaan mede in de context van de sinds de jaren 60 toegenomen waarden en bevolkingsomvang in het voor overstromingen gevoelige deel van Nederland. Ook in de toekomst wordt een verdere economische groei in deze gebieden verwacht en daarmee een verdere stijging van de schade bij overstroming. Zo neemt bij een economische groei van twee procent per jaar de schade toe met een factor 7 over 100 jaar. In enkele dijkringen, bijvoorbeeld die waarin veel stedelijke uitbreidingen plaatsvinden, kan de schade nog sneller toenemen. Als men ervan uitgaat dat het overstromingsrisico (kans maal schade) niet mag toenemen, dan zal men de norm strenger moeten maken wat resulteert in een toename van de toetshoogte. Deze toename is verschillend voor boven- en benedenrivierengebied en ligt in centimeters uitgedrukt in dezelfde orde van grootte als de toename als gevolg van het toenemen van de maatgevende afvoer. Bij het bepalen van de optimale ontwerphoogte dient men behalve de onzekerheid in het klimaatsscenario dus ook rekening te houden met verschillende mogelijke ruimtelijke-economische scenario's die aanleiding geven tot een aanpassing van de hoogte van de normen.

Bij een snelle toename van de toetshoogte ligt het voor de hand om de ontwerphoogte groter te maken om zo een voldoende lange functionele levensduur van de dijk te kunnen garanderen. Op deze wijze is dan ook de ontwikkeling in de toetshoogte gekoppeld aan de ontwerphoogte. Voor verschillende, mogelijke, ontwikkelingen van de toetshoogte kan worden bepaald wat financieel-economische de meest gunstige functionele levensduur en ontwerphoogte is. Door de resultaten van verschillende mogelijke economische en klimaatsontwikkelingen te combineren, kan de meest gunstige ontwerphoogte voor een combinatie aan scenario's worden bepaald.

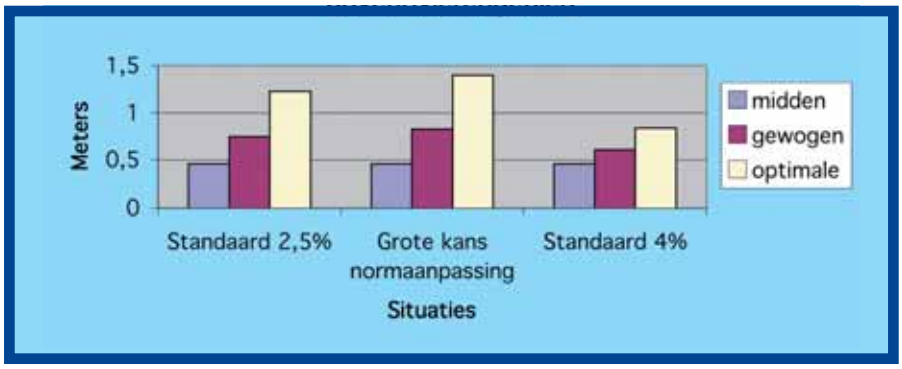
Resultaten

De resultaten hangen mede af van de discontovoet, die wordt gebruikt bij het terugrekenen van toekomstige investeringen naar contante waarde. Er is daarom gekeken naar de resultaten bij een discontovoet van 4% en 2,5%. Daarnaast is nog een aparte set scenario's doorgerekend, waarbij is uitgegaan van een grotere kans op normaanpassing bij een discontovoet van 2,5%. Hier worden de resultaten van deze twee situaties besproken: die van een kale dijk zonder steunberm en van een dijk met steunberm. Beide situaties kunnen worden gezien als uitersten wat betreft kostencurve voor een kale dijk zonder constructies.

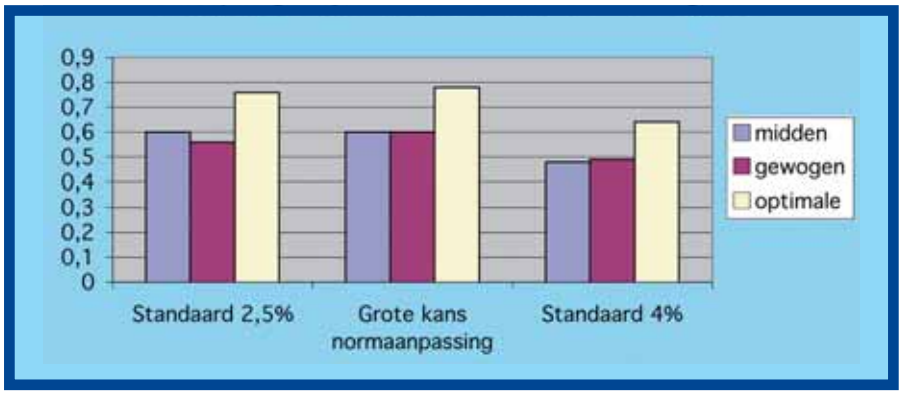
In afbeelding 1 zijn de resultaten weergegeven voor een dijk zonder steunberm in het bovenrivierengebied zonder aanwezigheid van woningen en leidingen nabij de dijkteen. Uit de resultaten valt af te lezen dat sprake is van grote verschillen in ontwerphoogte tussen het

Om te onderzoeken hoe om te gaan met deze verschillende scenario's en hoe deze door te vertalen naar een ontwerphoogte zijn de volgende stappen gezet:

- Voor verschillende typen dijkontwerp in het beneden- en bovenrivierengebied zijn kostencurven opgesteld op basis van reële situaties en ontwerpen. In deze ontwerpen is rekening gehouden met zetting en het al dan niet aanwezig zijn van wegen. De aanwezigheid van bebouwing, infrastructuur en leidingen is daarbij als variabele - wel of niet aanwezig op een bepaalde afstand van de dijk - meegenomen;
- Voor situaties in het boven- en benedengebied zijn gecombineerde scenario's opgesteld voor de verwachte toename in toetshoogte, zoals die samenhangen met verwachtingen ten aanzien van de afvoer, en ten aanzien van mogelijke aanpassingen van de veiligheidsnorm. Hierbij is ook aangegeven welke kans van optreden aan een gecombineerd scenario is toegekend. Door het combineren van een minimaal, midden en maximaal scenario voor normaanpassing en ook voor de toename van de (piek)afvoer ontstaan zo negen scenario's elk met een specifieke kans van optreden en een bijbehorende ontwikkeling van de toetshoogte;
- Voor deze negen scenario's zijn 'kalenders' opgesteld voor verschillende verhogingsfrequenties variërend van elke tien jaar tot eens in de 200 jaar. De kalenders geven aan op welk moment weer sprake is van een verhoging, wanneer onderhoud aan dijken en aan wegen aan de orde is en wanneer als gevolg van de verhoging woningen en infrastructuur moeten wijken. In alle scenario's wordt standaard uitgegaan van het meenemen van de 30 cm toeslag in de ontwerphoogte, zoals in de nieuwe Leidraad is geadviseerd vanwege modelonzekerheden;
- Van elk scenario zijn vervolgens de totale kosten bepaald voor elke verhogingsfrequentie. Hierbij is rekening gehouden met alle investeringen, beheer en onderhoud en zijn kosten in de toekomst teruggerekend naar euro's nu. Ook is hiermee rekening gehouden met restwaarden in de vorm van nog beschikbare overhoogte van de dijk;
- Vervolgens is per scenario bepaald welke verhogingsfrequentie en daarmee ontwerphoogte leidt tot de laagste totale kosten in de komende 100 jaar. De hieruit resulterende negen ontwerphoogten zijn vervolgens met elkaar gewogen op basis van de kans van optreden van elk scenario tot een gewogen ontwerphoogte. Deze ontwerphoogte en bijbehorende ontwerpfrequentie levert bij een onzekere toekomst in principe de laagste totale kosten;
- Aangezien blijkt dat de resulterende kostencurve in het bereik tussen de 50 en 150 jaar veelal erg vlak loopt, is ook voor alle negen scenario's gekeken naar een langere ontwerpperiode en hogere ontwerphoogte die niet meer dan tien procent duurder is dan de uit oogpunt van totale kosten meest gunstige ontwerpperiode en -hoogte. Vervolgens is uit deze negen scenario's een gewogen optimale ontwerphoogte en -versterkingsfrequentie bepaald. Deze extra totale kosten kunnen grotendeels worden verantwoord vanuit de verwachte afname in economische schadeverwachting die het gevolg is van het hanteren van een langere ontwerpperiode en daarom in de eerste jaren na aanleg verhoudingsgewijs veel veiligere dijk;
- De gewogen meest kostengunstige en de optimale ontwerphoogte zijn vervolgens vergeleken met de gangbare ontwerphoogte, waarbij wordt uitgegaan van een veronderstelde lineaire toename van de afvoer.



***Afb. 1:** Ontwerphoogten voor een dijk zonder steunberm in het bovenrivierengebied en voor verschillende uitgangspunten en scenario's.*



***Afb. 2:** Ontwerphoogten voor een dijk met steunberm in het benedenrivierengebied en voor verschillende uitgangspunten en scenario's.*

(nu gebruikelijke) middenscenario, het als boven beschreven financieel-economische gewogen scenario en het scenario waarin de kosten tot tien procent hoger mogen uitvallen. De ontwerphoogte van de laatste is twee tot drie maal zo groot als het gebruikelijke middenscenario, afhankelijk van de discontovoet die wordt gehanteerd. Een grotere kans op normaanpassing geeft nog een aanzienlijke toename in het verschil tussen de scenario's. We zien ook dat de discontovoet van grote invloed is op de ontwerphoogte, maar niet op de verhoudingen tussen de verschillende scenario's. De resultaten voor het benedenrivierengebied geven eenzelfde beeld maar met nog iets grotere optimale ontwerphoogten.

Afbeelding 1 heeft betrekking op een kale dijk en laat de theoretisch maximale verschillen zien. Bij aanwezigheid van woningen worden grotere ontwerphoogten verhoudingsgewijs snel duurder en is sprake van een minder groot verschil tussen de scenario's.

De resultaten voor deze situatie impliceren in feite dat vanuit het oogpunt van de totale kosten gekozen kan worden voor een veel langere ontwerpperiode en veel robuustere versterking dan op dit moment gangbaar is. Men kan ook stellen dat niet de centen, maar in dit geval andere overwegingen de doorslaggevende rol zouden kunnen geven. Het kan daarbij bijvoorbeeld gaan op mogelijke effecten op de natuur, het al dan niet moeten slopen van woningen en cultuurerfgoed en dergelijke.

Afbeelding 2 laat de verschillen in ontwerphoogte zien voor een dijk met steunberm in het benedenrivierengebied. Dit is een situatie met steil oplopende kostencurve. Een hogere ontwerphoogte komt daarbij overeen met veel hogere kosten. We zien dan ook dat deze situatie een wezenlijk ander beeld geeft en dat het midden en gewogen scenario nauwelijks verschillen. Het optimale scenario ligt echter ook nu nog steeds een stuk hoger. In het kader van de studie zijn nog meer situaties mee in beschouwing genomen.

We komen tot de volgende algemene conclusies:

- Een dijk met steunberm heeft een kortere ontwerphorizont dan een dijk zonder steunberm, omdat voor dit type dijk de kosten van verhoging relatief sneller stijgen met het toenemen van de ontwerphoogte. Aanwezigheid van woningen, leidingen en kunstwerken leidt tot een kortere ontwerphorizont, aangezien bij een kortere functionele levensduur deze verhoudingsgewijs grote investeringen langer worden uitgesteld. Eén en ander is wel sterk afhankelijk van de positie van de woningen, leidingen en kunstwerken ten opzichte van de dijk. Liggen ze erg dicht bij de dijk, dan kunnen ook bij een kortere functionele levensduur deze investeringen niet worden uitgesteld en is een langere functionele levensduur weer gunstiger;
- Hoe sneller de maatgevende waterstand toeneemt, des te gunstiger een langere functionele levensduur en dus hogere ontwerphoogte zal zijn. De reden hiervan is dat bij een snel stijgende ontwerphoogte een kortere functionele levensduur leidt tot vaker en daarmee in totaal duurder ingrijpen;
- Afhankelijk van de verhoudingsgewijze invloed van minimale en maximale scenario's kan sprake zijn van een kortere of langere optimale functionele levensduur. Daarbij kan worden opgemerkt dat het rekening houden met normaanpassing meestal leidt tot een toename van de functionele levensduur, omdat een aanpassing van de norm altijd leidt tot een snellere toename in de ontwerpopgave.

We zien in veel gevallen dat de curve van de totale gekapitaliseerde kosten erg vlak loopt tussen de 50 en 120 jaar en dat ontwerphoogten in dit bereik elkaar weinig schelen in totale kosten. Men komt tot een veel langere functionele levensduur als het optimum tot tien procent duurder mag zijn dan de ontwerphoogte met de laagste kosten.

Aanbevelingen

De doorgerekende voorbeelden laten zien dat het meenemen van onzekerheden van grote invloed kan zijn op de optimale ontwerphoogte. Eén en ander hangt daarbij sterk af van de situatie en ook van de kansen die aan verschillende scenario's worden toegekend. Als we ervan uitgaan dat het middenscenario niet de enige mogelijke toekomst is, dan dienen andere scenario's ook in de berekeningen te worden meegenomen.

Toch zien we dat in Nederland op dit moment doorgaans alleen wordt ontworpen uitgaande van een meest waarschijnlijk geachte middenscenario. De door het KNMI afgegeven vier nieuwe scenario's hebben ieder echter een even grote kans. Het robuust zijn van een oplossing hangt niet alleen af van hoe goed de oplossing het doet bij een minimaal of gemiddeld scenario, maar juist hoe het voldoet over de volle bandbreedte van mogelijke scenario's. En dan zien we dat een langere ontwerphorizont dan nu gebruikelijk is (orde 80 tot 120 jaar) in veel gevallen een verstandige keus lijkt te zijn.

Susanne Groot, Vrije Universiteit Amsterdam / HKV Lijn in Water
Pieter Stuyfzand, Vrije Universiteit Amsterdam / Kiwa Water Research
Jet Lebbink, PWN
Harry Rolf, PWN

Herkenning van kunstmatig geïnfiltreerd water

Ten behoeve van drinkwaterbereiding infiltreert PWN voorgezuiverd water uit de Rijn en het IJsselmeer in de Noord-Hollandse duinen. Verspreiding van dit infiltratiewater werd gekarteerd door het meten van chloride-, bromide- en sulfaatconcentraties in watermonsters. Kwaliteitsontwikkelingen in het Rijn- en IJsselmeerwater maken echter dat de conventionele sensoren minder bruikbaar worden. Aan de hand van een studie naar de kwaliteitsontwikkelingen van de verschillende watersoorten, veld- en laboratoriumonderzoek zijn andere sensorcombinaties, waarop onderscheid te maken is tussen het geïnfiltreerde water en het natuurlijke duingrondwater, benoemd voor drie onderzochte infiltratiegebieden van PWN. Ook is het gebruik van watertemperatuur als indicatie voor watersoort getest.

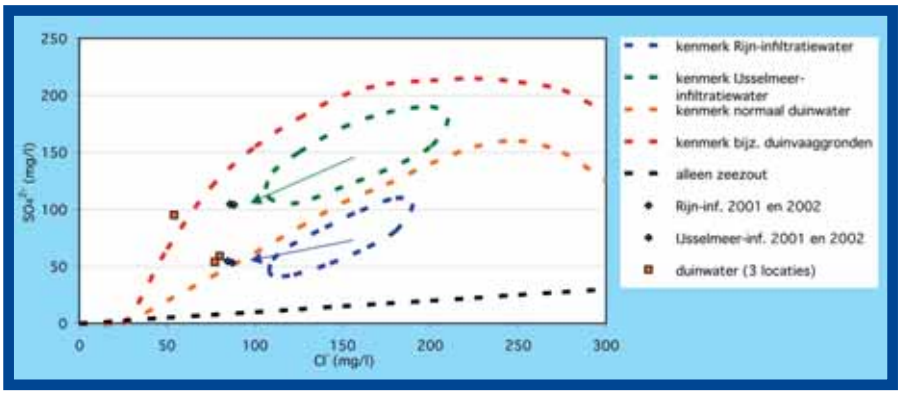
Herkomst van grondwater is onderwerp van veel studie. Waterleidingbedrijven willen bijvoorbeeld weten waar het grondwater dat gewonnen wordt vandaan komt, en in gebieden waar kunstmatige infiltratie plaatsvindt moet de verspreiding van het infiltratiewater bepaald worden. Met de invoering van de Kaderrichtlijn Water[1] wordt de herkomsttracering van water nog belangrijker.

Inlaat van het te infiltreren water in het open infiltratiegebied bij Castricum (foto: Sander de Haas).

PWN heeft tegenover de provincie de verplichting de verspreiding van kunstmatig geïnfiltreerd water (infiltratiewater) buiten de infiltratiegebieden zoveel mogelijk te voorkomen, omdat de kwaliteit van het infiltratiewater afwijkt van die van het natuurlijke duingrondwater (duinwater). Hiertoe wordt de verspreiding van infiltratiewater gemonitord, met behulp van een grondwatermodel en door het periodiek nemen en analyseren van watermonsters. Onderscheid tussen infiltratiewater en gebiedseigen duinwater is in de meeste gevallen mogelijk aan de hand van de (semi-)natuurlijke sensoren tritium, zuurstofisotopen, chloride en bromide[2]. PWN hanteerde chloride, bromide en sulfaat, maar deze leiden niet meer tot een eenduidige diagnose (afbeelding 1). Deze macro-elementen zijn relatief eenvoudig en goedkoop te meten, maar de concentraties ervan in het Rijn- en IJsselmeerwater zijn afgenomen.

Dit artikel presenteert een voorbeeldstudie naar het vinden van geschikte sensoren. Randvoorwaarde voor het onderzoek was dat ze relatief eenvoudig te bemonsteren en te analyseren moeten zijn. Ook moeten de sensoren de komende decennia gebruikt kunnen worden om de herkomst van grondwater in en rond de duininfiltratiegebieden te bepalen.
Het onderzoek is verricht in twee open en één diep infiltratiegebied in de duinen ten westen van Castricum en Heemskerk. In

Afb. 1: De verhouding van chloride en sulfaat in infiltratiewater uit de Rijn en het IJsselmeer verschuift naar die van duinwater.



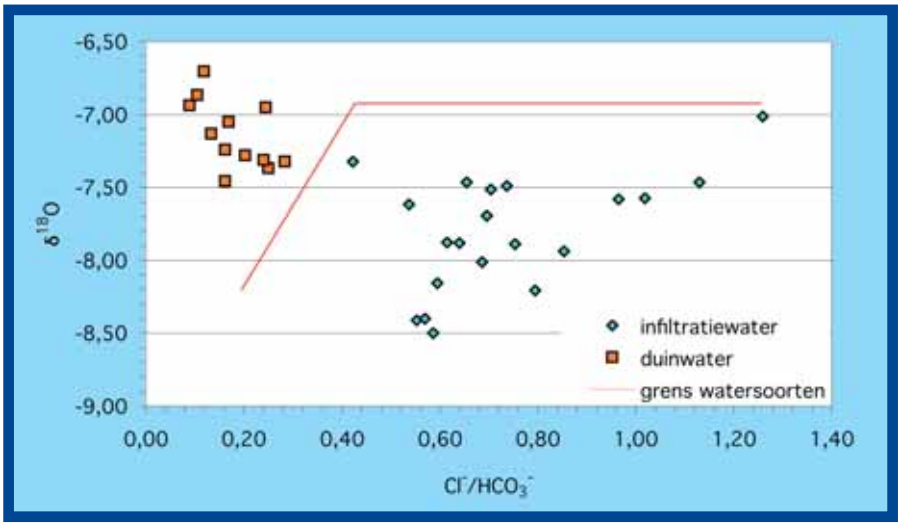
totaal zijn drie watervoerende pakketten betrokken, tot een diepte van circa NAP -100 m. Vanaf 1957 wordt hier Rijnwater geïnfiltreerd, vanaf 1981 IJsselmeerwater en sinds 2000 een mengsel van beiden. Deze veranderingen in herkomst van infiltratiewater maken tezamen met de veranderende waterkwaliteit in de verschillende watersoorten dat er niet één samenstelling van infiltratiewater en één van duinwater te geven is.

Waterkwaliteit

De waterkwaliteit van het infiltratie- en duinwater verschilt (tabel 1). De chlorideconcentratie in de Rijn is relatief hoog door vervuilende industrieën (mijnen en rioolwaterzuiveringen) langs de rivier. Door lozingen van bromide-arm steenzout is de bromideconcentratie relatief laag. De concentraties van zuurstof-18 ($\delta^{18}O$, zie kader) zijn in de Rijn lager dan in Nederlands grondwater, doordat de neerslag die de Rijn voedt verder van de kust valt[3]. De kwaliteit van IJsselmeerwater volgt die van Rijnwater voor de meeste parameters. Duidelijke verschillen komen voor in de concentraties sulfaat (hoger in het IJsselmeer), nitraat (door algenbloei is deze lager in het IJsselmeer) en bicarbonaat (door kalkneerslag is deze lager in het IJsselmeer). Ook verschillen de isotopenconcentraties: water in het IJsselmeer is sterker onderhevig aan verdamping waardoor de concentratie van zuurstof-18 en de isotopenverhouding (zuurstof-18/deuterium) hoger zijn dan die in de Rijn. Bovendien wordt polderwater met relatief hoge zuurstof-18-concentraties uitgeslagen in het IJsselmeer.

Duinwaterkwaliteit vertoont in zowel ruimte als tijd grote variaties. De kwaliteit hangt onder andere af van de hoeveelheid effectieve neerslag, neerslagkwaliteit, verstuiving van zeezouten en aerosolen, geochemie en vegetatiebedekking[2]. In het algemeen zijn het elektrisch geleidingsvermogen (en dus de concentratie opgeloste stoffen) en bijvoorbeeld de chlorideconcentratie lager dan in infiltratiewater. De concentraties calcium en bicarbonaat liggen vaak hoger dan in infiltratiewater[4].

Sinds 1970 is het Rijnwater beduidend schoner geworden[5]. De concentraties van de meeste macro- en sporenelementen zijn afgenomen, waardoor deze geen duidelijk onderscheid meer leveren met duinwater. De isotopenverhoudingen en de temperatuur zijn over de jaren vrijwel constant, maar tonen beide duidelijk seizoensvariaties. Ondanks deze verbetering van de kwaliteit van het infiltratiewater waar het macro- en sporenelementen betreft, is het van belang dat het infiltratiewater niet in de duinen weglekt. Er zijn andere verontreinigingen in het infiltratiewater in de vorm van bijvoorbeeld medicijnresten aangetoond[6], maar deze zijn moeilijk meetbaar.



Afb. 2: Het nieuwe onderscheid tussen infiltratie- en duinwater.

Methode

Aan de hand van de kwaliteitsontwikkelingen in de drie onderscheiden wateren (geïnfiltreerd Rijnwater, geïnfiltreerd IJsselmeerwater en natuurlijk duingrondwater) is een inschatting gemaakt van mogelijke sensoren. Vervolgens zijn (in de zomer van 2005) 135 watermonsters genomen, uit de drie watervoerende pakketten in en om de infiltratiegebieden. Hierin zijn monsters opgenomen waarvan zeker is dat het infiltratiewater betreft en monsters die zeker duinwater bevatten (op basis van hun locatie, historisch kwaliteitsverloop en de hydrogeologie). Deze monsters zijn geanalyseerd op parameters als temperatuur en pH-waarde, macro-elementen, sporenelementen en waterstof- en zuurstofisotopen. De isotopenanalyses zijn uitgevoerd door het Centrum voor Isotopen Onderzoek te Groningen. Tijdens de monsterneming zijn in de diepere putten (> 30 m onder maaiveld) in het gebied temperatuurprofielen gemeten. De waarde van de watertemperatuur als sensor is sinds de jaren 60 erkend en er wordt steeds meer mee gewerkt[7]. Seizoensfluctuaties van de temperatuur van natuurlijk grondwater zijn op tien tot 15 meter diepte vereffend, afwijkende temperaturen op grotere diepte duiden dus op grondwaterstromingen als kwel of infiltratie anders dan door neerslag alleen.

De monsters zijn verdeeld in groepen van infiltratiewater, duinwater en mogelijke mengsels. Met behulp van statistiek is bepaald welke van de geanalyseerde mogelijke sensoren het meest bijdragen aan het onderscheid tussen de groepen infiltratiewater en duinwater. De combinatie van zuurstofisotopen met de chloride/bicarbonaatverhouding blijkt het beste onderscheid te geven tussen de twee watergroepen (afbeelding 2). Gemiddeld genomen bevat duinwater meer zware zuurstofisotopen dan infiltratiewater ($\delta^{18}O$ minder negatief), maar de range van isotopenwaarden in beide watersoorten vertoont overlap. Zuurstofisotopen alleen geven dus geen uitsluitsel over de watersoort. De chloride/bicarbonaatverhouding blijkt een goede aanvulling te bieden. De chlorideconcentratie is gemiddeld gezien hoger in infiltratiewater,

De zwaarste stabiele isotoop van zuurstof is ^{18}O, de meest voorkomende stabiele isotoop van zuurstof is ^{16}O. De concentratie van ^{18}O in watermoleculen wordt gegeven als de relatieve afwijking van de standaard $^{18}O/^{16}O$ ratio van oceaanwater. Deze is vastgelegd in de Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW):

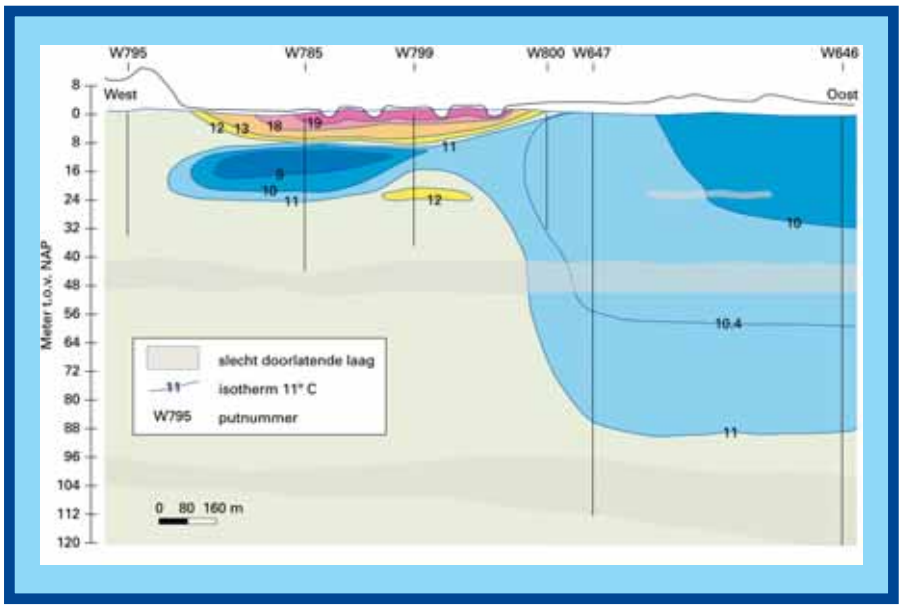
$$\delta^{18}O = 10^3 \left[\frac{(^{18}O/^{16}O)_{sample}}{(^{18}O/^{16}O)_{VSMOW}} - 1 \right]$$

met $\delta^{18}O$ in ‰ versus VSMOW.

Tabel 1 Overzicht gemiddelde waterkwaliteit tracers en enkele parameters

parameter	eenheid	infiltratiewater		duinwater
		Rijn	IJsselmeer	
Cl^-	[mg/l]	111	120	67
Br^-	[µg/l]	166	248	146
HCO_3^-	[mg/l]	159	127	295
SO_4^{2-}	[mg/l]	60	123	69
NO_3^{2-}	[mg/l]	3,1	1,2	0,1
Ca^{2+}	[mg/l]	72	74	117
$\delta^{18}O$	[‰ vSMOW]	-9,17	-7,01	-7,13
δ^2H	[‰ vSMOW]	-60	-52	-47

Infiltratiewater gemiddelden gebaseerd op gegevens van 1995 tot en met 2004; duinwater gemiddelden gebaseerd op gegevens van 1990 tot en met 2002; isotopenwaarden voor IJsselmeer- en duinwater gebaseerd op eigen metingen (zomer 2005).



Afb. 3: ***Temperatuurprofiel over een open infiltratiegebied. De horizontale schaal is 1:8000, de verticale schaal 1:800. De verticale lijnen geven meetlocaties (waarnemingsputten) en -dieptes weer.***

terwijl de bicarbonaatconcentratie lager is. Hierdoor is de chloride/bicarbonaatverhouding in infiltratiewater hoger dan in duinwater.

Zuurstofisotopen zijn in principe geschikte sensoren om dat ze zeer conservatief zijn (de waarde verandert niet tijdens bodempassage) en omdat ze stabiel zijn in de tijd. Chloride is ook een erkende goede sensor, terwijl bicarbonaat niet conservatief en daardoor in principe wat minder geschikt is. Door sulfaatreductie kan de bicarbonaatconcentratie in infiltratiewater toenemen en daardoor op die van duinwater gaan lijken. Sulfaatreductie vindt echter slechts plaats wanneer het water in de bodem in aanraking komt met dikke lagen slib of veen, wat in het onderzoeksgebied maar op enkele locaties het geval is. Zowel zuurstofisotopen als chloride en bicarbonaat zijn voldoende nauwkeurig te meten om onderscheid tussen de watersoorten mogelijk te maken. Juist de combinatie van de drie sensoren biedt goede mogelijkheden onderscheid te maken tussen duin- en infiltratiewater. Hierop zijn slechts enkele uitzonderingen, bijvoorbeeld onder schrale vegetatie (lage bicarbonaatconcentratie) en dicht bij zee (veel invang van spray en dus hoge chlorideconcentratie). De concentraties van chloride en bicarbonaat in duinwater kunnen daar op de concentraties van chloride en bicarbonaat in infiltratiewater lijken. Daardoor kan het nodig zijn ook de bromideconcentratie te bepalen of de waterstofisotopen te meten.

Toepassing

Alle watermonsters waarvan de herkomst niet zeker was, zijn op basis van de sensoren ingedeeld in één van de twee watersoorten of in een aantal gevallen geclassificeerd als mengsel. Deze indeling is geverifieerd door uitgebreide datastudie naar zowel alle analyseresultaten als de velddata. Aan de hand van de indeling is de verspreiding van infiltratiewater in de verschillende watervoerende pakketten gekarteerd in kaarten en dwarsprofielen. Deze verspreiding is getoetst aan de hand van de oude verspreiding en bekende stromingsrichtingen. De verspreidingsprofielen zijn vergeleken met de gemeten temperatuurprofielen. Een voorbeeld van een temperatuurprofiel is gegeven in afbeelding 3, waarin duidelijk te zien is dat warm water wordt geïnfiltreerd (zomer). Hieronder bevindt zich een kouder waterlichaam met een minimum temperatuur van 8,5°C. Dit moet winterinfiltratiewater zijn, daar duinwater op deze diepte een gemiddelde temperatuur van ruim 10°C heeft. De warmere lens rond 20 meter diepte is ook infiltratiewater. Dat is hier tot een diepte van NAP -50 m angetroffen (zo diep wordt door uitdempen van de temperatuurverschillen echter geen afwijkende temperatuur meer gemeten). Het verschil in temperatuur vanaf ongeveer 30 meter diepte tussen de westkant en de oostkant (afbeelding 3) duidt op relatief snelle afstroom van infiltratiewater naar het westen; het water is daar warmer dan gemiddeld duinwater. Ook naar het oosten vindt afstroom van infiltratiewater plaats, maar dit gaat kennelijk zo langzaam dat de temperatuurverschillen uitdempen.

Conclusies en aanbevelingen

Het onderzoek heeft bruikbare sensoren opgeleverd. Aan de hand van zuurstofisotopen in combinatie met de chloride/bicarbonaatverhouding is in het algemeen duidelijk onderscheid te maken tussen duin- en infiltratiewater. Er is echter niet één combinatie aan te wijzen die in alle gevallen uitsluitsel zal kunnen geven. Ook is het niet mogelijk op basis van de benoemde sensoren meer kwantitatieve uitspraken over de watersoort te doen. Er wordt een indeling gemaakt op duin- of infiltratiewater; duinwater met bijvoorbeeld 20 procent bijmenging van infiltratiewater wordt mogelijk niet herkend. Met de benoemde sensoren is het niet mogelijk onderscheid te maken tussen infiltratiewater uit de Rijn of het IJsselmeer en tussen oud en jong infiltratie- of duinwater. Verdere analyse van de data die verzameld zijn tijdens dit onderzoek, kan mogelijk meer houvast bieden.

Doordat niet in alle watersoorten alle mogelijke sensoren in het verleden regelmatig gemeten zijn, zijn de gesignaleerde kwaliteitsontwikkelingen onzeker. Goed onderzoek vergt grondige kennis van de kwaliteit van het originele duinwater of infiltratiewater. Zo is het bijvoorbeeld zinvol ook het IJsselmeer regelmatig te bemonsteren op isotopen (is nog niet systematisch gedaan). Juist de isotopensignatuur van het infiltratiewater uit het IJsselmeer ligt relatief dicht bij die van duinwater. In de toekomst zal het te infiltreren water mogelijk deels bestaan uit met UV/waterstofperoxide voorgezuiverd water. Mogelijk veranderen de isotopenconcentraties tijdens deze behandeling door de vorming van hydroxylradicalen tijdens het proces. Om hierover meer duidelijkheid te krijgen, kunnen de isotopen tijdelijk bemonsterd worden over het UV/waterstofperoxideproces.
Tot slot blijkt het temperatuuronderzoek zeer interessant. Een dergelijk onderzoek levert met relatief weinig moeite veel inzicht in de verspreiding van het zowel in de zomer als in de winter in temperatuur afwijkende infiltratiewater.

LITERATUUR

1) Van Slobbe E. (2003). Handboek Kaderrichtlijn Water. Ministerie van Verkeer en Waterstaat.
2) Stuyfzand P. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands. Proefschrift Vrije Universiteit Amsterdam. Kiwa Water Research.
3) Dansgaard W. (1964). Stable isotopes in precipitation. Tellus 16, nr. 4, pag. 436-468.
4) Groot S., P. Stuyfzand, J. Lebbink en H. Rolf (2006). Water tracers getraceerd. Onderzoek naar tracers ter herkenning van infiltratiewater en naar de verspreiding van infiltratiewater bij Castricum en Wijk aan Zee. Afstudeerrapportage Vrije Universiteit Amsterdam. Kiwa-rapport KWR 06.002.
5) Heymen R. (1992). Resultaten van het waterkwaliteitsonderzoek in de Rijn in Nederland. RIZA-nota 92.047.
6) Stuyfzand P., W. Segers en N. Van Rooijen (2007). Behavior of pharmaceuticals and other emerging pollutants in various artificial recharge systems in the Netherlands. In: Management of aquifer recharge for sustainability. P. Fox (ed.). Proceedings ISMAR-6 in Phoenix (USA). Acacia Publ. INc. pag. 231-245.
7) Anderson M. (2005). Heat as a groundwater tracer. Groundwater 43, nr. 6, pag. 951-968.