

Detecteren invloed gewijzigd spuibeheer

met statistisch model chloride gehalte Andijk

RIWA



drs. Paul K. Baggelaar (Icastat)
Aart Smits (RIWA)

Inhoud

Samenvatting	4
1 Inleiding	5
1.1 Doelstellingen van dit project	5
1.2 Aanpak op hoofdlijnen	5
1.3 Over deze rapportage	6
2 Uitgangsgegevens	7
2.1 Chloridegehalte te Andijk	7
2.2 Chloridegehalte van de Rijn	7
2.3 Afvoer van de Rijn te Lobith	9
3 Statistisch model chloride Andijk	11
3.1 Aanpak	11
3.2 Tijdseenheid en periode	11
3.3 Identificeren dynamische relaties	11
3.3.1 <i>Relatie chloridegehalten te Andijk en Lobith</i>	12
3.3.2 <i>Relatie chloridegehalte te Andijk en afvoer te Lobith</i>	12
3.3.3 <i>Relatie chloridegehalte en afvoer te Lobith</i>	13
3.4 Model Chloridegehalte Andijk op maandbasis	14
4 Gevoeligheid statistisch Model	17
4.1 Aanpak	17
4.2 Resultaten	18
4.3 Conclusies	19
5 Nulmodel chloride Andijk	21
5.1 Nut van een nulmodel	21
5.2 Werking van een nulmodel	21
5.3 Aanwijzingen voor gebruik nulmodel	22
Referenties	23
Bijlage 1. Algemene toelichting op de box-Jenkins-methode	25
Bijlage 2. Correctie van afvoer Lobith voor chloridegehalte Lobith	31
Colofon	36

Samenvatting

De Vereniging van Rivierwaterbedrijven (RIWA) maakt zich zorgen over de invloed van de nieuw te bouwen spuisluizen in de Afsluitdijk. De realisatie daarvan kan namelijk leiden tot een beïnvloeding van het chloridegehalte bij de innamepunten van de drinkwaterbedrijven bij Andijk. Op verzoek van RIWA heeft Icastat een instrument ontwikkeld om straks een eventuele relatie tussen het chloridegehalte te Andijk en het nieuwe spuibeheer objectief te kunnen vaststellen.

Het instrument omvat een statistisch model van het maandgemiddelde chloridegehalte te Andijk, dat gebruik maakt van de relaties van dat chloridegehalte met het chloridegehalte en de afvoer van de Rijn te Lobith, waarbij tevens de invloed van de afleiding van uitslagwater van de Wieringermeer naar de Waddenzee is verdisconteerd. Bij het modelleren bleek het maandgemiddelde chloridegehalte bij het innamepunt te Andijk statistisch significant gerelateerd aan deze afleiding, die vanaf eind 1997 operationeel is. De afleiding ging gepaard met een verlaging van het chloridegehalte van gemiddeld circa 31 mg/l.

Door middel van een beperkt aantal simulaties is een indruk gekregen van de gevoeligheid van het statistische model voor verschillende invloeden van het gewijzigd spuibeheer. Daaruit bleek dat als het gewijzigd spuibeheer het chloridegehalte te Andijk met 30 mg/l verhoogt, er na enkele jaren een statistisch significante relatie kan worden gedetecteerd. Bij grotere verhogingen kan er al na circa één jaar een statistisch significante relatie worden gedetecteerd.

Bij het modelleren is geen statistisch significante relatie gedetecteerd tussen het chloride te Lobith (chloridevracht respectievelijk chloridegehalte) en het Rijn-Zout-verdrag, maar dit hoeft nog geenszins te betekenen dat het verdrag geen invloed heeft gehad. De invloed kan namelijk ook een ander, meer variabel, patroon hebben gevolgd dan het stapvormige patroon waar bij de statistische modellering van uitgegaan is. Verder ligt de grootte van de bij de modellering geschatte relatie met de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag wel degelijk in de lijn van de verwachtingen daaromtrent, maar is de schatting alleen niet statistisch significant. En voor wat betreft de tweede fase, het zogenaamde "piekscheren", is het zeer wel mogelijk dat dat nog nauwelijks nodig is geweest - en dus ook nog geen effect kán hebben gehad - door de reeds relatief lage chloridegehalten van de Rijn te Lobith.

De RIWA kan het ontwikkelde statistische model straks hanteren om objectief te toetsen op een relatie tussen het gewijzigd spuibeheer en het chloridegehalte te Andijk. Het is echter niet praktisch om dit meer dan bijvoorbeeld eens per jaar te doen, vanwege de relatief grote inspanning die het modelleren vergt. Daarom wordt in dit rapport tevens een zogenaamd "nulmodel" gepresenteerd, dat zich beter leent voor routinematige (maandelijke) controle van het chloridegehalte te Andijk. Het betreft dan een visuele - en dus enigszins subjectieve - controle op grote veranderingen die níet te verklaren zijn uit het chloridegehalte en de afvoer van de Rijn te Lobith. Zonodig kan dan vervolgens met het statistische model objectief worden nagegaan of die verandering al dan niet gerelateerd is aan het gewijzigd spuibeheer van Rijkswaterstaat. Deze rapportage geeft concrete, stapsgewijze aanwijzingen voor deze aanpak.

Inleiding

Deze rapportage presenteert een statistisch model van het chloridegehalte bij de innamepunten van de pompstations te Andijk van de NV PWN Waterleidingbedrijf Noord-Holland. Het model is op verzoek van de Vereniging van Rivierwaterbedrijven (RIWA) ontwikkeld, om een beeld te krijgen van de mogelijkheid om straks met een statistische evaluatie een relatie vast te kunnen stellen tussen een gewijzigd spuibeheer, na het gereed komen van het nieuwe spuimiddel en het chloridegehalte bij het innamepunt te Andijk. De drinkwaterbedrijven maken zich zorgen over de plannen die Rijkswaterstaat heeft voor een nieuw spuibeheer (zie het kader) en hebben behoefte aan een objectief instrument om straks de gevolgen van dat spuibeheer te kunnen vaststellen.

Nieuwe spuisluis in Afsluitdijk nodig

De Afsluitdijk speelt een belangrijke rol voor de waterhuishouding in Nederland. Via de IJssel stroomt een grote hoeveelheid Rijnwater in het IJsselmeer en op het moment dat dit teveel wordt kan het surplus via de Afsluitdijk worden afgevoerd. In totaal zorgen vijftientwintig uitwateringssluizen ervoor dat per seconde in totaal ruim 5000 m³ IJsselmeerwater in de Waddenzee kan worden geloosd. Vijftien spuisluizen bevinden zich in drie complexen bij Den Oever, de overige tien bevinden zich in twee complexen bij Kornwerderzand.

Het spuien is alleen mogelijk als de waterstand op de Waddenzee minstens tien centimeter lager is dan die op het IJsselmeer. Meestal kan er bij eb (laagwater) gespuid worden, soms echter wordt door harde wind het water van de Waddenzee zo hoog tegen de dijk opgestuwd dat spuien onmogelijk is. Het niveauverschil tussen het IJsselmeer en de Waddenzee neemt, door de zeespiegel stijging, echter langzaam af, zodat de periode waarin gespuid kan worden steeds korter wordt. Er bestaat daarom behoefte aan vergroting van de spuicapaciteit. Dit zou kunnen met een gemaal dat op geforceerde wijze het water opstuwt naar de zee, maar vanwege de grote hoeveelheden water is deze keus niet voor de hand liggend. Rijkswaterstaat is daarom gestart met onderzoek naar een nieuw spuisluizencomplex. De bouw hiervan is gepland in de periode 2004 tot 2008.

De forse ingreep kan effecten hebben op het milieu van de Waddenzee en het IJsselmeer. Daarom voert Rijkswaterstaat een milieueffectrapportage uit. Als de ingreep kan leiden tot schadelijke effecten zal er voor moeten worden gezorgd dat deze worden voorkomen of gecompenseerd.

1.1 Doelstellingen van dit project

Dit project heeft als doelstellingen:

- 1) een statistisch model te ontwikkelen van het chloridegehalte bij het innamepunt van de WRK te Andijk, waarmee straks objectief de relatie kan worden vastgesteld tussen een gewijzigd spuibeheer van het IJsselmeer en dat chloridegehalte;
- 2) de gevoeligheid van dat model aan te geven.

1.2 Aanpak op hoofdlijnen

Omdat er een langjarige en hoogfrequente tijdreeks beschikbaar is van het chloridegehalte bij het innamepunt van de WRK te Andijk, kan er een statistisch model van dat gehalte worden ontwikkeld met tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode. Dit is een statistische techniek die gebruik maakt van

de statistische relaties tussen tijdreeksen. Bij de analyse worden als invloedsfactoren van het chloridegehalte te Andijk gehanteerd het chloridegehalte en de afvoer van de Rijn te Lobith. Deze invloedsfactoren zijn geselecteerd op basis van proceskennis en op basis van beschikbaarheid.

De mate waarin straks de relatie tussen een gewijzigd spui-beheer en het chloridegehalte te Andijk zal kunnen worden vastgesteld hangt af van de omvang van die relatie en van de pasvorm van het gehanteerde model. In dit rapport zullen we voor enkele hypothetische invloeden van het gewijzigd spui-beheer nagaan in hoeverre het model daarbij objectief relaties kan vaststellen.

Wij hebben voor de tijdreeksanalyse gebruik gemaakt van het pakket Box-Jenkins for Windows, van Jenkins & Partners Ltd. te Lancaster (UK). Laatstgenoemd bedrijf, opgericht door één van de geestelijke vaders van de Box-Jenkins-methode, heeft ruim 30 jaar internationale ervaring opgedaan in het analyseren van tijdreeksen en zijn software kan worden gezien als toonaangevend op dit terrein.

1.3 Over deze rapportage

Na deze inleiding wordt in hoofdstuk 2 ingegaan op de basisgegevens die beschikbaar zijn voor het onderzoek. In hoofdstuk 3 is vervolgens beschreven hoe met deze basisgegevens het statistisch model voor het chloridegehalte te Andijk is ontwikkeld. Door middel van simulaties is de gevoeligheid van het statistisch model voor verschillende hypothetische invloeden van het gewijzigd spui-beheer nagegaan (hoofdstuk 4). Hoofdstuk 5 presenteert een zogenaamd "nulmodel" voor het chloridegehalte te Andijk, dat hoogfrequent door de RIWA kan worden ingezet om visueel grote veranderingen te signaleren die niet zijn toe te schrijven aan het chloridegehalte of de afvoer van de Rijn te Lobith. Deze rapportage sluit af met de alfabetisch gerangschikte referenties.

Deze rapportage bevat twee bijlagen. In bijlage 1 wordt een algemene toelichting gegeven op de Box-Jenkins-methode. Bijlage 2 beschrijft de wijze waarop een nieuwe invoervariabele is gecreëerd voor de transfer-ruismodellering van het chloridegehalte te Andijk: de logaritme van de afvoer te Lobith, gecorrigeerd voor het chloridegehalte te Lobith.

* Een tijdreeks is een reeks chronologisch gerangschikte waarden van een bepaalde grootte.

Uitgangsgegevens

2

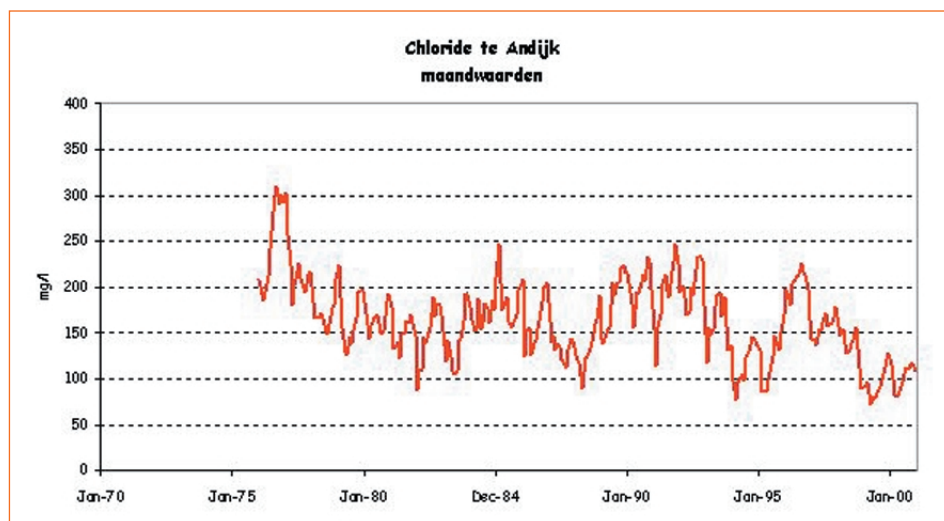
Dit hoofdstuk gaat in op de gegevens die beschikbaar zijn voor het modelleren van het chloridegehalte te Andijk en beschrijft hoe die geschikt zijn gemaakt voor het modelleren.

2.1 Chloridegehalte te Andijk

De WRK/RIWA heeft meetgegevens van het chloridegehalte te Andijk beschikbaar gesteld, die de periode januari 1976 t/m december 2000 beslaan. Tot juli 1979 bevat de reeks meestal vijf meetwaarden per week, doorgaans gemeten op maandag t/m vrijdag, daarna bevat de reeks meestal één meetwaarde per week, doorgaans gemeten op maandag. De meetwaarden zijn bepaald in steekmonsters.

De basisreeks is eerst omgezet tot een tijdreeks op weekbasis, bestaande uit de meetwaarden op, of anders nabij de maandag. Uitgaande van het duidelijke patroon in deze tijdreeks zijn de ontbrekende waarden (3,6% van het totaal) ingevuld door lineaire interpolatie. Vervolgens is deze reeks omgezet tot een tijdreeks op maandbasis, door te middelen. De resulterende tijdreeks is weergegeven in figuur 2.1.

Figuur 2.1: Tijdreeks van het chloridegehalte bij het innamepunt te Andijk, op maandbasis.



Uit figuur 2.1 blijkt dat het chloridegehalte te Andijk een duidelijk seizoenspatroon vertoont, waarbij doorgaans het jaarlijks maximum optreedt in het najaar en het jaarlijks minimum in het voorjaar. Verder vallen op de extreem hoge gehalten - meer dan 250 mg/l - in het najaar van het droge jaar 1976 en de lagere gehalten die de laatste jaren optreden.

2.2 Chloridegehalte van de Rijn

Het chloridegehalte te Andijk zal gerelateerd zijn aan het chloridegehalte van de Rijn, doordat een gedeelte van het water van de Rijn via de IJssel afvoert naar het IJsselmeer. Verder zal het chloridegehalte van de Rijn onbeïnvloed blijven door het gewijzigde spuibeheer van Rijkswaterstaat, zodat het voor de hand ligt deze te benutten als invoervariabele van het statistische model waarmee we straks een relatie willen kunnen detecteren tussen het gewijzigd spuibeheer en het chloridegehalte te Andijk.

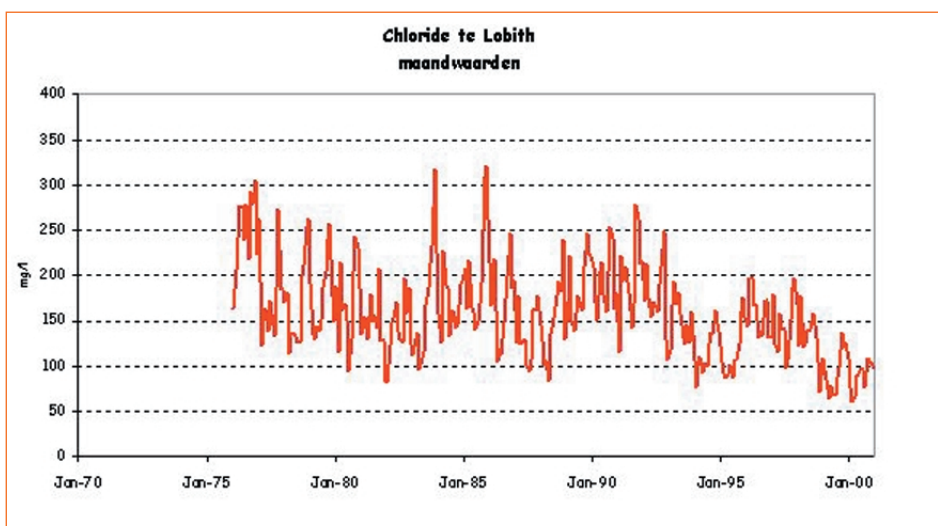
De WRK/RIWA heeft gegevens beschikbaar gesteld van het chloridegehalte van de Rijn te Tiel en te Lobith. De reeks van het chloridegehalte te Tiel beslaat de periode januari 1972 t/m december 1982 en bevat meestal zes meetwaarden per week, doorgaans gemeten op maandag t/m zaterdag. De meetwaarden zijn bepaald in steekmonsters.

Voor wat betreft het chloridegehalte te Lobith zijn twee reeksen beschikbaar gesteld, namelijk:

- 1) een reeks die loopt van januari 1979 t/m december 1994. Deze bevat t/m december 1992 veelal dagelijkse meetwaarden - zij het met soms grote hiaten - en daarna wekelijkse meetwaarden, meestal gemeten op woensdag. Alle meetwaarden zijn bepaald in steekmonsters;
- 2) een reeks die loopt van januari 1985 t/m december 2000, overwegend bestaande uit dagelijkse meetwaarden, zij het met soms grote hiaten. Alle meetwaarden zijn bepaald in dagverzamelmonsters.

Uit deze twee reeksen is een reeks samengesteld van het chloridegehalte te Lobith, die loopt van januari 1979 t/m december 2000. De reeks bestaat uit dagelijkse meetwaarden, met soms hiaten die tot enkele weken kunnen beslaan. Van januari 1979 t/m december 1984 bestaat de reeks uit dagelijkse meetwaarden die zijn bepaald in steekmonsters en van januari 1985 t/m december 2000 uit dagelijkse meetwaarden die zijn bepaald in dagverzamelmonsters. Door te middelen is deze omgezet tot een tijdreeks op maandbasis. En om deze vervolgens aan te kunnen vullen voor de periode januari 1976 t/m december 1978, is uitgegaan van de relatie met het chloridegehalte te Tiel, dat immers wel beschikbaar is vanaf 1976. Over de periode januari 1979 t/m december 1982 zijn namelijk zowel van Tiel als van Lobith meetwaarden beschikbaar van het chloridegehalte, grotendeels op dagbasis, zodat daarmee de relatie tussen beide grootheden kon worden vastgesteld. De relatie is uitgedrukt in een lineair regressiemodel dat het maandgemiddelde van het chloridegehalte te Lobith beschrijft als lineaire functie van het maandgemiddelde van het chloridegehalte te Tiel. Met het model is niet alleen het chloridegehalte te Lobith gereconstrueerd in de periode januari 1976 t/m december 1978, maar zijn ook enkele hiaten opgevuld die optreden in de periode januari 1980 t/m december 1982. De dankzij deze aanvulling ontstane volledige tijdreeks van het chloridegehalte te Lobith op maandbasis, die zich uitstrekt over de periode januari 1976 t/m december 2000, is weergegeven in figuur 2.2.

Figuur 2.2: Tijdreeks van het chloridegehalte van de Rijn te Lobith, op maandbasis.



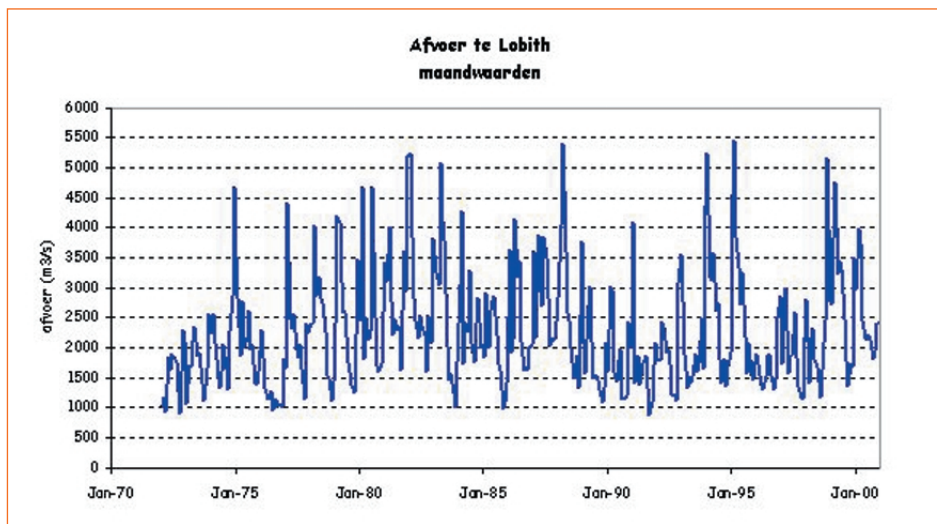
2.3 Afvoer van de Rijn te Lobith

Het chloridegehalte te Andijk zal behalve door het chloridegehalte van de Rijn ook beïnvloed worden door de afvoer van de Rijn. Het ligt daarom voor de hand ook deze relatie op te nemen in het statistische model van het chloridegehalte te Andijk. We mogen verwachten dat hiermee tevens de invloed van het neerslagoverschot op het chloridegehalte te Andijk min of meer wordt verdisconteerd.

De WRK/RIWA heeft daggegevens beschikbaar gesteld van de afvoer te Lobith.

Deze reeks is door middelen omgezet tot een tijdreeks op maandbasis. De resulterende tijdreeks is weergegeven in figuur 2.3.

Figuur 2.3: Tijdreeks van de afvoer van de Rijn te Lobith, op maandbasis.





Statistisch model

Statistisch model chloride Andijk

3

Dit hoofdstuk licht toe hoe het statistisch model van het chloridegehalte bij het innamepunt van de WRK te Andijk is ontwikkeld.

3.1 Aanpak

Uitgaande van de in hoofdstuk 2 vermelde gegevens is met de Box-Jenkins-methode (zie bijlage 1) een statistisch model ontwikkeld van het chloridegehalte te Andijk. Daarbij is vooral gebruik gemaakt van de statistische relaties die er bestaan tussen het chloridegehalte te Andijk enerzijds en het chloridegehalte en de afvoer van de Rijn te Lobith anderzijds. Deze relaties zijn neergelegd in het transfer-ruismodel van het chloridegehalte te Andijk.

3.2 Tijdseenheid en periode

De kleinste tijdseenheid waarmee statistische modellen kunnen worden ontwikkeld met de beschikbare gegevens is de week, omdat dit de hoogste meetfrequentie is die de betrokken variabelen gemeen hebben. We hebben er echter voor gekozen modellen te ontwikkelen met als tijdseenheid de maand, omdat dan beter kan worden aangesloten op de te verwachten dynamiek van de relatie tussen de kwaliteit van het IJsselmeer enerzijds en de kwaliteit en afvoer van de Rijn anderzijds.

Verder hebben alle modellen betrekking op de periode januari 1976 t/m december 2000, omdat de tijdreeksen van de beschikbare variabelen in die periode overlappen.

3.3 Identificeren dynamische relaties

Bij het statistisch modelleren van het chloridegehalte te Andijk is gebruik gemaakt van het kruiscorrelogram om een indruk te krijgen van de dynamische relaties met de mogelijke invloedsfactoren (zie het tekstkader voor een toelichting op het kruiscorrelogram).

Toelichting op het kruiscorrelogram

Met het kruiscorrelogram, de grafische weergave van de kruiscorrelatiefunctie van twee variabelen, kan visueel een indruk worden verkregen van de dynamische relatie tussen deze variabelen. Het toont de kruiscorrelatiecoëfficiënt (op de verticale as), een maat voor de samenhang van de waarden van de twee variabelen, als functie van de tijdsvertraging (op de horizontale as). De getoonde vorm van de kruiscorrelatiefunctie geeft een indicatie van de impuls-respons van de twee variabelen, oftewel de reactie van de ene variabele als de andere variabele een korte puls vertoont. Zo geeft figuur 3.1 een indruk van de reactie van het chloridegehalte te Andijk in de maanden 0, 1, 2, 3, etc., als het chloridegehalte van de Rijn te Lobith in maand 0 een kortstondige verhoging heeft gekend.

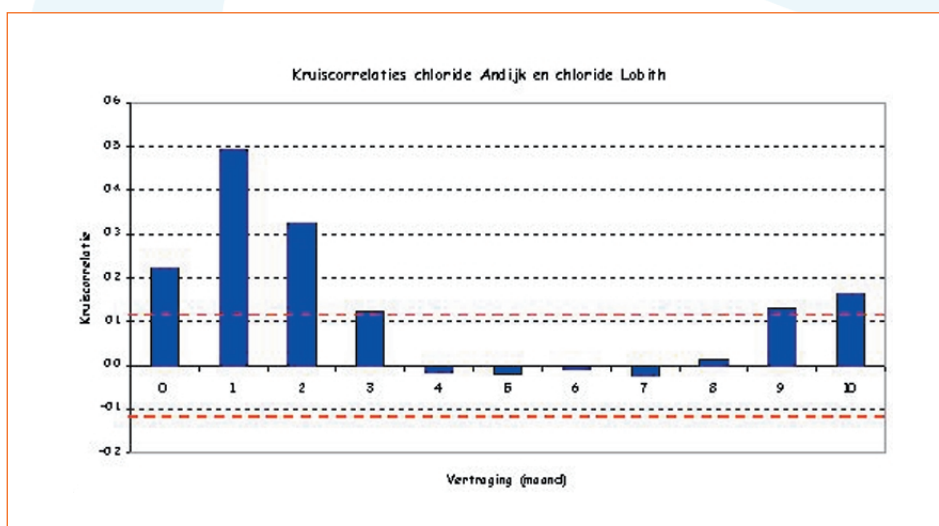
Om te bepalen of een geschatte kruiscorrelatiecoëfficiënt statistisch significant is, is in elk kruiscorrelogram tevens het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de schatting weergegeven, dat geldt onder de nulhypothese dat de twee variabelen geen relatie vertonen (dit is het interval tussen de gestippelde horizontale lijnen in figuur 3.1). Een geschatte kruiscorrelatiecoëfficiënt is statistisch significant als deze buiten het getoonde interval valt.

De tijdreeksen van veel variabelen vertonen een positieve autocorrelatie, waarbij opeenvolgende waarden doorgaans minder van elkaar verschillen dan van waarden elders in de tijdreeks. Dit verschijnsel kan het identificeren van de dynamische relatie tussen twee variabelen bemoeilijken. Om dit te omzeilen worden de tijdreeksen van beide variabelen vóór het schatten van de kruis-correlatiefunctie zoveel mogelijk ontdaan van autocorrelatie. Deze bewerking wordt wel aangeduid als het "vóóraf witten" (Engels: "prewhitening") van de variabelen.

3.3.1 Relatie chloridegehaltes te Andijk en Lobith

Zoals blijkt uit het kruiscorrelogram, weergegeven in figuur 3.1, vertonen het chloridegehalte te Andijk en het chloridegehalte van de Rijn te Lobith een sterke statistische relatie. Een wijziging in het chloridegehalte te Lobith lijkt gedurende enkele maanden invloed te hebben op het chloridegehalte te Andijk, waarbij een maximaal effect optreedt na één maand.

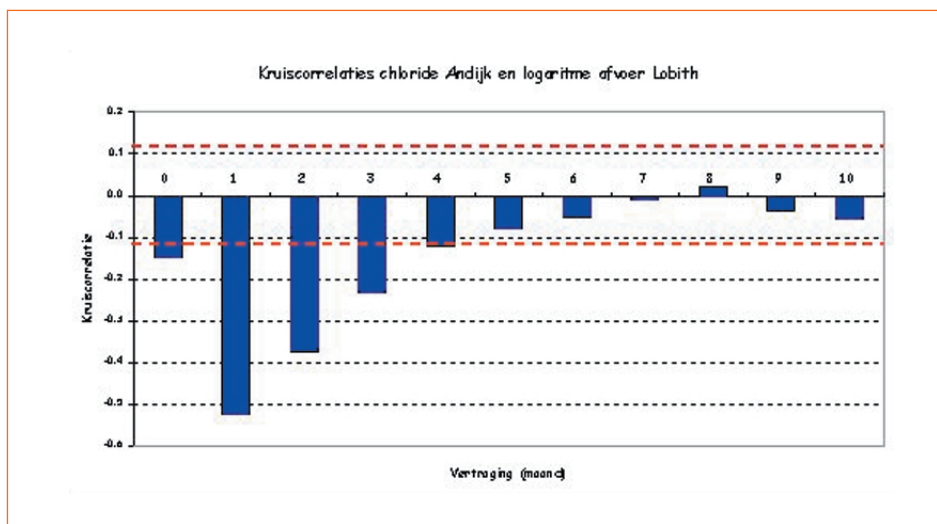
Figuur 3.1: Kruiscorrelogram van het chloridegehalte te Andijk en het chloridegehalte van de Rijn te Lobith.



3.3.2 Relatie chloridegehalte te Andijk en afvoer te Lobith

De afvoer van de Rijn te Lobith vertoont door het optreden van enkele extremen (zie figuur 2.3) duidelijk een niet-symmetrische kansverdeling. Voor de Box-Jenkins-methode dienen de betrokken variabelen echter te voldoen aan een normale (symmetrische) kansverdeling. Omdat de logaritme van de afvoer te Lobith wél voldoet aan een normale kansverdeling, is die bij de verdere analyse betrokken. Zoals blijkt uit het kruiscorrelogram, weergegeven in figuur 3.2, vertonen het chloridegehalte te Andijk en de logaritme van de afvoer te Lobith een sterke statistische relatie. Een wijziging in de afvoer te Lobith lijkt gedurende meerdere maanden invloed te hebben op het chloridegehalte te Andijk, waarbij een maximaal effect optreedt na één maand.

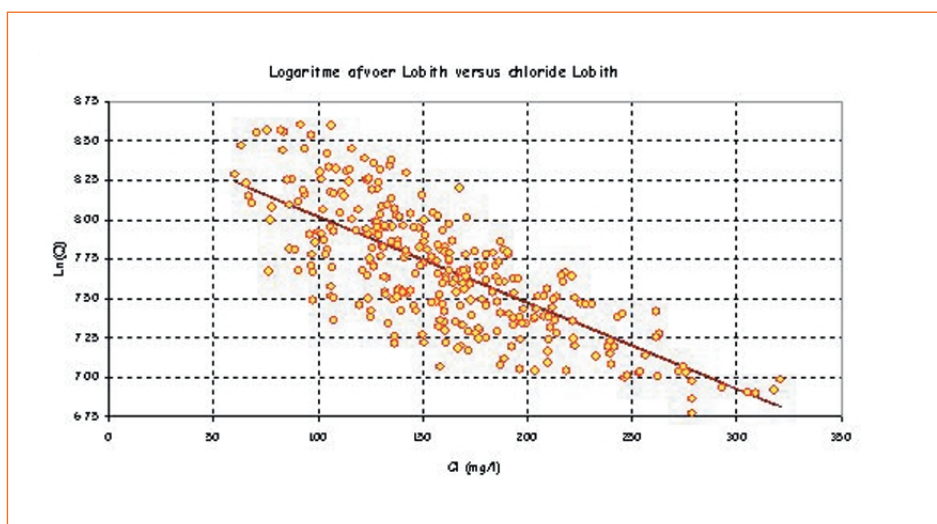
Figuur 3.2: Kruiscorrelogram van het chloridegehalte te Andijk en de logaritme van de afvoer van de Rijn te Lobith



3.3.3 Relatie chloridegehalte en afvoer te Lobith

Zoals blijkt uit het spreidingsdiagram van figuur 3.3 zijn het chloridegehalte en de logaritme van de afvoer van de Rijn te Lobith sterk negatief gecorreleerd, in de zin dat een hoge afvoer doorgaans gepaard gaat met een laag chloridegehalte en een lage afvoer afvoer met een hoog chloridegehalte.

Figuur 3.3: Spreidingsdiagram van het chloridegehalte en de logaritme van de afvoer van de Rijn te Lobith, met tevens de lineaire regressielijn.

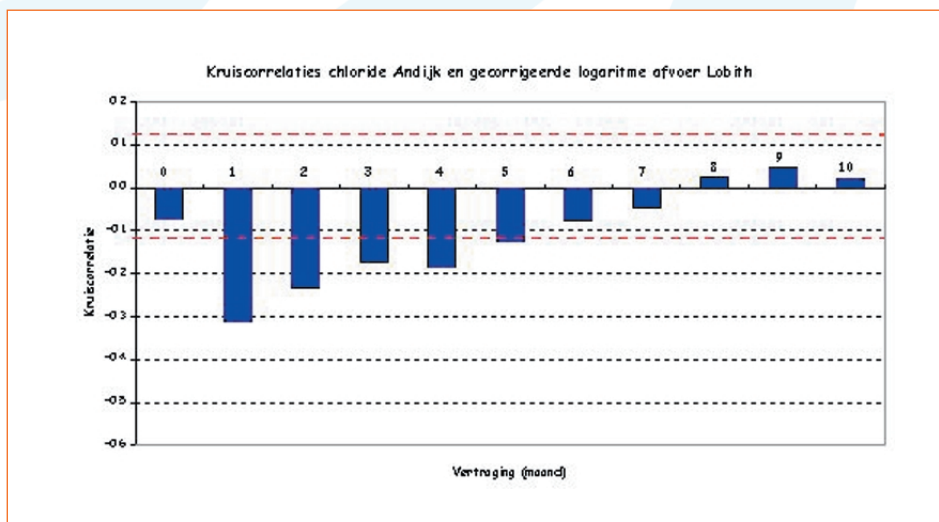


Vanwege deze sterke correlatie is het niet zinvol om bij het modelleren van het chloridegehalte te Andijk zowel het chloridegehalte als de (logaritme van de) afvoer te Lobith te hanteren, omdat dit tot ongewenste modeleigenschappen zal leiden. Daarom is een nieuwe variabele geconstrueerd, die niet meer gecorreleerd is aan het chloridegehalte te Lobith, namelijk de voor het chloridegehalte te Lobith gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith (zie bijlage 2).

Zoals blijkt uit het kruiscorrelogram, weergegeven in figuur 3.4, vertonen het chloridegehalte te Andijk en de gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith ook een sterke statistische relatie, die voor wat betreft vorm

lijkt op de relatie tussen het chloridegehalte te Andijk en de ongecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith. Een wijziging in de gecorrigeerde afvoer te Lobith lijkt gedurende enkele maanden invloed te hebben op het chloridegehalte te Andijk, waarbij een maximaal effect optreedt na één maand.

Figuur 3.4: Kruiscorrelogram van het chloridegehalte te Andijk en de gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith.



Invloed van het Rijn-Zoutverdrag?

Bij het construeren van de nieuwe variabele zijn we ook met een statistische modellering nagegaan of het chloridegehalte in de Rijn te Lobith en het internationale Rijn-Zout-verdrag een relatie vertonen. Want als dat het geval is, zal de relatie tussen het chloridegehalte en de afvoer te Lobith ook gewijzigd zijn en moet de constructie van de nieuwe variabele daar rekening mee houden.

Er bleek geen statistisch significante relatie te bestaan tussen het chloride (zowel vracht als concentratie) te Lobith en één van de uitvoeringsonderdelen van het Rijn-Zout-verdrag door Frankrijk (zie bijlage 2). Dit hoeft echter geenszins te betekenen dat het verdrag geen invloed heeft gehad. De invloed kan namelijk ook een ander, meer variabel, patroon hebben gevolgd dan het stapvormige patroon waar bij de transfer-ruismodellering van uitgegaan is. Verder ligt de grootte van de bij de modellering geschatte relatie met de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag wel degelijk in de lijn van de verwachtingen daaromtrent, maar is de schatting alleen niet statistisch significant. En voor wat betreft de tweede fase, het zogenaamde "piekscheren", is het zeer wel mogelijk dat dat nog nauwelijks nodig is geweest - en dus ook nog geen effect k n hebben gehad - door de reeds relatief lage chloridegehalten van de Rijn te Lobith.

3.4 Model chloridegehalte Andijk op maandbasis

Uitgaande van de bevindingen van de modelidentificatie is een transfer-ruismodel ontwikkeld van het maandgemiddelde chloridegehalte te Andijk, waarbij voor de modelcalibratie is uitgegaan van de gegevens uit de periode januari 1976 t/m december 2000. Als invoervariabelen van het model dienden:

- 1) het chloridegehalte te Lobith;
- 2) de gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith.

De dynamische relaties met deze invoervariabelen zijn in eerste instantie gepostuleerd op basis van hun kruiscorrelogrammen. Gedurende de verdere modelontwikkeling zijn deze dynamische relaties zonodig aangepast (zie bijlage 1 voor een beschrijving van het principe van de modelontwikkeling). Verder zijn bij het modelleren in eerste instantie ook nog twee andere invoervariabelen toegevoegd, omdat mag worden verwacht dat deze eveneens invloed uitoefenen op het chloridegehalte van het IJsselmeer, namelijk:

- 3) de afleiding van uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee;
- 4) het bellenscherm in de sluis te Den Oever.

ad 3) Als onderdeel van het Rijn-zoutverdrag heeft Nederland op zich genomen het zoutgehalte van het IJsselmeer te verlagen door de lozing van het zoute kwelwater uit de Wieringermeer te verleggen van het IJsselmeer naar de Waddenzee. De lozing betrof bijvoorbeeld in 1993 circa 150 miljoen m³ zout water, wat neerkomt op 0,8 miljoen ton zout per jaar. De gehele zouttoevoer naar het IJsselmeer bedroeg dat jaar 4,8 miljoen ton, hiervan was het grootste deel - 3 miljoen ton - afkomstig van de Rijn, via de IJssel. Verder was er nog 1 miljoen ton afkomstig uit de Waddenzee.

Om de afleiding naar de Waddenzee tot stand te brengen is samengewerkt door zeven organisaties, waaronder ook de WRK. De bouw van de benodigde voorzieningen heeft plaatsgehad in de periode december 1995 tot en met september 1997. De afleiding van het uitslagwater naar de Waddenzee is volgens opgaaf van het waterschap Hollands Kroon vanaf januari 1998 vol operationeel. Rekening houdende met een opstartperiode is de afleiding bij het modelleren van het chloridegehalte te Andijk vertegenwoordigd door een variabele die de waarde 0 heeft tot oktober 1997, dan lineair toeneemt tot de waarde 1 in januari 1998 en daarna constant op de waarde 1 blijft.

ad 4) Bij het schutten van schepen in de sluizen te Kornwerderzand en Den Oever konden grote hoeveelheden zout water van de Waddenzee over de bodem van de sluis het IJsselmeer binnendringen. Om dit tegen te gaan, heeft Rijkswaterstaat luchtbellenschermen geplaatst in de sluizen, die bij elke schutting worden aangezet. Het bellenscherm bij Kornwerderzand is in de herfst van 1975 in gebruik genomen, terwijl het bellenscherm bij Den Oever begin 1996 in gebruik is genomen.

Met het bellenscherm te Kornwerderzand hoefde bij de modellering van het chloridegehalte te Andijk geen rekening te worden gehouden, omdat het over de gehele modelperiode (1976 t/m 2000) al operationeel was. Het bellenscherm te Den Oever is bij het modelleren van het chloridegehalte vertegenwoordigd door een variabele die de waarde 0 heeft tot januari 1996 en daarna de waarde 1.

Bij de modelontwikkeling viel het bellenscherm in de sluis te Den Oever af als invoervariabele, door het ontbreken van een statistisch significante relatie met het chloridegehalte te Andijk. Uiteindelijk resulteerde het volgende transfermodel van het chloridegehalte te Andijk (zie bijlage 1 voor een toelichting op de notatie):

$$ClAnd_t = (\omega_{10} - \dots - \omega_{14}B^4) \cdot ClLob_t + (\omega_{20} - \dots - \omega_{24}B^4) \cdot gec \cdot \ln[QLob_t] + (\omega_{30} - \dots - \omega_{34}B^4) \cdot AUWW_t + N_t$$

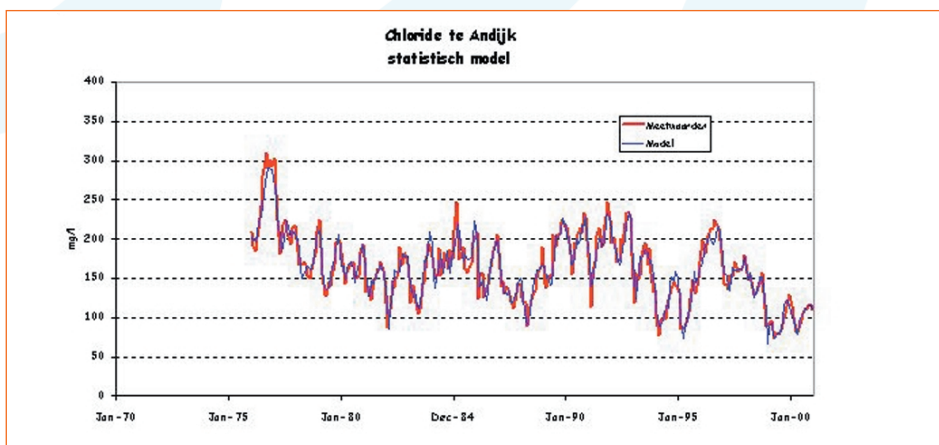
met $ClAnd_t$ het chloridegehalte te Andijk (mg/l), $ClLob_t$ het chloridegehalte te Lobith (mg/l), $gec \cdot \ln[QLob_t]$ de via lineaire regressie voor het chloridegehalte te Lobith gecorrigeerde logarithme van de afvoer te Lobith ($\ln[m^3/s]$), $AUWW_t$ de afleiding van uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee (met waarden van 0 tot 1) en N_t de ruis (mg/l) alle in maand t , $\omega_{10} \dots \omega_{14}$ moving-average modelparameters voor invoervariabele i ($i = 1, 2$ of 3) en B de terugschuif-operator. Het model voor de ruis luidt:

$$(1 - 0,84B) \cdot (N_t - 163,3) = (1 - 0,23B) \cdot a_t$$

met a_t het modelresidu in maand t . De standaardafwijking van het modelresidu bedraagt 13,6 mg/l.

De pasvorm van dit model mag redelijk tot goed worden genoemd, wat ook moge blijken uit figuur 3.5, waar de waargenomen en de gemodelleerde tijdreeks van het chloridegehalte te Andijk zijn weergegeven.

Figuur 3.5: Tijdreeksen van het waargenomen en gemodelleerde chloridegehalte te Andijk op maandbasis.



Het modelleren levert ook schattingen op van de evenwichtsrelaties tussen de betrokken invoervariabelen en het chloridegehalte te Andijk (zie tabel 3.1). De evenwichtsrelatie met een invoervariabele is de uiteindelijk resulterende verandering in het chloridegehalte als die invoervariabele continu één eenheid hoger wordt gezet.

Tabel 3.1: Geschatte evenwichtsrelaties tussen de invoervariabelen en het chloridegehalte te Andijk.

Invoervariabele	eenheid	evenwichtsrelatie mg/l per eenheid	95%-betr. interval mg/l per eenheid
Chloride te Lobith	mg/l	0,70	[0,58 ; 0,81]
Gec. logaritme van afvoer te Lobith	$\ln[m^3/s]$	-75,3	[-96,9 ; -53,7]
Afleiding Uitslagwater Wieringermeer	-	-31,3	[-54,5 ; -8,1]

Een geschatte evenwichtsrelatie is statistisch significant (met 95%-betrouwbaarheid), als zijn 95%-betrouwbaarheidsinterval niet de waarde nul bevat. Uit tabel 3.1 blijkt dat voor alledrie de invoervariabelen de geschatte evenwichtsrelatie statistisch significant is, bij een gehanteerde betrouwbaarheid van 95%. De afleiding van het uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee gaat volgens deze schatting gepaard met een gemiddelde verlaging van het chloridegehalte te Andijk van 31,3 mg/l. Het 95%-betrouwbaarheids-interval van deze schatting bedraagt [-54,5 mg/l ; -8,1 mg/l].

4

Gevoeligheid statistisch model

In dit hoofdstuk wordt aangegeven in hoeverre met een statistische evaluatie straks een relatie kan worden vastgesteld tussen een gewijzigd spuibeheer van het IJsselmeer en het chloridegehalte bij het innamepunt Andijk.

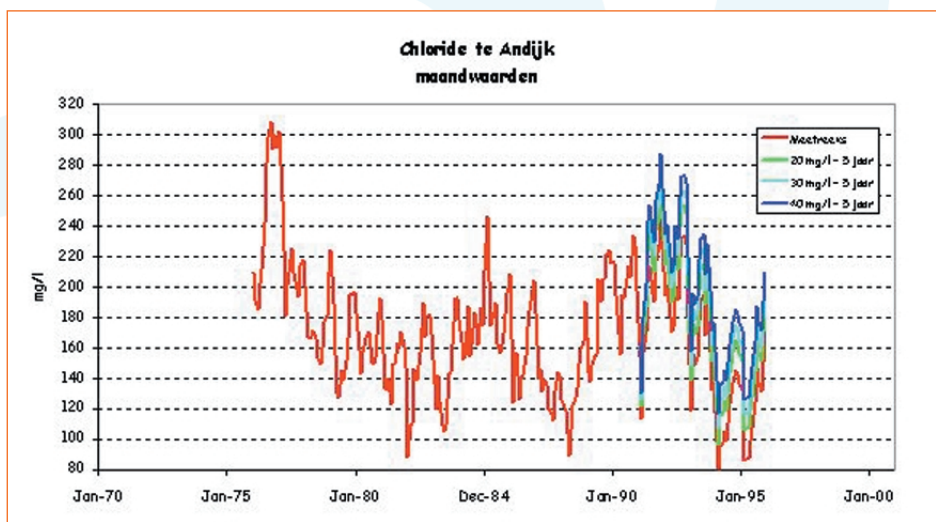
4.1 Aanpak

Het ligt voor de hand om straks voor de statistische evaluatie van het gewijzigd spuibeheer een statistisch model in te zetten, dat vergelijkbaar is met het hier ontwikkelde statistische model van het chloridegehalte te Andijk (zie § 3.4). De mate waarin een relatie tussen het gewijzigd spuibeheer en het chloridegehalte te Andijk zal kunnen worden vastgesteld hangt dan af van: a) de pasvorm van het gehanteerde statistische model en b) van de omvang van die relatie. In dit hoofdstuk zullen we voor enkele gesimuleerde invloeden van het gewijzigd spuibeheer, die verschillen in omvang en/of duur, nagaan in hoeverre het statistisch model-leren daarbij objectief een relatie kan vaststellen.

De aanpak was als volgt:

- 1) als basis voor de gevoeligheidsanalyse diende de tijdreeks van het chloridegehalte te Andijk, op maand-basis over de periode januari 1976 t/m december 1995. De periode januari 1996 t/m december 2000 is niet betrokken bij de analyse, om te vermijden dat een gesimuleerde invloed van het gewijzigde spui-beheer verstrengeld raakt met de invloed van de afleiding van uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee, of met de (mogelijke) invloed van het bellenscherm in de sluis te Den Oever;
- 2) uitgaande van deze basisreeks zijn negen verschillende tijdreeksen gesimuleerd van het chloridegehalte te Andijk, door elk van drie hypothetische invloeden van het gewijzigd spuibeheer, namelijk +20 mg/l, +30 mg/l en +40 mg/l, te superponeren over elk van drie deelperioden, namelijk het laatste jaar, de laatste twee jaar en de laatste vijf jaar van de basisreeks. Hierbij is ook rekening gehouden met het feit dat een invloed zich niet direct zal instellen, maar geleidelijk, door de eerste maand 20% te super-poneren van de hypothetische invloed, de tweede maand 40%, etc., zodat de volledige invloed zich na vijf maanden instelt. Figuur 4.1 toont voor elk van de drie hypothetische invloeden de tijdreeks die resulteerde door de invloed te superponeren op de laatste vijf jaar van de basisreeks;
- 3) vervolgens is een statistisch model ontwikkeld van de nieuwe tijdreeks, met als invoervariabelen:
 - het chloridegehalte te Lobith;
 - de gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith;
 - het gewijzigde spuibeheer (met de waarde 0 tot het begin van de hypothetische invloed en de waarde 1 daarna);
- 4) het modelleren levert een schatting op van de evenwichtsrelatie tussen het gewijzigde spuibeheer en het chloridegehalte te Andijk, evenals de bijbehorende standaardfout. Hiermee kan het 95%-betrouwbaarheidsinterval van de geschatte evenwichtsrelatie worden bepaald, dat is op te vatten als een maat voor de gevoeligheid van het statistische model voor de betreffende gesuperponeerde invloed.

Figuur 4.1: Drie van de negen voor de gevoeligheidsanalyse gesimuleerde tijdreeksen van het chloridegehalte te Andijk. De hypothetische invloeden van het gewijzigde spuibeheer zijn gesuperponeerd op de laatste 5 jaar van de basisreeks



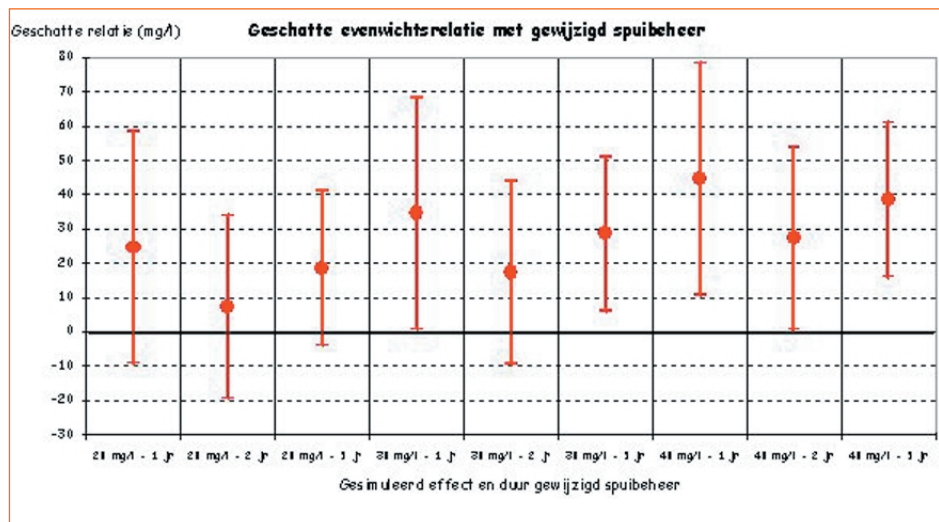
4.2 Resultaten

De resultaten van de gevoeligheidsanalyse zijn vermeld in tabel 4.1 en ook grafisch weergegeven in figuur 4.2.

Tabel 4.1: Geschatte evenwichtsrelatie (en bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval) tussen het gewijzigd spuibeheer en het chloridegehalte te Andijk, voor de negen gesimuleerde combinaties van invloed en duur.

Simulatie	Evenwichtsrelatie mg/l	95%-betr. interval mg/l
20 mg/l - 1 jr	24,5	[-9,3 ; 58,4]
20 mg/l - 2 jr	7,2	[-19,4 ; 33,9]
20 mg/l - 5 jr	18,6	[-4,0 ; 41,1]
30 mg/l - 1 jr	34,5	[0,7 ; 68,3]
30 mg/l - 2 jr	17,2	[-9,5 ; 43,9]
30 mg/l - 5 jr	28,6	[6,1 ; 51,0]
40 mg/l - 1 jr	44,5	[10,7 ; 78,4]
40 mg/l - 2 jr	27,2	[0,6 ; 53,9]
40 mg/l - 5 jr	38,6	[16,0 ; 61,1]

Figuur 4.2: Geschatte evenwichtsrelatie (en bijbehorend 95%-betrouwbaarheidsinterval) tussen het gewijzigd spui-beheer en het chloridegehalte te Andijk, voor de negen gesimuleerde combinaties van invloed en duur.



4.3 Conclusies

Uit tabel 4.1 en figuur 4.2 kan worden opgemaakt dat als het gewijzigd spui-beheer het chloridegehalte te Andijk met 30 mg/l verhoogt, er met het beschreven soort statistische evaluatie na enkele jaren een statistisch significante relatie kan worden gedetecteerd. Bij grotere verhogingen kan er al na circa één jaar een statistisch significante relatie worden gedetecteerd.

Wij wijzen er op dat de hier gevolgde aanpak slechts een indruk kan opleveren van de werkelijke gevoeligheid van het statistische model. Om de werkelijke gevoeligheid te kunnen vaststellen is namelijk een groot aantal simulaties nodig - 10.000 of meer -, waarbij de hypothetische invloed van het gewijzigd spui-beheer steeds wordt gesuperponeerd op een stochastisch gesimuleerde verlenging van de bestaande tijdreeks van het chloridegehalte te Andijk.



Nulmodel chloride Andijk

5.1 Nut van een nulmodel

Het is niet praktisch als de RIWA de transfer-ruismodellering straks hoogfrequent, zoals meer dan eenmaal per jaar, gaat hanteren om te toetsen op een statistisch significante relatie tussen het gewijzigd spui-beheer en het chloridegehalte te Andijk, vanwege de relatief grote inspanning die het modelleren vergt. Daarom presenteert dit hoofdstuk een afgeleid model, het zogenaamde "nulmodel", dat zich beter leent voor routine-matige controle van het chloridegehalte te Andijk. Vanwege zijn relatieve eenvoud is dit model uiteraard minder krachtig dan het transfer-ruismodel, maar het biedt de RIWA de mogelijkheid om het chloridegehalte te Andijk maandelijks visueel te beoordelen op grote veranderingen die niet te verklaren zijn uit het chloridegehalte en de afvoer van de Rijn te Lobith. Met een transfer-ruismodel kan zonodig vervolgens objectief worden nagegaan of die verandering al dan niet statistisch significant is gerelateerd aan het gewijzigd spui-beheer van Rijkswaterstaat.

5.2 Werking van het nulmodel

Met het nulmodel kan op relatief eenvoudige wijze elke maand het chloridegehalte te Andijk worden geraamd, uitgaande van de relaties met het chloridegehalte en de afvoer te Lobith, waarbij tevens is verdisconteerd voor de relatie met de afleiding van uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee. Het nulmodel heeft de volgende structuur:

$$\begin{aligned} ClAnd_t = & 3,007 + 0,056 \cdot ClLob_t + 0,289 \cdot ClLob_{t-1} + 0,245 \cdot ClLob_{t-2} \\ & + 0,150 \cdot ClLob_{t-3} + 0,142 \cdot ClLob_{t-4} - 27,287 \cdot gec \ln[QLob_t] \\ & - 43,618 \cdot gec \ln[QLob_{t-1}] - 15,406 \cdot gec \ln[QLob_{t-2}] \\ & - 4,661 \cdot gec \ln[QLob_{t-3}] + 2,236 \cdot gec \ln[QLob_{t-4}] \\ & + 21,446 \cdot AUWW_t + r_t \end{aligned}$$

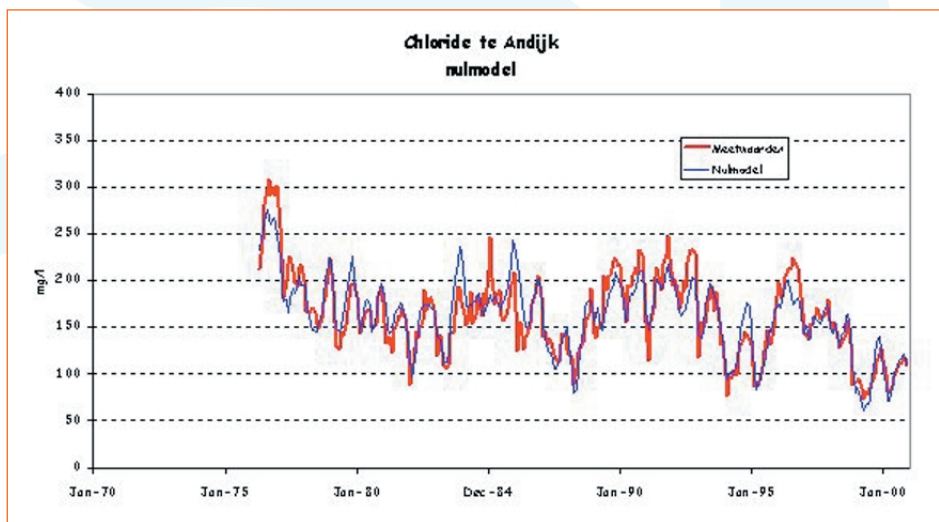
met $ClAnd_t$ het chloridegehalte te Andijk (mg/l), $ClLob_t$ het chloridegehalte te Lobith (mg/l), $gec \ln[QLob]$ de via lineaire regressie voor het chloridegehalte te Lobith gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith, zoals beschreven in bijlage 2 ($\ln[m^3/s]$), $AUWW$ de afleiding van uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee (met waarden van 0 tot 1), r het modelresidu (mg/l) en t de index voor de maand.

De afleiding van uitslagwater van het Wieringermeer naar de Waddenzee is hier vertegenwoordigd door een variabele die de waarde 1 heeft tot oktober 1997, dan lineair afneemt tot de waarde 0 in januari 1998 en daarna constant op de waarde 0 blijft. Dankzij deze formulering hoeft de afleiding niet meer apart te worden verdisconteerd bij toekomstig gebruik van het nulmodel.

De standaardafwijking van het modelresidu bedraagt 20,1 mg/l. De pasvorm van het nulmodel is ook af te leiden uit figuur 5.1, waar de waargenomen en de gemodelleerde tijdreeks van het chloridegehalte te Andijk zijn weergegeven.

Door elke maand de grafiek zoals weergegeven in figuur 5.1 aan te vullen met de realisatie van het maand-gemiddelde chloridegehalte te Andijk en de raming daarvan volgens het nulmodel, kan visueel worden gecontroleerd op grote veranderingen die niet te verklaren zijn uit het chloridegehalte en de afvoer van de Rijn te Lobith.

Figuur 5.1: Tijdreeksen van het waargenomen en het volgens het nulmodel geraamde chloridegehalte te Andijk, beide op maandbasis.



5.3 Aanwijzingen voor gebruik van het nulmodel

Om het bovenbeschreven nulmodel zo efficiënt mogelijk te kunnen benutten, moeten de volgende stappen worden uitgevoerd:

- (1) vergelijk elke maand de realisatie van het maandgemiddelde chloridegehalte te Andijk met de raming daarvan volgens het nulmodel. Het nulmodel dient daartoe dus gevoerd te worden met de realisaties van het maandgemiddelde chloridegehalte te Lobith en de via lineaire regressie voor dit chloridegehalte gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith (zie bijlage 2 voor deze correctie);
- (2) als de geconstateerde afwijking tussen realisatie en raming drie opeenvolgende maanden hetzelfde teken (+ of -) heeft, óf als er een zeer grote afwijking wordt geconstateerd, ga dan met een transfer-ruismodellering van het chloridegehalte te Andijk na of dat statistisch significant is gerelateerd aan het gewijzigd spuibeheer van Rijkswaterstaat;
- (3) ga in ieder geval jaarlijks met een transfer-ruismodellering van het chloridegehalte te Andijk na of er een statistisch significante relatie is met het gewijzigd spuibeheer van Rijkswaterstaat.

Referenties

Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1976): "Time Series Analysis, Forecasting and Control". Holden Day, San Francisco.

McLeod, G. (1983): "Box Jenkins in Practice". Time Series Library, Gwilym Jenkins & Partners Ltd., Lancaster.



Bijlage 1. Algemene toelichting op de Box-Jenkins-methode

Aan de hand van tijdreeksanalyse volgens de Box-Jenkins-methode [Box and Jenkins, 1976], kan de tijdreeks van een variabele beschreven worden met een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In het nu volgende geven we een beknopte uitleg van deze methode. Voor een diepgaande theoretische verhandeling wordt verwezen naar het standaardwerk [Box and Jenkins, 1976]. Voor een praktisch gerichte verhandeling wordt verwezen naar [McLeod, 1983].

Uitleg aan de hand van systeemtheorie

Het principe van de Box-Jenkins benadering kan goed worden toegelicht aan de hand van begrippen uit de systeemtheorie. Een systeem zal daartoe - enigszins intuïtief - worden omschreven als een deel van de werkelijkheid, dat via in- en uitgangssignalen wisselwerkingen vertoont met z'n omgeving. Het chloridegehalte te Andijk zullen we dan opvatten als het uitgangssignaal (hier: de uitvoerreeks) van een systeem, dat wordt aangedreven door meerdere ingangssignalen (hier: invoerreeksen). Een dergelijk systeem kan mathematisch worden uitgeschreven als:

$$Y(t) = g(G, X, t) \quad 1$$

met Y de stijghoogte, $g(_)$ één of andere functie, G een verzameling modelparameters, X de verzameling invoerreeksen en t de continue tijd.

Als we het chloridegehalte empirisch willen modelleren verdient het echter aanbeveling deze te beschouwen als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem:

- discreet: omdat relevante gegevens over het chloridegehalte en de invoerreeksen meestal slechts beschikbaar zijn in de vorm van discrete tijdreeksen;
- lineair: omdat dit de minste theoretische en praktische problemen oplevert, bovendien is gebleken dat veel systemen redelijk beschreven kunnen worden met lineaire modellen;
- dynamisch: omdat de tijd een essentiële rol speelt in het gedrag van de uitvoerreeks;
- stochastisch: omdat zo'n systeem nooit exact (deterministisch) kan worden beschreven, enerzijds vanwege de benadering die is ingevoerd door de discretisatie en linearisatie, anderzijds vanwege het feit dat het onmogelijk is alle invoerreeksen bij de beschrijving mee te nemen.

Een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem kan mathematisch worden uitgeschreven als:

$$Y_t = f(F, X'_t) + N_t \quad 2$$

met Y het chloridegehalte te Andijk, $f(_)$ een lineaire functie, F een verzameling modelparameters, X' een deelverzameling van de invoerreeksen, N de ruis en t de discrete tijdsindex. Omdat de algemene vorm van de Box-Jenkins modellen ook kan worden uitgeschreven als bovenstaande formule, is de Box-Jenkins-methode bij uitstek geschikt om zo'n systeem langs empirische weg te beschrijven. En omdat de methode er op is gericht het stochastische element terug te brengen tot een verschijnsel dat minimaal is en dat bekende waarschijnlijkheidswetten volgt, kunnen er uitspraken omtrent het systeem worden gedaan met minimale en kwantificeerbare onzekerheden.

Statistisch modelleren van een tijdreeks

De klassieke statistische methodologie is zelden geschikt voor een statistische modellering van tijdreeksen, omdat deze gebaseerd is op onafhankelijke waarnemingen, terwijl de waarnemingen in een tijdreeks vaak niet onafhankelijk van elkaar zijn. De belangrijkste bijdragen van Box en Jenkins tot de oplossing van dit probleem bestonden uit de formulering van een familie van statistische modellen om tijdreeksen te beschrijven en uit aanwijzingen tot een verantwoorde modelbouw [Box and Jenkins, 1976]. Voor de modellering van een tijdreeks ontwikkelden ze twee benaderingen, namelijk univariate modellering aan de hand van een Arimamodel en transfer-ruismodellering aan de hand van een transferuismodel. Beide zullen in het nu volgende kort en voornamelijk intuïtief worden omschreven.

Univariaat modelleren

Bij de univariate modellering wordt uitsluitend uitgegaan van de te modelleren tijdreeks, die wordt beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door een stochastische invoerreeks. Deze laatste is onbekend en ontstaat eigenlijk pas in de modelleerfase als het modelresidu. De modellering is er dan ook op gericht dit terug te brengen tot een verschijnsel dat bekende waarschijnlijkheidswetten volgt ("witte ruis") en een minimale variantie heeft. De variantie mag in dit verband als een soort maat voor de onzekerheid van het model worden beschouwd.

Witte ruis kan worden opgevat als een volledig toevallig signaal, bestaande uit een opeenvolging van onafhankelijke trekkingen uit een normale kansverdeling, met gemiddelde nul en variantie σ_a^2 .

Het zal duidelijk zijn dat de univariate benadering nauwelijks inzicht levert in het beschouwde systeem. Het wordt wel veel toegepast om voorspellingen van een bepaalde variabele te genereren. Deze zijn dan uitsluitend gebaseerd op een statistische analyse van het gedrag van deze variabele in het verleden. Deze toepassing heeft dan ook vooral opgang gemaakt in de economie, met zijn gecompliceerde en minder inzichtelijke dynamische systemen.

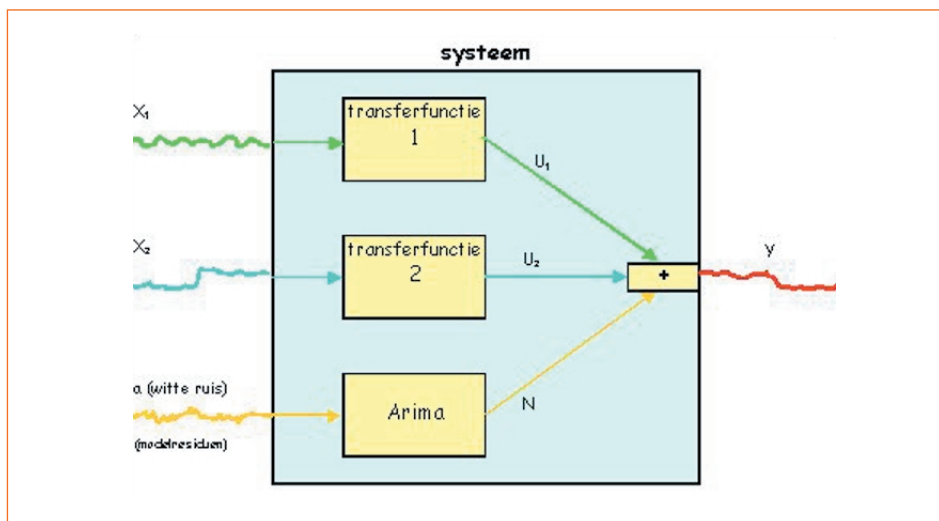
Transfer-ruismodelleren

Bij de transfer-ruismodellering wordt de te modelleren tijdreeks beschouwd als de uitvoerreeks van een discreet lineair dynamisch stochastisch systeem dat wordt aangedreven door meerdere invoerreeksen, waaronder ook witte ruis (zie figuur b1.1). Elke invoerreeks (X_j) levert hierbij volgens een afzonderlijke lineaire transferfunctie een component (U_j) van de uitvoerreeks (Y). De resterende ruis (N) vertegenwoordigt de component die wordt geleverd door alle invoerreeksen die niet bij de modellering zijn betrokken. Deze ruis kan op zijn beurt worden weergegeven als de uitvoerreeks van een deelsysteem, dat volgens een Arimamodel (in feite ook een soort transferfunctie) wordt aangedreven door witte ruis. De verschillende componenten geven door middel van lineaire superpositie de uiteindelijk waargenomen uitvoerreeks, volgens:

$$Y_t = U_{1t} + \dots + U_{mt} + N_t$$

3

Figuur b1.1: Principe van het transfer-ruismodel, hier met twee invoervariabelen.



De kracht van het transfer-ruismodel is dat een groot aantal dynamische situaties beschreven kan worden met slechts een gering aantal modelparameters.

Ontwikkelen van een Box-Jenkins model

Het ontwikkelen van een Box-Jenkins model is - net als bij de meeste modellen - een iteratief proces. Per ronde worden drie fasen doorlopen:

- 1) identificatie van de vorm het model;
- 2) schatting van de modelparameters;
- 3) verificatie van het model.

In het nu volgende beschrijven we de drie fasen afzonderlijk, met als toepassing de ontwikkeling van een transfer-ruismodel.

Identificeren van de modelvorm

Aan de hand van diagnostieken van de relaties tussen de uitvoerreeks en de invoerreeksen, zo mogelijk aangevuld met fysisch inzicht in deze relaties, wordt de vorm van het model gepostuleerd. De diagnostieken worden geleverd door de (steekproef) kruiscorrelatiefuncties van de uitvoerreeks en elke afzonderlijke invoerreeks. Zo'n functie geeft de kruiscorrelatiecoëfficiënt, een maat voor de samenhang tussen de waarde van de invoerreeks en de uitvoerreeks k tijdseenheden later, als functie van k (de tijdsverschuiving). Een kruiscorrelatiefunctie wordt vaak geplotted weergegeven (het kruiscorrelogram), omdat dit de diagnose aanzienlijk vergemakkelijkt. Omdat het beeld van de relatie vertroebeld kan worden door de autocorrelaties binnen de reeksen, worden beide vóór het berekenen van de kruiscorrelatiefunctie door een filter gehaald, namelijk het inverse Arimamodel voor de invoerreeks. Deze aanpak noemt men ook wel "prewhitening" [Box and Jenkins, 1976].

In deze identificatiefase dient tevens de vorm van het ruismodel te worden geformuleerd. Hiervoor zijn verschillende benaderingen mogelijk. Als er met grote waarschijnlijkheid van kan worden uitgegaan dat alle relevante invoerreeksen in het transferruismodel zijn opgenomen, kan het ruismodel worden geformuleerd als een stationair model. Zo'n model beschrijft een tijdreeks die voldoet aan een bepaald statistisch evenwicht en in feite met een constante spreiding rond een constante waarde schommelt. Als er daarentegen (vermoedelijk) relevante invoerreeksen ontbreken, kan het ruismodel in eerste instantie worden geformuleerd als het Arimamodel voor de uitvoerreeks. In alle gevallen zal de juistheid of onjuistheid van de formulering van het ruismodel blijken in de verificatiefase.

Schatten van de modelparameters

De parameters van het geïdentificeerde model worden geschat volgens een optimalisatieprocedure, waarbij de som van de kwadraten van de residuën - een functie van de modelparameters - wordt geminimaliseerd. Dit noemt men ook wel de kleinste kwadratenmethode.

Verifiëren van het model

In de verificatiefase wordt nagegaan of het model de tijdreeks adequaat beschrijft en of voldaan wordt aan alle vooronderstellingen die aan het model ten grondslag liggen (residuën normaal verdeeld, onafhankelijk van elkaar, gemiddeld 0 en zonder relatie met de afzonderlijke invoerreeksen). Hierbij wordt gebruik gemaakt van diagnostieken van de residuën, zoals een plot, een histogram en enkele (steekproef)correlatiefuncties, alsmede de schatting van de variantie van de residuën, de statistische significantie van de modelparameters en de correlatiematrix van de parameterschatters. Bij een onbevredigende diagnose kan een betere modelvorm geformuleerd worden aan de hand van de geconstateerde discrepanties. Het ontwikkelproces vervolgt dan weer met de schatting van de modelparameters.

Betrouwbaarheidsinterval van een geschatte parameter

De schatting van de parameter van een transfer-ruismodel kan opgevat worden als een waarde van een schatter, een stochastische (of toevals)variabele met een bepaalde kansverdeling. Een schatting gaat gepaard met een maat voor de spreiding van deze kansverdeling: de standaardafwijking (de wortel uit de variantie). Deze standaardafwijking van een schatter wordt ook wel als standaardfout aangeduid. Als voldaan wordt aan de vooronderstellingen die ten grondslag liggen aan het transfermodel, heeft een schatter een normale kansverdeling waarvan het gemiddelde overeenkomt met de werkelijke waarde van de te schatten parameter. Aan de hand van de schatting en de standaardfout kan dan het interval worden aangegeven waarbinnen de werkelijke waarde van de parameter zal liggen met een bepaalde betrouwbaarheid (meestal wordt hiervoor 95% genomen). Dit noemt men het (95%)betrouwbaarheidsinterval. Als dit interval de waarde 0 bevat, is de modelparameter statistisch niet significant.

Formuleren van een transfer-ruismodel

De Box-Jenkins formulering van de dynamische relatie tussen een invoerreeks en een uitvoerreeks van een systeem is afgeleid van de algemene weergave van een discreet lineair dynamisch systeem met een lineaire differentie vergelijking. Voor een systeem met één invoerreeks geldt bijvoorbeeld de volgende differentievergelijking:

$$(1 + C_1 \Delta + \dots + C_r \Delta^r) Z_t = g(1 + D_1 \Delta + \dots + D_s \Delta^s) X_t \quad 4$$

met Z de afwijking van de uitvoerreeks ten opzichte van zijn gemiddelde, X de afwijking van de invoerreeks ten opzichte van zijn gemiddelde, t de discrete tijdsindex, $C_1 \dots C_r$ en $D_1 \dots D_s$ modelparameters, - de differentieoperator ($-Z_t = Z_t - Z_{t-1}$) en g de evenwichts- of stationaire relatie tussen X en Z . De evenwichtsrelatie (Engels: "steadystate gain") is een belangrijke karakteristiek van een dynamische relatie. Het is in feite de waarde die de uitvoerreeks aan zal nemen als de invoerreeks continu op de waarde +1 wordt gehouden. Of, in het geval van de modellering van het chloridegehalte te Andijk aan de hand van het chloridegehalte te Lobith, het uiteindelijke chloridegehalte te Andijk als het chloridegehalte te Lobith continu 1 mg/l bedraagt.

De oplossing van bovenstaande differentievergelijking kan worden uitgeschreven als:

$$Z_t = \sum_{u=0}^{\infty} v_u \cdot X_{t-u} \quad 5$$

$$= v_0 X_t + v_1 X_{t-1} + v_2 X_{t-2} + \dots$$

$$= (v_0 + v_1 B + v_2 B^2 + \dots) X_t$$

met $v_0, v_1, v_2, \dots$ de impulsrespons gewichten (die samen de discrete impuls-respons functie vormen) en B de backshift-operator ($BX_t = X_{t-1}$, let wel: B is geen modelparameter, maar slechts een operator die dient om de notatie te vereenvoudigen!). Deze impulsrespons functie vertegenwoordigt de dynamica van het systeem en beschrijft de reactie van de uitvoerreeks Z op een eenheidspuls in de invoerreeks X . En als X bestaat uit een opeenvolging van verschillende pulsen, wordt Z beschreven als de som van door X geschaalde impulsrespons gewichten.

In Box-Jenkins notatie wordt een differentievergelijking met één invoerreeks uitgeschreven als:

$$(1 - \delta_1 B - \dots - \delta_r B^r) Z_t = (\omega_0 + \omega_1 B + \dots + \omega_s B^s) X_t \quad 6$$

met $\delta_1, \dots, \delta_r$ de autoregressieve parameters, $\omega_0, \dots, \omega_s$ de movingaverage parameters en B de backshift-operator (hier gebruikt als substituuat voor B , aangezien $B=1-B$). Dit noemt men de transferfunctie van de orde (r,s) . In nóg compactere vorm wordt dit ook wel als volgt uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} X_t \quad 7$$

met $\omega(B)$ de movingaverage operator voor X , volgens:

$$\omega(B) X_t = \omega_0 X_t + \omega_1 X_{t-1} + \dots + \omega_s X_{t-s} \quad 8$$

en $\delta(B)$ de autoregressieve operator, die inwerkt op Z , volgens:

$$\delta(B) Z_t = Z_t - \delta_1 Z_{t-1} - \dots - \delta_r Z_{t-r} \quad 9$$

Het Box-Jenkins transferruismodel is een model om een tijdreeks te beschrijven als een som van transferfuncties van de relevante invoerreeksen, aangevuld met een ruisterm. In deze zin vormt het een discreet lineair dynamisch stochastisch model. In compacte vorm kan het transfer-ruismodel als volgt worden uitgeschreven:

$$Z_t = \frac{\omega_l(B)}{\delta_l(B)} X_{l_t} + \dots + \frac{\omega_m(B)}{\delta_m(B)} X_{m_t} + N_t \quad 10$$

met $X_1, \dots, X_m$ de invoerreeksen en N de ruis.

De tijdreeks van de ruis vertegenwoordigt de invloed van alle invoerreeksen die niet in het model zijn opgenomen. Over het algemeen bevat zo'n reeks nog regelmatigigheden die beschreven kunnen worden met een univariaat model (ook wel Arimamodel genaamd).

Het univariaat model

Een univariaat model beschrijft een variabele als lineaire functie van voorgaande waarden van deze variabele en het modelresidu. De algemene vorm van een univariaat model is:

$$\Phi(B)\Phi(B^s)(\nabla^d \nabla_s^D Z_t - c) = \Theta(B)\Theta(B^s) a_t \quad 11$$

met Z de variabele, a het modelresidu, t de tijdsindex, ∇ de differentie operator ($\nabla Z_t = Z_t - Z_{t-1}$), d het aantal differenties, s de seizoensperiode (met dagelijkse waarnemingen en een weekcyclus is deze bijvoorbeeld 7), ∇_s de seizoensdifferentieoperator ($\nabla_s Z_t = Z_t - Z_{t-s}$), D het aantal seizoensdifferenties, c de transformatieparameter ($c=1$ als Z normaal verdeeld is) en c een constante.

Verder bevat deze formulering de volgende operatoren:

- $\Phi(B)$ de autoregressieve operator, volgens:

$$\Phi(B) Z_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-1} - \dots - \phi_p Z_{t-p} \quad 12$$

met $\phi_1 \dots \phi_p$ de autoregressieve parameters;

- $\Phi(B^s)$ de autoregressieve seizoensoperator, volgens:

$$\Phi(B^s) Z_t = Z_t - \phi_1 Z_{t-s} - \dots - \phi_p Z_{t-ps} \quad 13$$

met $\phi_1 \dots \phi_p$ de autoregressieve seizoenparameters;

- $\Theta(B)$ de movingaverage operator, volgens:

$$\Theta(B) a_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad 14$$

met $\theta_1 \dots \theta_q$ de movingaverage parameters;

- en $\Theta(B^s)$ de movingaverage seizoensoperator, volgens:

$$\Theta(B^s) a_t = a_t - \theta_1 a_{t-s} - \dots - \theta_Q a_{t-Qs} \quad 15$$

met $\theta_1 \dots \theta_Q$ de movingaverage seizoenparameters.

Bijlage 2. Correctie van afvoer Lobith voor chloridegehalte Lobith

Het chloridegehalte en de (logaritme van de) afvoer te Lobith zijn sterk gecorreleerd. Het is dan niet zinvol om beide als invoervariabele te hanteren bij het statistisch modelleren van het chloridegehalte te Andijk, omdat dit tot ongewenste modeleigenschappen zal leiden. Daarom is een nieuwe variabele geconstrueerd, die niet meer gecorreleerd is aan het chloridegehalte te Lobith, namelijk de voor het chloridegehalte te Lobith gecorrigeerde logaritme van de afvoer te Lobith. Deze is dan wél geschikt om – naast het chloridegehalte te Lobith – te fungeren als invoervariabele van het statistische model van het chloridegehalte te Andijk.

Invloed van het Rijn-Zoutverdrag?

Alvorens de nieuwe variabele te construeren, zijn we nagegaan of het chloride in de Rijn te Lobith en het internationale Rijn-Zout verdrag (zie de toelichting in het tekstkader) een relatie vertonen. Want als dat het geval is, kan de relatie tussen het chloridegehalte en de afvoer te Lobith ook gewijzigd zijn en moet de constructie van de nieuwe variabele daar rekening mee houden.

Het internationale Rijn-Zoutverdrag

Om het relatief hoge zoutgehalte van de Rijn - en daarmee ook het IJsselmeer - te verlagen, is op 3 december 1976 het internationale Rijn-Zoutverdrag gesloten tussen Frankrijk, Duitsland, Zwitserland, Luxemburg en Nederland. Als onderdeel daarvan heeft Frankrijk zich verplicht de lozing van zout uit de Elzasser kalimijnen op de Rijn gefaseerd te verminderen, door zout in de bodem op te slaan. De in deze kalimijnen gewonnen mineralen komen in een gemiddelde verhouding van 25% kali, 70% zout en 5% dolomiet aan de oppervlakte. Via een proces van fabrieksmatige zuivering worden de bestanddelen zout en dolomiet geïsoleerd van de kalimestoffen en vervolgens grotendeels als afvalstoffen geloosd op de Rijn.

Door allerlei politieke en juridische manoeuvres van Frankrijk is de eerste fase van de zoutopslag echter pas vanaf 5 januari 1987 uitgevoerd. Daarbij werd de zoutlozing door opslag verminderd met 20 kg/s, wat neerkomt op circa 6% van de toenmalige Rijnzoutlast. Vooral door toedoen van de toenmalige Nederlandse minister van Verkeer en Waterstaat is de uitvoering van de tweede fase, waarin een verdere reductie van de Franse lozing met 40 kg/s was voorzien, echter voor onbepaalde tijd opgeschort.

Op 25 september 1991 ondertekenden de betrokken Rijnsoeverstaten het Aanvullend Protocol van het Rijn-Zoutverdrag, dat ondermeer Frankrijk verplicht zijn zoutlozingen te moduleren, zodra het chloridegehalte van de Rijn te Lobith boven de 200 mg/l uitkomt en dit op basis van voorspelde afvoercijfers vermoedelijk gedurende vier dagen het geval zal blijven (het zogenaamde "piekscheren"). Het protocol is in het voorjaar van 1993 geratificeerd door Frankrijk, dat terzelfdertijd ook nieuwe mogelijkheden tot zoutopslag in gebruik nam. Het trad officieel in werking op 1 november 1994, maar al vanaf eind maart 1993 hield Frankrijk zich aan de daarin vervatte afspraken.

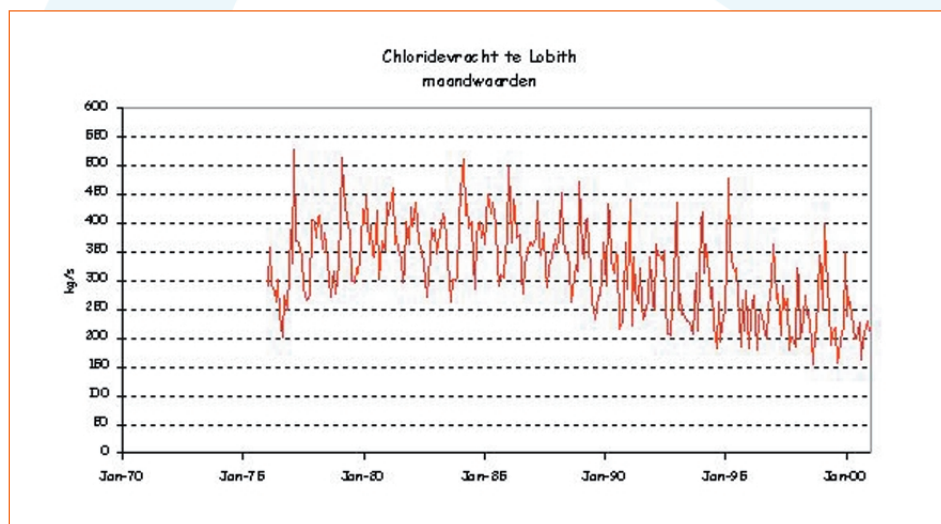
Om na te gaan of het chloride in de Rijn te Lobith en het Rijn-Zoutverdrag een relatie vertonen, hebben wij aan de hand van transfer-ruismodellering twee statistische toetsen uitgevoerd, namelijk:

- 1) toets op relatie tussen de chloridevracht te Lobith en het Rijn-Zoutverdrag;
- 2) toets op relatie tussen het chloridegehalte te Lobith en het Rijn-Zoutverdrag.

ad 1) Toets op relatie tussen de chloridevracht te Lobith en het Rijn-Zoutverdrag

Om statistisch te kunnen toetsen of de chloridevracht te Lobith een relatie vertoont met het Rijn-Zoutverdrag, hebben wij een transfer-ruismodel ontwikkeld van de maandelijkse chloridevracht te Lobith in de periode januari 1976 t/m december 2000. De tijdreeks van de maandelijkse chloridevracht (zie figuur b2.1) is geconstrueerd door de dagwaarden van de afvoer en het chloridegehalte te Lobith met elkaar te vermenigvuldigen en de resulterende dagvrachten vervolgens te middelen op maandbasis.

Figuur b2.1: Tijdreeks van de chloridevracht te Lobith, op maandbasis.



Als invoer-variabelen voor het transfer-ruismodel zijn gehanteerd: (a) het uitvoeren van de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk (deze variabele heeft de waarde 0 tot januari 1987 en daarna de waarde 1) en (b) het uitvoeren van het Aanvullend Protocol van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk, het zogenaamde "piekscheren" (deze variabele heeft de waarde 0 tot april 1993 en daarna de waarde 1). De modelontwikkeling resulteerde in het volgende transfer-ruismodel (zie bijlage 1 voor een toelichting op de notatie):

$$ClvrachtLo \hat{b}_t = -19,0 \cdot RZV87_t - 5,0 \cdot RZV93_t + N_t$$

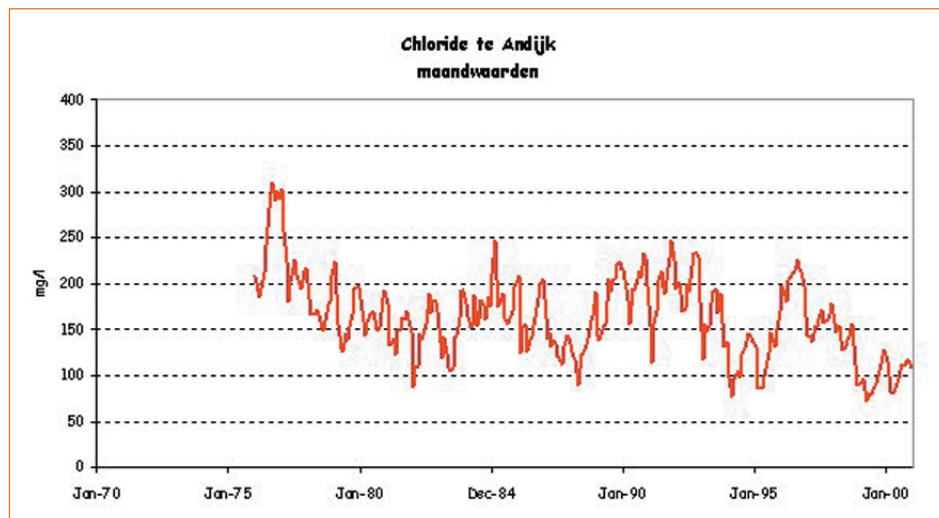
met $ClvrachtLo \hat{b}_t$ de chloridevracht te Lobith (kg/s), $RZV87_t$ het uitvoeren van de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk (met de waarden 0 of 1), $RZV93_t$ het uitvoeren van het Aanvullend Protocol van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk (met de waarden 0 of 1) en N_t de ruis (mg/l), alle in maand t . Het model voor de ruis luidt:

$$(1 - 0,14B) \cdot (\nabla \nabla_{12} N_t) = (1 - 0,89B) \cdot (1 - 1,09B^{12} + 0,03B^{24} + 0,14B^{36}) \cdot a_t$$

met ∇ de differentie-operator, ∇_{12} de seizoensdifferentie-operator, B de terugschuif-operator, B^{12} de seizoensterugschuif-operator en a_t het modelresidu in maand t . De standaardafwijking van het modelresidu bedraagt 44,7 kg/s.

Het modelleren levert schattingen op van de evenwichtsrelaties tussen de betrokken invoervariabelen en de chloridevracht te Lobith (zie tabel b2.1).

Tabel b2.1: Geschatte evenwichtsrelaties tussen de invoervariabelen en de chloridevracht te Lobith.



Een geschatte evenwichtsrelatie is statistisch significant (met 95%-betrouwbaarheid), als zijn 95%-betrouwbaarheidsinterval niet de waarde 0 bevat. Uit tabel b2.1 blijkt dan dat er met het gehanteerde model geen statistisch significante relatie is aangetoond tussen één van de uitvoeringsonderdelen van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk en de chloridevracht te Lobith. Het is overigens wel opvallend dat de grootte van de geschatte evenwichtsrelatie tussen de chloridevracht en de uitvoering van het eerste onderdeel van het verdrag (-19 kg/s) heel goed aansluit op de verwachting daaromtrent (-20 kg/s).

ad 2) Toets op relatie tussen het chloridegehalte te Lobith en het Rijn-Zoutverdrag

Om te kunnen toetsen of het chloridegehalte te Lobith een relatie vertoont met het Rijn-Zoutverdrag, hebben wij een transfer-ruismodel ontwikkeld van het maandelijkse chloridegehalte te Lobith in de periode januari 1976 tot december 2000. Als invoervariabelen zijn gehanteerd: (a) de logaritme van de afvoer te Lobith; (b) het uitvoeren van de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk en (c) het uitvoeren van het Aanvullend Protocol van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk, het zogenaamde "piekscheren". De modelontwikkeling resulteerde in het volgende transfer-ruismodel (zie bijlage 1 voor een toelichting op de notatie):

$$CLob_t = -101,8 \cdot \ln[QLob_t] - 12,9 \cdot RZV87_t - 9,8 \cdot RZV93_t + N_t$$

met $CLob_t$ het chloridegehalte te Lobith (mg/l), $\ln[QLob_t]$ de logaritme van de afvoer te Lobith ($\ln[m^3/s]$), $RZV87_t$ het uitvoeren van de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk (met de waarden 0 of 1), $RZV93_t$ het uitvoeren van het Aanvullend Protocol van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk (met de waarden 0 of 1) en N_t de ruis (mg/l), alle in maand t . Het model voor de ruis luidt:

$$(1 - 0,26B) \cdot (\nabla_{12} N_t) = (1 - 0,87B) \cdot (1 - 0,91B^{12}) \cdot a_t$$

met ∇ de differentie-operator, ∇_{12} de seizoensdifferentie-operator, B de terugschuif-operator, B^{12} de seizoensterugschuif-operator en a_t het modelresidu in maand t . De standaardafwijking van het modelresidu bedraagt 15,3 mg/l.

Het modelleren levert schattingen op van de evenwichtsrelaties tussen de betrokken invoervariabelen en het chloridegehalte te Lobith (zie tabel b2.2).

Tabel b2.2: Geschatte evenwichtsrelaties tussen de invoervariabelen en het chloridegehalte te Lobith.

Invoervariabele	Eenheid	Evenwichtsrelatie mg/l per eenheid	95%-betr. interval mg/l per eenheid
Logaritme van afvoer te Lobith	Ln[m ³ /s]	-101,8	[-107,8 ; -95,8]
Rijn-Zoutverdrag 1987	-	-12,9	[-32,5 ; 6,7]
Rijn-Zoutverdrag 1993	-	-9,8	[-30,2 ; 10,6]

Een geschatte evenwichtsrelatie is statistisch significant (met 95%-betrouwbaarheid), als zijn 95%-betrouwbaarheidsinterval niet de waarde 0 bevat. Uit tabel b2.2 blijkt dan dat er met het gehanteerde model geen statistisch significante relatie is aangetoond tussen één van de uitvoeringsonderdelen van het Rijn-Zoutverdrag door Frankrijk en het chloridegehalte te Lobith. Ook hier is het overigens weer opvallend dat de grootte van de geschatte evenwichtsrelatie tussen het chloridegehalte en het eerste onderdeel van het verdrag (-12,9 mg/l) heel goed aansluit op de verwachting daaromtrent (circa -10 mg/l, uitgaande van -20 kg/s bij een gemiddelde afvoer van 2.000 m³/s).

Over de invloed van het Rijn-Zoutverdrag op het chloride in de Rijn te Lobith

Het feit dat we met de in het voorgaande gehanteerde transfer-ruismodellen geen statistisch significante relatie hebben gedetecteerd tussen het chloride te Lobith (chloridevracht respectievelijk chloridegehalte) en het Rijn-Zout verdrag, hoeft nog geenszins te betekenen dat het verdrag geen invloed heeft gehad op het chloride te Lobith. De invloed kan namelijk ook een ander, meer variabel, patroon hebben gevolgd dan het stapvormige patroon waar bij de transfer-ruismodellering van uitgegaan is. Verder liggen de groottes van de bij de modellering geschatte relaties met de eerste fase van het Rijn-Zoutverdrag wel degelijk in de lijn van de verwachtingen daaromtrent, maar zijn ze alleen niet statistisch significant. En voor wat betreft de tweede fase, het zogenaamde "piekscheren", is het zeer wel mogelijk dat dat nog nauwelijks nodig is geweest - en dus ook nog geen effect kan hebben gehad - door de reeds relatief lage chloridegehalten van de Rijn te Lobith.

Methode van correctie

Als we het verloop van de chloridevrachten in de Rijn te Lobith beschouwen (figuur b2.1), dan valt op dat de chloridevrachten vanaf ongeveer de tweede helft van de jaren tachtig gemiddeld doorgaans lager zijn dan in de periode daarvoor. Een relatie met de uitvoering van het Rijn-Zout verdrag door Frankrijk is weliswaar niet statistisch significant aangetoond, maar zeker niet uit te sluiten (zie boven). En verder zijn er ook andere mechanismen denkbaar die tot verminderde zoutlozingen hebben geleid, zodat wij voor alle zekerheid toch rekening houden met een wijziging in de relatie tussen het chloridegehalte en de afvoer te Lobith. Daarom maken wij bij het corrigeren van de (logaritme van de) afvoer te Lobith voor het chloridegehalte onderscheid tussen twee perioden, namelijk: (a) de periode januari 1976 t/m december 1986 en (b) de periode januari 1987 t/m december 2000. De nieuwe variabele ontstaat dan als het model-residu van het lineaire regressiemodel dat de logaritme van de afvoer te Lobith beschrijft als lineaire functie van het chloridegehalte te Lobith. Voor de periode januari 1976 t/m december 1986 is het regressiemodel:

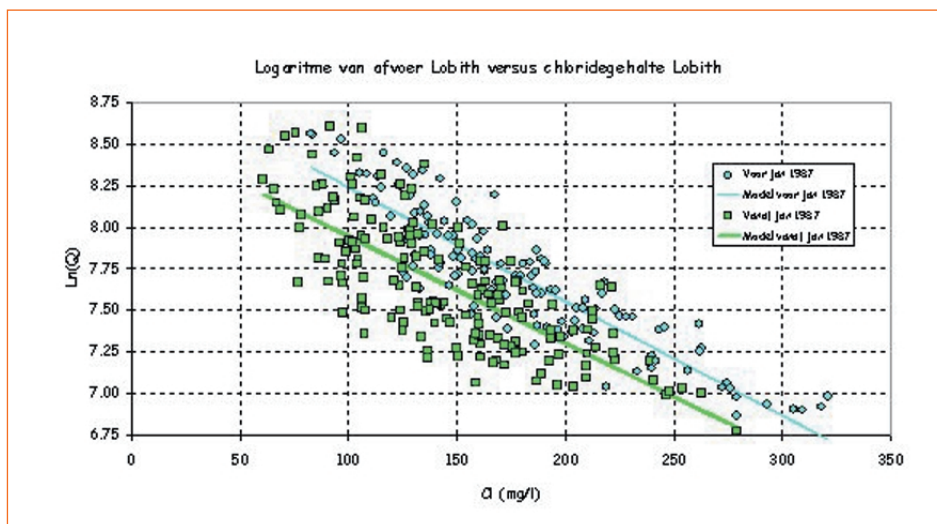
$$\text{Ln}[Q_t] = 8,92834 - 0,00688 \cdot \text{Cl}_t + r_t$$

en voor de periode januari 1987 t/m december 2000 is het regressiemodel:

$$\text{Ln}[Q_t] = 8,58945 - 0,00645 \cdot \text{Cl}_t + r_t$$

met $\text{Ln}[Q_t]$ de logaritme van de afvoer te Lobith (afvoer in m^3/s), Cl_t het chloridegehalte te Lobith (mg/l) en r_t het modelresidu, alle in maand t (voor het eerste model geldt: t = januari 1976 t/m december 1986 en voor het tweede model geldt: t = januari 1987 t/m december 2000). Beide regressiemodellen zijn weergegeven in figuur b2.2.

Figuur b2.2: Spreidingsdiagram van het chloridegehalte en de logaritme van de afvoer te Lobith voor twee verschillende perioden, met voor elke periode tevens de lineaire regressielijn.



Colofon

Auteurs:

Drs. Paul K. Baggelaar



Icastat Statistisch Adviesbureau
Niagara 18
1186 JP AMSTELVEEN
T: +31 (0)20 – 641 52 11
e-mail: paulbagg@planet.nl

Aart Smits



RIWA
Groenendaal 6
3439 LV Nieuwegein
Postbus 402
3430 AK Nieuwegein
T: +31 (0)30 – 600 90 30
F: +31 (0)30 – 600 90 39
e-mail: riwa@riwa.org
web: www.riwa.org

Opdrachtgever: Vereniging van Rivierwaterbedrijven (RIWA)

Concept en opmaak: Meyson Communicatie, Amsterdam

Druk: ATP Digitale Media, Zwanenburg

ISBN: 90-6683-104-9

augustus 2003

The image features a stylized logo for RIWA in the top left corner. The logo consists of the letters 'RIWA' in a bold, sans-serif font, with the 'I' and 'W' in blue and the 'R' and 'A' in grey. The background is composed of several abstract, flowing shapes in shades of orange and white, creating a sense of movement and depth. A large, solid orange shape occupies the right side of the image, while a series of horizontal blue stripes of varying shades are positioned in the center. The overall design is modern and clean.

RIWA

Groenendaal 6
NL 3739 LV
Nieuwegein
Postbus 402
3430 AK Nieuwegein
T (030) 600 90 30
F (030) 600 90 39