

Kunstmatige neurale netwerken in integraal waterbeheer: fictie of de toekomst?

F.H. SCHULZE, WITTEVEEN+BOS
A.P. SALVERDA, WITTEVEEN+BOS

Een kunstmatig neuraal netwerk is een wiskundige techniek waarmee relaties worden bepaald tussen oorzaak (invoergegevens) en gevolg (uitvoergegevens) zonder het systeem zelf in beschouwing te nemen. De toepassingen in het integraal waterbeheer zijn hiermee uitgebreid: van operationeel waterbeheer en on-line sturing tot voorspellen van het drinkwaterverbruik. In dit artikel wordt de achterliggende theorie op een toegankelijke wijze toegelicht. Daarnaast worden aan de hand van een sterkte-/zwakte-analyse en een aantal toepassingen de mogelijkheden van kunstmatige neurale netwerken (KNN) in het integraal waterbeheer geschetst. Gezien de brede toepassingsmogelijkheden en de kracht van de techniek, is de verwachting dat KNN op termijn in vrijwel alle disciplines in het integraal waterbeheer een volledig geaccepteerde techniek wordt.

De techniek van kunstmatige neurale netwerken staat sterk in de belangstelling. In 1997 werd in dit tijdschrift toegelicht hoe het drinkwaterverbruik zeer goed kan worden voorspeld met behulp van KNN (Aafjes *et al.*). Ook bij andere toepassingen in de praktijk blijkt de techniek een krachtig instrument.

Veelal wordt aangegeven dat de mogelijkheden van KNN schier onbeperkt zijn. In Intermediair verscheen in hetzelfde jaar een artikel met de sprekende titel "Neuraal netwerk gaat de beursvloer op" (Zuidema). Gezien de complexe theoretische achtergrond is de techniek op het eerste gezicht moeilijk te doorgronden zonder uitgebreide wiskundige en statistische kennis.

De vraag rijst natuurlijk wat de toepassing van KNN kan betekenen in het integraal waterbeheer. Dit artikel beoogt allereerst het toegankelijk maken van de methodiek. Vervolgens wordt aan de hand van een sterkte/zwakte-analyse en een drietal voorbeelden aangegeven wat de mogelijkheden zijn van KNN in het integraal waterbeheer.

Theorie

Het concept van KNN is in eerste instantie ontwikkeld om het menselijk zenuwstelsel te modelleren. Het menselijk zenuwstelsel is opgebouwd uit een hecht netwerk van met elkaar verbonden neuronen. KNN worden ook opgebouwd uit kunstmatige neuronen, de rekenelementen. De vorm van het netwerk wordt bepaald door de manier waarop de neuronen gegroepeerd zijn (zie afbeeldingen 2, 4 en 6). KNN zijn na verloop van tijd ook in andere disciplines geïntroduceerd. De analogie met het menselijk zenuwstelsel geeft het werken met KNN een uitdaging. Een mens kan taken uitvoeren zoals herkenning, combinatie, generalisatie, enzovoort. Dit zijn functies die niet eenvoudig in een (computer) algoritme zijn vast te leggen. Een computer kan zeer nauwkeurig lange series berekeningen volgens een expliciet algoritme uitvoeren. Dit is een taak waarbij de mens snel fouten gaat maken. Een neuraal netwerk combineert het associatievermogen van de mens met het analytische karakter van een computer.

Een neuron heeft vaak meerdere invoerparameters. Een KNN combineert de waarden van alle invoerparameters. De zogenaamde *transferfuncties* wijzigen de gecombineerde invoer. Deze functies zijn vaak eenvoudige mathematische functies, zoals sinus, sigmoïde, tangens hyperbolicus of lineaire functies. De uitvoer van de transferfunctie is in feite de uitvoer van het neuron, welke vaak weer als invoer dient voor een volgend neuron. Meestal zijn neuronen georganiseerd in verborgen lagen. Hieraan zijn twee buffers verbonden met de buitenwereld: een invoerbuffer met alle invoerparameters en een uitvoerbuffer met alle uitvoerparameters.

Met name het zelflerende karakter van KNN maakt de techniek zeer krachtig. Op basis van de gegenereerde verschillen tussen modeluitkomsten en realisaties, fouten ofwel *residuen*, worden parameters in het model automatisch bijgesteld, zodat de uiteindelijke fout wordt geminimaliseerd. Zo ontstaat een leerproces waarbij een neuraal netwerk bij een bepaalde invoer de bijbehorende uitvoer kan reproduceren.

Professionele programmatuur op het gebied van KNN zoals NEURALWORKS (NeuralWare, Inc., 1996) is nog maar mondjesmaat beschikbaar. Via verenigingen zoals de Vereniging voor Artificiële Neurale Netwerken (VANN) worden de laatste ontwikkelingen op het gebied van KNN en hun toepasbaarheid in de praktijk besproken en bediscussieerd.

Het product

Een KNN is uiteindelijk een wiskundig model. Dit model dient net als gangbare modellen te worden gedefinieerd, gekalibreerd en gevalideerd (zie afbeelding 1). Het KNN bestaat uit een set wiskundige vergelijkingen en bijbehorende geoptimaliseerde gewichtenmatrices.

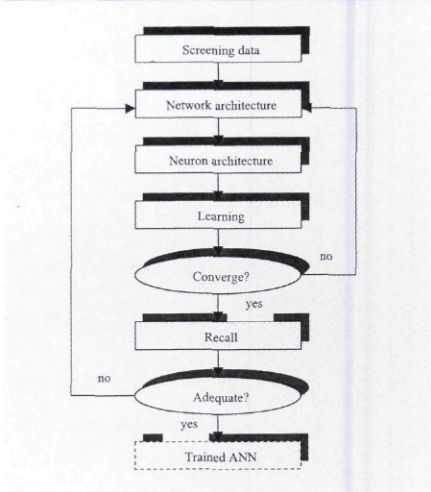
Een KNN kan eenvoudig worden omgezet in een programmacode waardoor het als onafhankelijk systeem kan functioneren of geïmplementeerd kan worden in bestaande systemen. Er bestaat ook de mogelijkheid KNN online bij te sturen.

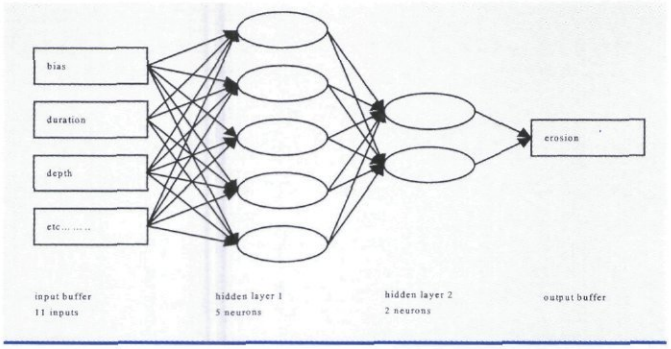
Toepassingsmogelijkheden

In het onderstaande wordt een globaal overzicht gegeven van de verschillende toepassingsmogelijkheden van KNN in het integraal waterbeheer.

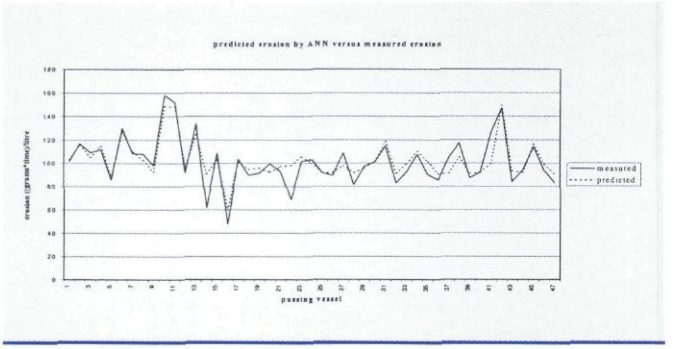
- *Operationeel waterbeheer en on-line sturing*
  In het operationele waterbeheer moeten op

Afb. 1 Ontwerpproces van een KNN.





Afb. 2 Globale KNN-structuur voor het voorspellen van erosie in kribvakken.



Afb. 3 Voorspelde en gemeten erosie in kribvakken.

basis van veel informatie geoptimaliseerde beslissingen worden genomen. KNN zijn zeer geschikt om snel relaties vast te leggen tussen sturingsparameters en de effecten hiervan. Met deze relaties is het mogelijk op basis van metingen direct (bij) te sturen. Dit bespaart veelal tijd en geld en zorgt voor een snellere (re)actie op veranderende omstandigheden. Toepassingsmogelijkheden zijn boezembeheer, sturing van gemalen of stuwen (grondwatergestuurd peilbeheer), scheepvaartregulatie, online sturing van drinkwater/zuiveringsinstallaties en procesoptimalisaties van bijvoorbeeld het coagulatieproces of slibontwatering.

– *Optimalisatie en rationalisatie van meetnetten*

Het uitvoeren van metingen is vaak een kostbare zaak. De optimale meetdichtheid en -frequentie zijn sterk afhankelijk van de ruimtelijke en temporele variabiliteit. Met KNN is het mogelijk ruimtelijke en temporele variaties te parameteriseren, zodat het mogelijk is het meetnet te optimaliseren.

– *Prognosemodellen*

Bij voorspelling van het weer, energie- en drinkwaterverbruik en water- en sedimentbeweging spelen veel factoren een rol. Vaak is het niet duidelijk welke factoren dit zijn, of is slechts een deel hiervan bekend. KNN zijn bij uitstek geschikt om op basis van informatie uit het verleden alle mogelijk relaties te traceren en vast te leggen.

– *Simulatiemodellen*

In het integraal waterbeheer wordt veelvuldig gebruik gemaakt van deterministische modellen (sedimentatie-, morfologische-, ecologische-, grondwater-, stromings- of stofverspreidingsmodellen). Voorwaarde voor een deterministische beschrijving is dat de aard van het proces bekend is. Bij KNN is dit niet noodzakelijk omdat deze het proces zelf buiten beschouwing laat. Daarbij blijken de voorspellingen in de praktijk vaak beter dan de gangbare deterministische modellen. Tevens kan een neuraal netwerk worden toegepast als foutencorrector van een deterministisch model. Het neuraal netwerk modelleert, voorspelt en corrigeert in feite de fout die door het deterministische model wordt gegenereerd. Dit resulteert enerzijds in een aanzienlijke verhoging van de nauwkeurigheid van voorspellingen. Anderzijds verschaft het inzicht in de factoren die van invloed zijn op het proces.

– *Ecologische modellen*

Ecologische processen zijn veelal zeer complex van aard en derhalve vaak moeilijk te modelleren. KNN zouden een oplossing kunnen bieden om dergelijke complexe processen adequaat te modelleren en daarmee inzicht te verschaffen in de factoren die belangrijke invloed uitoefenen op bepaalde processen. Dit kan veelal tijd en geld besparen die anders nodig zouden zijn geweest om deze factoren op deterministische wijze te bepalen.

– *Specifieke toepassingen*

Betrekkingslijnen, bijvoorbeeld afvoer-waterstand-relaties, staan vaak onder invloed van complexe processen. In de praktijk is het vaak niet of nauwelijks mogelijk een goede relatie te formuleren. Met behulp van KNN is men in staat het meerdimensionale karakter van dit soort relaties relatief snel, eenvoudig, adequaat en goedkoop te modelleren.

Toepassingen in de praktijk

Onderzoek relatie tussen scheepvaart en erosie in kribvakken

De Waal voert circa 65 procent van de afvoer uit het stroomgebied van de Rijn. Daarnaast is de Waal de transportader tussen het achterland en de haven van Rotterdam. Om de oevers te beschermen tegen erosie, zijn in de Waal kribvakken aangelegd. Stroming en sedimentatie in kribvakken zijn sterk afhankelijk van scheepsinvloeden. Gezien de enorme toename van de scheepvaart en de grootte van de schepen, is deze invloed toegenomen. Om dit effect te bepalen zijn waterstandsmetingen, stroomsnelheidsmetingen en troebelheidsmetingen uitgevoerd. Tegelijkertijd zijn karakteristieken van passerende schepen genoteerd, zoals lengte, breedte, diepte, snelheid, tonnage, afstand vanaf de kribkop, stroom op- of afwaarts, enzovoort. Daarnaast zijn hydraulische karakteristieken van de rivier meegenomen zoals natte rivierdoorsnede, afvoersnelheid, enzovoort.

In de literatuur worden potentiële factoren genoemd voor de relatie tussen scheepvaart en sedimentatie, de exacte relaties zijn echter niet bekend. Daarom is in opdracht van het RIZA voor deze studie de techniek van KNN toegepast. Allereerst is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd om de significante factoren vast te stellen. Uiteindelijk is een KNN ontwikkeld bestaande uit 11 invoerparameters en 1 uitvoerparameter (zie afbeelding 2). Vervolgens is het KNN gebruikt om de erosie in de kribvakken te voorspellen (zie afbeelding 3).

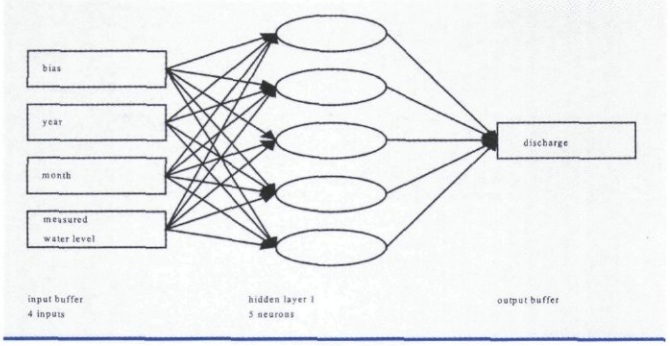
Met het opgestelde KNN blijkt het redelijk tot goed mogelijk de water- en sedimentbeweging in de kribvakken te relateren aan scheepskarakteristieken van passerende schepen.

Analyse van tijdsafhankelijke afvoer-waterstand-relaties

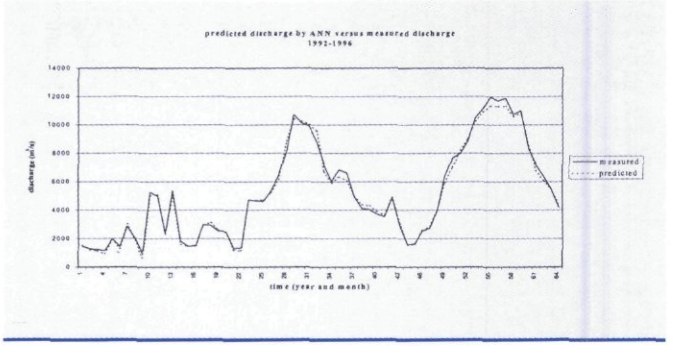
Afvoer-waterstand-relaties staan vaak onder invloed van complexe processen. Deze complexe processen verstoren veelal de eenduidigheid van deze relatie in de tijd en introduceren extra dimensies waarmee rekening gehouden moet worden bij het construeren van deze relatie. Bij afvoer-waterstand-relaties op de Bovenrijn bijvoorbeeld spelen processen zoals autonome bodemdaling, hysterese lussen, baggeren, ijsvorming, stuwbeheer, verandering rivierprofiel een belangrijke rol. Met gangbare technieken was het niet of nauwelijks mogelijk een relatie te leggen tussen afvoer, waterstand en de tijd waardoor het moeilijk was veranderingen in deze relatie te kwantificeren en te modelleren.

Voor Rijkswaterstaat is met behulp van KNN een analyse uitgevoerd van tijdsafhankelijke afvoer-waterstand-relaties en waterstandsanalyse in relatie tot autonome bodemdaling voor de Bovenrijn te Lobith over de periode 1956-1995. Allereerst is een KNN ontwikkeld bestaande uit 4 invoerparameters en 1 uitvoerparameter (zie afbeelding 4). Vervolgens is het KNN gebruikt om de afvoer te voorspellen (zie afbeelding 5).

Met behulp van KNN blijkt het mogelijk het meerdimensionale karakter van deze relatie relatief eenvoudig en in korte tijd voldoende adequaat te modelleren zonder het hele systeem in beschouwing te nemen.



Afb. 4 Globale KNN-structuur voor het voorspellen van de afvoer.



Afb. 5 Voorspelde en gemeten afvoeren.

Prognose drinkwaterverbruik

Het voorspellen van het drinkwaterverbruik van de volgende dag, bij voorkeur opgesplitst naar uurverbruik, kan leiden tot een kostenbesparing, vroegtijdige lekdetectie, betere en gelijkmatigere waterkwaliteit, en een optimalisatie van de beschikbare infrastructuur. Het drinkwaterverbruik van de volgende dag of het volgende uur heeft veelal een relatie met het verbruik in voorgaande weken, dagen, uren, soort dag in de week, wel of geen feestdag, wel of geen vakantie en bepaalde klimaatfactoren.

Allereerst is een KNN ontwikkeld bestaande uit 24 invoerparameters en 1 uitvoerparameter (zie afbeelding 6). Vervolgens is het KNN gebruikt om het drinkwaterverbruik te voorspellen (zie afbeelding 7).

Middels een haalbaarheidsstudie is aangetoond dat het goed mogelijk is het toekomstig drinkwaterverbruik te voorspellen met behulp van KNN (zie afbeelding 6).

Sterkte/zwakte-analyse

Een neuraal netwerk is een krachtige, relatief snelle en breed inzetbare modelleringstechniek. Voor het gebruik van KNN moet echter wel aan een aantal voorwaarden worden voldaan: voldoende representatieve metingen van invoer en uitvoer ofwel leervoorbeelden om het netwerk te definiëren, hardware en software met voldoende geheugen- en rekencapaciteit, nauwe samenwerking met deskundigen uit de betreffende disciplines en een uitgebreide kennis van het opstellen van dergelijke netwerken en kennis van de statistiek om modellen te kunnen valideren.

Toepassing van KNN heeft verschillende voordelen. Vrijwel elke relatie tussen oorzaak en gevolg kan worden gemodelleerd. Vooraf hoeven nauwelijks veronderstellingen c.q. aannamen te worden gedaan ten aanzien van de te hanteren (niet-)lineaire relatie tussen invoer en uitvoer. Eenmaal gedefinieerd levert een KNN relatief snel en eenvoudig betrouwbare resultaten. En tenslotte is een gekalibreerd neuraal netwerk snel en eenvoudig om te zetten in een programmacode en derhalve een werkend model dat door iedere gebruiker bediend kan worden.

Maar er zijn ook nadelen. Het probleem of proces wordt niet bestudeerd maar beschouwd als een black box. Gezien het onbeperkte aantal vrijheidsgraden bestaat er een risico voor overparameterisatie. Men moet bekend zijn met technieken die overparameterisaties kunnen lokaliseren, visualiseren en kwantificeren. Het is bovendien niet mogelijk scenario's met andere randvoorwaarden te berekenen, omdat het netwerk deze situatie niet heeft geleerd.

KNN in het integraal waterbeheer

Momenteel worden de toepassingsmogelijkheden van KNN binnen diverse disciplines uitgeprobeerd. Toepassing van KNN lijkt vooral zinvol als kennis van processen/situaties ontbreekt of beperkt is. Daarbij blijken de voorspellingen in de praktijk vaak beter dan de gangbare deterministische modellen. KNN kunnen direct worden ingezet en leveren relatief snel betrouwbare resultaten op. Het gaat hierbij vooral om terreinen waar de processen zeer complex zijn. Met KNN is het mogelijk meer grip te krijgen op de aard van traditioneel moeilijk te doorgronden processen.

Voor het ontwikkelen van KNN is een achtergrond noodzakelijk op het gebied van wiskunde / statistiek en informatica. De kennis is vergelijkbaar met de benodigde kennis voor het zinvol toepassen van statistische pakketten als SAS of SPSS. Het uiteindelijk resultaat is echter een model dat eenvoudig kan worden bediend zonder uitgebreide achterliggende kennis. Gedefinieerde KNN kunnen relatief eenvoudig worden geïmplementeerd in of samenwerken met bestaande systemen. Gezien de brede toepassingsmogelijkheden en de kracht van de techniek, is de verwachting dat KNN op termijn in vrijwel alle disciplines in het integraal waterbeheer een volledig geaccepteerde techniek wordt. ¶

LITERATUUR

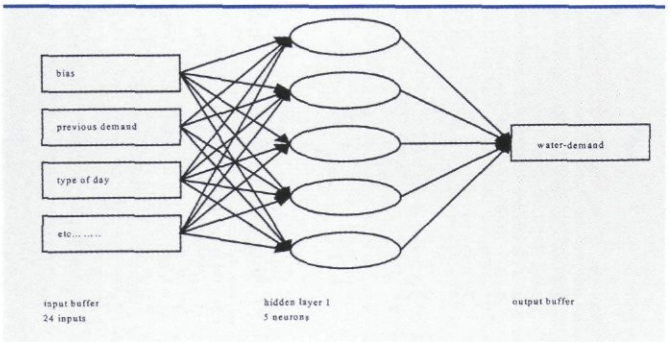
Aafjes et al., 1997. Voorspellen van het drinkwaterverbruik met een neuraal netwerk. Aafjes, J. Hendriks, L., Verberne, A., Vingerhoeds, R. H_2O (30), 1997 nr. 15, p 484-487.

NeuralWare, Inc., 1996. Neural Computing, Handleiding NeuralWorks Professional II/PLUS 1996.

Schulze F., Ten Brinke W. en Kruyt N. (1998). An artificial neural network to relate erosion of groyne field sediments of the characteristics of passing vessels. Abstract voor Hydroinformatics 98.

Zuidema, 1997. Neuraal netwerk gaat de beursvloer op. Intermediair, 12 juni 1997. 33e jaargang, nummer 24.

Afb. 6 Globale KNN-structuur voor het voorspellen van het drinkwaterverbruik.



Afb. 7 Voorspelde en gemeten drinkwaterverbruik.

