

# BAYESIAN BELIEF NETWORKS: NIEUW VEELBELOVEND GEREEDSCHAP VOOR WATERSYSTEEMANALYSES

## AUTEURS



Lisette N.  
de Senerpont Domis  
(NIOO-KNAW)



Lilith Kramer  
(Deltares)



Bob Brederveld  
(Witteveen+Bos)

**STOWA heeft een diagnostisch instrumentarium ontwikkeld dat inzicht geeft in de relaties tussen systeemkenmerken en de ecologische toestand van wateren: de Ecologische Sleutelfactoren (ESFs). Kenmerk is dat iedere ESF een deel van het systeem functioneren van oppervlaktewater blootlegt. Een instrumentarium waarmee de samenhang tussen verschillende ESFs kan worden gekwantificeerd, ontbreekt. Kunnen Bayesian Belief Network-modellen hierin voorzien?**

Veel wateren in Nederland voldoen niet aan de doelstellingen van de Kaderrichtlijn Water (KRW). Voor het verbeteren van de ecologische kwaliteit van deze wateren is het belangrijk om via een watersysteemanalyse inzicht te krijgen in de oorzaken van de ontoereikende kwaliteit.

In de ESF-methodiek van de STOWA wordt gebruik gemaakt van negen sleutelfactoren die zo onafhankelijk mogelijk van elkaar elk een deel van het ecologisch functioneren van een watersysteem belichten. In de praktijk zijn er echter interacties tussen deze sleutelfactoren, die we ook graag inzichtelijk willen maken voor een volledig systeembegrip. Een instrumentarium waarmee naast de relatie tussen de ESFs en de ecologische toestand van wateren ook de samenhang tussen verschillende ESFs kan worden gekwantificeerd, ontbrak tot op heden.

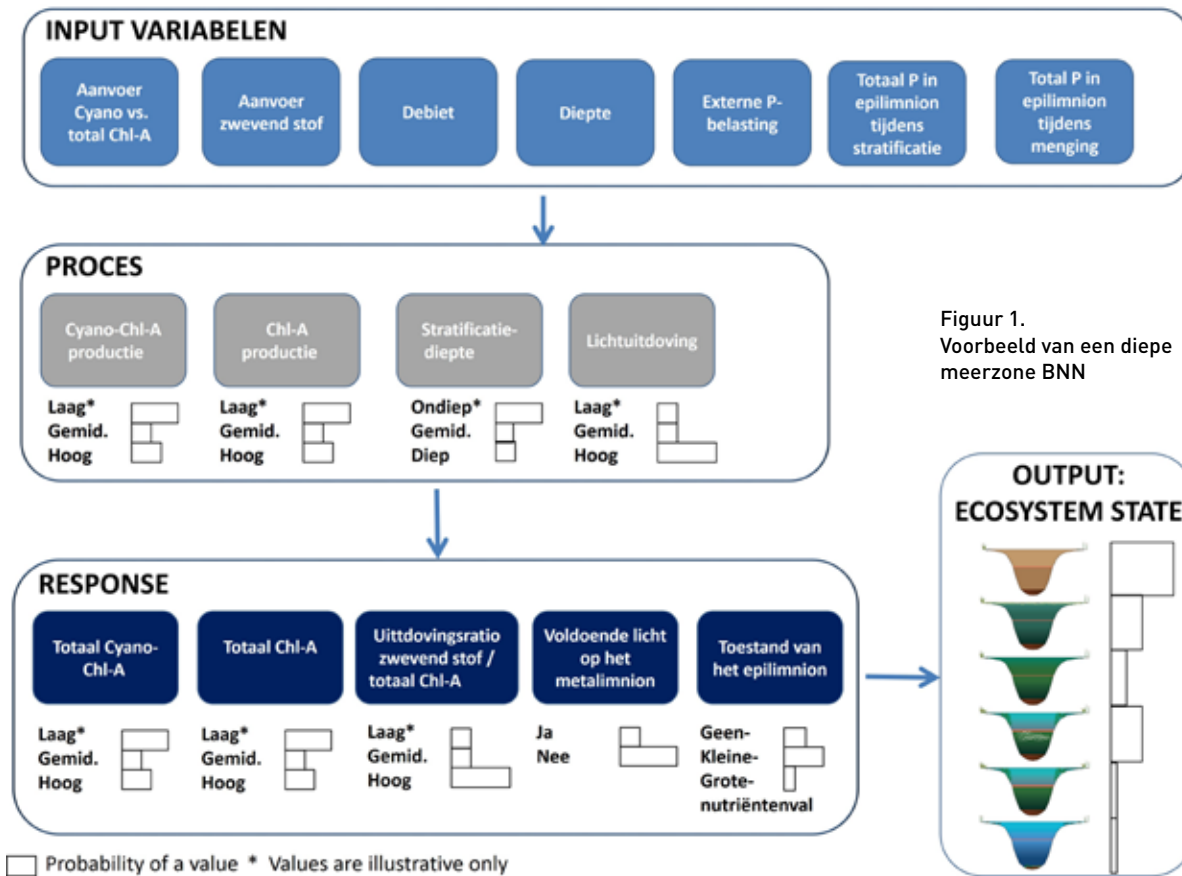
In opdracht van het STOWA wordt in het project "Linking ESFs" door een consortium van Deltares, NIOO en Witteveen+Bos een dergelijk diagnostisch instrumentarium ontwikkeld. Er wordt gebruik gemaakt van een specifieke statistische techniek, namelijk Bayesian Belief Networks (BBNs), die de laatste jaren steeds meer wordt toegepast voor natuurbescherming en waterbeheer. Een BBN kenmerkt zich door een causaal netwerk, waarin alle relaties tussen verschillende factoren worden vastgelegd op grond van expertkennis, modellen en/of metingen. Op basis van een vastgesteld netwerk rekent het instrumentarium door wat de kans op een bepaalde uitkomst is bij specifieke gebiedscondities (zowel van de uiteindelijke ecologische toestand als van alle tussenliggende factoren).

Voor het vaststellen en kwantificeren van de causale relaties in de BBNs is gebruik gemaakt van veel toegepaste kennisregels die verankerd zijn in bestaande modellen zoals Uitzicht, Baggernut, PCDitch, PCLake en het Nürnberg P-model voor diepe meren. Aangezien het huidige instrumentarium niet toereikend bleek voor het completeren van de BBNs, is in het project ook onontsloten gepubliceerde internationale kennis toegankelijk gemaakt. In dit artikel beschrijven we kort wat een BBN is, hoe het toegepast kan worden - geïllustreerd door een diepe plassen casus - en wat de toekomstige ontwikkelingen zullen zijn.

### Wat is een BBN?

Een BBN bestaat uit een schema van causale relaties tussen systeemkenmerken en ecosystemestoestand (knopen), die door middel van pijlen (processen) met elkaar zijn verbonden. De causale relatie tussen een ouderknoop (oorzaak) en een kindknoop (gevolg) wordt

**Deel van een Diepe plassen BBN**



Figuur 1. Voorbeeld van een diepe meerzone BBN

gekwantificeerd aan de hand van een gediscrète kansverdeling, waarbij de kans op een bepaalde uitkomst bij de kindknoop wordt bepaald door de kansverdeling bij de ouderknoop en het type relatie dat ertussen beide is. De BBNs zijn als het ware een doorgeefluik van kansverdelingen, waardoor niet alleen de links tussen ESFs expliciet worden meegenomen, maar ook (a) de (on)zekerheden rondom de (tussen)uitkomsten expliciet inzichtelijk worden gemaakt en (b) het belang van bepaalde causale paden gekwantificeerd. In onze BBNs wordt aan de hand van een set van systeemkenmerken, zoals diepte, debiet en nutriëntenbelasting, bepaald welk belang alle processen spelen in het tot stand komen van de ecologische toestand in een stilstand water, waarbij onderscheid gemaakt is tussen de ondiepe meerzone, de diepe meerzone en de slootzone. In bovenstaande figuur staat een vereenvoudigd voorbeeld van de diepe meerzone BBN.

**Voor- en nadelen van BBNs**

Eén van de grote voordelen van een BBN is de eendui-

dige en transparante manier waarop niet alleen het eindresultaat, maar ook alle tussenliggende stappen inzichtelijk worden gemaakt. Hiernaast brengt een BBN de effecten van onzekerheden in beeld. Al deze eigenschappen tezamen leveren een beter begrip van het ecologisch functioneren van het watersysteem. Een mogelijk nadeel is dat feedbackloops niet gemodelleerd kunnen worden in een BBN. Een voorbeeld van een dergelijke feedback is het effect van de helderheid van het water op waterplanten en vice versa. Enerzijds stuurt de helderheid de waterplantengroei, anderzijds kunnen waterplanten zelf ook de helderheid vergroten. In onze aanpak van de BBNs hebben we dit nadeel ondervangen door gebruik te maken van metamodellen. Een meta-model is niets anders dan een grote tabel met invoerwaarden en overeenkomstige uitvoerwaarden voor een gegeven mechanistisch model. Doordat we metamodellen hebben gemaakt van mechanistische modellen (waarin dergelijke feedbackloops zijn verankerd) hebben we dit nadeel zoveel mogelijk ondervangen. Deze werkwijze is toegepast door andere gebruik te maken

van de ecosysteemmodellen PCLake en PCDitch. Voorts kunnen met BBNs alleen evenwichtssituaties worden berekend. Voor processen die sterk variëren in de tijd of ruimte moet worden teruggerepen op andere modellen, of moet een BBN doorgerekend worden voor verschillende scenario's, bijvoorbeeld winter- versus zomerscenario's.

### Toepassing in het waterbeheer

Een goed diagnostisch instrument dat de waterschappers ondersteunt bij hun watersysteemanalyses moet aan een aantal criteria voldoen. In de eerste plaats dient het instrument extra inzicht te leveren in het functioneren van het ecosysteem. Hiervoor moeten de relaties tussen verschillende processen die de ecologische toestand bepalen, inzichtelijk zijn. Voorts moet het instrument betrouwbare uitkomsten leveren, en inzicht geven in de effecten van (on)zekerheden in kwaliteit van invoergegevens en betrouwbaarheid van de kennisregels. Voor de gebruikersvriendelijkheid is het van belang dat de tussenstappen en het eindresultaat op een intuïtieve manier worden gepresenteerd.

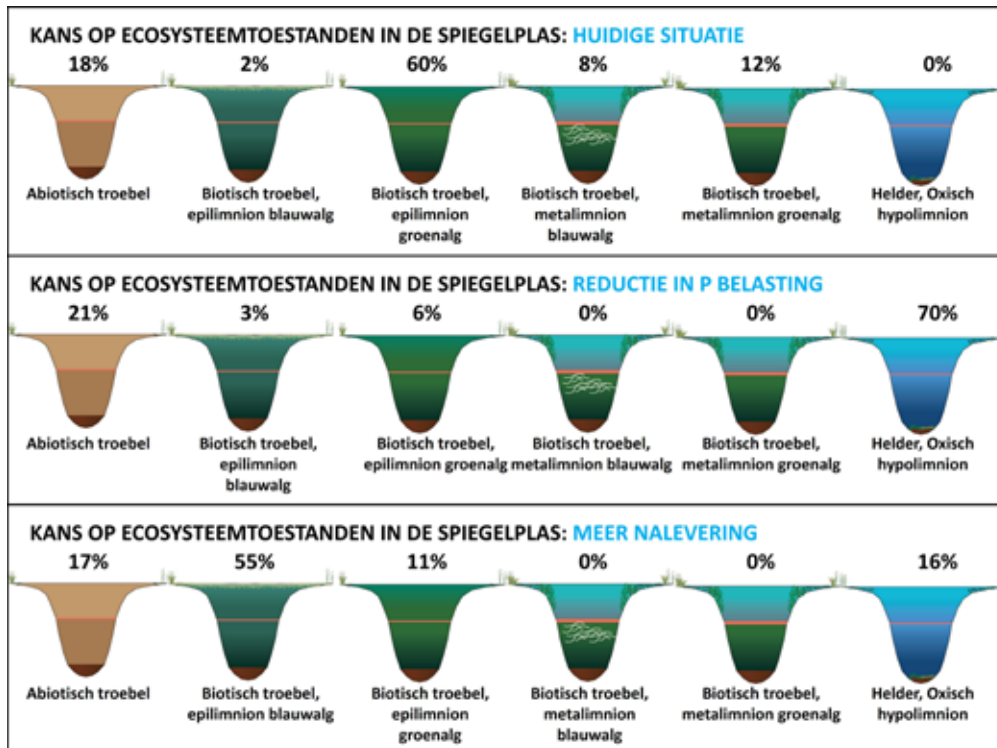
Betrouwbaarheid van de BBN is getoetst aan de hand van getrapte validatie procedure, die wij hier beschrijven aan de hand van de BBN voor diepe meerzones. Om de causale relaties te toetsen aan de verwachtingen zijn extreme invoerwaardes verkend; deze resultaten waren goed. Ter illustratie: wanneer we een situatie doorrekenen met een lage externe P-belasting ( $<0.001$  mg P/m<sup>2</sup>/dag) en een hoge visbiomassa ( $>381$ – $488$  kg/ha) gaf de BBN een relatief grote kans op zowel de troebele toestand met weinig algen (42%) als een heldere, oxische toestand (29%). Dit is wat je zou verwachten op grond van de rol die bodemwoelende vis kan hebben van opwerveling van sedimentmateriaal en de daarmee gepaard gaande verhoging van troebelheid. Tevens is het ook logisch dat de kans op een heldere, oxische toestand relatief groot is, gegeven de extreem lage externe belasting. Voor het verkennen van de diepe meerzone BBN aan de hand van realistische waardes stelde Water-net gegevens beschikbaar over de Spiegelplas. De Spiegelplas is een diepe zandwinplas (gemiddelde

diepte = 16.9 meter), die zich kenmerkt door de grote aanwezigheid van Quagga mosselen. De invoerwaardes van de Spiegelplas (Figuur 2, bovenste panel) geven volgens de tool een relatief grote kans op een biotisch troebele plas, waarbij de bovenste laag van de waterkolom gedomineerd wordt door de aanwezigheid van groenalgen. Door de aanwezigheid van de met een grote filtercapaciteit behepte Quagga mossel, is de huidige toestand echter in realiteit veel helderder.

Conform verwachting geeft het drastisch reduceren van de externe P-belasting een grote kans op een helder plas met een oxische onderste waterlaag (70%, Figuur 2, middelste panel). Wanneer we een scenario testen waarbij de nalevering toeneemt ten opzichte van de huidige situaties, neemt de kans op een biotisch troebele plas, gedomineerd door blauwalgen toe (55%, Figuur 2, onderste panel). Door de verkenning van de BBN aan de hand van de realistische waardes van de Spiegelplas casestudy komen ook wat meer subtiele resultaten naar voren. Deze hebben te maken met de klassen van de kansverdelingstabellen, de minimum en maximumwaardes zijn soms onlogisch. De klassegrenzen zijn in eerste instantie via een computeralgoritme gemaakt, in een eventueel vervolgtraject moeten de klassegrenzen met een uitgebreidere studie vastgesteld worden.

### Ontwikkelingen voor de toekomst

Het instrument in zijn huidige vorm levert extra inzicht in functioneren van het systeem, laat de interacties tussen zowel systeemkenmerken als ecosysteemtoestanden inzichtelijk en transparant zien, en brengt (on)zekerheden in kennis en uitkomsten duidelijk in beeld. In een aanvullend traject zullen extra validatiestappen in casestudies de betrouwbaarheid van de (tussen)resultaten verhogen en wordt de gebruikersvriendelijke interface uitgebouwd. De uitwerking van de tool in zijn huidige vorm was gericht op de implementatie van kennisregels van processen die ten grondslag liggen aan ESF1-4. Aanbevolen wordt om eveneens kennisregels van de andere ecologische sleutelfactoren in de BBNs op te nemen.



Figuur 2. Invloed op ecosysteem van de Spiegelplas

### Conclusie

Deltares, NIOO en Witteveen+ Bos hebben laten zien dat de toepassing van dit type BBNs voor het waterbeheer veelbelovend is. Het belang van verschillende processen bij het tot stand komen van ecologische toestanden wordt in het instrument expliciet gemaakt. Tegelijkertijd zijn alle tussenresultaten compleet inzichtelijk voor de waterbeheerder, waardoor er geen sprake is van een black-box model. Deze tussenresultaten sluiten goed aan op de praktische informatie die waterbeheerders in het veld verzamelen, zoals verwachte chlorofyl-A-concentraties, plantbedekkingen etc. Daarnaast wordt ook duidelijk met welke onzekerheden dergelijke diagnoses gepaard gaan. Dit instrument zal waterbeheerders ondersteunen bij het creëren van systeembegrip, en daarmee bij het vaststellen van realistische doelen en efficiënte maatregelpakketten.

Lisette N. de Senerpont Domis  
(NIOO-KNAW)  
Lilith Kramer  
(Deltares)  
Bob Brederveld  
(Witteveen+Bos)

### SAMENVATTING

Voor verbetering van ecologische waterkwaliteit is het belangrijk om via een watersysteemanalyse inzicht te krijgen in de oorzaken van de ontoereikende kwaliteit. Ter ondersteuning van systeemanalyses heeft STOWA de ecologische sleutfactoren systematiek ontwikkeld (ESFs) die inzicht geeft in de relaties tussen systeemkenmerken en de ecologische toestand van wateren. Een instrumentarium waarmee naast de relatie tussen de ESFs en de ecologische toestand van wateren ook de samenhang tussen verschillende ESFs kan worden gekwantificeerd, ontbrak tot op heden. Deltares, NIOO en Witteveen+Bos hebben een op Bayesian Belief Netwerken gestoeld instrumentarium ontwikkeld, waarin het belang van verschillende systeemkenmerken en processen bij het tot stand komen van ecologische toestanden expliciet gemaakt. Tussenresultaten zijn inzichtelijk voor de waterbeheerder en sluiten goed aan op de praktische informatie die waterbeheerders in het veld verzamelen. Ook wordt duidelijk met welke onzekerheden dergelijke diagnoses gepaard gaan. Dit instrument zal waterbeheerders ondersteunen bij het creëren van systeembegrip, en daarmee bij het vaststellen van realistische doelen en efficiënte maatregelpakketten.

Bayesian Belief  
Networks