Ontwikkeling van een blauwalgenbloeimodel

E. Flipsen, Arcadis
F. Los, WLDelft Hydraulics
L. Mur, Universiteit van Amsterdam
J. Stroom, Hoogheemraadschap van Rijnland

In de Nederlandse oppervlaktewateren treedt regelmatig overmatige bloei van cyanobacteriën (blauwalgen) op. Voor het bestrijden en voorkomen van algenbloei zijn diverse modellen beschikbaar. In de meeste hiervan is de beschrijving van algengroei echter tamelijk traditioneel en niet gericht op het voorspellen van algenbloei. Bovendien zijn nieuwe inzichten in de ecologie van cyanobacteriën en op het gebied van turbulentie nog niet of nauwelijks in de modellen geïntegreerd. De bestaande praktijkgerichte waterkwaliteitsmodellen zijn om bovenstaande redenen momenteel niet toereikend en actueel.

In een samenwerkingsverband tussen ecologen, modelleurs en waterbeheerders kan op basis van bestaande modellen en beschikbare kennis mogelijk gekomen worden tot de ontwikkeling van een model dat algenbloei beter beschrijft en een beter antwoord geeft op vragen uit de praktijk. De eerste aanzet voor deze samenwerking vond plaats in de vorm van een workshop, die Arcadis verzorgde in opdracht van de Stichting Toegepast Waterbeheer (STOWA). Daar stonden de volgende vragen centraal: waaraan bestaat vanuit het waterbeheer behoefte, welke nieuwe ecologische kennis is in dit kader relevant en op welke manier kan deze kennis zo goed mogelijk in een model toegepast worden?

Dit artikel geeft de resultaten van de workshop weer. Als eerste wordt de behoefte aan een algenmodel nader omschreven, gevolgd door de verkregen en verder te bestuderen inzichten in het gedrag en ecologie van blauwalgen, die kunnen bijdragen aan een verbeterd model voor algenbloei. Derde aspect is de modeltechnische kant: welke modellen bestaan reeds en welke nieuwe ontwikkelingen in de modellering kunnen leiden tot een verbeterd model voor algenbloei?

De overmatige groei van deze algen tast het functioneren van watersystemen aan. Drijflaagvormende soorten leveren problemen op, omdat ze stankoverlast en zuurstoftekort veroorzaken en het water een onaantrekkelijke aanblik geven. Bloei van toxinevormende blauwalgen kan leiden tot hoge concentraties toxines in het oppervlaktewater, die de gezondheid van mensen en dieren kunnen bedreigen. Daarnaast vermindert algenbloei het doorzicht. Het voorkomen van toxinevormende soorten is met name ongewenst in wateren met een zwemwaterfunctie en in drinkwaterbassins.

De waterbeheerder staat voor de taak om overmatige bloei van overlast veroorzakende algen te voorkomen (bijvoorbeeld in nieuw aan te leggen oppervlaktewater) en te bestrijden. Er bestaat in het waterbeheer behoefte aan handvatten om van symptoombestrijding naar handhaving van een gezond watersysteem te komen. Als het creëren van een gezond watersysteem (op korte termijn) niet haalbaar is, wil de waterbeheerder gezien de benodigde investeringen kunnen uitgaan van betrouwbare voorspellingen om symptoombestrijding zo efficiënt mogelijk in te zetten en de invloed van inrichting en lokale omstandigheden op de kans op algenbloei zo goed mogelijk in beeld te hebben.

De waterbeheerder zoekt naar een model, waarin causale verbanden tussen bloei en factoren als licht, nutriënten, temperatuur, stratifiicatie en morfologie zijn verwerkt. Het model moet in de tijd biomassa, soort, drijflaagvorming en verspreiding en toxineproductie berekenen en als resultaat begrip van het waarom en wanneer van bloei overlast opleveren. Het dient daarnaast de mogelijkheid te bieden het effect van maatregelen in te kunnen schatten.

Een voorbeeld uit de praktijk: het Hoogheemraadschap van Rijnland hecht als waterkwaliteitsbeheerder veel belang aan het voorkomen, bestrijden en beperken van overlast door blauwalgen. In het beheersgebied heeft overmatige groei van *Microcystis* in verschillende wateren geleid tot overlast in de vorm van drijflagen waardoor de gebruiksfunctie van het water werd aangetast. De overlast komt in zowel ondiepe meren en diepe (zandwin)putten voor. Deze wateren verschillen onderling in systeemeigenschappen (verblijftijd en diepte), nutriëntenhuishouding en chlorophylgehalte. Op dit moment is niet voldoende duidelijk welke (combinatie van) bovenstaande variabele(n) sturend is voor het optreden van cyanobacterie-overlast.

Wanneer in gevoelige gebieden (met name bij bewoning) stankoverlast optreedt kunnen drijflagen worden weggezogen, met name wanneer men verwacht dat de drijflaag niet snel zal verwaaien. Het Hoogheemraadschap van Rijnland past symptoombestrijding toe als er een reden is om op korte termijn overlast te beperken, en een systeembenadering niet kansrijk geacht wordt. Daartoe wordt bij twee watersystemen in het beheersgebied geforceerde menging door beluchting toegepast. Daarnaast wordt naar andere, meer duurzame, oplossingen gezocht. Gedacht wordt aan herinrichting waarbij systemen ondieper worden gemaakt en kansen voor waterplanten worden gecreëerd.

Ook elders in Nederland blijkt de bloei van *Microcystis* in diepe watersystemen problematisch in het waterbeheer. Door de drijflaagvorming en de mogelijke aanwezigheid van toxines in het water wordt recreatie in het water regelmatig afgeraden. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de voormalige zand- en grindgaten in het winterbed van de Maas (beheersgebied van Zuiveringschap Limburg), de Binnenschelde (Hoogheemraadschap van West-Brabant), de Kralingse Plas (Hoogheemraadschap van Schieland), Haarlemmermeerse bosplas en het IJsselmeer.

Ecologie van cyanobacteriën

Voorwaarde voor het modelleren is voldoende inzicht in het gedrag en de ecologie van algen. Het zijn juist de specifieke eigenschappen van deze organismen, die aanleiding kunnen geven tot een bloei met alle nadelige gevolgen van dien. De dominantie van een soort wordt bepaald door die eigenschappen, die een soort onder bepaalde omgevingscondi-

ties voordeel brengt ten opzichte van andere soorten.

Ten opzichte van andere algengroepen zijn er een aantal eigenschappen die blauwalgen een voordelige concurrentiepositie geven. Algemeen geldt dat blauwalgen zich goed kunnen aanpassen aan slechte lichtomstandigheden, dat ze gevoelig zijn voor hoge lichtintensiteiten en een lage groeisnelheid hebben. Verliezen door graas en sedimentatie zijn doorgaans gering. Deze algemene kenmerken van de blauwalgengroep worden vaak in modellen gebruikt om de concurrentie met andere algen te beschrijven. Het zonder meer uitgaan van generalisaties is echter gevaarlijk en leidt tot discrepantie tussen de simulatieresultaten en de praktijk die door het inbouwen van meer soortspecifieke karakteristieken van de algen beperkt kan worden.

Er is reeds veel onderzoek uitgevoerd naar de ecologische karakteristieken van blauwalgen. Tot deze groep behoren vele soorten met onderling verschillende eigenschappen. Tabel 1 geeft een indeling in groepen met een aantal relevante eigenschappen, die van belang zijn voor het gedrag.

Stikstoffixeerders als *Anabaena* en *Aphanizomenon* zijn in het voordeel bij lage concentraties opgelost stikstof, omdat deze soorten voor hun stikstof niet aangewezen zijn op stikstof in de waterkolom. Een andere belangrijke eigenschap die een aantal soorten bezit en daarmee concurrentiekracht bezorgt, is de regulatie van hun drijfvermogen. Hierdoor zijn deze organismen in staat te migreren over de verticaal en zo de meest gunstige lichtcondities op te zoeken. Op deze wijze kunnen ze in de eufotische zone blijven en bij extreem hoge lichtintensiteiten schade aan fotosynthetische pigmenten voorkomen. Bovendien zijn voor deze organismen de verliezen door sedimentatie te verwaarlozen. Regulatie van het drijfvermogen vindt bij verschillende soorten plaats met behulp van gasvesikels. Het zijn echter de kolonievormers, die het drijfvermogen optimaal kunnen uitbuiten. De verticale stijgsnelheid wordt namelijk bepaald door de dichtheid, maar ook de grootte van een kolonie heeft een grote invloed op deze eigenschap: volgens de wet van Stokes is er immers een kwadratische verband tussen de stijg- en daalsnelheid en de diameter van de kolonie of alg. In diepe gestratificeerde systemen met een stabiele waterkolom (weinig verticale menging) zijn de kolonievormers (als *Microcystis* en *Anabaena*) dan ook sterk in het voordeel. Deze soorten komen in hoge dichtheden aan het oppervlak voor en kunnen op deze wijze drijflagen vormen.

Verschillende instituten en bureaus voeren momenteel ecologisch onderzoek uit, dat kan bijdragen aan een verbeterde modellering van het gedrag van blauwalgen. Dit onderzoek richt zich zowel op het verder onderzoeken van eigenschappen als het bestuderen van de relaties tussen het gedrag van algen en de omgeving. Tabel 2 geeft een kort overzicht van het ecologisch onderzoek naar blauwalgen, dat recent is uitgevoerd, momenteel nog in uitvoering is of gepland staat. Andere belangrijke ecologische verschijnselen zijn de interactie tussen algen en hogere trofieniveaus (bijvoorbeeld allelopathische effecten, maar ook selectieve graas en de rol van waterplanten), het effect van de aanwezigheid van een ent in het sediment, en de productie, werkingsmechanismen en effecten van toxines op het aquatisch ecosysteem en de volksgezondheid.

Modellen

Er bestaan reeds modellen die de groei van blauwalgen beschrijven. Op dit moment zijn dat over het algemeen zogenaamde eutrofiëringsmodellen, die naast de groei van algen ook de kringlopen van stikstof, fosfaat en meestal silicaat beschrijven. De meeste eutrofiëringsmodellen zijn veelal gebaseerd op dezelfde uitgangspunten, maar er zijn wel accentverschillen in het detailniveau waarmee de processen worden beschreven. De modellen verschillen slechts in detailniveau van de beschrijvingen en processen, waarop het accent wordt gelegd. Zo verschillen bijvoorbeeld het aantal algensoorten dat wordt beschreven, legt het ene model het accent op N^2-fixatie en neemt een ander selectieve graas en kolonievorming mee als belangrijk proces. Ook zijn er verschillen in de mate van validatie en genericiteit van de modellen. Tabel 3 geeft een overzicht van in Nederland gebruikte operationele modellen. Voor de meeste modellen geldt dat de basis is terug te voeren tot het midden van de jaren zeventig, toen in de Verenigde Staten voor het eerst dit soort modellen werden ontwikkeld en toegepast op de Great Lakes.

Het model Bloom verschilt voor wat betreft de beschrijving van algengroei duidelijk van de andere modellen, omdat in dit model onderscheid wordt gemaakt in verschillende fenotypen algen. In de andere modellen geldt dat een cyanobacterie wordt gemodelleerd als een groenalg met andere coëfficiënten.

PcLake onderscheidt zich door het meenemen van de interacties met het ecosysteem. In dit model worden ook de hogere trofieniveaus gemodelleerd. Zo kunnen in dit model ook zooplankton, vis en waterplanten worden gesimuleerd.

In de meeste modellen geldt, dat de concurrentie tussen verschillende soorten slechts kan worden gestuurd door andere waarden voor parameters in de beschrijving van de groei en het verlies te kiezen. De zwakte van deze modellen is dan ook dat ze weinig inzicht geven in de samenstelling van de algenpopulatie. De toepassing van de modellen de afgelopen twee decennia leert, dat de modellen echter geschikt zijn voor screening en het vergroten van het inzicht in de dynamiek van algengroei over langere tijdschalen (jaar) en het functioneren daarvan. Met wisselend succes kan ook een redelijke voorspelling worden gegeven van de totale algenbiomassa. Op een aantal punten kunnen de modellen nog worden verbeterd, bijvoorbeeld door de beschrijving van de interacties met het ecosysteem, de rol van de ent in het model op te nemen en karakteristieke waarden van parameters te gebruiken, die representatief zijn voor veldcondities. Veelal wordt in modellen nu gebruik gemaakt van parameters, die in het laboratorium zijn vastgesteld.

Naast ecologisch onderzoek naar karakteristieken van blauwalgen wordt ook op het terrein van de modelvorming onderzoek verricht. Het recent uitgevoerde en lopende onderzoek naar modellering van ecologische processen is vermeld in tabel 4.

Op vragen over kortere tijdschalen, die uit oogpunt van het beheer relevant zijn, kan met de huidige modellen momenteel slechts zeer beperkt een antwoord worden gegeven. Om dit type vragen te beantwoorden zijn andere modellen nodig, die niet alleen de ecologie, maar ook de fysica in een watersysteem kunnen beschrijven. Het transport en de (verticale) menging zijn factoren die moeten worden meegenomen. Een eerste aanzet is het model PUT (DUFLOW) waarin de biologie wordt gecombineerd met een simpele beschrijving van de verticale menging. In dit model wordt de verticaal opgedeeld in een aantal laagjes en wordt de menging tussen de lagen beschreven met een empirische relatie, die de afhankelijkheid tussen de verticale menging en de wind beschrijft.

Het model is toegepast in een studie voor de Haarlemmermeerse Bosplas en gebruikt om het effect van geforceerde menging op de concurrentie tussen kolonievormende drijflaagvormers (*Microcystis*) en groenalgen te voorspellen. In het model is gebruik gemaakt van in het laboratorium experimenteel bepaalde stijgsnelheden voor de kolonies.

Afbeelding 1 laat het effect zien op de verhouding blauwalgen (*Microystis*) en groenalgen voor een wel en niet verticaal gemengde situatie. Opgemerkt wordt dat het

	A. De homogeen verdeelde cyano's in ondiepe meren	B. Gestratificeerd voorkomende cyano's in diepe meren	C. Migrerende kolonievormende cyano's	D. N^2-fixerende cyano's	E. Kleine enkelcellige cyano's
voorbeelden	*Oscillatoria agardhii* *Oscillatoria redekei*	*Oscillatoria agardhii var 7821* *Oscillatoria rubescens*	*Microcystis spp.* *Aphanothece sp.* *Anabaena spp.* *Aphanizomenon flosaquae*	*Anabaena spp.* *Aphanizomenon flos-aquae*	*Cyanodictyon sp.* *Synachococcus*
eigenschappen					
aangepast aan lage licht omstandigheden					
gevoelig voor hoge lichtintensiteiten					
lage maximale groeisnelheid					
lage verliessnelheid					
drijfvermogen					
N^2-fixatie					

aanwezige eigenschap — onderscheidende eigenschap — sterk onderscheidende eigenschap

Tabel 1: *Indeling in groepen met een aantal relevante eigenschappen die van belang zijn voor het gedrag.*

Tabel 2: *Overzicht van de recent uitgevoerd en momenteel lopend onderzoek naar eigenschappen en gedrag van blauwalgen, relevant voor het modelleren van algenbloei.*

RIZA
- invloed van de omvang van de ent in het voorjaar op de algenbloeid in de zomer
- laboratoriumonderzoek naar de concurrentiekracht van algensoorten
- verspreiding en invloed van toxines op hogere trofieniveaus
- effect van selectieve graas door driehoeksmosselen op algen

WUR
- effect van toxicanten op ecosystemen, gericht op concurrentie en predatie
- invloed van sedimentatie en resuspensie op biomassa en soortensamenstelling

AquaSense
- effecten van toxines op het aquatisch ecosysteem
- geografische verspreiding van potentieel toxische blauwalgen
- seizoensafhankelijke variatie van potentieel toxische blauwalgen
- methodologisch onderzoek naar analysetechnieken voor toxines
- onderzoek naar gebruik van biologische testmethodes voor toxines

RIVM
- advisering normering cyanotoxines
- epidemiologisch onderzoek naar gezondheidsklachten door cyanotoxines (gepland)

UvA
- ontwikkelen van biochemische/moleculair-biologische methoden om in fytoplankton limitaties te kunnen herkennen op celniveau
- verticale verspreiding en beweging van *Microcystis*
- het gebruik van kunstmatige verticale circulatie door de onderdrukking van bloe van *Microcystis*
- de voorspelbaarheid van de ontwikkeling van toxische populaties
- onderzoek naar algemene wetmatigheden in de successie van de ontwikkeling van fytoplankton

Tabel 3: *Overzicht van in Nederland toegepaste operationele modellen voor simulatie van algenbloei.*

model	beheerder	model	beheerder
DUFLOW: Eutrof 1 en 2	STOWA	SOBEK/Delft3D/BLOOM	WLDelft Hydraulics
PCLake	RIVM/STOWA	OOMAS	AqaSense
SOBEK/Delft3D/WAQ	WLDelft Hydraulics	Bekwaam	DHV

Tabel 4: *Overzicht van recent uitgevoerd en lopend onderzoek naar het inbouwen van ecologische processen in modellen.*

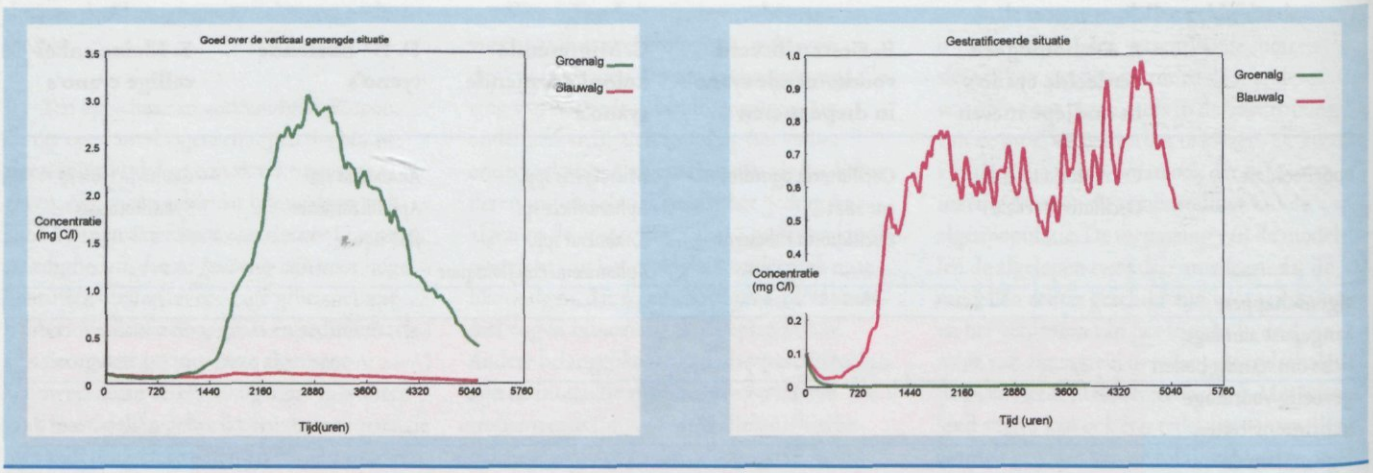
RIZA
- remote sensing van algenbloei: integratie van remote sensing, modellen en *in situ* metingen

WUR
- modellering van de concurrentie tussen *Oscillatoria* en andere soorten
- op individu gebaseerd model voor één alg
- modellen voor thermische stratificatie en menging

RIVM
- toepassen van PcLake inclusief moerasmodule voor beheersplan voor het Zuidlaardermeer ter evaluatie van de afvissingscomponent in het model
- validatie eutrofiëringsmodel in PcLake

UvA
- ontwikkelen van modellen met verschillen in efficiëntie van fototrofe groei
- modellering van verticale en horizontale stromingsverschijnselen in binnenwateren

WLDelft Hydraulics
- onderzoek naar turbulentiemodellering als basis voor de ontwikkeling en afregeling van ecofysiologische modules van blauwalgen.
- remote sensing van algenbloei: integratie van remote sensing, modellen en *in situ* metingen



Afb. 1: Concurrentie tussen blauw- en groenalgen (in mg C/l) in de bovenste waterlaag voor een wel en niet gemengde situatie.

gaat om een voorspelling, die in de praktijk nog niet is getoetst. Wel is in andere systemen gebleken dat geforceerde menging problemen met drijflaagvorming kan voorkomen. Ook het model Bloom dat gekoppeld kan worden met hydrodynamische modellen biedt de mogelijke dergelijke simulaties uit te voeren. Onderzoek naar het inbrengen van fysische processen in modellen vindt tevens plaats op de Universiteit Twente, de Technische Universiteit Delft en door SEPRA-Noort.

In een andere voorbeeldstudie is een expertsysteem op basis van de fuzzy logic-techniek gecombineerd met modellen van de waterbeweging en seizoensdynamiek van fytoplankton en nutriënten.

Modellen waarin de biologie wordt gecombineerd met simpele fysica vergroten het inzicht in de sturende processen en geven een eerste indruk van de effectiviteit van geforceerde menging. De simpele beschrijving van de fysica maakt het echter niet mogelijk een indruk te geven van de werkelijke verspreiding en volledigheid van de menging. Dat laatste is vooral van belang in verband met het optreden van stagnante zones, die niet aan de verticale menging mee doen en waar alsnog cyanobacteriën hun drijfvermogen kunnen uitbuiten. Beantwoorden van dit soort vragen vraagt om koppeling met complexe modellen waarin 'state of the art'-beschrijvingen van turbulent transport zijn opgenomen. Ook om inzicht in de relatie tussen de inrichting van systemen en het wel en niet voorkomen van blauwalgen te verkrijgen, kunnen dergelijke modellen een belangrijke rol spelen.

Koppeling van complexe hydrodynamische modellen met op lange termijn gerichte algen-groeimodellen is niet zonder meer mogelijk. De coëfficiënten in deze modellen zijn de resultante van allerlei over korte tijdschaal variërende niet lineaire processen. Zo varieert bijvoorbeeld het drijfvermogen van algen binnen de dag, omdat het gekoppeld is aan de fotosynthese en de respiratie en treedt er adaptie op aan wisselende lichtcondities. Dit betekent dat koppeling van hydrodynamica en biologie aandacht vraagt voor de manier waarop processen worden beschreven en dat veel bekende coëfficiënten gebruikt in de traditionele modellen niet direct overdraagbaar zijn.

Conclusies

Als het gaat om de traditionele modellen voor het voorspellen van ontwikkelingen op de lange termijn kan worden gesteld dat deze hun nut hebben bewezen. Zoals geschetst kunnen de modellen op een aantal punten nog worden verbeterd. Anders staat het met de ontwikkeling van modellen voor korte tijdschalen. Deze ontwikkeling staat nog in de kinderschoenen. Meer dan een eerste aanzet hiervoor is nog niet gemaakt en wat er ligt heeft nog een hoog academisch gehalte. Dit terwijl de vragen vanuit de praktijk aangeven dat behoefte is aan operationele modellen die antwoord kunnen geven op belangrijke vragen met betrekking tot de vorming van drijflagen en toxines.

Veel van de benodigde kennis hiervoor is aanwezig bij de ecologen of wordt verzameld in het kader van lopende onderzoeksprojecten. Van belang is dat de kennis ook wordt overgedragen en geïmplementeerd in modellen. Dat vraagt om interdisciplinaire samenwerking tussen fysici, biologen en modelleurs. Op deze wijze kan kennis operationeel worden gemaakt voor de praktijk van het waterbeheer en kunnen modellen worden ontwikkeld, die antwoord kunnen geven op de vragen vanuit de praktijk. Fysici, biologen en modelleurs moeten daarom met elkaar in gesprek blijven. Dat onderstreept het belang van workshops waarover dit artikel handelt. Naar aanleiding van die bijeenkomst zullen vervolggesprekken worden gehouden om nieuwe ontwikkelingen te initiëren. ¶

Literatuur

AquaSense (1994). Toxinen in cyanobacteriën: de situatie in Nederland. In opdracht van RIZA, rapport 94.052.

Arcadis (1999). Modellen voor de bestrijding van cyanobacteriën. In opdracht van STOWA, stagerapport R. Rosenboom.

Bokhorst M., M. Vonk en F. Los (1997). Drijflagen module DBS. WLDelft Hydraulics rapport T515.

Ibelings B., W. Wiegant, R. Aalderink, H. Ketelaars, G. Waajen en J. Koedood (1997). Modelling the competition between buoyant cyanobacteria, green algae and dinoflagellates to assist the implementation of artificial mixing in lakes and reservoirs. In: Eutrofication Research, pag. 211-218.

Los F. en J. Passarge (1998b). Impact of the size of of the innoculum on summer levels of Microcystis in Lake Volkerak-Zoom. Delft Hydraulics rapport T2208.

Molen D. van der, J. Janse en I. de Vries (1996). Eutrofiëringsmodellen: overmaat schaadt? H_2O nr. 2, pag. 34-37.

Nobel W. de, R. Baard, N. Staats en L. Mur (1994). Kompetitie en ontwikkeling van stikstoffixatie activiteit van Aphanizomenon en Anabaena. Laboratorium voor Microbiologie, Universiteit van Amsterdam.

Visser P. (1995). Growth and vertical movement of the cyanobacterium Microcystis in stable and artificially mixed water columns. PhD-thesis of University of Amsterdam.

Vonk M., B. Michielsen en F. Los (1998a). Fuzzy Scum model IJsselmeer. WLDelft Hydraulics rapport T2129.