

**Bestrijding van overlast
door drijflagen van blauwwieren**



INHOUD

Ten geleide	
SAMENVATTING	1
1 INLEIDING	3
2 AANPAK EN OPZET VAN HET ONDERZOEK	6
3 TERMINOLOGIE EN VERSCHIJNINGSVORMEN	9
3.1 Terminologie	9
3.2 Verschijningsvormen van drijfslagen	12
4 DYNAMIEK VAN DRIJSLAGEN	16
4.1 Algemeen	16
4.2 Concentratiemechanismen	16
4.3 Snelheid en richting van het transport	21
4.4 Aanvoer- en ophopingsmechanismen	23
5 MODELLERING VAN AANVOER EN OPHOPING	27
5.1 Algemeen	27
5.2 Modellerings	27
5.3 Relatieve kwantificering van aanvoer	29
5.4 Toepassing	30
5.5 Toetsing en conclusies	32
6 VERHINDEREN VAN HET BINNENDRINGEN VAN DRIJSLAGEN	35
6.1 Algemeen	35
6.2 Mechanische schermen	35
6.3 Bellenscherm	39
6.3.1 inleiding	39
6.3.2 theoretische beschouwingen en experimenten	39
6.3.3 dimensionering en ontwerpregels	41
6.3.4 besturingssysteem	43
6.3.5 resultaten en conclusies bij een praktijkopstelling	43
6.4 Variatie in ontwerp van een havenmond	44
6.5 Gedeeltelijk doorspoelen	44
6.6 Neveneffecten van verhinderen van binnendringen	44
7 VERWIJDERING EN VERWERKING VAN DRIJSLAGEN	45
7.1 Algemeen	45
7.2 Flotatie- en sedimentatiegedrag van blauwwieren	46
7.2.1 flotatie	46
7.2.2 sedimentatie	46
7.2.3 consequenties voor indikking en verwerking	47
7.3 Afzuigen	48
7.4 Indikken	50
7.5 Verwerking op RWZI's	54
7.5.1 oxydatiesloten, actief-slibinstallaties	54
7.5.2 slibgisting RWZI	55
7.5.3 alternatieven	56

8	DISCUSSIE	57
9	LITERATUUR	60
	SYMBOLENLIJST	62
BIJLAGE		
	BLAUWWIEREN MEETTECHNISCH GEZIEN	

Ten geleide

Overmatige groei van fytoplankton in zoet oppervlaktewater als gevolg van eutrofiëring beïnvloedt de waterkwaliteit negatief door de sterk verminderde helderheid en de zuurstofloosheid bij het afsterven van de algen. Van de verschillende groepen algen die hierbij een rol spelen, worden de blauwwieren (*Microcystis*) als de meest bezwaarlijke gezien.

Het thans voorliggende rapport behandelt het ontstaan van de overlast door blauwwieren en stelt op vuistregelniveau een model op waarmee het ontstaan en de effecten van de bestrijding van blauwwierdrijflagen kunnen worden begroot. Aan het verwijderen en verwerken van de blauwwieren wordt ruim aandacht besteed.

Het onderzoek werd op aanbeveling van de Onderzoekadviescommissie* door het algemeen bestuur van de STORA opgedragen aan de Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing, faculteit der Civiele Techniek van de Technische Universiteit Delft. Projectleider was prof. dr. M. Donze, een belangrijk deel van de uitvoering berustte bij ir. R.F. van Nieuwenhuyze. De laatste experimenten en een deel van de eindrapportage werden verricht door ir. B. van der Veer. Tevens bevat het eindrapport bijdragen uit het KEMA onderzoek aan blauwwieren. De experimenten aan het Braassemermeer werden ondersteund door het Hoogheemraadschap van Rijnland en door de directie van Jachthaven Meerzicht. Namens de STORA werd het onderzoek begeleid door een commissie bestaande uit dr. S.P. Klapwijk (voorzitter), drs. L.W.C.A. van Breemen, dr. T.H.L. Claassen, ir. H. van der Honing, drs. F.L. Los en drs. M-L. Meijer.

Den Haag, april 1992

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

* De onderzoekscommissie die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris), ir. J. Boschloo, ir. R. den Engelse, prof.dr. P.G. Fohr, ir. A.E. van Giffen, ir. J.J. de Graeff, dr.ir. P.J. Huiswaard, Ir. R. Karper, dr. S.P. Klapwijk, prof.ir. J.H. Kop, ir. Tj. Meijer, ir. L.P. Savelkoul, wijlen ir. H.M.J. Scheltinga, dr. ir. D.W. Scholte Ubing en ir. M. Tiessens, leden.

SAMENVATTING

Blauwwieren die grote drijvende kolonies vormen, geven vaak meer overlast dan niet kolonievormende planktonisch levende wieren. Dit is het gevolg van hydrodynamische concentratiemechanismen. De kolonies kunnen nog bij redelijke windkracht naar het oppervlak opstijgen en gaan drijven. De inhomogene verticale distributie in de waterkolom leidt tot verschillende concentratiemechanismen in horizontale richting. In extreme omstandigheden zoals in winddode hoeken en in havens, met ongunstige windrichting en draaiingen daarvan, zijn duizendvoudig hogere concentraties van deze blauwwieren ten opzichte van het open water niet ongewoon.

Het in dit rapport beschreven onderzoek richt zich op de bestrijding van deze symptomen, en houdt zich bezig met het ontwikkelen en toetsen in de praktijk van methoden die het optreden van dergelijke concentraties kunnen verhinderen of verminderen. Tevens wordt aandacht besteed aan de bestrijding van de overlast die drijfvlagen van opgehoopte blauwwieren kunnen geven, door enkele verwerkingsmethoden te onderzoeken.

Om gestandaardiseerd en eenduidig (veld)waarnemingen te kunnen noteren en herkennen, wordt een terminologie gegeven waarmee de diverse verschijningsvormen van individuen en conglomeraten van individuen van blauwwieren, zoals die zich aan het blote oog voordoen, geassocieerd kunnen worden beschreven.

De overlast door blauwwieren wordt in hoge mate bepaald door een combinatie van een aantal verticale en horizontale hydrodynamische concentratiemechanismen en transportmechanismen. In de kwalitatieve en kwantitatieve beschrijving van deze dynamiek van de drijfvlagen spelen naast omgevingsfactoren (lichtintensiteit, nutriënten) en de fysiologische eigenschappen van de cel (drijfvermogen), de concentratiemechanismen de belangrijkste rol. In verticale zin zijn bezinken, stijgen en "plakken" aan de oppervlaktespanning van belang, in horizontale zin gaat het om opstuwning door wind, door wind geïnduceerde oppervlaktestroming en de invloed van neerwaartse stroming.

De kwantitatieve bestudering van de concentratiemechanismen en transportmechanismen leverde op vuistregelniveau een rekenmodel op dat de snelheid van ontstaan bij benadering beschrijft en waarmee de ophoping van blauwwieren op bepaalde daarvoor kwetsbare plaatsen van meren geschat kan worden. Toetsing van het rekenmodel op actuele situaties in het Braassemermeer toonde een verrassend goede overeenkomst. Algen die zich in havens ophopen, kunnen een substantieel deel, circa 10%, van de totale populatie van een meer uitmaken. Het model kan gebruikt worden bij het optimaliseren van de aanleg van kleine havens, bij het berekenen van de effectiviteit van maatregelen om ophoping te voorkomen en voor de berekening van af te voeren hoeveelheden.

Bij de aanleg van havens kan door de keuze van de ligging al rekening worden gehouden met dit transport van blauwwieren. Ook is het mogelijk door het aanbrengen van vaste schermen minder ophoping te verkrijgen. Desondanks kunnen deze voorzieningen bij ongunstige windomstandigheden tekort schieten. Omdat beweeglijke schermen, die rekening houden met de wind en stroming, gecompliceerd en kostbaar zijn, is gezocht naar kleinschalige, effectieve maatregelen om de drijfvlagen tegen te houden.

Er werd uitgebreid onderzoek gedaan met een bellenscherm voor de ingang van een jachthaven. De resultaten maakten dimensionering en sturing van de bediening mogelijk. Indien het bellenscherm zodanig geplaatst is dat het de vorm van de oever volgt, kan het ongeveer 75% van de aanvoer van algen tegenhouden. De kustlijn moet gevolgd worden omdat anders de algen zich voor het scherm kunnen ophopen waardoor het bellenscherm niet werkt.

Aan het verwijderen en verwerken van de blauwwieren werd veel aandacht besteed. Voor het verwijderen is gekeken naar afzuigtechnieken en "skim"-methoden, zoals die ook bij olieverontreiniging worden toegepast. De afgezogen drijfslagen hebben een zeer hoog watergehalte.

Het hoge watergehalte van de blauwwiermassa is zowel voor het vervoer als voor de verwerking een bezwaar. Om de indikeigenschappen te verbeteren, zijn de blauwwieren blootgesteld aan een plotselinge hoge druk, hetzij aan een drukschok van 10 bar, hetzij aan doorvoering door een hogedrukpomp bij 7 - 10 bar. De gasvesikels in de cellen barsten, waarna de ontstane massa beter in te dikken is door flotatie of sedimentatie. Deze massa kan aangevoerd worden op een RWZI en daar in het normale biologische zuiveringsproces worden verwerkt. Door hun verlies van drijfvermogen spoelen de cellen niet meer onbehandeld door de zuiveringsinrichting heen.

1 INLEIDING

Overmatige groei van fytoplankton in zoet oppervlaktewater als gevolg van vermisting is een overbekend probleem dat zich wereldwijd sinds de zestiger jaren voordoet. De bezwaren voor de waterkwaliteit zijn overbekend: sterk verminderde helderheid met negatieve gevolgen voor het ecologisch systeem en risico op zuurstofloosheid bij het afsterven van de algen. Van de verschillende groepen algen die hier een rol kunnen spelen, worden de blauwwieren of cyanobacteriën algemeen als het meest bezwaarlijk aangemerkt. Door de aanwezigheid van gasvacuolen is, per eenheid chlorofyl, hun effect op de helderheid groter en er zijn goede redenen aan te nemen dat ze minder gegeten worden door zoöplankton en daardoor een ongunstiger effect op de voedselketen als geheel hebben. Bovendien kunnen vele soorten giftig zijn voor waterorganismen, drinkend vee en de mens. Over dit laatste onderwerp wordt in Nederland door het Research Instituut Toxicologie en het Duinwaterbedrijf Zuid-Holland onderzoek verricht (Hoekstra et al., 1991, Bol & Seinen, 1988, Kappers, 1980, 1984, 1987, Reynolds, 1991).

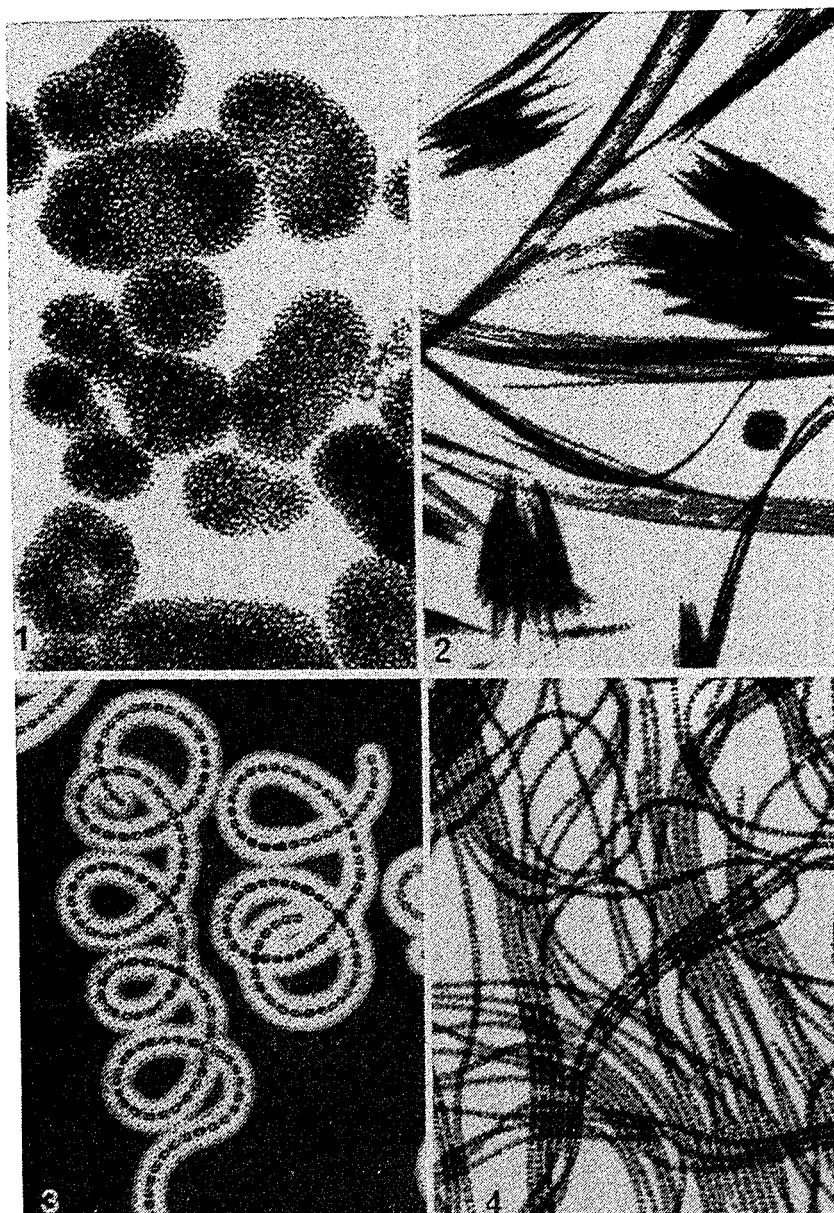
De -weinige- soorten blauwwieren, waar het in de praktijk om gaat, hebben gemeenschappelijk het bezit van gasvacuolen waardoor ze zich drijvend kunnen houden. Zie figuur 1. Het gehalte aan vacuolen, het zetmeelgehalte en het polyfosfaatgehalte bepalen in hoofdzaak het soortelijk gewicht dat om dat van water kan schommelen. Variatie van het soortelijk gewicht leidt tot het vermogen van deze algen tot op zekere hoogte zelf hun plaats langs de vertikaal in een waterkolom te bepalen, en zodoende te profiteren van verschillen in lichtintensiteit en nutriëntengehaltes (Reynolds et al., 1987).

Op grond van hun cel-morfologie zijn de soorten te onderscheiden bolletjes van 2-8 μm en in tonvormige cellen met een diameter van 2-8 μm die met de vlakke zijde aan elkaar blijven zitten en zo onvertakte celdraadjes of trichomen vormen met lengtes tot circa 1 mm.

De soorten die trichomen vormen, zijn weer te verdelen in soorten die geen atmosferische stikstof kunnen binden, en dus aangewezen zijn op stikstofbemesting voor groei, en soorten die met behulp van heterocysten, gespecialiseerde microscopisch herkenbare cellen, dit wel kunnen en aldus deze afhankelijkheid missen. Binding van atmosferische stikstof kost wel circa 10% extra energie in de vorm van licht voor deze organismen (Donze et al., 1972).

Zowel onder de bolvormige soorten als onder de draadvormers treffen we soorten aan waarvan de cellen of draadjes wel of niet klonten kunnen vormen tot groottes van enkele millimeters.

Bij de bolvormige cellen, zoals Microcystis, ontstaan kolonies doordat de cellen een slijmmatrix afscheiden, waardoor na deling de dochtercellen in deze slijm massa verzameld bijeen blijven. Er is dus sprake van een echte kolonie. Draadvormige soorten als Gloeotrichia kunnen dit ook doen. Andere groepen kunnen secundair aan elkaar plakken; dan hoeft er dus geen sprake te zijn van een echte kolonie: de cellen in een klont stammen niet noodzakelijk van een oudercel af. De klonten kunnen, als in Aphanizomenon, de vorm hebben van een takkenbos in het geval van rechte draadjes of van een bos verknoot touw in het geval van in elkaar gehaakte spiraalvormige draadjes zoals bijvoorbeeld Anabaena spiroïdes. Dergelijke kolonies kunnen,



Figuur 1. Cyanobacteriën. 1. Microcystis (*110) 2. Aphanizomenon (*44)
 3. Anabaena met slijmmatrix (*250) 4. Oscillatoria (*156)
 (Canter-Lund, in: Reynolds, 1991).

vermoedelijk afhankelijk van fysisch-chemische en fysiologische condities snel uit elkaar vallen tot individuele trichomen.

Voor de waterkwaliteitsbeheerders vormen de macroscopische klontvormers veel grotere problemen dan de microscopische soorten.

Deze microscopische vormen hebben door hun drijf- of zweefvermogen waarschijnlijk enig voordeel in de strijd om het bestaan met algen uit andere groepen zoals groenwieren en kiezelwieren, die een grotere kans lopen in

diepere, donkere lagen van het water te geraken waar de groei trager is of stopt.

De macroscopische soorten kunnen, op grond van de wet van Stokes, veel hogere verticale snelheden halen voor dezelfde variatie in soortelijk gewicht, tot naar schatting 1 meter per uur (Reynolds et al., 1987). Hierdoor kunnen ze zich beter tegen turbulentie verzetten. Dit kan leiden tot de vorming van drijfslagen aan het wateroppervlak, die zich verder kunnen concentreren tot sterke lokale matras-dikke lagen in havens en dode hoeken van wateren. Deze geven lokaal grote overlast doordat de omgeving er dusdanig onsmakelijk uitziet dat waterrecreatie vrijwel onmogelijk wordt, terwijl bij rotting de lagen gaan stinken. Ook neemt het risico toe dat door ontbinding van de massa giftige stoffen vrijkomen.

De zeer inhomogene verdeling van de kolonies maakt kwantitatief veldonderzoek naar ophopingsverschijnselen moeilijk en kostbaar.

De beste manier om overlast door algen te bestrijden, is principieel de aanpak van een geheel meer en met name het eutrofiëringsprobleem. Hierover bestaat een omvangrijke mondiale literatuur, terwijl in Nederland al veel praktische ervaring met saneringsmaatregelen is opgedaan. Het is hier niet de plaats daarop verder in te gaan. Vaak is gebleken dat saneringsmaatregelen nog geen of te gering effect hebben, danwel te kostbaar zijn.

Onderzoek, speciaal gericht op de lokale bestrijding van drijfslagen werd in Nederland gestart door het Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden (van der Honing & Meijer, 1985, Meijer & van der Honing, 1986). Aan het Brielse Meer was al veel onderzoek verricht en een aantal saneringsmaatregelen was uitgevoerd. Niettemin bleef in de zomermaanden sterke overlast door drijfslagen voor vooral de recreatie zich voordoen. Naast verdergaande maatregelen die op het hele meer betrekking hadden, werd een aantal mogelijkheden voor symptoombestrijding geconcipeerd. Uiteindelijk bleek het mogelijk het gehele meer in één keer snel door te spoelen met Rijnwater gedurende het groeiseizoen van de algen. Dit bleek een afdoende maatregel. Door de watertoevoer naar het Westland via het Brielse Meer is de verblijfstijd in de zomer nu zo kort dat drijfslagen van blauwwieren niet meer voorkomen. Het onderzoek naar symptoombestrijding in het Brielse Meer is daardoor niet meer nodig.

De ideeën die daar gegenereerd werden, gaven mede aanleiding tot de onderhavige studie.

Dit STORA-onderzoek beoogt verbetering in de gesignaleerde problemen te brengen door na te gaan hoe de overlast door drijfslagen tot stand komt, welke kleinschalige maatregelen getroffen kunnen worden om drijfslagen tegen te houden, of deze zo efficiënt mogelijk te bestrijden en/of te verwijderen. Tevens wordt op vuistregelniveau een model opgesteld dat de snelheid van ophoping in havens in eerste benadering beschrijft. Het kan gebruikt worden voor het optimaliseren van de aanleg van kleine havens, bij het berekenen van de effectiviteit van maatregelen om ophoping te voorkomen en voor berekening van af te voeren hoeveelheden.

2 AANPAK EN OPZET VAN HET ONDERZOEK

Om een aantal praktische redenen werd de Jachthaven Meerzicht aan het Braassemermeer gekozen als locatie van uitvoering voor het veldwerk. Een direct gevolg is dat strikt genomen, de resultaten alleen van toepassing zijn op de blauwwiersoort Microcystis aeruginosa, de enige alg die hier massaal optreedt.

Als inleiding tot het onderwerp van deze studie is in tabel 1 een overzicht gegeven van allerlei denkbare mogelijkheden om drijfslagen of drijfmassa's tegen te gaan of anderszins te behandelen. Tevens is aangegeven waaraan tijdens het onderzoek aandacht besteed is, zowel in de praktijk (p) als theoretisch (t). Dit zijn vooral de aspecten van lokale bestrijdingsmaatregelen (L) en, voor zover mogelijk, aan de procestechnologische mogelijkheden van scheiden en/of behandelen van blauwwiermassa elders (E en L/E). Dit onderzoek was in hoofdzaak mechanisch-technologisch van aard.

Combinatie van diverse maatregelen is mogelijk met verwijderings- en/of zuiveringsinrichtingen. Deze kunnen nieuw gebouwd worden als het kleinere systemen betreft, maar ook zou gebruik gemaakt kunnen worden van reeds bestaande installaties, met name van rioolwaterzuiveringsinrichtingen.

Het onderzoek is ingedeeld in drie hoofdaspecten:

Terminologie (Hoofdstuk 3)

Een drijfslag is direct te zien, doch vanwege de grote variabiliteit en inhomogeniteit van de verdeling van de algen over het oppervlak slecht kwantificeerbaar. Om kwalitatief onderzoek en de communicatie tussen de medewerkers in het veld te vergemakkelijken is een terminologie opgezet, toegesneden op het beschrijven van de drie-dimensionale verdeling van blauwwieren in een meer.

Onderbouwend onderzoek aan processnelheden (Hoofdstukken 4 en 5)

In hoofdstuk 4 worden de transportmechanismen besproken, die een rol spelen bij het opstuwen van blauwwiermassa's. In hoofdstuk 5 wordt hieraan een ruwe, modelmatige vorm gegeven. Hiermee kan in eerste benadering geschat worden hoe groot het risico op drijfslagvorming in een specifieke geometrische situatie is.

Er zijn metingen verricht aan windkracht, windrichting, waterstromen, temperatuur en lichtintensiteit. Dit werd ondersteund door een beperkt literatuuronderzoek naar proces-parameters die een rol spelen bij ophoepingsmechanismen en reinigingstechnieken.

Praktijkonderzoek (Hoofdstukken 6 en 7)

Op plaatsen waar het opdrijven van grote hoeveelheden blauwwieren zich voordoet en die zich qua omvang en/of configuratie lenen voor onderzoek op praktijkschaal is aandacht besteed aan:

- het verhinderen van het binnendringen van de drijfslagen, zie hoofdstuk 6. Bestudeerd zijn de effectiviteit van bellenscherm, mechanisch scherm en variatie in ontwerp van een havenmond.

MAATREGEL	METHODE	MIDDEL	PLAATS	DIT RAPPORT
Stop eutrofiëring	aanpak vermessing		M	-
Stop P-nalevering	reinigen bodem	baggeren	M	-
	P-fixatie	bodem behandelen	M	-
Groeibelemmering	CO ₂ -inbreng	bellenscherm	M	-
	circulatie inhoud		M	-
	circ. + CO ₂ -inbreng		M	-
	volledig doorspoelen		M	-
	verstoren inoculum	ploegen in winter	M	-
	verander temperatuur		M	-
	stimuleren lysis	infecteer algen	M	-
	bio-regulatie	bepanting, vis	M	-
Tegenhouden	hydraulisch	bellenscherm	L	p
		waterjet	L	t
	mechanisch	strekdam	L	t
		drijvende schotten	L	t
Doorspoelen	hydraulisch	riolen/-kanalen	L	t
Vernietigen	toedienen drukschok	dynamiet	L	t
		drukvat	L	p
	chemisch	NaOH	L	-
		H ₂ O ₂	L	-
		N ₂	L	-
	biologisch	eenden	L	-
		vissen	L	-
		bacteriën	L	-
		virussen	L	-
Oogsten	mechanisch	afzuigen	L	p
		afromen	L	t
Scheiden-primair	statisch	flotatie	L	p
		ontspanningsflot.	L	t
		precipitatie	L	t
		druk + precip.	L	p
		chemische precip.	L	t
		centrifugeren	L	p
		filtreren	L	p
		zeven	L	p
Scheiden-secundair			L/E	p
Behandelen	biochemisch	actief-slibinst.	E	p
	vergisten	slibgisting	E	p
	verbranden	oven	E	p
	drogen	slibveld	E	p
	composteren	landfarming	E	-
Verwerken	dierenvoer		E	-
	chemikaliën		E	-

Tabel 1. Overzicht van mogelijke bestrijdingsmethoden. Bij plaats van uitvoering is: M = het gehele meer; L = lokaal in haven en dergelijke; E = elders na verwijdering uit oppervlaktewater; - = niet behandeld; t = theoretische aandacht; p = praktijk onderzoek verricht.

- het periodiek schoonmaken door afzuigen en indikken, met in eerste instantie technieken ontleend aan de bestrijding van olieverontreiniging. Een beschrijving is gegeven in hoofdstuk 7. Hierbij wordt ook aandacht besteed aan de verwerking van de blauwwiermassa en haar neveneffecten. Voor dit laatste aspect is laboratoriumwerk uitgevoerd.

3 TERMINOLOGIE EN VERSCHIJNINGSVORMEN

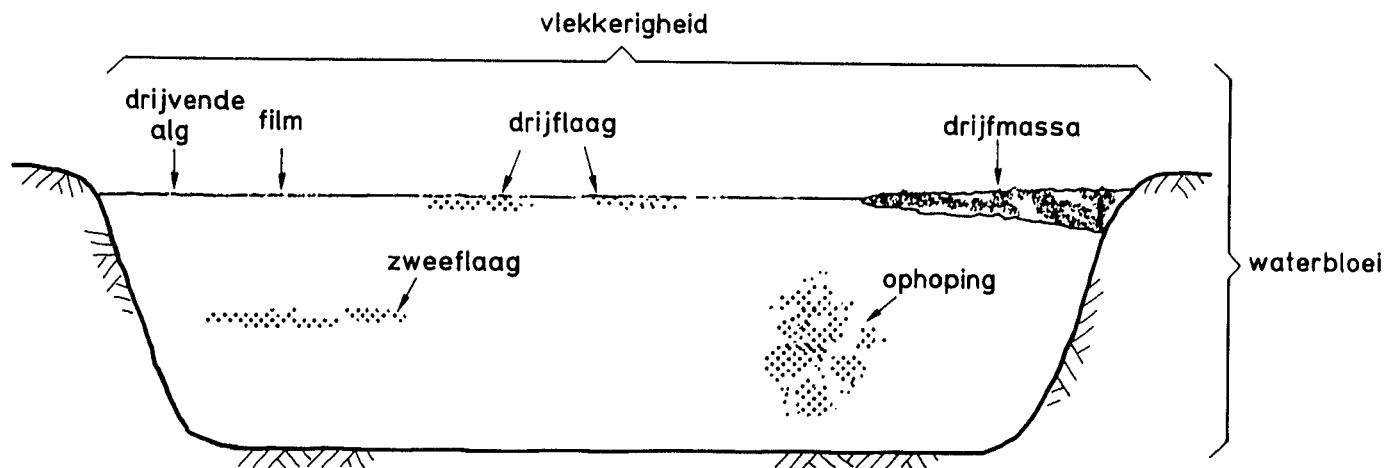
3.1 Terminologie

Een eenduidige allesomvattende terminologie waarmee de verschijnselen aangegeven kunnen worden die te zien zijn bij blauwwierbloei was niet beschikbaar bij de aanvang van dit onderzoek. In het hier beschreven onderzoek, waar gebruik gemaakt wordt van de interpretatie van luchtfoto's, van kwalitatieve en kwantitatieve waarnemingen in het veld en in het laboratorium, evenals van enquêteringen, zijn herkenning van objecten en verschijnselen alsmede klassificatie noodzakelijk. Het is dus van belang over een eenduidige terminologie te beschikken waarin en waarmee waarnemingen herkend en genoteerd kunnen worden. Een voorstel hiertoe werd gedaan door Jacobs & Donze (1986); dit wordt hier nader uitgewerkt.

De volgende aanduidingen worden gebruikt:

Vlekkerigheid, zie figuur 2 en 3a.

Algemene term voor inhomogeniteiten in de concentratieverdeling van chemische stoffen, deeltjes en micro-organismen in het water. Talrijke ontstaansmechanismen komen voor. In zijn algemeenheid wordt vlekkerigheid weer ongedaan gemaakt door turbulente menging. Turbulentie kan ook zelf "vlekjes" doen ontstaan van asymmetrische deeltjes.



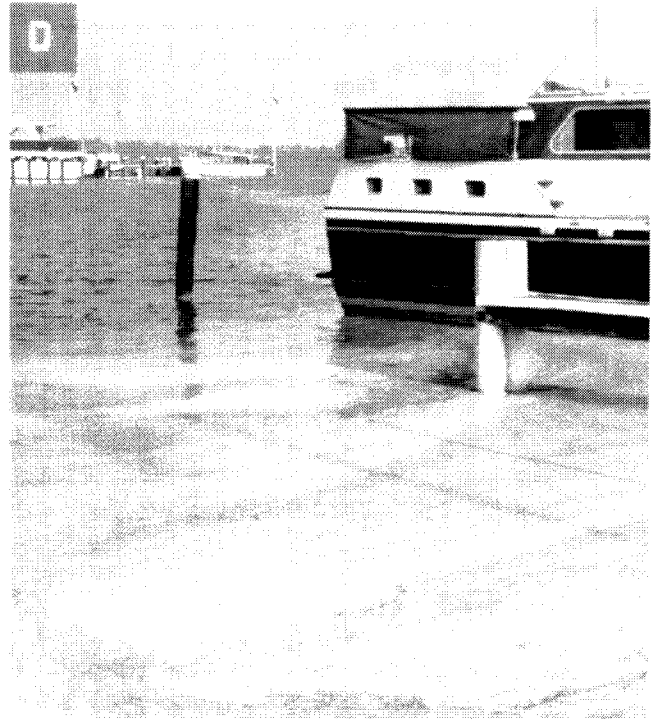
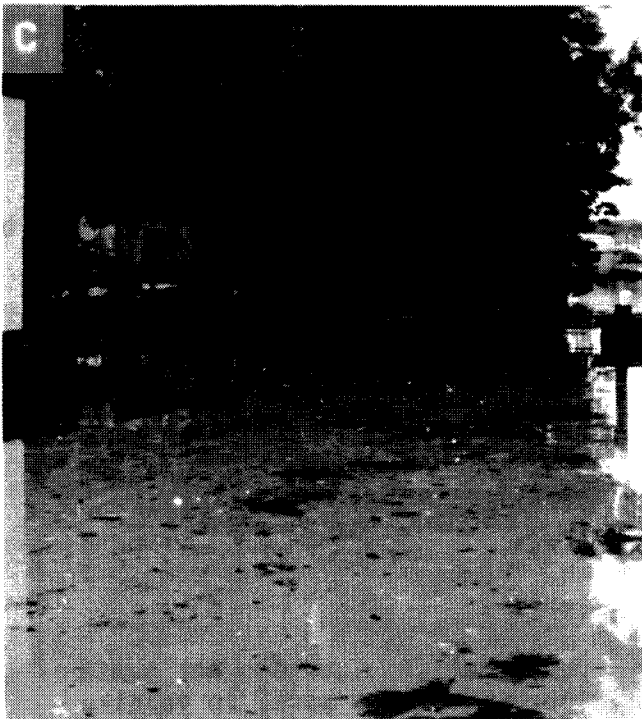
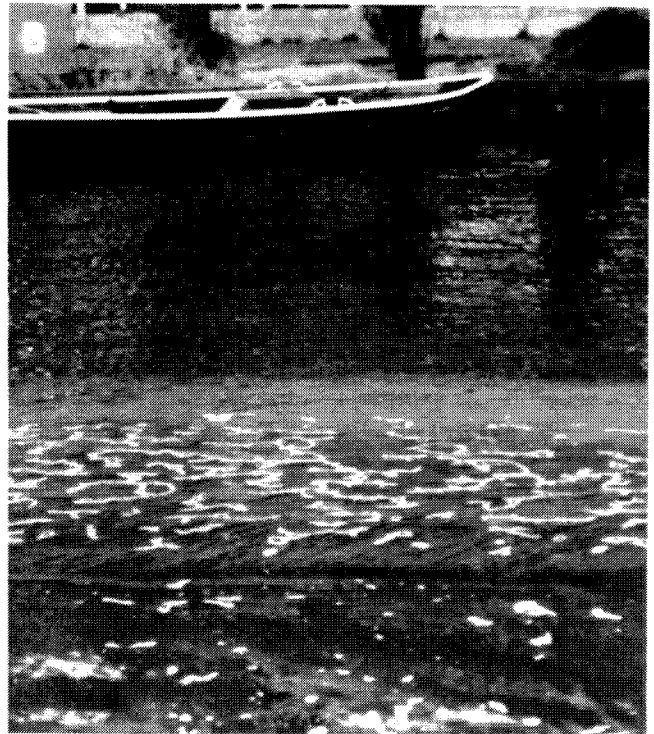
Figuur 2: Verschijningsvormen van algen.

Ophoping, zie figuur 2.

Een algemene benaming van lokaal hogere concentraties algen dan het gemiddelde in een meer, zonder veel structuur. Ophoping treedt zowel in verticale als in horizontale richting op. Concentratieverhogingen van een factor vijf ten opzichte van het gemiddelde zijn normaal.

Klont

Een massief bol- of worstvormig aggregaat van kolonies. Met een maximale



Figuur 3: Een aantal voorbeelden uit de terminologie. a. vlekkerigheid; b. film; c. drijfslag; d. drijfmasa.

afmeting van circa 4 cm werden deze in gevallen van extreem lage turbulentie waargenomen langs de Maas.

Waterbloei, zie figuur 2.

In strikte zin betekent deze term het zich aan het oppervlak verzamelen van microben; in het buitenwater zijn dit vooral blauwwieren. Bij het eutrofiëringsonderzoek is de term veralgemeeniseerd en vervaagd doordat deze synoniem geworden is met "veel algen", of ze drijven of niet. Hier wordt de oorspronkelijke betekenis gehandhaafd, waarbij de precisie vergroot wordt door een viertal nieuwe termen te gebruiken.

Drijvende algen, zie figuur 2.

Cellen, draadjes of kolonies van algen aan het wateroppervlak die daar langer verblijven dan door turbulentie alleen bepaald zou zijn, terwijl hun concentratie laag genoeg is om geen klontering te laten ontstaan, zodat geen opvallend, met het ongewapende oog waarneembare laag optreedt.

Film, zie figuur 2 en 3b.

Een laag blauwwieren ter dikte van één of hooguit enkele cellen aan het wateroppervlak, die gevormd kan worden door soorten die als solitaire cellen of individuele celdraadjes voorkomen. Een dergelijke film ontstaat slechts bij spiegelglad water; de film wordt reeds afgebroken door de turbulentie die met capillaire golven gepaard gaat. Deze eigenschap doet de film van blauwwieren verschillen van de levensgemeenschap die zich bij lagere turbulentie aan het wateroppervlak kan ontwikkelen en "neuston" genoemd wordt.

Drijfslaag, zie figuur 2 en 3c.

Een laag ter dikte van één of hooguit enkele kolonies aan of tegen het wateroppervlak en die 20% of meer van dat oppervlak bedekt; in het algemeen klonteren de kolonies in horizontale richting, zodat in deze richting zeer sterke vlekkerigheid optreedt. Capillaire golven hebben geen of weinig effect.

Drijfmassa, zie figuur 2 en 3d.

Een laag blauwwieren, die vooral door winddrift, maar ook bij gemalen en dergelijke, in horizontale richting ingedikt is tot een laag van enkele millimeters tot tientallen centimeters en vaak gekenmerkt wordt door anaërobie, met stankoverlast als gevolg. Drijfmassa vertoont de neiging bij stilstand te verbleken onder invloed van het zonlicht en vervolgens te gaan rotten met bruine, bruingrijze en helderblauwe verkleuringen. Afhankelijk van de voorgeschiedenis kan een onderscheid gemaakt worden in:

- primaire drijfmassa, rechtstreeks gevormd door opdrijven, transport en ophoping;
- secundaire drijfmassa, gevormd door op drift geraakte en vervolgens weer opgehoopte primaire drijfmassa.

Zweefslaag, zie figuur 2.

Een in verticale richting verhoogde concentratie algen nabij het wateroppervlak, bij de bodem, bij de thermocline of elders, maar niet aan of tegen

het wateroppervlak. Concentratieverhogingen van een factor vijf zijn normaal.

Van bovenaf gezien kan elk van de hierboven genoemde verschijnselen, of een willekeurige combinatie daarvan, bij een inhomogene distributie opgevat worden als vlekkerigheid.

3.2 Verschijningsvormen van drijfslagen

Visuele waarneming van drijfslagen

Bij het zien neemt het menselijk oog geïntegreerd een combinatie waar van verschillen in plaats, kleur en spiegeling. De interpretatie wordt, na een leerproces, door de hersenen ook op een geïntegreerde manier uitgevoerd. Bij de interpretatie wordt ook de snelheid waarmee een beeld verandert betrokken; golven op water en zwevende kolonies van Microcystis vormen goede voorbeelden. In het volgende wordt nader ingegaan op wat optisch en met instrumentele methoden van kolonievormende blauwwieren waargenomen kan worden.

Drijvende algen

Vanaf grote hoogte gezien zijn drijvende algen in twee klassen te verdelen:

1. Het volledige wateroppervlak is door de algen bedekt. In deze situatie wordt dus uitsluitend informatie over de optische eigenschappen van de algen verzameld; niets over hun concentratie dan een ondergrens die door 100% oppervlaktebedekking gegeven wordt. Biomassa-informatie zal onder deze omstandigheden uit meting van de laagdikte of andersoortige bemonstering in het veld verzameld moeten worden. Het feit dat alleen de algen gezien worden, maakt het mogelijk metingen vanuit de lucht te ijken tegen laboratoriummetingen aan monsters uit het veld. Tenslotte is het onder deze omstandigheden zonder meer mogelijk veranderingen in de pigmentsamenstelling van de algen te detecteren.
2. Een klein deel van het oppervlak wordt door de algen bezet. Het nabij-infrarood, waar het water zwart is, is dan het beste gebied om te kijken of te meten. Planten vertonen hier een hoge reflectie, die bij een aantal soorten blauwwieren nog eens versterkt wordt door de aanwezigheid van gasvesikels in de cellen. Het is niet bekend in hoeverre het bestaan van een meniscus, van een "deukje" in de oppervlakte van het water ter plekke van een drijvende algenkolonie de optische eigenschappen beïnvloedt. Er vanuitgaande dat de algenlaag overal even dik is mag verwacht worden dat in principe de algenbiomassa in eerste benadering te bepalen is.

Kleur van drijfslagen gezien vanaf grote hoogte

Bij gesloten drijfslagen en drijfmassa's in havens en langs oevers kunnen vanaf de wal en vanuit hogere positie tot en met een satelliet verschillende kleuren waargenomen worden. De meest naar de oever gelegen delen zijn vaak witachtig. Hier zijn de pigmenten uit de algen door het licht gebleekt

en/of biochemisch door autolyse en/of afbraak door bacteriën verwijderd. Door een scherpe grens hiervan gescheiden, wordt tegen de gebleekte gebieden vaak een strook heldergroene algen waargenomen; dit zijn wellicht fracties die juist zijn gearriveerd en zich beginnen op te hopen. Bij een naar de oever gerichte wind breiden de groene gebieden zich in de loop van een dag verder uit, waarbij enigszins menging op kan treden met de gebleekte laag. Uit de luchtopnamen wordt niet duidelijk of de mate van bleking met de tijd toeneemt.

In het open water worden eveneens drijfslagen waargenomen, die evenals in havens en dergelijke kleuren kunnen hebben variërend van heldergroen tot witachtig blauwgroen. Deze laatste kleurstelling wordt meestal aangetroffen als drijfslagen in banden voorkomen. Vermoedelijk is daar sprake van zogenaamde primaire drijfslagen die op drift geraakt is. Dit vermoeden wordt min of meer bevestigd doordat de banden met scherpe grenzen sterk contrasteren met hun omgeving en daardoor een hoge mate van stabiliteit suggereren. Drijfslagen kunnen ook in heldergroene banden voorkomen, met veel minder scherpe grenzen; deze banden zijn waarschijnlijk het gevolg van een horizontaal concentratiemechanisme.

Kleur en structuur van drijfslagen in het veld

Door waarnemingen in havens en door eenvoudige experimenten met blauwwiermassa is het mogelijk geworden het verloop van de verandering in kleur en structuur van stilstaande drijfslagen kwalitatief beter te beschrijven. De proeven bestonden uit het visueel volgen van de veranderingen die optreden in emmers met vers verzamelde, ingedikte Microcystismassa.

Een verse drijfslagen heeft aanvankelijk een heldere grasgroene kleur; doordat de drijfslagen voornamelijk bestaat uit kleine klontjes van circa 1 mm of kleiner is de structuur nog erg los. Zie figuur 4.

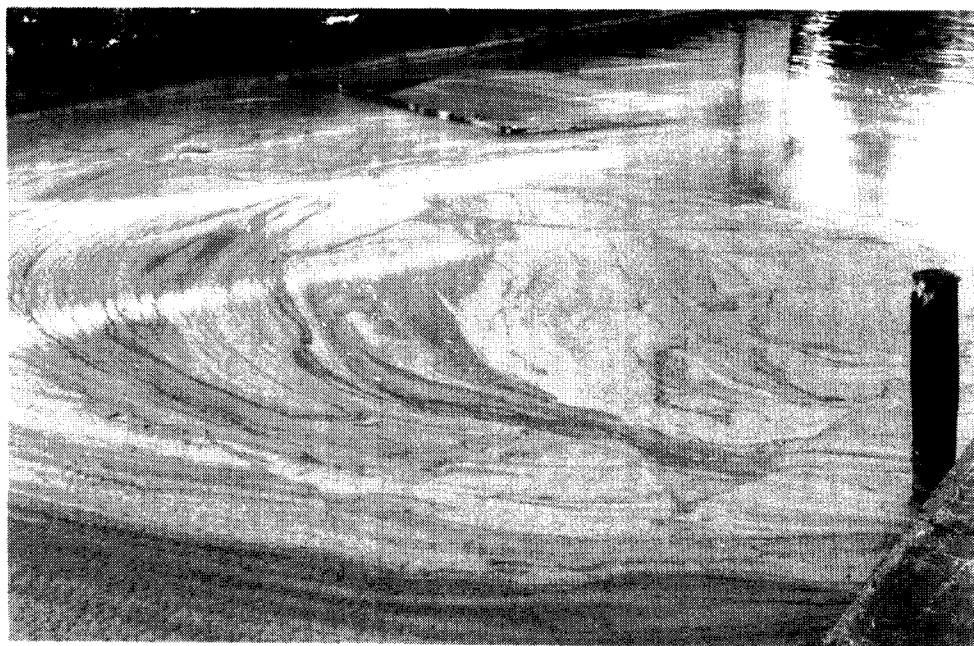
Afhankelijk van de intensiteit van het zonlicht kan reeds na enkele uren tot één dag een aanzienlijke verandering optreden in het uiterlijk van een drijfslagen. Door uitdroging en samenpakking van de kleine klontjes wordt de laag compacter en worden klontjes gevormd die groter zijn dan 1 mm. Het oppervlak krijgt een valse geelgroene kleur doordat de pigmenten uit de algen door het licht gebleekt worden. Hier is ook de uitdroging het sterkst en er ontstaat een structuur die het best omschreven kan worden als een "vel", ter dikte van 1 - 2 mm. Zie figuur 5.

Na één - twee dagen stilstand is de drijfslagen verder ingedikt en zijn grotere klonten ontstaan van 1 cm of meer. Het vel is verder gebleekt tot een witachtige grijsgroene kleur; doordat ook de uitdroging is toegenomen beginnen krimpscheuren op te treden en ziet het oppervlak eruit als "gebarsten kleigrond". In de scheuren is de onderliggende grasgroene drijfslagen zichtbaar.

Na twee - drie dagen kunnen de eerste verschijnselen van afbraak optreden. De restanten van het "vel" zijn verder gedroogd en gekrompen zodat de scheuren breder geworden zijn en een relatief groter oppervlak gaan innemen dan de restanten van het vel. De velresten zijn nu bruingrijs van kleur geworden, de scheuren voornamelijk lichtblauw. Het oppervlak kan in dit stadium goed vergeleken worden met de hoed van een knolzwam, zoals bijvoorbeeld van de welbekende vliegzwam. De blauwe kleur van de scheuren wordt veroorzaakt door phycocyaan, een fluorescerend pigment dat vrijkomt als



Figuur 4. Verse drijfmassa. De drijf laag is 1 - 2 cm dik.



Figuur 5. Drijfmassa in staat van ontbinding.

blauwwieren lyseren. Na ongeveer drie à vier dagen zijn ook de blauwgekleurde scheuren wat bleker geworden en ingedroogd, zodat een secundaire korst is ontstaan. Binnen de primaire scheuren ontstaan secundaire groene scheuren; de cyclus van uitdrogen en scheurvorming herhaalt zich blijkbaar. De oorspronkelijke velresten zijn wat donkerder geworden.

Vanaf dit stadium raakt de drijfmassa geïnfected door bacteriën (kolonievorming aan het oppervlak), schimmels en/of virussen, waardoor de massa in versneld tempo begint te rotten. Aan het oppervlak van de rottende en stinkende brij zijn twee fasen te onderscheiden: een vaste fase die bestaat uit restanten van de korst en die verkleurt van bruingrijs naar donkerbruin, en een vloeibare fase die voor een groot deel bestaat uit phycocyaan en losse gasvesikels, en een melkachtige blauwe kleur heeft. Deze laatste eigenaardige kleur wordt vooral veroorzaakt door de losse gasvesikels, die vrijkomen na lysis van de blauwwiercellen en het licht sterk verstrooien.

Na ongeveer één maand is de rottende drijfmassa sterk in volume afgenomen en worden geen groene blauwwiercellen meer waargenomen.

Bovenstaande beschrijving is van toepassing op een stilstaande drijfmassa die vrijwel dagelijks blootgesteld is aan een vrij intensieve zonbestraling. Bij ontbreken van zonlicht en bij enige mate van roeren treedt nauwelijks bleking en/of uitdroging op. Hoewel een vertraging van ongeveer 10 à 14 dagen optreedt, vindt wel afbraak binnen de drijfmassa plaats, vermoedelijk geïnitieerd door infectie met bacteriën, schimmels en/of virussen, in combinatie met relatief hoge temperaturen en blootstelling aan de lucht. Dit vermoeden wordt bevestigd door de constatering dat Microcystis massa, bewaard bij 2 °C in een afgesloten donker vat, na een jaar nog steeds heldergroen van kleur was en geen enkel spoor van afbraak vertoonde.

Tijdens het onderzoek bleek de opgezette terminologie nuttig voor onderlinge communicatie, vooral voor de planning van experimenten als functie van de weersverwachting. Ook in combinatie met foto's in gesprekken met derden, zoals havenmeesters en sluiswachters, was de terminologie zinvol en bruikbaar.

4 DYNAMIEK VAN DRIJFLAGEN

4.1 Algemeen

De horizontale verdeling van drijfslagen en daarmee de overlast wordt in hoge mate bepaald door een combinatie van een aantal verticale en horizontale hydrodynamische concentratie- en transportmechanismen waaraan blauwvieren onderworpen zijn: de "dynamiek van drijfslagen".

Hoewel horizontale distributiepatronen beïnvloed kunnen worden door fysische, chemische en biologische factoren, wordt toch de grote heterogeniteit in de meeste meren veroorzaakt door wind-geïnduceerde circulatiepatronen. Het directe effect van wind op de verdeling van fytoplankton werd al vermeld door Verduin (1951) en uitgebreid besproken in Reynolds (1984). Een kwantitatieve evaluatie van windeffecten op de verdeling van oppervlaktechlorofyl werd gegeven door Small (1963). Colebrook (1960) bewees de invloed van interne seiches (slingeringen) op de horizontale verdeling van zoöplankton, in Windermere. George & Edwards (1976) toonden eveneens de invloed van wind aan op de horizontale en verticale verdeling van chlorofyl-a en zoöplankton en waren tevens in staat met een empirisch model gemiddelde concentraties van blauwvieren aan lager wal redelijk te voorspellen in Eglwys Nynydd, een reservoir van een vierkante kilometer in Zuid-Wales.

In het kader van dit STORA-onderzoek is de dynamiek van drijfslagen vanuit de lucht en in het veld bestudeerd. In de hierna volgende paragrafen worden de resultaten kort samengevat.

4.2 Concentratie-mechanismen

Vertikale concentratiemechanismen

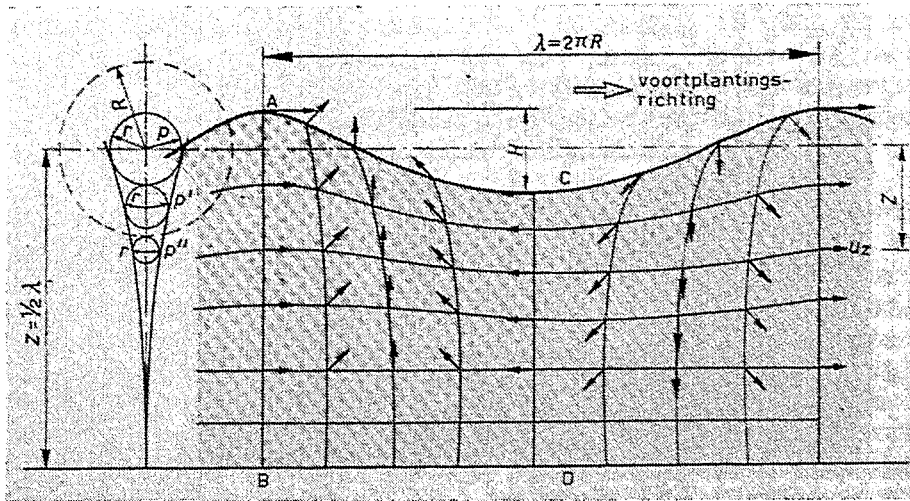
Vertikale concentratieverschillen ontstaan door de fysiologisch bepaalde variatie van het soortelijk gewicht van de kolonies, als gevolg van de wet van Stokes door de koloniegrootteverdeling en door de hydrodynamische variatie van hun omgeving. Doordat het soortelijk gewicht van de kolonievormende blauwvieren rond dat van water schommelt, kunnen deze zowel drijven, zweven als zinken, terwijl de deeltjes groot genoeg zijn om een behoorlijke verticale snelheid te ontwikkelen. Opwaartse en neerwaartse snelheden van 1 meter per uur werden tijdens experimenten waargenomen. Hierbij is in het algemeen geen sprake van een uniforme snelheid, waarmee de kolonies opdrijven, maar van een frequentieverdeling van snelheden, veroorzaakt door variaties in grootte en soortelijke massa van de kolonies.

Het soortelijk gewicht is afhankelijk van de fysische en chemische omgeving: vooral lichtintensiteit en nutriëntenbeschikbaarheid zijn belangrijk. In hetzelfde monster worden meestal zowel drijvende als zinkende kolonies aangetroffen. In hoeverre dit een verschil is dat ontstaat doordat deze kolonies een verschillende herkomst hebben, of doordat ze anderszins van aard verschillen, is onbekend. Het soortelijk gewicht van de algen daalt met toenemende concentratie aan gasvesikels; deze concentratie stijgt als de synthese sneller is dan de groei van de algen. Het soortelijk gewicht stijgt bij vorming van zetmeel en polyfosfaat. De afhankelijkheid van de lichtintensiteit induceert een periodiciteit over het etmaal. Alle processen die het soortelijk gewicht doen stijgen, hangen af van het licht en van nutriëntenvoorziening. Er zijn dus redenen om aan te nemen dat juist onder "gebreksomstandigheden" drijfslagen optreden: wanneer de cellen "ziek" zijn

en niet meer in staat tot regulatie van het soortelijk gewicht. Schade door overmatig zonlicht kan sterven en rotting bespoedigen.

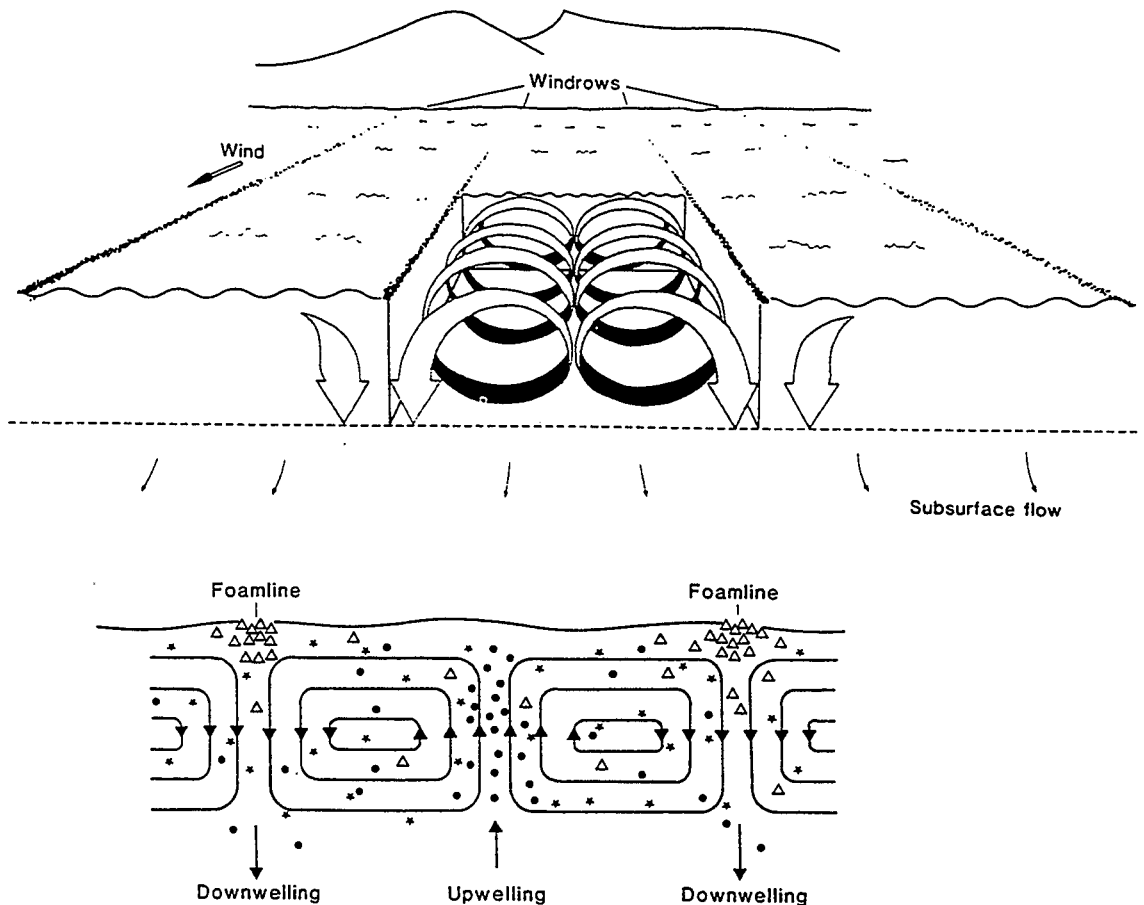
In verticale richting kunnen vier concentratiemechanismen onderscheiden worden:

1. Door bezinken op de bodem in een hoeveelheid die naar verwachting evenredig is met het gehalte in het beschouwde volume water en met het percentage zinkende kolonies.
2. Door stijgen naar het oppervlak, waarvoor in principe hetzelfde verband geldt als hierboven voor bezinken. Wanneer in de diepte ontstane ophopingen weer gaan drijven, kan in een dieper deel van een meer een hogere concentratie aan het oppervlak verwacht worden. In het algemeen doet aan het oppervlak de turbulentie haar invloed gelden. Deze wordt veroorzaakt door de overdracht van windenergie langs het wateroppervlak. Hierdoor ontstaan golven, die gepaard gaan met orbitaalbewegingen onder de waterspiegel (figuur 6). Op een diepte z gelijk aan de halve golflengte is geen invloed van de golfbeweging meer merkbaar.



Figuur 6. Orbitaalbeweging onder de waterspiegel ten gevolge van wind. z = waterdiepte (m), λ = golflengte (m), H = golfhoogte (m), u_z = snelheid van een (water)deeltje op diepte z ($m \cdot s^{-1}$), de pijltjes geven de snelheidsrichting weer op tijdstip t (Nortier & van der Velde, 1971).

Daarnaast kunnen Langmuir-circulaties ontstaan, gekenmerkt door het optreden van schuimstrepen op het wateroppervlak, evenwijdig aan de heersende windrichting (figuur 7). De met deze fenomenen gepaard gaande wervelingen kunnen in de bovenste zone van de waterkolom menging van blauwwieren veroorzaken, omdat de optredende verticale snelheidscomponenten groter worden dan de flotatiesnelheden van de kolonies. Door deze menging wordt de vorming van drijfslagen geremd, maar wel kan een hogere concentratie algen zich in de bovenste waterlaag handhaven. Langmuir-



Figuur 7: Langmuir-circulatie, met de waarschijnlijke verdeling van sterk zinkende (stip), sterk oprijvende (open driehoek) en zwevende deeltjes (ster) (Reynolds, 1984).

circulatie zou ook aanleiding kunnen geven tot het vormen van strepen evenwijdig met de wind. Dit is in zoete wateren noch waargenomen noch theoretisch onderzocht. Luchtfoto's van de Noordzee tonen dit effect wel voor hoge populatiedichtheden van zeevonk. Uit recent onderzoek door het RIZA, het KNMI en de TUD met behulp van de NOAA-satelliet aan drijfvlagen op het IJsselmeer bleek dat deze weggeroerd worden bij windsnelheden groter dan $3 \text{ tot } 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Beneden deze windsnelheden kan drijfslagvorming optreden.

3. Door "plakken" van de kolonies aan de oppervlaktetension van het water.
4. Door "plakken" van levende aan dode kolonies, zie ook: horizontale concentratiemechanismen.

De hoeveelheid algen direct aan het wateroppervlak wordt bepaald door de concentratie in het water en de verblijfstijd aan het oppervlak. De verblijfstijd aan het oppervlak wordt verkort door verhoging van het soorte-

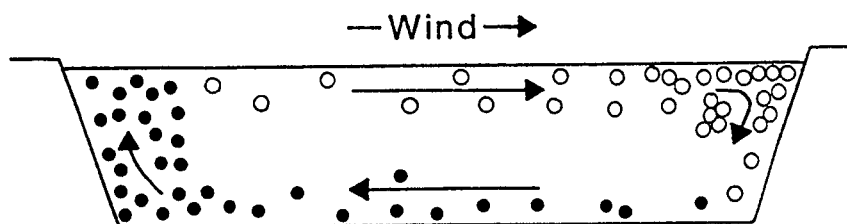
lijk gewicht en turbulentie, en verlengd door de "plak"-mechanismen genoemd onder 3 en 4.

Met zinkende algen kan, *mutatis mutandis*, hetzelfde aan de bodem gebeuren. 's Winters kan zich daar de gehele biomassa van Microcystis bevinden. Tijdens het groeiseizoen is niet bekend welke fracties van deze soort zich op de bodem, in het water of aan het wateroppervlak bevinden.

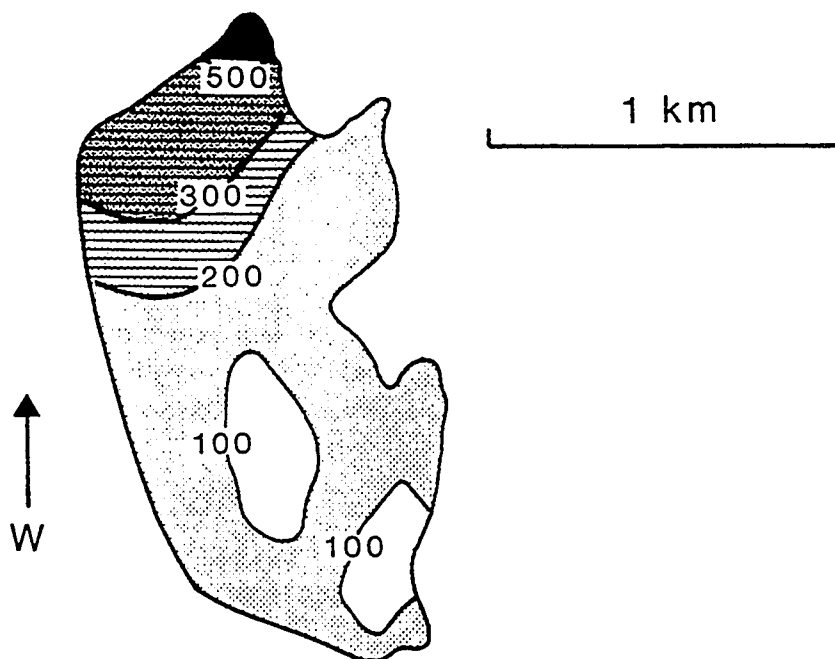
Horizontale concentratiemechanismen

Vertikaal concentratieverschil is een eerste voorwaarde voor het optreden van een verder concentratiemechanisme in horizontale richting. Een tweede voorwaarde is dat transport in horizontale richting plaatsvindt. In horizontale richting zijn dan drie concentratiemechanismen te onderscheiden:

1. Door opstuwung van drijvende kolonies onder invloed van wind. Hierdoor treedt transport op langs het wateroppervlak (winddrift) en vindt een toename van concentratie plaats doordat kolonies met hoge snelheden langzamer kolonies inhalen en verzamelen. Waarschijnlijk is dit mechanisme er de oorzaak van dat drijfvlagen vaak in "banden" aangetroffen worden. Boven een windsnelheid van 3 tot 6 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ treedt dit mechanisme niet meer op; de turbulentie in de bovenste waterlaag is dan zo hoog dat de kolonies niet meer kunnen opdrijven, doch over een groot deel van de waterkolom gemengd worden. Ook reeds aanwezige c.q. eerder gevormde drijfvlagen zullen hierdoor aan het wateroppervlak onttrokken worden.
2. Door verzet van drijvende kolonies tegen neerwaartse stroming. In het geval van winddrift treedt transport van de bovenste waterlaag op in de richting van de aan lager wal gelegen oever. Hier aangekomen duikt de stroom naar de bodem en keert van richting om. Door opdrijven tegen deze stroming in neemt de concentratie aan blauwwierkolonies toe. Door stroomvertraging en vermindering van turbulentie wordt het opdrijven bevorderd, waardoor versterking van het concentratiemechanisme optreedt. Dit mechanisme werd voor het eerst beschreven door George & Edwards (1976). Het werd door hen aangeduid als het "transportband-model", weergegeven in figuur 8.



Figuur 8. Horizontaal concentratiemechanisme, het transportbandmodel van George & Edwards (1976). Dichte stip: sterk zinkend deeltje, open stip: sterk opdrijvend deeltje.



Figuur 9. Horizontale ophoping van Microcystis in het reservoir te Eglwys Nynydd (Zuid-Wales). W = windrichting. Isopleten in $\mu\text{g chlorofyl-a} \cdot \text{l}^{-1}$ aan het oppervlak (Reynolds, 1984).

Figuur 9 toont een duidelijk voorbeeld van ophoping van Microcystis als gevolg van dit door wind geïnduceerde horizontale concentratiemechanisme.

3. Door stagnatie van transport langs het oppervlak. Onder invloed van door wind geïnduceerde stromingen kunnen drijfslagen zich langs oevers verplaatsen en havens binnendrijven. In havens, achter pieren en dergelijke, nemen de concentraties toe, doordat op zulke plaatsen het transport stagneert en de lokale turbulentie veel lager is. Dit mechanisme onderscheidt zich van het tweede mechanisme doordat hier sprake is van bijzondere gevallen van driftstroming. Er treedt wel stroming langs het oppervlak op onder invloed van de wind, maar de richtingscomponenten worden hier bepaald door de geometrie van de omgeving en de momentane windrichting.

In het eenvoudigste geval, waarbij alleen sprake is van door wind geïnduceerde stromingen (winddrift), kan aan lager wal een extreem hoge ophoping ontstaan wanneer de stijgsnelheid van de algen hoger is dan de neerwaartse gang van het water. Dit blijkt onder andere uit het feit dat drijfslagen steeds worden gezien aan de kust op de oevers waarheen de wind waait. Het mechanisme dat in havens, achter pieren en dergelijke optreedt, blijkt bijvoorbeeld in het Brielse Meer, waarvan bekend is dat middenop het meer de kolonies vrijwel steeds homogeen over de diepte verdeeld zijn (Kappers, 1984), terwijl in de havens vaak drijfslagen gesignaleerd worden.

Tenslotte treden nog twee elkaar versterkende mechanismen op wanneer

eenmaal een ophoping ontstaan is: de individuele kolonies gaan aan elkaar koeken. In deze toestand gaat de gevormde drijfslag rotten en stinken. Bij drijfslagen van enige dikte zullen bovendien de meer naar onder gelegen kolonies zich in het donker bevinden, waardoor de lichtafhankelijke neiging om te gaan zinken niet meer kan optreden.

Na lysis van blauwwiercellen komen de gasvesikels vrij; vermoedelijk blijven deze nog langere tijd intact en aan de massa kleven. Het drijfvermogen van de blauwwiermassa blijft hierdoor eveneens intact.

4.3 Snelheid en richting van het transport

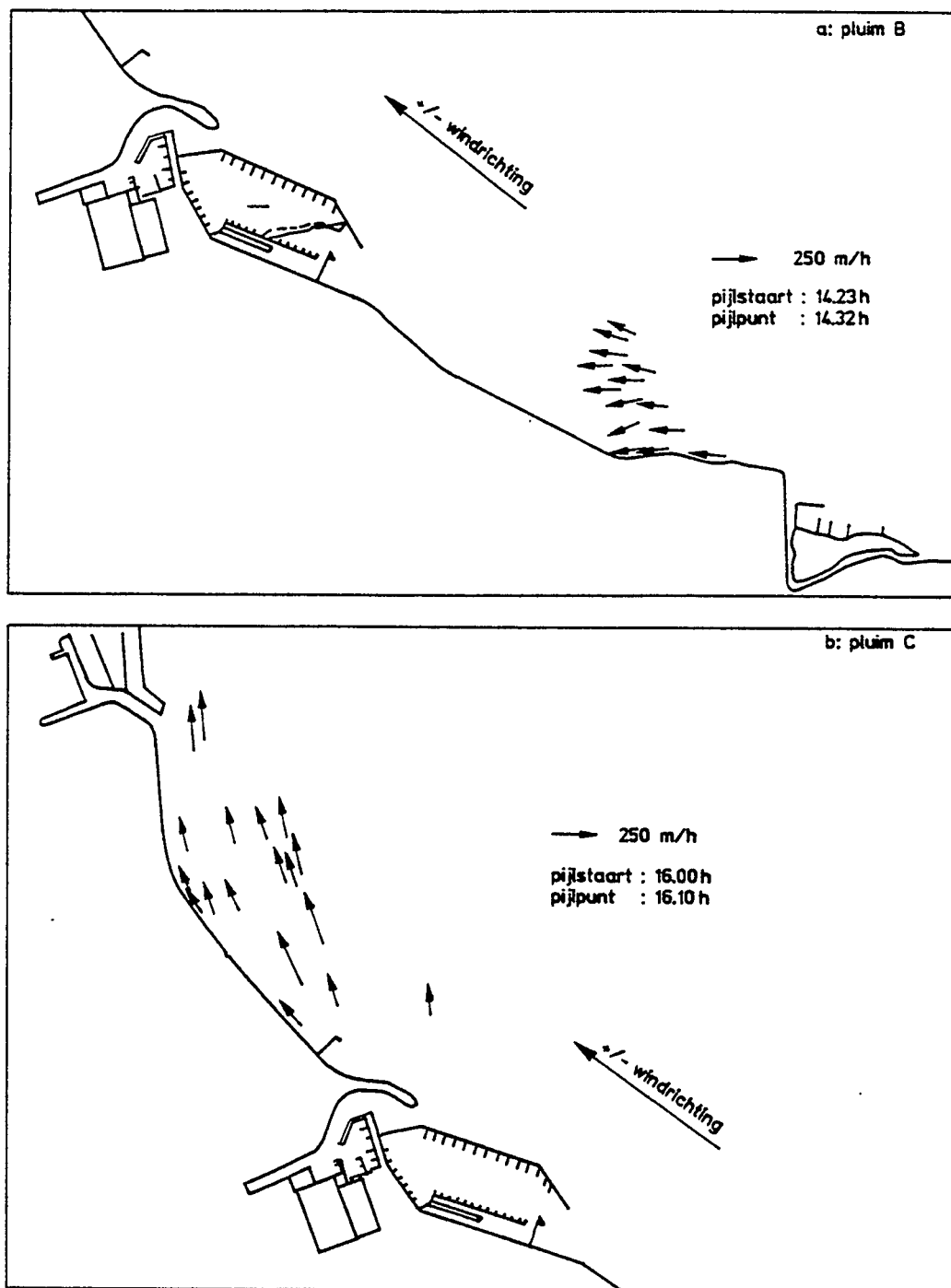
Een term die in de literatuur vaak gehanteerd wordt om de door wind geïnduceerde oppervlaktestroming te kwantificeren is de zogenaamde windfactor. Deze is gedefinieerd als de verhouding tussen de stroomsnelheid aan het oppervlak en de windsnelheid, en meestal gegeven in procenten. Veelal worden waarden van 1 à 3% gehanteerd (Tsahalis, 1979). Figuur 10 toont transportsnelheden en richtingen van drijfslagen, afgeleid uit een serie luchtopnamen van de noordelijke oever van het Braassemermeer. Uit deze resultaten kon afgeleid worden dat de "windfactor voor drijfslagen" varieert van 1 tot 4%, consistent met de literatuur. Hiermee worden in eerste benadering de grenzen vastgelegd van de snelheden waarbinnen transportprocessen van drijfslagen verlopen.

De geconstateerde snelheden waarmee drijfslagen zich verplaatsen zijn relatief hoog; bij een windsnelheid van $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en een windfactor van gemiddeld 2.5% verplaatsen de lagen zich met een snelheid van $180 \text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$. De geconstateerde grote tijdsafhankelijke variaties in chlorofylconcentraties zijn ongetwijfeld vaak het gevolg van de snelle verplaatsingen van drijfslagen en het gemengde gedeelte van de waterkolom daaronder.

Een beschouwing over transportsnelheden bij hogere windsnelheden lijkt overbodig. Haines & Bryson (1961) en George & Edwards (1976) namen waar dat de windfactor sterk afnam bij windsnelheden groter dan 5 tot $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; dit is de overgang van een hydrodynamisch glad naar een hydrodynamisch ruw oppervlak. Deze afname van de windfactor wordt theoretisch verklaard door aan te nemen dat bij hoge turbulentie een groot gedeelte van de windenergie over de waterkolom gedissipeerd wordt in golven en orbitaalbeweging. Dit betekent verlies van impuls in horizontale richting en slechts een gering horizontaal transport door golven. Deze zienswijze is tevens consistent met het feit dat ook de drijfslagen bij deze en hogere windkracht verdwijnen.

De afname van de windfactor bij hoge windsnelheden betekent dat horizontale transportsnelheden onder invloed van winddrift wel eens lager kunnen zijn dan bij lage windsnelheden. Gecombineerd met het feit dat bij hoge turbulentie minder of helemaal geen vorming van drijfslagen kan optreden, leidt dit tot de conclusie dat er dan ook weinig netto transport van blauwwieren is. Voorlopig wordt aangenomen dat transport alleen van belang is onder invloed van driftstroming, langs het wateroppervlak en bij lage windsnelheden.

Uit luchtfoto's blijkt dat de drijfslagen bewegen met richtingscomponenten die, naarmate de oever dichterbij genaderd wordt, meer parallel met de oever gaan lopen dan met de windrichting. Dit houdt in dat drijfslagen, na het bereiken van een oever, langs deze oever verder getransporteerd worden en



Figuur 10. Transportsnelheden en -richtingen van drijfslagen, afgeleid uit luchtfoto's.

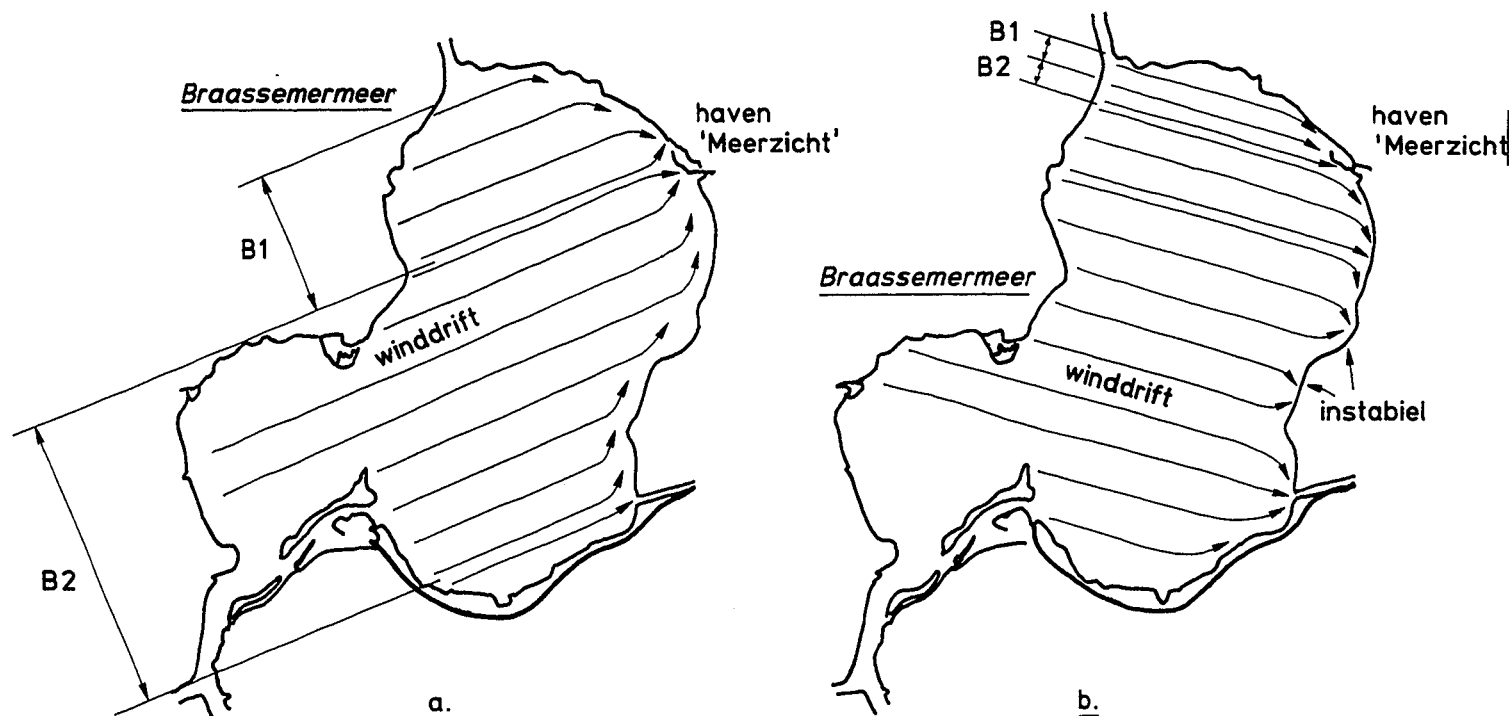
dat ze voornamelijk meegevoerd worden door de oppervlaktestroming en niet of weinig beïnvloed worden door de momentane windsituatie. Een meer uitgebreide verzameling illustraties met luchtfoto's en satellietopnames is gegeven door van Stokkom & Donze (1988). Donze et al. (1990) laten zien dat de opstuwing door wind langs de kust eveneens een rol speelt bij de hinderlijke ophoping van algen in de Adriatische zee.

4.4 Aanvoer- en ophopingsmechanismen

In het hiernavolgende wordt met bovenbeschreven resultaten meer kwantitatief beschreven hoe drijfslagen vanuit een meer aangevoerd worden en zich ophopen in een haven. Hierbij wordt als lokatie van ophoping een haven beschouwd omdat daar in het algemeen de grootste overlast door drijfslagen wordt ondervonden. Er wordt een onderscheid gemaakt tussen aanvoer vanuit het meer naar de haven toe en ophoping in de haven zelf (als er algen binnengedreven zijn). Onder ophoping wordt in dit verband verstaan "het accumuleren van drijfslagen".

Aanvoer vanuit het meer

Microcystis vormt drijfslagen bij lage turbulentie, waarbij de concentratie aan het wateroppervlak het hoogst is. Bij windsnelheden kleiner dan 3 tot 5 $m*s^{-1}$ treedt een aanzienlijk transport langs het wateroppervlak op, met snelheden van circa 2.5% van de windsnelheid. Bij windsnelheden groter dan 5 tot 6 $m*s^{-1}$ neemt dit transport als gevolg van turbulentie af. De mate van aanvoer is afhankelijk van de windrichting bij een overigens gelijkblijvende windsnelheid. Onder aanname van aanvoer door winddrift wordt dit als volgt verklaard. Als de wind gedurende enige tijd dezelfde richting en snelheid heeft, kan een drijvende kolonie Microcystis onder invloed van winddrift het meer oversteken. Bij de oever aangekomen, beweegt de kolonie zich langs de oever. Deze beweging zal voortduren totdat bijvoorbeeld een havenmond bereikt wordt en de kolonie binnendrijft. Het mechanisme wordt geïllustreerd in figuur 11.



Figuur 11. Drijfslagtransport naar jachthaven "Meerzicht" door driftstroming als functie van de windrichting.

Alle kolonies die zich in een gebied met een zekere breedte B1, respectievelijk B2, bevinden, komen na verloop van tijd in de buiten-, respectievelijk binnenhaven van "Meerzicht" terecht. De grootte van B1, respectievelijk B2, bepaalt de mate van aanvoer. Bij vergelijking van figuur 11a met figuur 11b blijkt dat de breedtes B1 en B2, en daarmee de aanvoer van Microcystis sterk afhankelijk zijn van de windrichting. De geometrie van het meer en van de toegang tot een havenmond c.q. opening bepaalt uit welk deel van een meer de aanvoer van Microcystis bij een bepaalde windrichting komt.

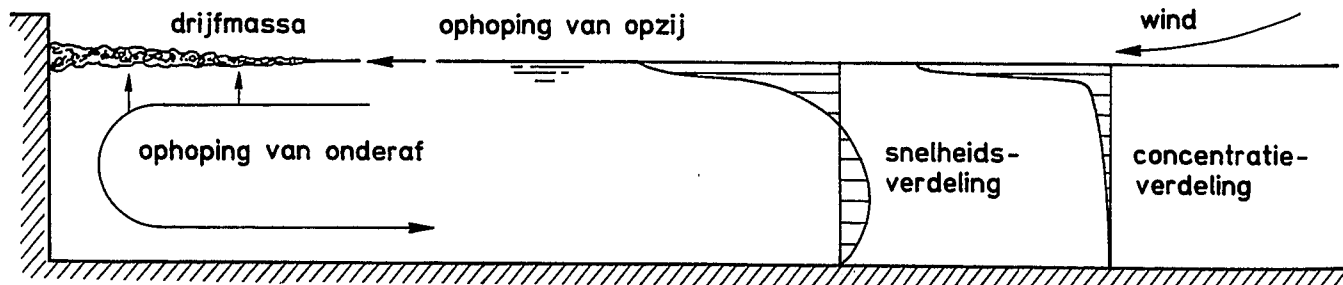
De aanvoer van Microcystis wordt mede bepaald door de dikte waarmee een gevormde drijfslaag aangevoerd wordt. Door "aangroei" van onder af zal deze aangroei evenredig zijn met de tijd waarin de drijfslaag onderweg is.

Resumerend verloopt de aanvoer vanuit een meer naar een haven als volgt:

- drijfslaagvorming treedt op bij windsnelheden kleiner dan $3 - 5 \text{ m*s}^{-1}$;
- transport van drijfslagen treedt voornamelijk op langs het wateroppervlak onder invloed van winddrift en bij windsnelheden kleiner dan $5 - 6 \text{ m*s}^{-1}$;
- de grootte van aanvoer naar een opening of haven is afhankelijk van:
 - * windrichting en windsnelheid
 - * de dikte van de drijfslaag c.q. de "aangroei" onderweg
 - * de geometrie van meer en haventoeegang.

Ophoping in een haven

Eenmaal binnengedreven, zal een drijfslaag zich door lokale winddrift naar dode hoeken bewegen, waarbij het nieuw aangevoerde materiaal het oude opstuwt. Omdat geen accumulatie van water op kan treden, zal de stroming bij de wal van richting moeten veranderen en omkeren. Door de hiermee gepaardgaande stroomvertraging en vermindering van turbulentie hopen de drijfslagen zich op en kunnen tevens algen, die zich op grotere diepte bevinden, opdrijven. Deze processen worden schematisch samengevat in figuur 12.



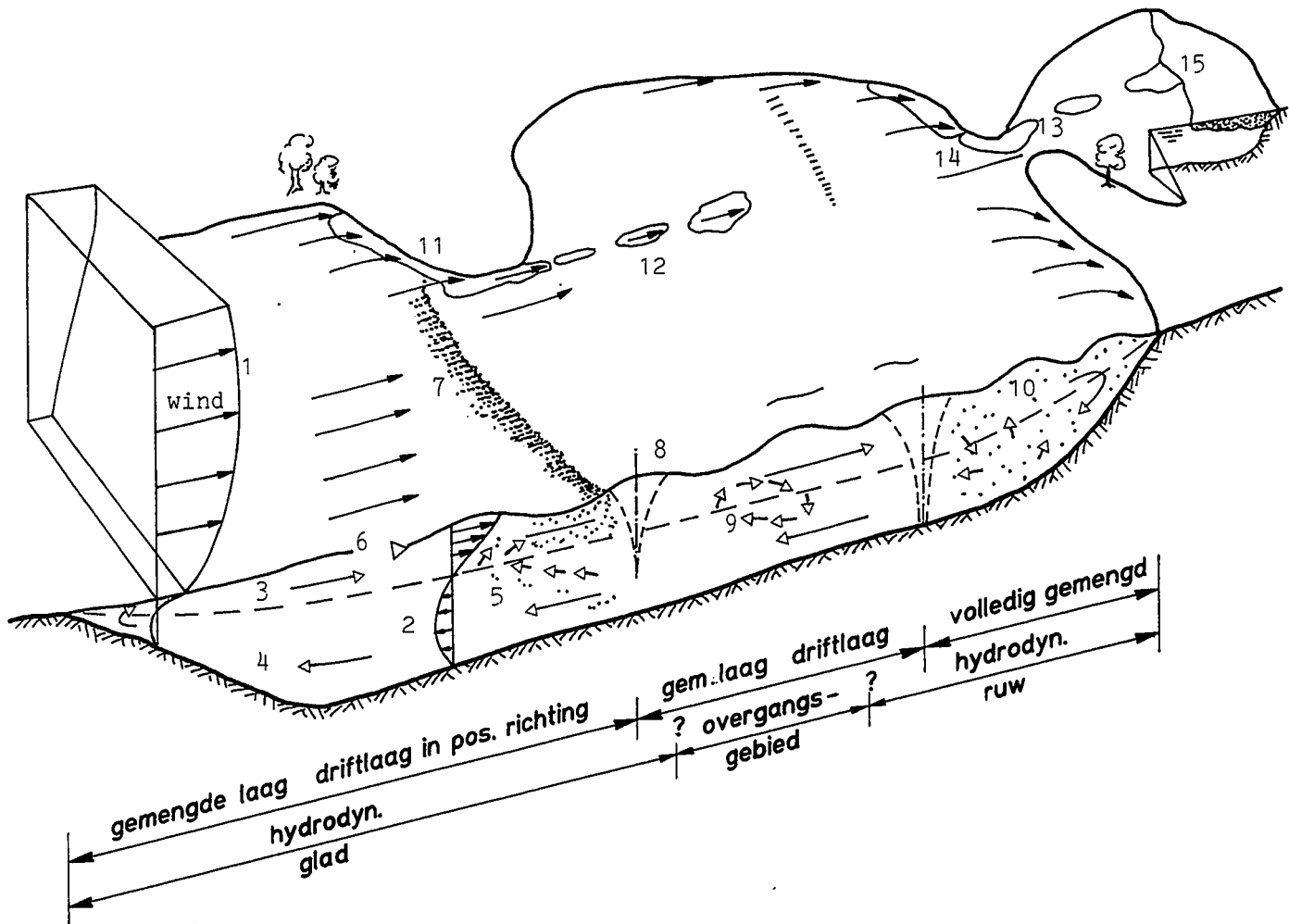
Figuur 12. Ophoping van drijfslagen in een haven.

Er is sprake van ophoping "van opzij" en van ophoping "van onder af". Waarnemingen hebben aangetoond dat de horizontale snelheid aan het wateroppervlak een factor 3 groter kan zijn dan juist onder het oppervlak, de

concentraties een factor 10.000. Omdat de ophopingssnelheid evenredig is met snelheid maal concentratie, moet aangenomen worden dat ophoping van opzij vele malen (30.000 maal) groter is dan ophoping van onder af. In kwantitatieve zin is dit laatste ophopingsmechanisme dus te verwaarlozen.

Doordat kolonies aan elkaar gaan kleven, wordt een drijfslag stabiel en minder gevoelig voor kleine lokale reststromen. Doordat tevens de strijklengte (door de wind beïnvloede deel van het wateroppervlak) in een haven gering is en de ligging veelal beschermd, is de kans dat eenmaal in een haven binnengedreven drijfslagen weer afgevoerd worden, gering. De haven fungeert als een fuik voor drijfslagen. In figuur 13 wordt een totaalbeeld gegeven van de diverse aspecten die bij de dynamiek van drijfslagen een rol spelen.

Uit de hierboven gegeven beschrijving van de dynamiek van drijfslagen kan voor vrijwel iedere willekeurige lokatie afgeleid worden onder welke omstandigheden en in welke mate overlast door drijfslagen optreedt. Deze basisbeschrijving vormt het uitgangspunt voor de hiernavolgende hoofdstukken.



Figuur 13. Totaalbeeld van aspecten die een rol spelen bij de dynamiek van drijfslagen

1. Windsnelheidsprofiel.
2. Vertikaal snelheidsprofiel.
3. Driftstroming; bovenste deel waterkolom.
4. Retourstroming; onderste deel waterkolom.
5. Opdrijven blauwwierkolonies.
6. Oppervlaktetransport.
7. Horizontaal concentratiemechanisme: bandvorming.
8. Orbitaalbeweging door golven.
9. Menging kolonies door orbitaalbeweging.
10. Volledige menging bij grote strijklengte; omkeren van driftstroming.
11. Ophopen van drijfslagen langs oevers: vorming primaire drijfslagen; richtingscomponent oppervlaktetransport evenwijdig aan oever.
12. Op drift raken van primaire drijfslagen.
13. Havenmond.
14. Ophopen van drijfslagen en primaire drijfslagen; invangen door haven.
15. Vorming secundaire drijfslagen.

5 MODELLERING VAN AANVOER EN OPHOPING

5.1 Algemeen

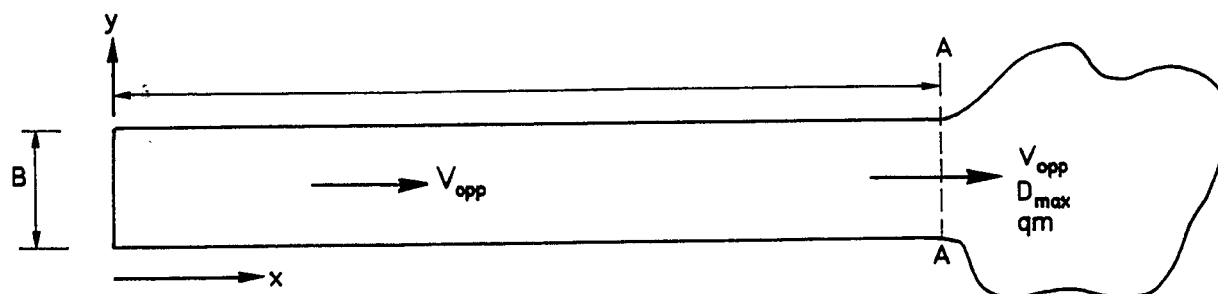
In het voorgaande is de behoefte aangeduid aan meer precisie in hoeveelheden en mate van ophoping van drijfslagen gedurende het seizoen. Het frequent uitvoeren van bemonsteringstochten en remote-sensing geven slechts de actuele situatie en bezitten nauwelijks enige voorspellende waarde. Hier wordt een aanzet gegeven voor een modelmatige beschrijving van aanvoer- en ophopingsmechanismen van drijfslagen waarmee voor een willekeurige lokatie op eenvoudige wijze voorspellingen gedaan kunnen worden over de vorming van drijfmasa. Uitgangspunt is de dynamiek van drijfslagen zoals beschreven in hoofdstuk 4.

5.2 Modellering

Om berekening van aanvoersnelheden mogelijk te maken of te vereenvoudigen wordt een aantal aannamen gedaan:

Bij de aanvoer van een drijfslaag door een verticale doorsnede:

- AANNAME 1: de windrichting is constant gedurende een periode dP .
- AANNAME 2: de windsnelheid is constant gedurende een periode dP .
- AANNAME 3: de breedte B (zie figuur 14) is constant.



Figuur 14: Drijfslaagaanvoer door een verticale doorsnede.

- AANNAME 4: het transport van Microcystis vindt alleen plaats langs het oppervlak.
- AANNAME 5: interceptie van drijfslagen treedt alleen op in haventoeengangen of andere inhammen, maar niet langs oevers.

Aannamen 1 en 2 houden in dat de snelheid aan het oppervlak V_{opp} na enige tijd niet meer zal variëren met de tijd, maar nog wel met de plaats:

$$V_{opp} = f(x, y).$$

Om dit te elimineren wordt nog een aanname geïntroduceerd.

- AANNAME 6: de snelheid aan het oppervlak V_{opp} is constant met de plaats gedurende een periode dP .

Per tijdseenheid zal nu door doorsnede A-A van figuur 14 een transport van Microcystis optreden ter grootte van:

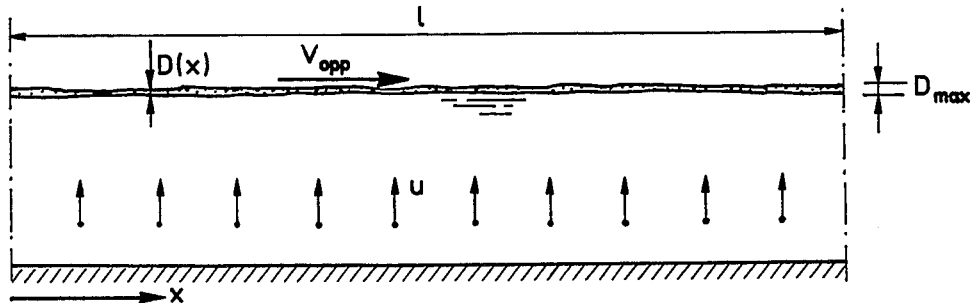
$$Q_M = V_{opp} * A_{drijfslaag} = V_{opp} * B * D_{max} \quad (1)$$

Hierin is

$A_{drijfslaag}$: het oppervlak van een verticale doorsnede over de drijf-
laag ter plaatse van doorsnede A-A
 D_{max} : drijfslaagdikte in doorsnede A-A

Bij de aangroei van de drijfslaag.

D_{max} bepaalt de grootte van de aanvoer. De grootte van D_{max} is nog niet bepaald. In figuur 15 is de drijfslaagdikte aangegeven met $D(x)$.



Figuur 15. Schematische weergave van de toename van de dikte van een drijfslaag.

Deze dikte zal bij transport van de drijfslaag langs het wateroppervlak aangroeien door opdrijvende kolonies Microcystis. De grootte van de aangroeisnelheid μ is niet bekend. Daarom:

AANNAME 7: de aangroeisnelheid μ van een drijfslaag is constant naar plaats en tijd.

Nu geldt:

$$dD \cdot (dt)^{-1} = \mu, \text{ ofwel } dD = \mu \cdot dt$$

Tevens geldt:

$$V_{opp} = dx \cdot (dt)^{-1}, \text{ ofwel } dt = dx \cdot V_{opp}^{-1}$$

$$\text{Gecombineerd levert dit: } dD = \mu \cdot dx \cdot V_{opp}^{-1}$$

Deze differentiaalvergelijking is op te lossen wanneer de randvoorwaarden bekend zijn, bijvoorbeeld $D = D_0$ voor $x = 0$. Integratie levert nu:

$$D(x) = D_0 + \mu \cdot V_{opp}^{-1} \cdot x.$$

D_0 is niet bekend. In verband hiermee wordt de volgende aanname gedaan.

AANNAME 8: aan het begin van een periode dP bedraagt de aanvangsdikte van een drijfslaag $D_0 = 0$.

D_{max} kan nu bepaald worden met $D_{max} = D(x)$ voor $x = L$. Dit levert:

$$D_{max} = \mu * V_{opp}^{-1} * L \quad (2)$$

Bij de aanvoer van de drijfslaag gedurende een zekere periode.

Combinatie van (1) en (2) levert:

$$q_M = \mu * B * L \quad (\text{onafhankelijk van } V_{opp}!) \quad (3)$$

Gedurende de beschouwde periode dP zal aangevoerd worden:

$$Q_M = \mu * B * L * dP \quad (4)$$

Gedurende een aantal perioden dP zal aangevoerd worden :

$$\Sigma Q_M(\alpha) = \mu * \Sigma [B(\alpha) * L(\alpha) * dP(\alpha)] \quad (5)$$

Hierbij is aangenomen dat de windrichting α gedurende een periode dP constant is, maar voor elke periode verschillend, en dat tevens de periode-duur dP varieert met de windrichting. Met andere woorden : B , L en dP zijn afhankelijk geworden van α .

De aanvoer van Microcystis is nu gedurende een langere periode te berekenen. Per windrichting (α) zijn $L(\alpha)$ en $B(\alpha)$ uit de geometrie van het meer en de haventoeegang af te leiden. $dP(\alpha)$ is af te leiden uit windstatistieken. Enige onbekende is de aangroeisnelheid μ . Een kwantitatieve berekening is zonder getalswaarde voor μ niet mogelijk. Een relatieve berekening wel.

5.3 Relatieve kwantificering van aanvoer

Zonder extra aannamen te doen kan gesteld worden dat in het meer gedurende een bepaalde periode T een totale hoeveelheid drijfmasa gevormd wordt ter grootte van:

$$Q_{M, tot} = \mu * A_{meer} * T \quad (6)$$

Hierin stelt A_{meer} het oppervlak van het meer voor.

Het quotiënt van (5) en (6) wordt gegeven door:

$$R = \frac{\Sigma [B(\alpha) * L(\alpha) * dP(\alpha)]}{(A_{meer} * T)} \quad (7)$$

R is onafhankelijk van μ en geeft een relatieve maat voor de ophoping in de haven ten opzichte van de totale hoeveelheid alg in het meer gedurende de periode T .

Er is zo met behulp van een aantal aannamen een methode gecreëerd om aanvoer en ophoping van drijfslagen in een haven in relatieve zin in eerste benadering te berekenen. De methode komt erop neer een bepaald tijdvak te verdelen in een aantal kleinere tijdvakken met een bepaalde windrichting en vervolgens de ophopingen per verkleind tijdvak te berekenen en te sommeren. Hierbij wordt geen rekening gehouden met het feit dat bij hoge windsnelheden geen drijfslagen gevormd en getransporteerd worden.

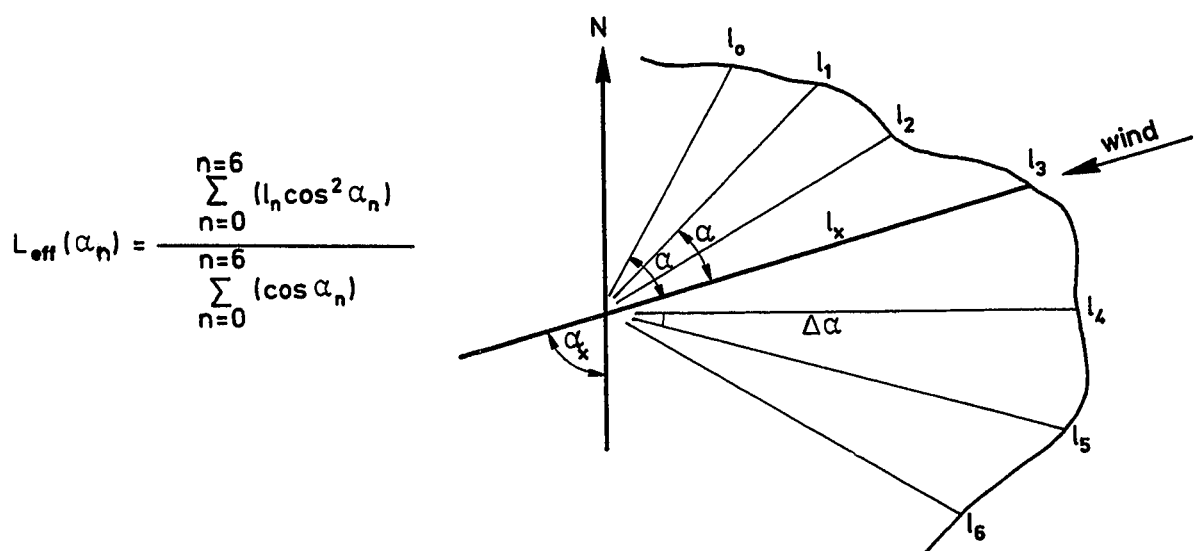
AANNAME 9: gedurende de beschouwde periode wordt steeds een drijfslaag gevormd, dit wil zeggen dat de windkracht steeds kleiner dan circa $5 - 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ wordt verondersteld; de voorraad drijfslaag in het meer is onuitputtelijk.

5.4 Toepassing

Met vergelijking (7) wordt de aanvoer van Microcystis gedurende een bepaalde periode geschat voor een lokatie aan het Braassemermeer. Deze lokatie is de binnenhaven van Jachthaven "Meerzicht" te Rijnsaterwoude. Van deze jachthaven zijn veel gegevens bekend van geometrie en van overlast door drijfmassa's.

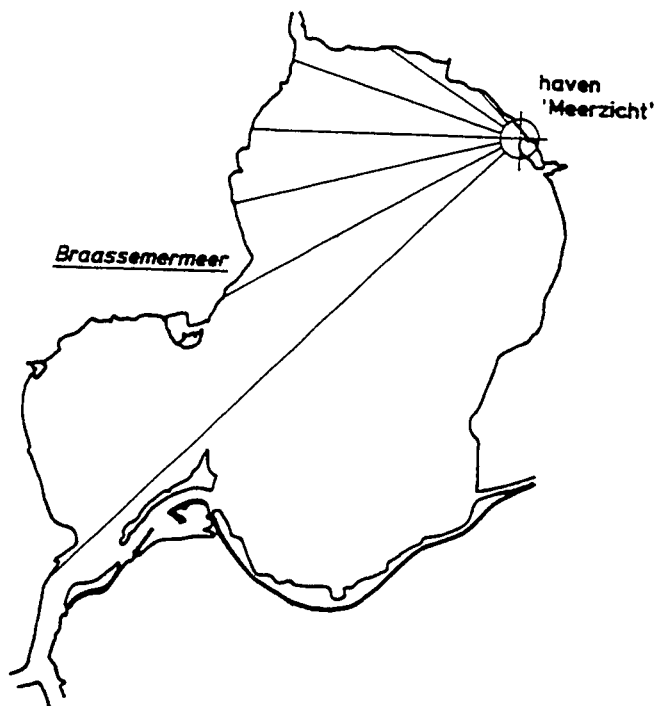
Bij het toepassen van vergelijking (7) is voor de te beschouwen periode T gekozen voor een periode van juni tot en met oktober in een gemiddeld jaar. Buiten deze periode wordt geen groei en aanvoer van Microcystis verwacht.

De parameters $L(\alpha)$ en $B(\alpha)$ zijn afhankelijk van de windrichting en kunnen per lokatie bepaald worden uit de geometrie van meer en haventoeegang. L en B geven de maten weer van een rechthoek die verantwoordelijk is voor aanvoer van Microcystis bij een bepaalde windrichting. In werkelijkheid is geen sprake van een rechthoek. Besloten is om voor $L(\alpha)$ de effectieve strijklengte $L_{\text{eff}}(\alpha)$ te nemen, hetgeen neerkomt op een soort gewogen gemiddelde strijklengte over een zekere hoek. In figuur 16 is aangegeven hoe op een eenvoudige wijze de effectieve strijklengte L_{eff} bij een bepaalde windrichting is te berekenen.



Figuur 16. Berekening van effectieve strijklengten $L_{\text{eff}}(\alpha)$.

Door de windrichting te variëren ($\alpha(x)$) met stappen van 15 graden en door alle strijklengten te bepalen kan voor elke windrichting van 0 - 360 graden de effectieve strijklengte bepaald worden. De methode is geschikt voor een geautomatiseerde berekening. De geschetste berekeningswijze is gebaseerd op de meest gebruikelijke. In figuur 17 is aangegeven bij welke windrichtingen er sprake is van aanvoer van drijfslagen naar de buitenhaven van Meerzicht.



Figuur 17. Strijklengten meerzijde buitenhaven.

Deze vereenvoudiging was nodig om gebruik te kunnen maken van de beschikbare winddata. Toepassing van de vereenvoudigde berekeningswijze blijkt in de praktijk niet te leiden tot significante verschillen ten opzichte van de oorspronkelijke methode.

Voor $B(\alpha)$ zal de gemiddelde breedte van het verantwoordelijk deel van het meer gekozen worden. Dit geschiedt op basis van geometrische gegevens zoals deze van een kaart af te lezen zijn. De aldus bepaalde breedte zal de effectieve breedte B_{eff} genoemd worden. Bij bepaalde windrichtingen zal sprake zijn van geen aanvoer of zelfs van afvoer van Microcystis. Voor deze windrichtingen wordt $B_{eff} = 0$ gesteld.

Toepassing van het model kan als volgt worden samengevat:

Te berekenen:

$$R = \int_0^T [B(\alpha_{eff}) * L(\alpha_{eff}) * dP(\alpha)] * (A_{meer} * T)^{-1} \quad (8)$$

R : relatieve maat voor de ophoping van Microcystis in de haven ten opzichte van de totale hoeveelheid Microcystis in het meer gedurende een periode T (-)

Benodigde gegevens:

- A_{meer} : oppervlak Braassemermeer: 486 hectare = 4.860.000 m².
 T : periode juni tot en met oktober (groeiseizoen in een gemiddeld jaar): 150 dagen.
 $dP(\alpha)$: periode dat windrichting α heerst. Deze is uit de windstatistiek te berekenen. Hiervoor zijn meetresultaten te De Bilt gebruikt met delta $\alpha = 15$ graden.
 $L_{\text{eff}}(\alpha)$: berekenen met behulp van vergelijking in figuur 16 .
 $B_{\text{eff}}(\alpha)$: meten vanaf de kaart (m).

De resultaten:

Zie figuur 18. De binnenhaven van "Meerzicht" blijkt gevoelig voor overlast, hier hoopt 9.5% van het meertotaal zich op. Dit in contrast met de buitenhaven van "Meerzicht" waar zich 3.2% ophoopt (resultaten van de berekeningen hier niet gegeven). Voor beide havens geldt dat drijfvlagen zich voornamelijk ophopen bij zuid-westelijke winden.

5.5 Toetsing en conclusies

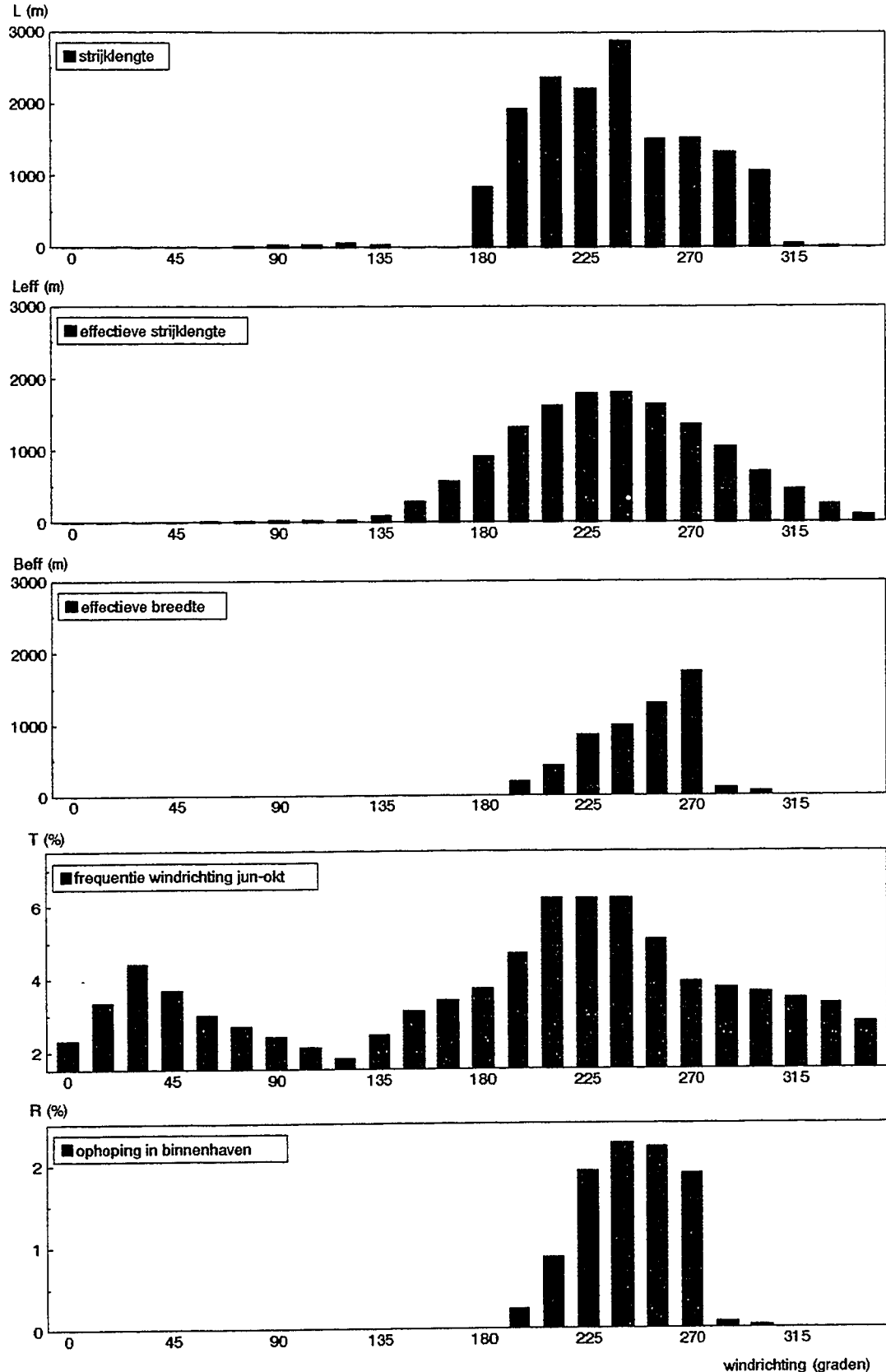
Met het model is de aanvoer en ophoping van Microcystis in een aantal lokaties in eerste benadering berekend. De resultaten stemmen in kwantitatief opzicht overeen met het verwachtingspatroon en veldwaarnemingen van aanvoer en ophoping. Dit werd duidelijk door de resultaten van het model te vergelijken met de resultaten van bemonsteringen op het Braassemermeer en in Jachthaven "Meerzicht". Uit analyses van monsters genomen op een 12-tal plaatsen op verschillende dieptes bleek dat het Braassemermeer over de diepte als volledig gemengd mag worden beschouwd. Jachthaven "Meerzicht" is op 10 plaatsen bemonsterd. Hiervoor werd de jachthaven in secties verdeeld. Voor monsternamen is elke sectie met behulp van een schip volledig gemengd. De blauwwierconcentraties zijn volumetrisch bepaald, zie tabel 2. In de bijlage wordt de volumetrische bepaling van blauwwieren beschreven. Met ophopingen op andere plaatsen dan "Meerzicht" en de westoever is geen rekening gehouden.

Met het model kan in eerste benadering antwoord gegeven worden op de volgende vragen:

- is een lokatie al dan niet gevoelig voor ophoping
- hoeveel blauwwiermassa hoopt zich (in relatieve zin) in een seizoen in zo'n lokatie op
- wat is het effect van verschillende maatregelen om overlast door drijfmassa's tegen te gaan.

Het voordeel van het model is dat het gebruik maakt van eenvoudig te verkrijgen gegevens, zoals geometrie van meer en jachthaven en langjarig gemiddelde frequentieverdelingen van windrichtingen.

Uit toepassing en toetsing op andere lokaties dan het Braassemermeer zal blijken in hoeverre het model algemeen gebruikt kan worden.



Figuur 18. Ophoping "Meerzicht" - binnenhaven.

- α : windrichting
- L : strijklengte
- L_{eff} : effectieve strijklengte
- B_{eff} : effectieve breedte
- $\%T$: % van de periode juni tot en met oktober dat α optreedt
- R : % ophoping bij α ten opzichte van het meertotaal in de periode juni tot en met oktober

Hoeveelheden blauwwier				
	Monstertocht 300987		Model	Model
	gemeten tot 011087 (m ³)	(%)	berekend tot 011087 (%)	berekend tot 011187 (%)
Binnenhaven	136	6.5	7.7	9.5
Buitenhaven	51	2.4	2.6	3.2
Totaal "Meerzicht"	187	8.9	10.3	12.7
Lokatie westoever	-	-	1.8	2.4
Braassemermeer	1900	91.0	87.8	84.8
Totaal meer	2087	100.0	100.0	100.0

Tabel 2. Overzicht van gemeten en berekende hoeveelheden blauwwier.

6 VERHINDEREN VAN HET BINNENDRINGEN VAN DRIJFLAGEN

6.1 Algemeen

In dit hoofdstuk worden de mogelijkheden nagegaan om het binnendringen van drijflagen bij een lokatie te verhinderen. Hierbij wordt uitgegaan van situaties die zich bij een (jacht)haven of vergelijkbare lokatie kunnen voordoen. Daarnaast wordt gekeken of de beschouwde mogelijkheden tevens toepasbaar zijn bij situaties als een inlaatkanaal van een drinkwaterbedrijf.

Mogelijkheden om drijflagen tegen te houden zijn het aanbrengen van één of meer mechanische schermen of de installatie van bellenschermen of waterjets. Mogelijkheden als variatie in ontwerp van een havenmond en gedeeltelijk doorspoelen kunnen strikt genomen niet beschouwd worden als maatregelen om drijflagen tegen te houden, maar kunnen wel een bijdrage leveren aan vermindering van de overlast ter plaatse.

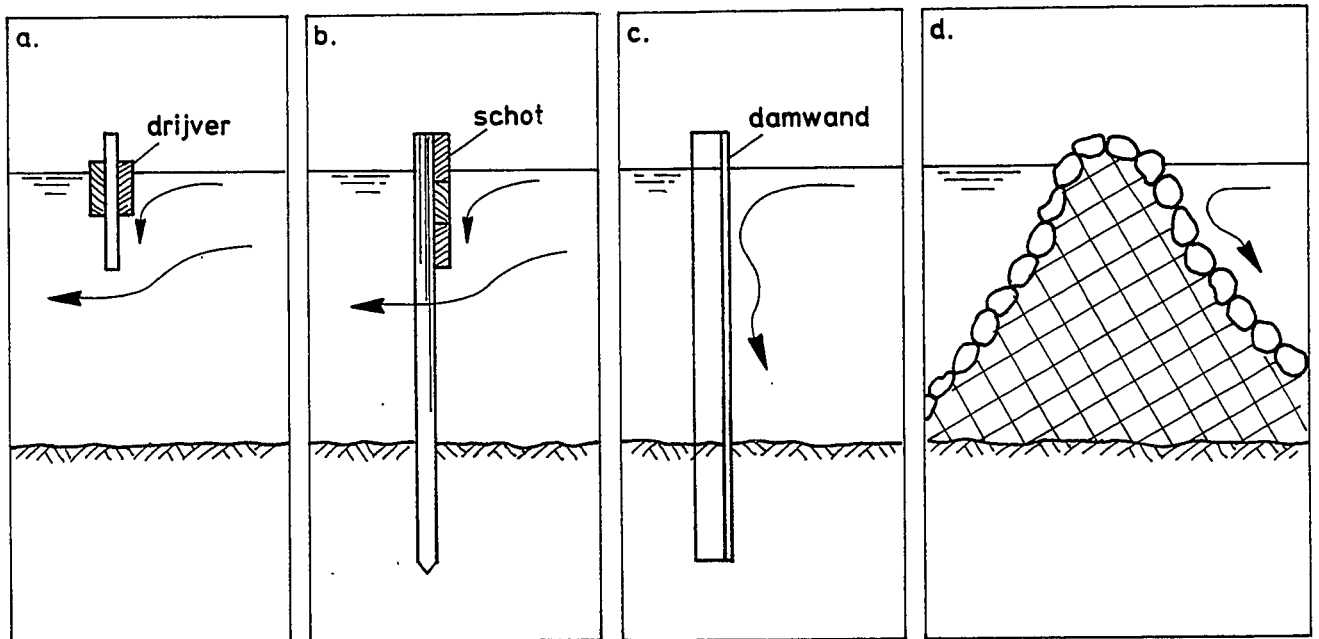
6.2 Mechanische schermen

Varianten

Mechanische schermen, bijvoorbeeld in de vorm van drijvende schotten, worden toegepast bij de bestrijding of isolatie van olieverontreinigingen. Het ligt voor de hand na te gaan of dergelijke schermen toegepast kunnen worden om drijflagen tegen te houden of af te leiden. De volgende varianten van mechanische schermen zijn mogelijk:

- Drijvende schotten of (olie)schermen. Deze zijn verplaatsbaar, zodat aanpassing aan een gewijzigde situatie mogelijk is. De constructie is vanaf de onderkant van het scherm tot de waterbodem open, waardoor geen volledige scheiding van de waterpartijen aan weerszijden van het scherm optreedt.
- Golfschotten, zoals in jachthavens worden toegepast om de golfslag te verminderen. Deze constructies bestaan in het algemeen uit een palenrij waarop in dwarsrichting planken zijn bevestigd tot op zekere diepte onder de waterspiegel. Ze zijn eenvoudig te realiseren, niet verplaatsbaar en geven evenals de drijvende schotten geen volledige scheiding van waterpartijen.
- Damwanden: constructies in hout of staal, betrekkelijk eenvoudig uit te voeren, relatief kostbaar, niet verplaatsbaar, met een vrijwel volledig waterdichte scheiding.
- Constructies als strekdammen, geleidedammen en dergelijke. Meestal worden deze uitgevoerd als puinstorting, eventueel bekleed met stortsteen. De constructies zijn eenvoudig te realiseren, minder kostbaar dan damwanden, niet verplaatsbaar en geven evenals damwanden een vrijwel volledig waterdichte scheiding.

In figuur 19 is een schematisch overzicht van de genoemde varianten gegeven.



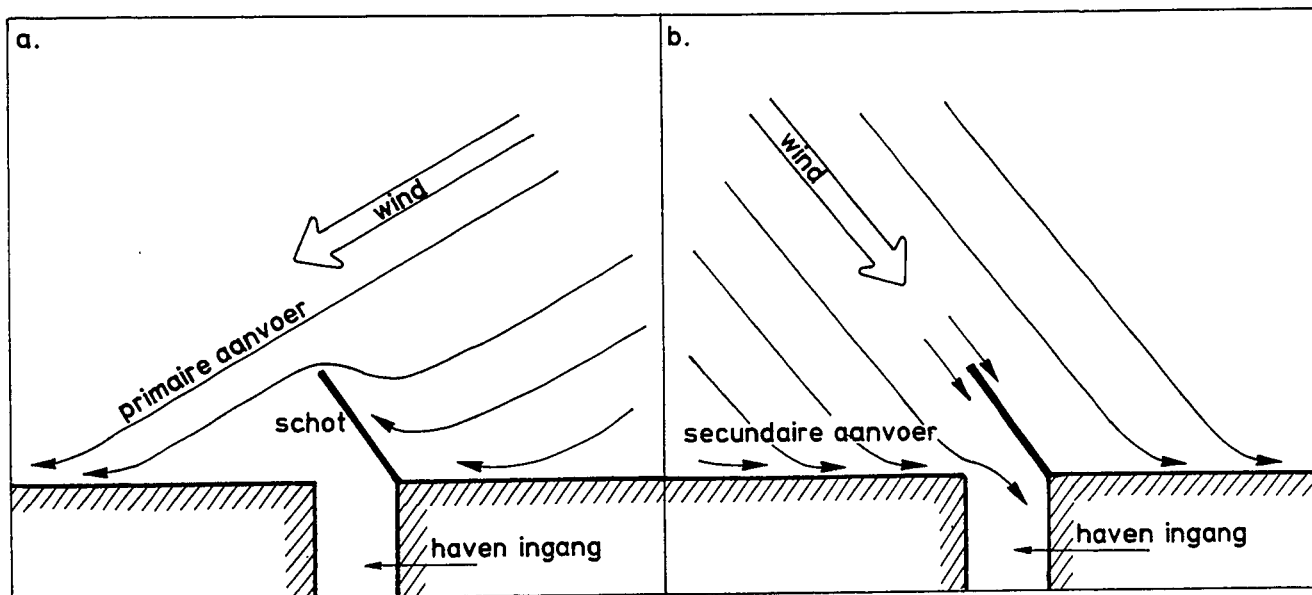
Figuur 19. Uitvoeringsvormen van mechanische schermen.
 a. drijvend en verplaatsbaar: drijvende schotten en oliescherm;
 b. niet verplaatsbaar en doorlatend: golfschotconstructie;
 c. niet verplaatsbaar en ondoorlatend: damwand;
 d. niet verplaatsbaar en ondoorlatend: steensoort, strekdam en dergelijke.

Het is niet zonder meer duidelijk in welke mate deze uitvoeringsvormen van mechanische schermen drijfslagvorming tegen zullen houden. In het hiernavolgende wordt nagegaan onder welke omstandigheden zij effect sorteren.

Toepasbaarheid bij havens

Bij een (jacht)haven kunnen in principe alle varianten toegepast worden, mits vrije doorvaart voor schepen gewaarborgd blijft. In figuur 20a is schematisch een situatie weergegeven met een windrichting die frequent optreedt gedurende het groeiseizoen van de blauwwieren, en een scherm dat de aanvoer van drijfslagen bij de meest voorkomende windrichting afleidt. Door het scherm ongeveer onder een hoek van 85 graden met deze windrichting te plaatsen wordt het binnendringen van drijfslagen verhinderd.

De situatie verandert zodra de wind uit andere richtingen komt, zie figuur 20b. Het scherm leidt nu geen drijfslagen af, maar werkt als een val voor drijfslagen. Variatie in windrichting is dus de reden waarom plaatsing van een permanent scherm in het algemeen geen oplossing biedt om binnendringen van drijfslagen bij (jacht)havens te verhinderen. Bij gevolg kunnen verplaatsbare drijvende schotten een oplossing bieden. Deze oplossing heeft als nadeel dat bij frequent wisselende windrichting het scherm voortdurend verplaatst moet worden, en een havenmeester vrijwel dagelijks de aanvoer van drijfslagen in het oog moet houden. Een ander nadeel, tijdens het onderzoek gebleken, is dat bij hogere turbulentie, drijvende schermen nauwelijks het binnendringen van drijfslagen verhinderen.

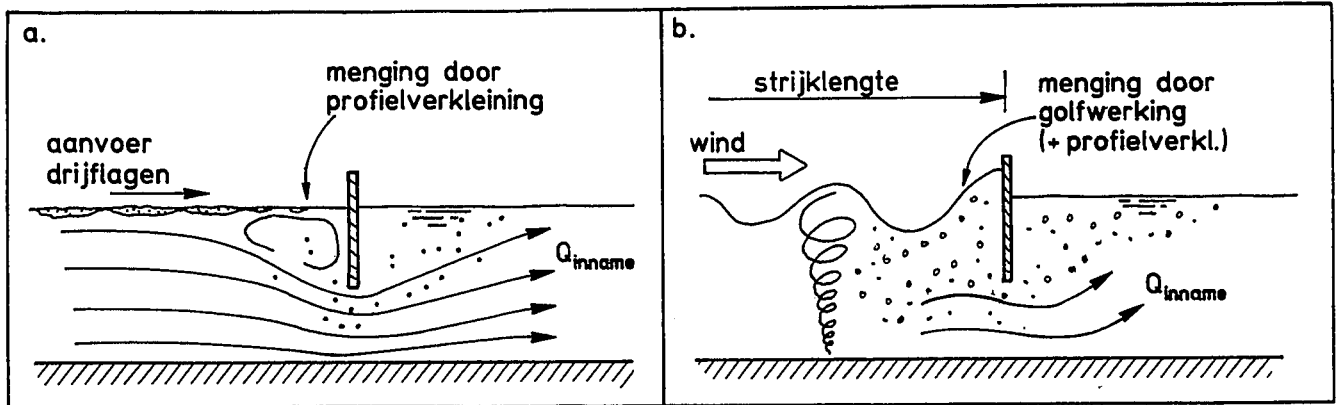


Figuur 20. Effect van een permanent mechanisch scherm bij een haven.

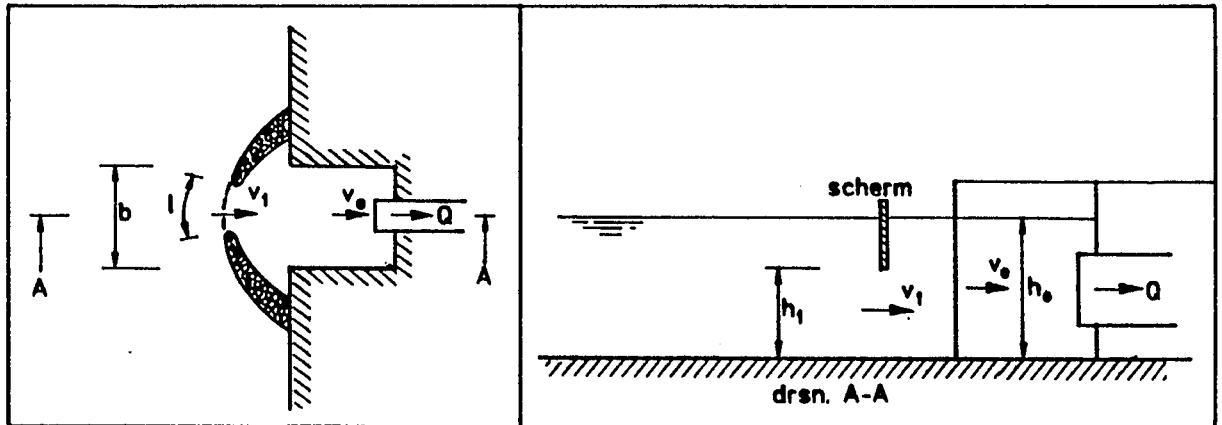
Andere toepassingen

Een geheel andere situatie wordt aangetroffen bij innamepunten van waterwin-bedrijven. Hier hoeft bij plaatsing van een scherm geen rekening te worden gehouden met vrije doorgang voor de scheepvaart. Een inlaatkanaal kan dus over de volle breedte met een scherm afgesloten worden. Volledige afsluiting van het profiel komt uiteraard niet in aanmerking, zodat een scherm in ieder geval niet in zijn geheel uit een damwand of dam kan bestaan. Drijvende schotten kunnen voor onderzoek gebruikt worden, golf-schotten of een damwand met gaten aan de onderkant van de waterkolom zouden een permanente voorziening kunnen vormen. Omdat drijfvlagen voornamelijk langs het oppervlak aangevoerd worden, moet getracht worden deze bij het tegenhouden of afleiden zoveel mogelijk intact te laten. Ter plaatse van het scherm dient daarom afbraak door turbulentie zoveel mogelijk vermeden te worden. Hierbij worden twee aspecten beschouwd, zoals toegelicht in figuur 21. Bij het scherm treedt een profielverkleining op. Toename van stroomsnelheid en de daarmee gepaard gaande verhoging van turbulentie kan er toe leiden dat de aangevoerde drijfvlagen geroerd worden en onder het scherm door schieten. Daarnaast (21b) kan menging ontstaan door golven. Afhankelijk van de windsnelheid en de strijklengte kan menging over een grote diepte optreden, zodat onder het scherm door water aangezogen wordt met mogelijk hoge concentraties blauwwieren.

Menging door profielverkleining kan eenvoudig opgelost worden wanneer de aanvoer van drijfvlagen door het innamekanaal onder normale omstandigheden voornamelijk langs het wateroppervlak optreedt. Dan blijken stroomsnelheden en turbulentie niet genoeg om menging te veroorzaken. Ongeveer dezelfde condities kunnen ook ter plaatse van het scherm gecreëerd worden door het niet direct voor het innamekanaal te plaatsen, maar in een boog op enige afstand van de inlaat. Figuur 22 geeft een dergelijke situatie, waarbij een gedeelte van het scherm uitgevoerd is als geleidedam.



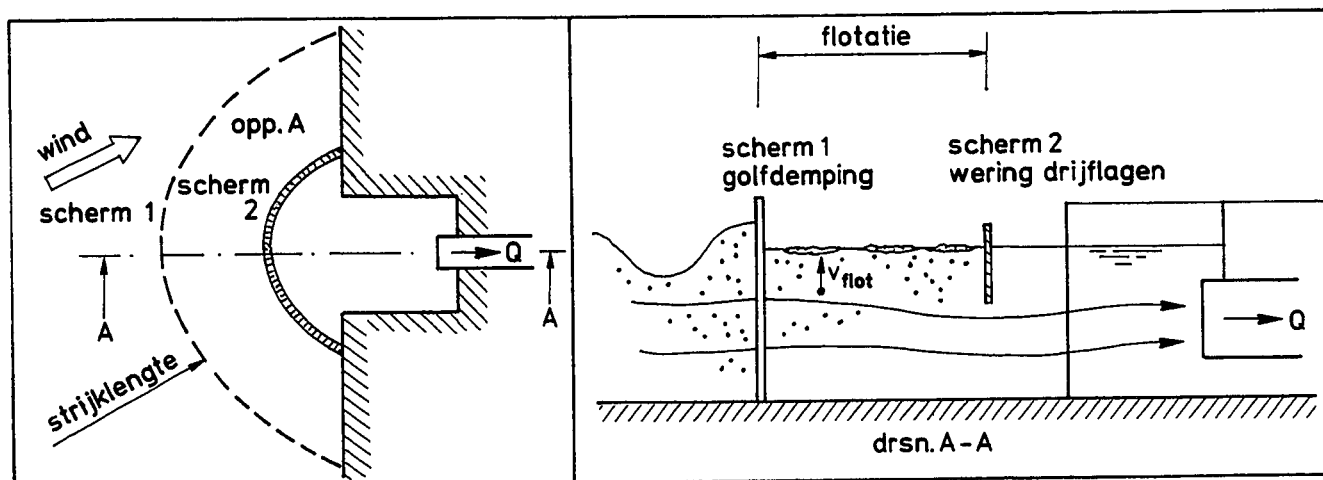
Figuur 21. Effecten bij een permanente damwand op menging van drijfslagen bij waterinnamepunten.
 a. profielverkleining;
 b. golfwerking en profielverkleining.



Figuur 22. Boogvormig scherm uitgevoerd als geleidedam bij een waterinnamepunt.

Als wordt aangenomen dat ongeveer gelijke condities in het kanaal en ter plaatse van het scherm gekarakteriseerd worden door eenzelfde gemiddelde stroomsnelheid, dan moeten de gemiddelde snelheden v_0 (in het kanaal) en v_1 (onder het scherm) aan elkaar gelijk zijn. Hieruit volgt dat de lengte van het scherm gelijk dient te zijn aan: $l = b \cdot h_0 \cdot h_1^{-1}$, waarin l de lengte van het scherm, b de breedte van het inlaatkanaal, h_0 de waterdiepte in het inlaatkanaal en h_1 de waterdiepte onder het scherm.

De menging door golfwerking kan gedeeltelijk opgelost worden door niet één maar twee schermen aan te brengen, zoals geschetst in figuur 23. Hierbij wordt het eerste scherm gebruikt als golfbreker en uitgevoerd met golfdempende schotten of paalrijen. Het gedeelte tussen het eerste en tweede scherm dient om daarin blauwwieren op te laten drijven; het is zo groot dat de oppervlaktebelasting van dat deel kleiner is dan de flotatiesnelheid van de blauwwierkolonies. Bij deze oppervlaktebelasting zullen immers alle kolonies voor het tweede scherm tot opdrijven komen.



Figuur 23. Toepassing van twee schermen bij waterinnamepunt.

6.3 Bellenscherm

6.3.1 inleiding

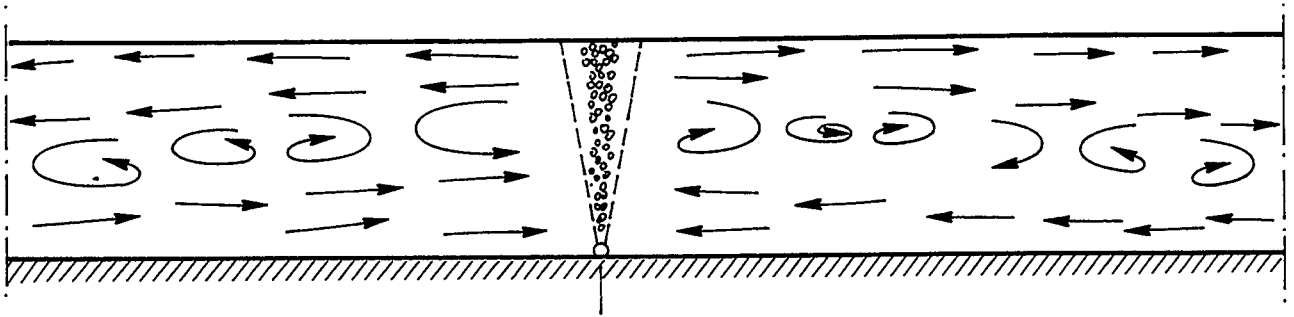
Een bellenscherm wordt gerealiseerd met een geperforeerde slang, die zich op de bodem onder water bevindt en waardoor met behulp van een compressor lucht geblazen wordt. Hierdoor ontstaan verticale circulatiestromingen in het water. Bellenschermen worden voor diverse doeleinden gebruikt: stratificatiecontrole, voorkomen van dichtheidsstromingen, isolatie van olievlekken, viswering, voorkomen van ijsafzetting, opvangen van golfaanvallen, beluchting en zoet-zoutscheidingen. Een haventoeegang is door middel van een bellenscherm zodanig af te schermen dat drijfslagen een haven niet binnen kunnen drijven.

In 1987 is een bellenscherm in jachthaven "Meerzicht" geïnstalleerd. Hierbij is met name veel aandacht besteed aan een via windmeters gestuurde bediening van het scherm. Theoretisch onderzoek over bellenschermen leidde tot ontwerpregels voor bellenschermen met als doel het tegenhouden van drijfslagen (de Bert, 1988).

6.3.2 theoretische beschouwingen en experimenten

Wanneer lucht in water wordt geblazen door een op de bodem gelegen, over de gehele lengte gelijkmatig geperforeerde buis, ontstaat boven de buis een lucht-watermengsel, dat een geringere dichtheid heeft dan het omringende water. Hierdoor ondervindt het lucht-watermengsel een opwaartse kracht, waardoor water omhoog gebracht wordt (figuur 24). Nabij de waterspiegel aangekomen ontsnapt het merendeel van de lucht van het lucht-watermengsel naar de atmosfeer. Het water stroomt langs de waterspiegel in horizontale richting af, met een snelheid v_{opp} .

De pogingen van een groot aantal onderzoekers om de snelheid aan het oppervlak te beschrijven, leidden vrijwel steeds tot de volgende vergelijking:



Figuur 24. Schematische werking van een bellenscherm.

$$v_{opp} * g^{1/2} * q_a^{-1} = f(H_a, h)$$

met:

- v_{opp} : door het scherm geïnduceerde stroomsnelheid aan het oppervlak
- g : versnelling van de zwaartekracht
- q_a : luchtdebiet per strekkende meter buis
- H_a : de atmosferische druk
- h : boven het scherm (buis) staande waterkolom.

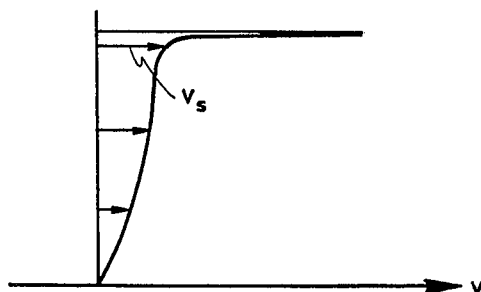
De meest betrouwbare vergelijking is die van Maxwell & Tekeli (1978):

$$v_{opp} * (g * q_a)^{-0.33} = 1.4 * [(H_a * (h + 0.03 * (h + H_a)))^{-1} * \ln((H_a + h) H_a^{-1})]^{0.5} \quad (8)$$

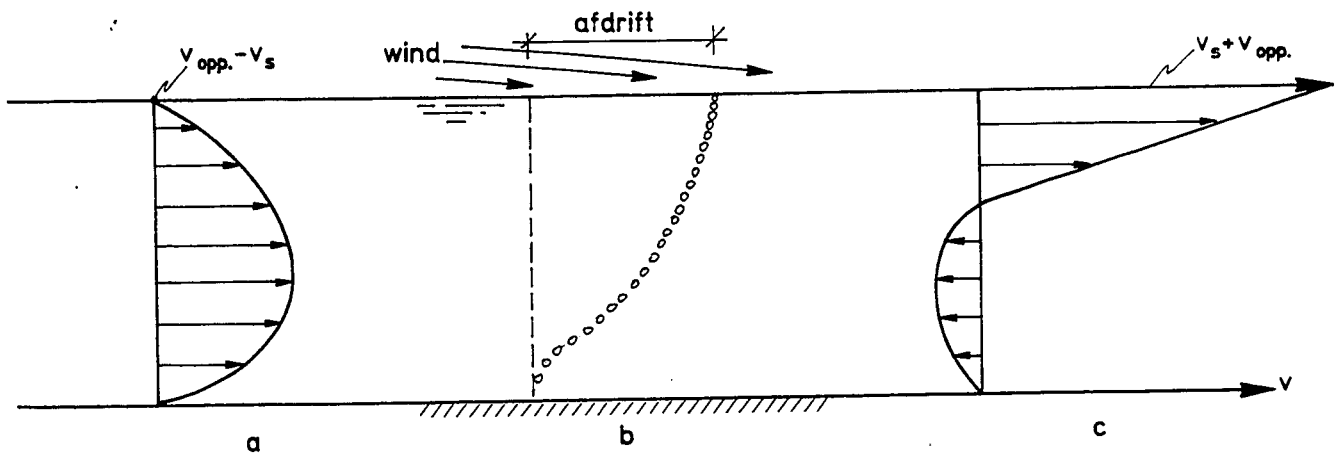
In het algemeen kan verwacht worden dat één of andere vorm van stroming op het stromingspatroon van een bellenscherm gesuperponeerd dient te worden. Hier zijn uniforme horizontale stroming en de winddrift beschouwd.

Bij uniforme horizontale stroming blijken de stromingsrichtingen aan het oppervlak niet in gevaar te komen, als de door het bellenscherm geïnduceerde stroming aan het oppervlak groter is dan de oppervlaktesnelheid van de horizontale stroming. Omdat dergelijke stromingen in het algemeen niet verwacht worden bij een bellenscherm in een havenmond, worden deze verder buiten beschouwing gelaten; bij andere toepassingen dient met deze stromingen wel rekening gehouden te worden.

Door winddrift ontstaat een snelheidsprofiel (v_s) in het water (figuur 25).



Figuur 25. Snelheidsprofiel in het water te gevolge van winddrift.



Figuur 26. Doorsnee over een bellenscherm en snelheidsprofielen aan weerszijden bij winddrift.
 a. snelheidsprofiel links;
 b. doorsnee over het scherm;
 c. snelheidsprofiel rechts.

Figuur 26 geeft een beeld van de veranderde omstandigheden aan weerszijden van een bellenscherm, onder invloed van winddrift. Uit de figuren blijkt dat bij een bepaald luchtdebiet q_a de werking van het bellenscherm in gevaar komt als $v_s > v_{opp}$. Bij hogere windsnelheden en dus grotere v_s zal doorbraak over het scherm optreden. Bovendien kan door sterkere golfwerking overslag optreden; dit is niet te voorkomen.

6.3.3 dimensionering en ontwerpregels

Omdat de drijfslagen van blauwwieren zich in de bovenste lagen van het water bevinden, is het voldoende dat de oppervlakt snelheid v_{opp} de driftsnelheden van de drijfslagen overtreft. Bij windsnelheden groter dan 5 m*s^{-1} is zoveel turbulentie aanwezig dat geen drijfslaagvorming en -transport langs het oppervlak meer optreden. Bij een windfactor (gedefinieerd als de verhouding tussen de stroomsnelheid aan het oppervlak en de windsnelheid) van 3 % betekent dit voor de praktijk dat v_{opp} hooguit 0.15 m*s^{-1} bedraagt. ($v_{opp} = \text{windfactor} * \text{windsnelheid}$). Dit komt overeen met veldwaarnemingen van transportsnelheden van drijfslagen waarbij driftsnelheden tot 500 meter per uur werden gemeten. Dit betekent:

$$v_{opp} \geq 0.15 \text{ m*s}^{-1} \quad (9)$$

Voor de dimensionering van een bellenscherm kan nu de vergelijking (8) toegepast worden, die voor waterdiepten tot ongeveer 7 m vereenvoudigd mag worden tot:

$$v_{opp} = 2.6 * q_a^{0.33} \quad , \quad \text{ofwel} \quad q_a = v_{opp}^3 * 0.06 \quad (10)$$

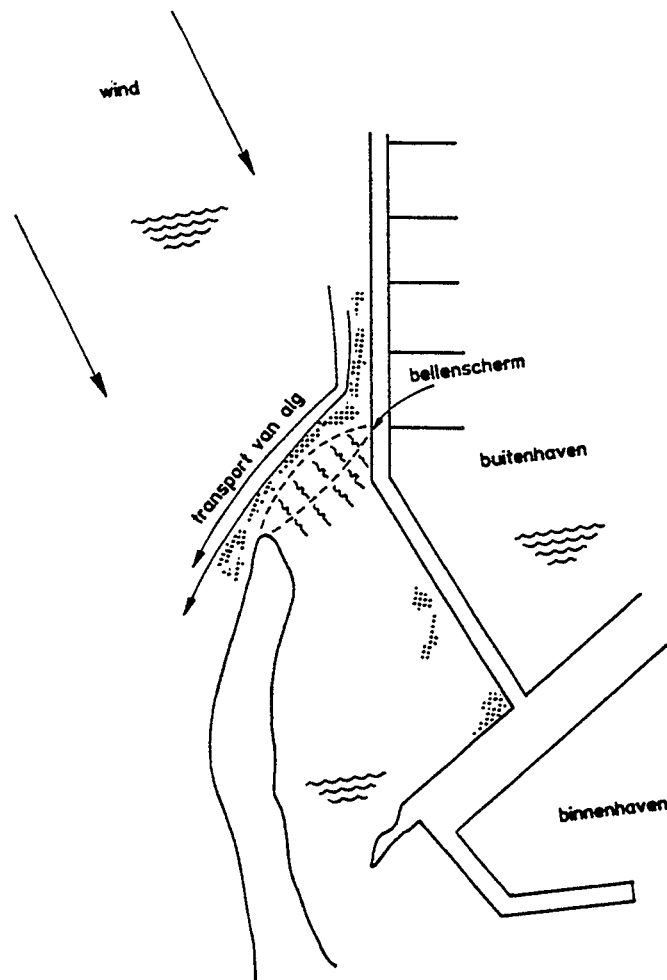
Combinatie van (9) en (10) levert:

$$q_a \geq 0.20 * 10^{-3} \text{ m}^3 * \text{m}^{-1} * \text{s}^{-1} \quad (11)$$

Met vergelijking (11) kan het luchtdebiet per strekkende meter buis berekend worden, dat nodig is om de aanvoer van drijfslagen onder invloed van winddrift bij een windsnelheid van ten hoogste 5 m*s^{-1} te belemmeren.

Op grond van de voorgaande beschouwingen en waarnemingen in het veld werden de volgende ontwerpregels geformuleerd:

- In een slang ter lengte van de te overspannen havenmond met een diameter van 2.5 cm en een buitendiameter van 3 cm worden spiraalsgewijs gaatjes geboord van 1.5 mm op een onderlinge afstand van 25 cm. Om te voorkomen dat de slang op de bodem terecht zou komen en de gaatjes verstopt raken, wordt de slang aan steunen bevestigd, waardoor deze ongeveer 15 cm boven de bodem komt.
- De ligging van de slang moet dusdanig zijn dat de oeverlijn, waarvan het bellenscherf onderdeel is geworden, vloeiend wordt gevolgd (figuur 27). Is dit niet het geval dan ontstaan neren en drijfslagen kunnen zich ophopen waardoor de kans groter wordt dat ze over het bellenscherf heen slaan.



Figuur 27. Door bellenscherf veroorzaakte effecten op algentransport bij jachthaven "Meerzicht" aan het Braassemeermeer.

- Op de slang wordt een compressor aangesloten. Uitgaande van een v_s van maximaal $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, bedraagt het benodigde luchtdebiet per strekkende meter slang minimaal $0.20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ($= 720 \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

- De benodigde overdruk die door de compressor geleverd moet worden is vrijwel gelijk aan de waterdiepte.
- De prijs van de energie nodig om de perslucht te verpompen vormt een belangrijk deel van de totale kosten, waardoor het rendabel is het scherm alleen in werking te hebben als windrichting en windkracht dit nodig maken.

6.3.4 besturingssysteem

In bedrijfstelling van het bellenscherm door middel van handbediening is niet effectief, omdat daarvoor gedurende het groeiseizoen permanente personele bewaking van de situatie nodig is. Een systeem dat het scherm automatisch in of buiten bedrijf stelt als dat nodig is, bleek betrouwbaar. Aanvoer van drijfslagen treedt alleen op in een bepaald windrichtingsinterval en in een bepaald windsnelheidsinterval. Besturing van het bellenscherm via in serie geschakelde meting van windrichting en windsnelheid ligt voor de hand.

Voor de experimenten in jachthaven "Meerzicht" is een analoog regelsysteem ontworpen en gebouwd, dat via meting van windrichting en windsnelheid het geïnstalleerde bellenscherm aan- of uitschakelt. Het gebrek aan flexibiliteit van analoge procesregelingen is hierbij niet bezwaarlijk en de geringe storingsgevoeligheid en mogelijkheden tot handbediening zijn belangrijke voordelen. Uitgebreide technische details worden gegeven in de Bert (1988).

6.3.5 resultaten en conclusies bij een praktijkopstelling

De werking van scherm en besturingssysteem werden in de praktijk getest, in hoofdzaak met behulp van visuele inspectie door de havenmeester, aangevuld met incidentele bezoeken door de betrokken onderzoekers. De resultaten zijn:

1. Door het bellenscherm volgens de gegeven ontwerpregels aan te leggen, worden aan het wateroppervlak stromingen gecreëerd die de aanvoer van drijfslagen af kunnen leiden.
2. Afhankelijk van windsnelheid en -richting werd naar schatting 75% van de drijfslagen tegengehouden. Naast een bellenscherm zijn aanvullende maatregelen nodig om een haven volledig van overlast te vrijwaren.
3. Een q_a van $0.20 \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ($720 \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) was voldoende om het scherm naar behoren te laten functioneren.
4. Voor een q_a van $720 \text{ l} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en een h van 3 meter waterkolom is een compressor nodig met een opgesteld vermogen van circa 75 Watt per strekkende meter buis. Met een veiligheidsfactor van ongeveer 1.75, betekent dit een te installeren vermogen van ongeveer 130 Watt per strekkende meter buis.
5. Voor geringe waterdiepten is de benodigde overdruk geringer en kan in plaats van een compressor een blower geïnstalleerd

worden. De investering blijft ongeveer gelijk; het op te stellen vermogen is veel kleiner, ongeveer 26 Watt per strekkende meter buis.

6. De besparing op energiekosten door de installatie van een automatische besturing is afhankelijk van de ligging op de wind; voor lokaties die op het noordoosten liggen kan deze besparing oplopen tot ongeveer 60% ten opzichte van volcontinu draaien.

6.4 Variatie in ontwerp van een havenmond

Uit de dynamiek van drijfslagen blijkt dat de uiteindelijke aanvoer voornamelijk bepaald wordt door de ligging ten opzichte van de meest voorkomende windrichting en de geometrie van de oevers aan weerszijden van een haven. Alleen de geometrie van de oevers kan enigszins beïnvloed worden door variatie in ontwerp van de havenmond. Deze variatie zou daarbij uitgevoerd moeten worden overeenkomstig de regels voor plaatsing van een permanent mechanisch scherm. Zoals vermeld bieden permanente schermen wel een bijdrage, doch geen afdoende oplossing voor het tegenhouden van drijfslagen. Dit geldt dus ook voor variatie in ontwerp van een havenmond.

6.5 Gedeeltelijk doorspoelen

Gedeeltelijk doorspoelen kan in incidentele gevallen een oplossing vormen. Te denken valt aan het doorleiden van een beek door een haven of het lozen dan wel onttrekken van polderwater of proceswater. Dergelijke oplossingen hangen af van lokale omstandigheden; wellicht kan het idee meegenomen worden bij het ontwerpen van havenlokaties of waterhuishoudkundige constructies.

6.6 Neveneffecten van verhinderen van binnendringen

Het uiteindelijke resultaat van alle succesvolle varianten die het binnendringen van drijfslagen verhinderen, is dat een (jacht)haven of waterinnamepunt vrijblijft van drijfslagen. De tegengehouden of doorgespoelde drijfslagen belanden opnieuw in het omringende water, waardoor veelal op een andere lokatie de overlast vergroot wordt. Immers, een voornaam deel van het transport treedt langs de oever op. Het probleem van lokale overlast wordt niet opgelost maar verplaatst. Zo kan bijvoorbeeld een jachthaven zonder bellenscherm naast het eigen aandeel overlast door drijfslagen ook nog eens geconfronteerd worden met een extra hoeveelheid drijfslagen die door de buurman, een jachthaven met bellenscherm, zijn tegengehouden en afgeleid.

7 VERWIJDERING EN VERWERKING VAN DRIJFLAGEN

7.1 Algemeen

Een meer constructieve en effectieve maatregel dan het tegenhouden van drijfslagen, bestaat uit het verwijderen van drijfslagen of de ophopingen van drijfslagen. Tegenhouden verplaatst het probleem, verwijderen heft het symptoom op. Verwijderen van de biomassa kan bovendien een niet verwaarloosbare bijdrage leveren aan verbetering van de waterkwaliteit in het betrokken meer. Met de biomassa worden chlorofyl, fosfaat, stikstof, CZV en overige verontreinigingen in geconcentreerde vorm uit het aquatisch ecosysteem verwijderd. Zie ook tabel 3.

parameter	g*(kg droge stof) ⁻¹
Ruwe as	250
Organische stof	750
N-totaal	42.2
P-totaal	7.3
K	23.3
Ca	17.7
Mg	5.4

	mg*(kg droge stof) ⁻¹
Cu	65
Cr	8.0
Zn	200
Pb	37
Cd	0.1
Ni	9.6
Hg	1.3
As	3.3
Ag	1.4

Tabel 3. Chemische samenstelling blauwwiermassa, voornamelijk bestaande uit Microcystis aeruginosa, bemonsterd op 080984 in de Braassemermeer bij "Meerzicht".

De methode van verwijdering wordt voor een belangrijk deel bepaald door de uiteindelijke bestemming van de drijfslagen. Uitgangspunt in het hiernavolgende zal zijn dat het verwijderde materiaal, gezien het natte, biologische karakter ervan, aangeboden wordt aan een rioolwaterzuiveringsinrichting (RWZI). Gelet op eventuele tussenopslag, transportkosten en kwantitatieve belasting van zo'n RWZI zal de voorkeur uitgaan naar een zo gering mogelijk volume. Bij de verwijdering van de drijfslagen moet worden gestreefd naar zoveel mogelijk blauwieren en zo weinig mogelijk water, te bereiken door een efficiënte methode van verwijderen en concentreren.

Gelet op het aanvoer- en ophopingsmechanisme van drijfslagen kunnen twee verschillende principes van verwijderen toegepast worden. Enerzijds kan de verse aanvoer van drijfslagen (semi-)continu worden verwijderd. Dit houdt in dat goed bekend moet zijn waar deze aanvoer optreedt en dat een (semi-)

permanente installatie nodig is met een relatief lage capaciteit. Anderzijds kan een mobiele installatie worden ontworpen met een relatief hoge capaciteit, die de gedurende langere tijd geaccumuleerde drijfslagen of drijfmassa's op een snelle wijze lokaal verwijdert. Een dergelijke installatie kan op een schip of vrachtwagen opgesteld zijn. De keuze zal ondermeer afhankelijk zijn van de kosten, frequentie van optreden van overlast, dynamisch karakter van de overlast, de aanvoer en de lokatie. Vooral lokale verschillen zullen een optimum hierbinnen bepalen.

7.2 Flotatie- en sedimentatiegedrag van blauwwieren

Gedurende het onderzoek zijn verschillende experimenten uitgevoerd om na te gaan hoe blauwwierkolonies floteren of sedimenteren. Aan de hand van de resultaten kunnen procestechnologische consequenties gegeven worden voor het gedrag van drijfslagen bij indikking en bij de verwerking in een zuiveringsinstallatie.

7.2.1 flotatie

Het flotatiegedrag van Microcystis is onderzocht door in het veld drijfslagen te bemonsteren en meer of minder in te dikken. Vervolgens werden mengsels van drijfmassa en water in doorzichtige cilindres gegoten, geroerd en in de loop van de tijd gevolgd.

Direct na inzetten van de experimenten beginnen blauwwierkolonies snel op te drijven. Hierbij blijkt dat geen sprake is van een uniforme snelheid voor alle kolonies, maar van een frequentieverdeling van flotatiesnelheden, als gevolg van verschillen in koloniegrootte. Grote kolonies hebben flotatiesnelheden van $10 \text{ m}^*\text{h}^{-1}$ of meer, kleine kolonies snelheden van $0.5 \text{ m}^*\text{h}^{-1}$ of minder. Een redelijke indruk van snelheden wordt verkregen uit de schijnbare flotatiesnelheden $V_{\text{flot},100}$ of $V_{\text{flot},90}$, zijnde de snelheden waarmee 100%, respectievelijk 90%, van alle kolonies tenminste floteren. Gemeten waarden varieerden aldus: $V_{\text{flot},100}$ tussen 0.3 en $1.7 \text{ m}^*\text{h}^{-1}$, $V_{\text{flot},90}$ tussen 0.6 en $3.5 \text{ m}^*\text{h}^{-1}$. Alle (100%) kolonies hadden dus een flotatiesnelheid groter dan 0.3 à $1.7 \text{ m}^*\text{h}^{-1}$.

De gevormde drijfslaag begint reeds na korte tijd in dikte af te nemen ofwel zelf in te dikken. De maximaal te bereiken indikking bedraagt 60 - 80% van de beginwaarde en is het grootst bij relatief dunne drijfslagen. Het tijdstip waarop maximale indikking bereikt wordt, ligt in de orde van uren of dagen na aanvang van het experiment, afhankelijk van de begindikte van de drijfslaag.

Indikking door flocculatie en flotatie met toevoeging van poly-electrolieën is in een proefopstelling door de Dienst openbare werken Amsterdam uitgevoerd. Het proces werkt maar is duur (Savelkoul et al., 1989)

7.2.2 sedimentatie

Het sedimentatiegedrag van blauwwieren is eveneens onderzocht door in het veld drijfslagen te bemonsteren en min of meer in te dikken. De voorbehandelde mengsels van drijfmassa en water werden in doorzichtige cilindres gegoten, geroerd en in de loop van de tijd gevolgd. Om het drijfvermogen

van de blauwwieren teniet te doen, werden de monsters op twee verschillende wijzen voorbehandeld.

Bij de eerste voorbehandelingsmethode werden de blauwwieren in een drukvat gedurende een aantal seconden blootgesteld aan een drukverhoging van 10 bar. Door de drukverhoging barsten de gasvesikels en neemt het soortelijk gewicht van de kolonies toe, waardoor de kolonies niet meer opdrijven maar gaan zinken. Evenals bij flotatie is hier sprake van een frequentieverdeling van snelheden waarmee de blauwwierkolonies sedimenteren. $V_{sed,100}$, de snelheid waarmee 100% van de kolonies tenminste sedimenteren, en $V_{sed,90}$ bleken wat lager dan $V_{flot,100}$ en $V_{flot,90}$.

Microscopisch onderzoek wees uit dat, behalve het verdwijnen van de gasvesikels, geen verschil te constateren viel met de onbehandelde monsters.

Bij de tweede voorbehandelingsmethode werden de monsters door een hogedruk-pomp van de lokale brandweer gevoerd, waarbij een drukverhoging van 7 tot 10 bar optreedt. Door de constructie van dergelijke pompen treden hoge watersnelheden op waarin hoge schuifspanningen optreden.

In tegenstelling tot onbehandelde monsters of aan een drukschok blootgestelde monsters, kunnen direct na inzetten van de proef geen floterende of sedimenterende blauwwieren onderscheiden worden. Aanvankelijk lijkt het er op dat een homogene zeer fijn verdeelde suspensie van blauwwieren is ontstaan die geen enkele reactie vertoont. Na ongeveer 30 minuten stilstand begint de suspensie uit te vlokken; aanvankelijk worden zeer kleine vlokjes gevormd, die vervolgens aangroeien en met andere vlokjes grotere aggregaten vormen, die gaan uitzakken. Dit houdt in dat sprake is van een langzaam dalende "slibspiegel". Een gemeten $V_{sed,100}$ van $0.03 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ geeft aan dat sedimentatie zeer traag verloopt.

Verder blijken de bezonken lagen een 1.5 tot 3 maal zo groot volume te hebben als de onbehandelde of met een drukschok behandelde monsters. Dit verschil wordt verklaard door de zeer waterige, lichte vlokstructuur waarin de blauwwieren nu voorkomen. Bij microscopisch onderzoek blijkt inderdaad dat de koloniestructuren volledig zijn verdwenen. Er zijn alleen kleine diffuse structuren te onderscheiden met hier en daar een duidelijk klontje cellen. Blijkbaar zijn de Microcystiskolonies door de drukverhoging en de hoge schuifspanningen compleet "verpulverd".

7.2.3 consequenties voor indikking en verwerking

Het blijkt dat door blauwwierkolonies mechanisch te behandelen de afscheidings-eigenschappen aanzienlijk kunnen worden gewijzigd. Met betrekking tot indikking en zuiveringstechnieken kan nu een drietal conclusies getrokken worden:

1. De gemeten V_{flot} 's zijn beduidend hoger dan de snelheden die door andere onderzoekers zijn geconstateerd. Reynolds (1973) en Reynolds & Rogers (1976) hebben bijvoorbeeld een maximale V_{flot} gemeten van $0.144 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. Natuurlijke flotatie verliep iets sneller dan sedimentatie, hetgeen inhoudt dat indikking bij voorkeur dient te geschieden door middel van statische scheiding in een flotatietank.

2. Bij voorgaande experimenten was gebleken dat onbehandelde blauwwieren vrijwel onveranderd door een zuiveringsinstallatie met actiefslib heen kunnen lopen, doordat ze zich door hun drijfvermogen in feite onttrekken aan allerlei inwerkingen van het normale zuiveringsproces. Uit de hier beschreven experimenten blijkt dat het drijfvermogen op een eenvoudige wijze teniet gedaan kan worden, en de Microcystis wel aan het zuiveringsproces onderworpen kunnen worden. Hierbij zou de voorkeur uit dienen te gaan naar het zogenaamde "verpulveren" van de blauwwieren met behulp van een hogedrukpomp.
3. Bij het toedienen van een drukschok barsten de gasvesikels, maar verandert de structuur van de kolonies niet. Bij het verpulveren worden de kolonies vermalen tot individuele cellen en mucus (slijm) en het relatieve deeltjesoppervlak neemt enorm toe, waardoor, bijvoorbeeld bij een behandeling in een actiefslibinstallatie, biochemische interacties beter mogelijk worden en het afbraakproces wordt bevorderd.

Verpulverde blauwwieren vertonen nauwelijks neiging om te bezinken en er bestaat dus geen gevaar voor ongewenste sedimentatie in een van de onderdelen van de zuiveringsinrichting. Verpulveren met een hogedrukpomp is eenvoudiger uit te voeren dan het toedienen van een drukschok. Vooral doordat het een continu proces is. Dit opent de mogelijkheid blauwwieren uit een haven af te zuigen, eventueel verder in te dikken en vervolgens direct op een nabijgelegen riolering te lozen voor afvoer en verdere verwerking.

Hoewel statische scheiding door middel van flotatie een betere methode blijkt dan sedimentatie, zou in sommige gevallen toch besloten kunnen worden om over te gaan tot scheiding door middel van sedimentatie, door eenvoudigweg gebruik te maken van een bestaande sedimentatietank (voorzinking) van een RWZI. Hieraan zouden dan de voorwaarden verbonden zijn, dat de oppervlaktebelasting van deze tank zodanig is dat het merendeel van de blauwwieren door sedimentatie verwijderd kan worden en dat het resterende deel van de blauwwieren zo gering is dat verderop in de installatie geen problemen meer optreden. Snelle sedimentatie wordt hier bewerkstelligd door aan de blauwwieren een drukschok toe te dienen en niet door ze te verpulveren. Ook hier kan, na verwijdering en indikking, eventueel direct op een nabijgelegen riolering afgevoerd worden.

7.3 Afzuigen

Tot nu waren er geen goede methoden voorhanden om grote hoeveelheden drijfslagen efficiënt af te zuigen en in te dikken. In de haven van Lelystad pompt men, met behulp van een pomp met een snijkop, bij overlast de algenmassa over de kade. De pomp is geplaatst in de hoek van de haven waar, bij de windrichting die de meeste aanvoer veroorzaakt, de algen zich het sterkst ophopen. Verder wordt de bovenste laag van circa 5 cm afgezogen, zodat van natuurlijke indikking gebruik gemaakt wordt. Door de snijkop wordt verstopping door materialen als stro, takjes en bladeren vermeden. Verstopping door groter drijfvuil maakt schoonmaken met de hand van de aanzuigopening enkele malen per dag nodig. Bij het Hoogheemraadschap van Rijnland wordt een kolkenzuiger gebruikt om af te zuigen; de algenmassa wordt met een giertankwagen naar een rioolwaterzuiveringsinrichting ge-

bracht. Het mengsel dat wordt afgezogen is zeer waterrijk, doordat de buis met de hand en op het oog wordt verplaatst.

In principe kan afgezogen worden met behulp van methoden die toegepast worden bij oliebestrijding, zoals bijvoorbeeld met behulp de Oilcrab, een schip dat olie verwijdert, of een waterwisser. Aangezien de dichtheid van drijflagen (ongeveer $980 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) hoger is dan de dichtheid van olie ($800 - 950 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) zijn drijflagen minder stabiel dan drijvende olie. Een geringe turbulentie bij het afzuigen is reeds voldoende om de drijflagen tot over een bepaalde diepte te mengen, waardoor de concentraties op het afzuigpunt sterk afnemen en het verwijderingsrendement lager wordt.

Geschikte methoden dienen derhalve drijflagen in een zo hoog mogelijke concentratie te verwijderen en ervoor te zorgen dat langs het wateroppervlak afgezogen wordt met een zo gering mogelijke verstoring van de drijf-laag. De volgende twee methoden om drijflagen af te zuigen werden in het veld getest.

Drijvende algenzuiger

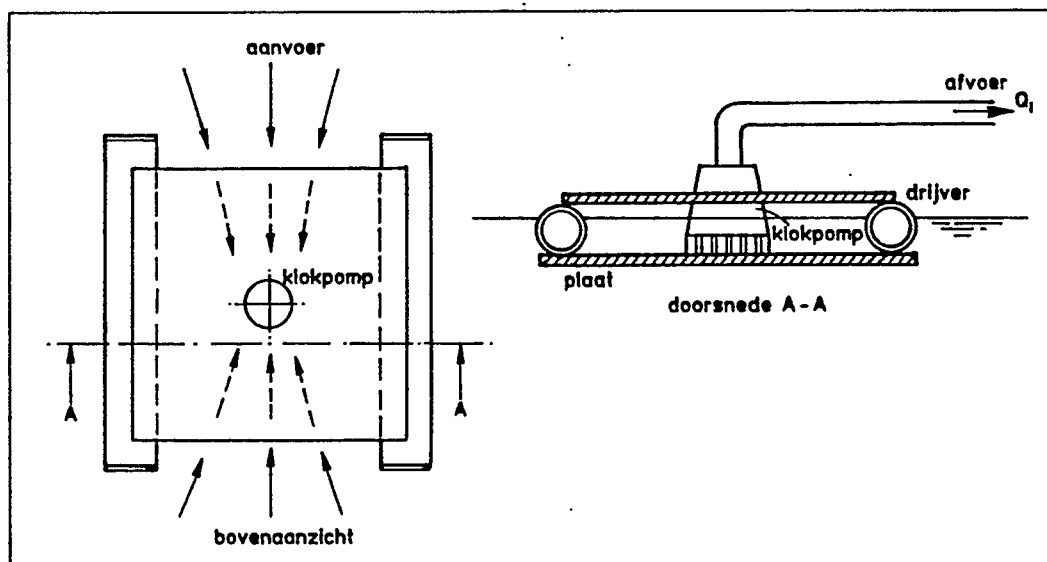
Onder een drijvende constructie (vlot) is een in hoogte verstelbare plaat gemonteerd. Op deze plaat is een, door een 12 Volt accu gevoede, pomp bevestigd die via een flexibele leiding afvoert naar de wal (figuren 28 en 29).

De constructie garandeert dat uitsluitend langs het oppervlak afgezogen wordt. Drijflagen met een dikte van minder dan 1 cm stromen naar de pomp toe en laten zich op deze manier goed verwijderen. Een onvermijdelijk nadeel is dat relatief veel water meegezogen wordt. Drijflagen met een dikte van 1 cm of meer blijken zo stabiel te zijn dat ze moeilijk toevloei-en. Zo ontstaat als het ware een wak in de drijf-laag, en na enige tijd pompen wordt nog uitsluitend water aangezogen. Ter verbetering van deze situatie kan het vlot met behulp van lijnen door de drijf-massa getrokken worden, terwijl de pomp in bedrijf is, of het vlot wordt op een ge-schikte plaats vastgelegd en de drijf-massa wordt in de richting van het vlot getrokken met behulp van drijvende schotten. Per situatie zal beoor-deeld moeten worden welke methode het meest in aanmerking komt. Voordeel van een algenzuiger is dat deze in het water goed verplaatsbaar is en dus gebruikt kan worden op plaatsen waar de hoogste concentratie van drijflagen optreedt.

Skimmer

Verwijdering van blauwwieren met behulp van een skimmer werd beproefd door de Dienst openbare werken Amsterdam (figuur 30). De constructie bestaat uit een stalen bak, die zodanig in het water geplaatst wordt dat de randen juist boven het wateroppervlak uitsteken. Eén van de randen is in hoogte verstelbaar c.q. te verlagen zodat water binnen kan stromen. Onder aan de skimmer is een slang bevestigd die verbonden is met een pomp. De skimmer blijkt goed te functioneren en garandeert net als de algenzuiger dat uitsluitend langs het wateroppervlak aangezogen wordt. Onder ideale omstan-digheden, bij vrijwel windstil weer, kan de verstelbare rand zo gesteld worden dat slechts een geringe hoeveelheid water meegezogen wordt. De skimmer heeft als nadelen:

- a. gevoelig voor golven;
- b. voor een gelijkmatige aanvoer dient de verstelbare rand zuiver



Figuur 28. Schematische weergave van een drijvende algenzuiger. Voor een grootte-indicatie zie figuur 29.

- horizontaal gesteld te worden;
- c. de aanvoer van drijfblagen wordt snel geblokkeerd door drijvend vuil;
- d. de skimmer is moeilijk verplaatsbaar.

7.4 Indikken

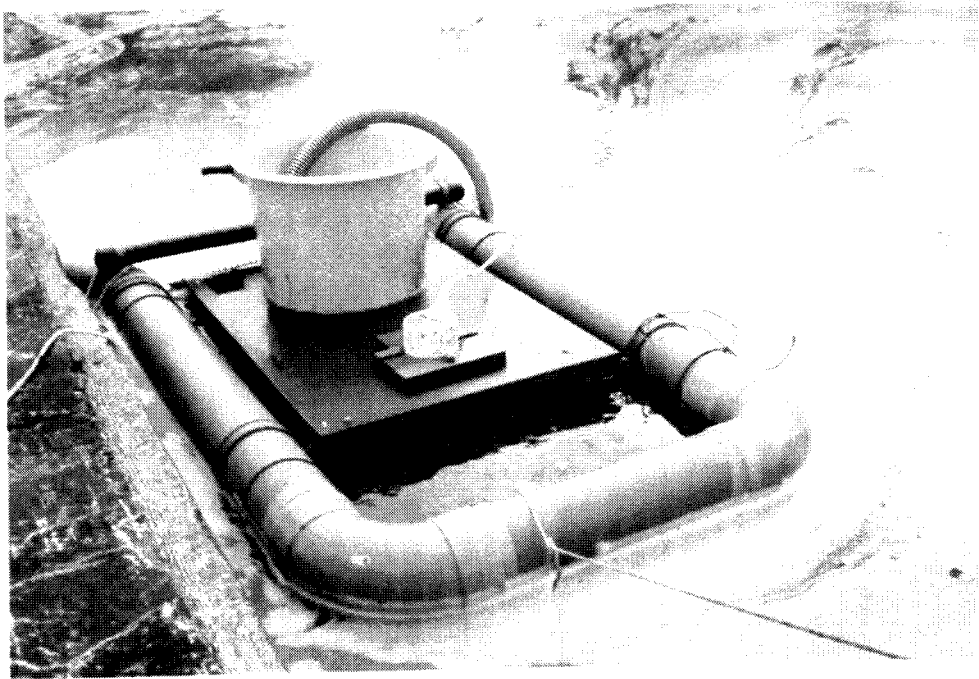
De met algenzuiger of skimmer verwijderde algenmassa heeft nog een aanzienlijk watergehalte. Uit oogpunt van opslagcapaciteit en transport is een zo laag mogelijk watergehalte gewenst. Twee methoden komen in aanmerking om de verwijderde algenmassa voor opslag en transport zover mogelijk te ontwateren: statische scheiding door middel van flotatie of sedimentatie en zeven.

In het veld zijn deze methoden getest door de indikking als volgt in twee stappen uit te voeren: een eerste indikking na verwijdering met behulp van algenzuiger of skimmer, gevolgd door een verdergaande indikking door statische scheiding in een voorraadvat.

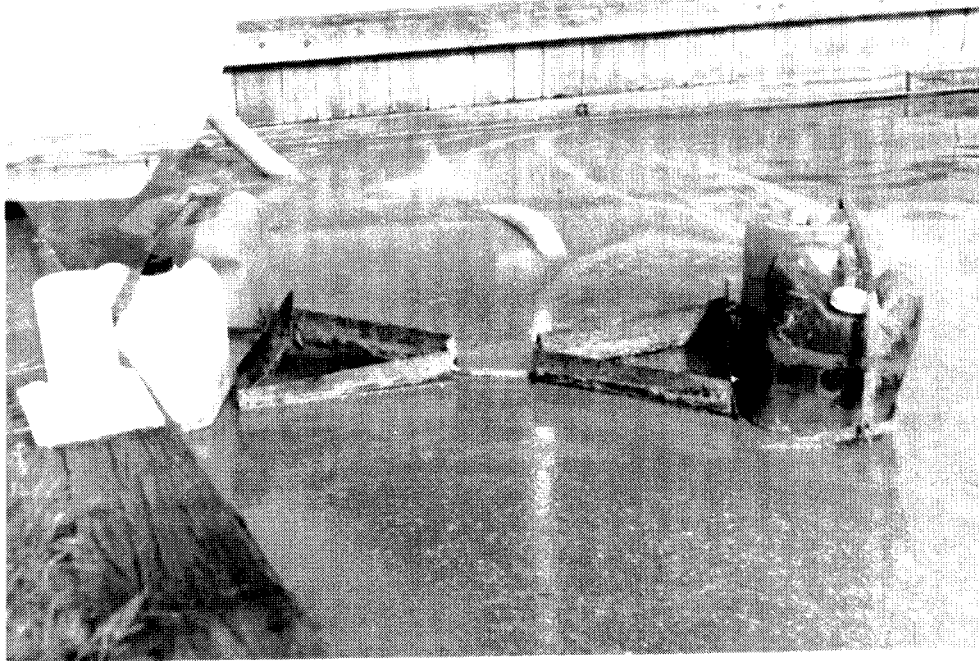
De eerste indikkingsstap werd uitgevoerd op twee manieren: met behulp van een zelf geconstrueerde, schuin opgestelde zeef en met behulp van een trillende zeefbocht.

Schuin opgestelde zeef

Dit eenvoudige apparaat is in een experimentele opstelling getest en leverde goede resultaten. Het afgezogen mengsel van algen en water wordt over een schuin opgestelde zeef van geweven roestvast staal met een maaswijdte van 105 μm geleid. Door de helling worden kolonies en klonten groter dan 105 μm langs het zeefdoek afgevoerd. Het filtraat met kolonies



Figuur 29. Drijvende algenzuiger.



Figuur 30. Skimmer.

kleiner dan 105 μm , komt in een onderliggende goot terecht en kan teruggevoerd worden naar het water. De afgefiltreerde algenmassa kan naar een statische indikker geleid worden voor verdere indikking. Door de zeef schuin op te stellen wordt de algenmassa voortdurend afgevoerd, waardoor de zeef in zekere mate schoon blijft en dus niet verstopt raakt, zoals dat bij loodrechte filtratie het geval zou zijn.

Het verwijderingsrendement is afhankelijk van de concentratie die aangevoerd wordt en vooral afhankelijk van de koloniegrootteverdeling. Het varieerde van 48% als veel kleine kolonies aanwezig waren tot 83% wanneer de populatie in hoofdzaak uit grote kolonies bestond. De concentraties die met de schuin opgestelde zeef bereikt werden, varieerden tussen 10 en 50 volume %.

Trillende zeefbocht

De trillende zeefbocht is een variant op de statische zeefbocht, waarmee vloeistof en vaste stoffen gescheiden kunnen worden. Door het apparaat in trilling te brengen raakt de zeefbocht minder snel verstopt. Het apparaat wordt in verschillende typen, met capaciteiten tussen 2 en 200 $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, en sleufwijdten tussen 0.15 en 1.50 mm geleverd. De sleufwijdte bedroeg bij het beproefde apparaat 0.15 mm, wat inhield dat deeltjes werden verwijderd met een korrelgrootte van ongeveer 60 μm of groter (figuren 31 en 32). Blauwwierconcentraties van 80 volume % werden bereikt. Tijdens het experiment kon de zeefbocht niet in trilling gebracht worden, doch dit raakt de conclusie nauwelijks, omdat door het trillen in hoofdzaak de tijd waarin storingsvrij gewerkt kan worden, verbetert zonder dat veel effect op het scheidingsrendement optreedt.

De tweede indikkingsstap werd uitgevoerd door de, van de eerste indikkingsstap afkomstige, algenmassa in een vat van 2 m^3 te brengen en daar vervolgens te laten opdrijven. Na ongeveer een dag is er een duidelijke scheiding ontstaan tussen de drijvende algenmassa en het onderstaande water. Dit onderstaande water kan in een praktijksituatie teruggevoerd worden naar het oppervlaktewater. De maximaal met deze methode te bereiken blauwwierconcentratie varieerde tussen 64 en 86 volume %. Het materiaal afkomstig van de zeefbocht werd niet verder ingedikt.

Expansieflotatie

De last die oppervlaktewaterzuiverende waterwinningsbedrijven door blauwwieren ondervinden, kan incidenteel aanzienlijke vormen aannemen. Mechanische microzeven worden op een aantal plaatsen in de wereld routinematig gebruikt. Ook is gebleken dat Dissolved Air Flotation (DAF) een goede methode is om blauwwieren te verwijderen. Bij deze techniek wordt de flotatie van deeltjes bewerkstelligd door zeer kleine luchtbelletjes in het water tijdens het stijgen aan zwevende deeltjes te laten hechten en deze mee naar de waterspiegel te laten voeren. Door een volume vloeistof onder druk te brengen wordt het oververzadigd met gas; bij decompressie worden de belletjes gevormd. De methode werd experimenteel getest door Prof. dr. Nakasone (persoonlijke mededeling) bij Tokyo. Met DAF werd een verwijderingspercentage behaald van 98% voor Microcystis bij een cyclustijd van 10 minuten.



Figuur 31. Demonstratie trillende zeefbocht.



Figuur 33. Verpulveren algenmassa onder hoge druk.



Figuur 32. Demonstratie trillende zeefbocht.

7.5 Verwerking op RWZI's

Na verwijdering en indikking dient de algenmassa een bestemming te krijgen. Uitgaande van verwerking op een RWZI en gelet op het voorgaande is er een aantal mogelijkheden voor verwerking, transport en eventuele voorbehandeling. Deze mogelijkheden zijn in tabel 4 weergegeven.

bestemming	transport	voorbehandeling
oxydatiesloot	riool/per as	verpulveren
actief-slibinstallatie	riool	verpulveren
slibgisting RWZI	per as	geen
voorbezinking RWZI	riool	drukschok
slibdroogveld RWZI	per as	geen

Tabel 4. Verwerking van algenmassa op een RWZI.

Bij de verwerking van de algenmassa in één van de onderdelen van een RWZI moet rekening worden gehouden met het verhoogde aanbod in zowel kwantitatieve als kwalitatieve zin. Kwantitatief is het aanbod vrij eenvoudig te sturen door goede afspraken met de aanbieder te maken over het tijdstip van aanbieden en de hoeveelheden. In geval van lozing op het riool zal de aanbieder dit dienen te melden aan de waterbeheerder en eventueel een vergunning aan moeten vragen. In kwalitatief opzicht dient de RWZI-beheerder rekening te houden met een verhoogd aanbod van voornamelijk organisch, veelal anaëroob materiaal. In tabel 5 zijn de parameters, die voor deze verhoogde belasting van belang zijn, weergegeven.

CZV	16000 g*m ⁻³	(120 inwonerequivalenten)
BZV	4800 g*m ⁻³	(90 inwonerequivalenten)
N-Kjeldahl	1250 g*m ⁻³	(125 inwonerequivalenten)
Chlorofyl-a	130 g*m ⁻³	
O ₂	< 1 mg*l ⁻¹	

Tabel 5. Globale belasting van een RWZI door algenmassa.

Overige consequenties voor de verschillende processen worden in het hierna volgende vermeld.

7.5.1 oxydatiesloten, actief-slibinstallaties

Oxydatiesloten worden gekenmerkt door een lage slibbelasting en een lange verblijfstijd. Hierdoor is het mogelijk de zuivering van het rioolwater en vergaande mineralisering van het slib in één systeem te combineren. Ten opzichte van een actief-slibinstallatie ontbreken de voorbezinking en slibgisting. Oxydatiesloten worden toegepast voor kleine zuiveringscapaciteiten, vanaf enkele honderden tot enkele tienduizenden inwonerequivalenten. Actief-slibinstallaties hebben veelal grotere capaciteiten, tot enkele honderdduizenden inwonerequivalenten.

Tijdens het onderzoek is tweemaal een kleine hoeveelheid algenmassa, 2 en 4

m³ (blauwwierconcentratie beide keren ongeveer 50 volume %), geloosd op een riolering met afvoer op de oxydatiesloot te Rijnsaterwoude met een ontwerp-capaciteit van 1200 inwonerequivalenten.

De algenmassa werd voorafgaand aan de lozing verpulverd met een hogedruk-pomp (figuur 33). Voor de oxydatiesloot betekende deze lozing een extra BZV- en N-Kjeldahl-belasting van ongeveer 15%. Als gevolg van het verpulveren werd op de oxydatiesloot door de lozing visueel niets waargenomen. Dit in tegenstelling tot experimenten van het Hoogheemraadschap van Rijnland in september 1984 uitgevoerd op de RWZI te Langeraar. Hierbij werden onbehandelde algen direct in het circuit gepompt. Kort na het storten werden opdrijvende algen waargenomen die onbehandeld via de effluentgoot werden afgevoerd.

Het zuiveringsrendement van de installatie te Rijnsaterwoude liep na lozing enigszins terug door verminderde BZV-afbraak en afname van de mate van nitrificatie. De zuiveringspercentages bleven boven het gemiddelde. Chlorofyl-a wordt goed afgebroken. Hierbij moet worden bedacht dat het in dit geval om effecten van stootbelastingen gaat, terwijl de blauwwierconcentratie relatief laag was. Bij toepassing van goede verzamel- en indiktechnieken mag worden verwacht dat deze concentratie aanzienlijk hoger zal zijn. Onbekend is hoe de oxydatiesloot reageert op regelmatige lozingen in het zomerseizoen. De ontwerp-capaciteit en de werkelijke belasting van het zuiveringssysteem zullen bepalen in hoeverre de extra belasting invloed heeft op het zuiveringsproces.

Transport naar een oxydatiesloot is in principe mogelijk per as of via het riool. In het laatste geval worden geen ofwel minder transportkosten gemaakt.

Voor actief-slibinstallaties geldt dat transport van de algenmassa in principe alleen zinvol is via de riolering. Indien per as getransporteerd moet worden kan beter direct in de slibgistingstank gespuid worden.

7.5.2 slibgisting RWZI

Slibgisting wordt vooral uitgevoerd bij RWZI's die rioolwater behandelen met een actief-slibinstallatie. De capaciteit van een slibgistingstank bedraagt al gauw enige tienduizenden inwonerequivalenten.

In de periode juli tot en met oktober 1986 heeft het Hoogheemraadschap van Rijnland bij wijze van experiment negen maal een hoeveelheid algen gebracht in de slibgistingstank van de RWZI Alphen-Noord. Per keer werd niet meer dan 32 m³ aangevoerd. In eerste instantie deden zich bij het doseren enige problemen voor doordat in het materiaal veel grove delen, bladeren, takjes en dergelijke aanwezig waren. Later werd dit euvel verholpen door de algenmassa vooraf te zeven. Door de incidenteel verhoogde aanvoer van 32 m³*dag¹ boven de normale gemiddelde vers-slibtoevoer van 50-55 m³*dag⁻¹ in de gisting werd geen nadelige invloed op het gistingproces geconstateerd. De gistinggasproductie ging omhoog en de kwaliteit van het uitgegiste slib was steeds goed. De verblijfstijd van het slib in de tank nodig voor een volledige gisting (20 dagen) is niet overschreden. Behalve tijdens het inbrengen van de verse algenmassa traden tijdens de bedrijfsvoering geen stankproblemen op.

Na de gisting vindt verdere indikking in een na-indikker plaats. Het

effluent van deze indikker wordt nabehandeld in een lagune, waar een laatste bezinking van de vaste deeltjes optreedt. Het slibeffluent van de lagune wordt teruggevoerd naar de inlaat van de zuiveringsinrichting. Dit effluent had een groene kleur door de daarin nog aanwezige algen. In het navolgende oxydatiebed werden de algen verder afgebroken zodat het effluent van het oxydatiebed nog slechts lichtgroen was.

Ook in het vrijkomende slib was een lichtgroene kleur waarneembaar, hetgeen als onesthetisch werd ervaren. Dit wijst erop dat de algenmassa tijdens de gisting niet geheel afgebroken wordt. De groenkleuring van het slib en het effluent kan voorkomen worden door de algenmassa vooraf te verpulveren. Hierdoor verandert de kleur van de algenmassa van licht- naar donkergroen. Tevens valt te verwachten dat de algenmassa beter afgebroken wordt.

Transport naar de slibgisting zal per as dienen te geschieden.

7.5.3 alternatieven

De volgende twee bestemmingsmogelijkheden zijn niet onderzocht, maar bieden wellicht alternatieven voor de hierboven vermelde methoden.

voorbezinking RWZI

Indien de RWZI voorzien is van een voorbezinkingstank kan de algenmassa daar via de riolering naar afgevoerd worden. Voorwaarde is dat de algenmassa vooraf behandeld wordt met een drukschok, dus niet wordt verpulverd. De algenmassa kan na sedimentatie met het primair slib verder verwerkt worden. Met deze methode zijn geen transportkosten gemoeid en wordt het achterliggende zuiveringsproces vrijwel niet belast.

slibdroogveld RWZI

Indien de RWZI voorzien is van slibdroogvelden kan de algenmassa daar per as naar afgevoerd worden. Daar zal door droging aan de lucht een volumereductie optreden van naar schatting meer dan 98% ten opzichte van het oorspronkelijke algenvolume. Deze methode gaat met transportkosten gepaard, maar het zuiveringsproces van de RWZI wordt in het geheel niet belast. Bovendien is bij deze methode geen voorbehandeling van de algenmassa nodig om de gasvesikels kapot te maken. In hoeverre er problemen ontstaan aangaande dichtslaan van het zand en stank is niet bekend.

Het blijkt dat de afvoer en verwerking van blauwwiermassa's op de schaal die hier worden beschouwd zonder bezwaren uitvoerbaar zijn. De kosten hiervoor, en de te kiezen methode, hangen sterk af van de lokale omstandigheden. Hetzelfde geldt voor de bestrijdingsmaatregelen tegenhouden of (en) verwijderen.

Volledige onderdrukking van overlast in een haven is niet mogelijk als drijfvlagen wel op het meer optreden. Onderdrukking van de ophoping van algen met als streefwaarde een verbetering van 80% zal in de meeste situaties haalbaar zijn.

8 DISCUSSIE

Onderzoek

De kwalitatieve- en semi-kwantitatieve beschouwingen kunnen in een gegeven situatie het nemen van de beslissing om wel of niet bepaalde maatregelen te nemen ondersteunen. De aspecten die een rol spelen zijn in grote lijnen bekend. Het is te verwachten dat de nauwkeurigheid niet zeer groot is, doch dit geldt voor meerdere modellen voor saneringsmaatregelen van oppervlaktewater.

De modellering van de klontvormende blauwwieren is extra moeilijk, daar de transportprocessen in het model meegenomen moeten worden. Een nul-dimensionaal model waarin een meer homogeen beschouwd wordt, of een één-dimensionaal model waarbij een verticale gradiënt aangenomen wordt, is ontoereikend. Met minder dan een drie-dimensionaal model waarin de transportsnelheden opgenomen zijn, lukt modellering niet goed. De transportprocessen zijn bovendien snel ten opzichte van de groeiprocessen, wat een extra probleem in een model oplevert. Het in hoofdstuk 5 gepresenteerde model kan worden gebruikt om in eerste benadering een antwoord te geven op vragen betreffende ophopingsgevoeligheid van een lokatie, relatieve ophoping van blauwwiermassa en effect van maatregelen om overlast door drijfslagen tegen te gaan.

Limiterend voor vooruitgang in nauwkeurigheid is nu de nauwkeurigheid waarmee de totale hoeveelheid klontvormende blauwwieren en hun drie-dimensionale verdeling eenvoudig en snel gemeten kunnen worden. Een dergelijke meting is voorwaarde voor het testen en ontwikkelen van modellen. In de bijlage worden verschillende (in ontwikkeling zijnde) bepalingmethoden besproken om de blauwwierconcentratie te bepalen.

In het kader van het algemene vermessingsonderzoek kan verwacht worden dat verder werk aan de snelheden van de processen die een rol spelen, gecontinueerd blijft.

Maatregelen

Naast de mate van eutrofiëring bepaalt de windkracht of er wel of geen drijfslagen worden gevormd. De windrichting bepaalt in welke richting de drijfslagen worden afgevoerd. Bij ontwerp en inrichting van lokaties waar drijfslagen problemen kunnen geven dient hiermee rekening te worden gehouden. Bij bestaande lokaties hangt het van de lokale omstandigheden af welke maatregelen het meeste effect zullen sorteren om het binnendringen van de drijfslagen te verhinderen. Het effect van mechanische schermen kan goed worden voorspeld. De resultaten van het onderzoek met een bellenscherm voor de ingang van een jachthaven maken dimensionering en besturing van de bediening mogelijk. Afhankelijk van de lokale omstandigheden houdt een bellenscherm 50-100% van de drijfslagen tegen. Belangrijk is dat het bellenscherm zodanig aangelegd wordt dat het de vorm van de kustlijn volgt, anders kunnen de blauwwieren zich voor het scherm ophopen en kan doorslag optreden waardoor het niet werkt.

Het probleem van lokale overlast wordt op deze manier niet opgelost, maar verplaatst. Drijfslagen die bij de ene lokatie worden tegengehouden kunnen een andere lokatie extra belasten. Aanleg van algenvallen speciaal ingericht om blauwwiermassa te verzamelen en te concentreren op plaatsen waar geen overlast ontstaat door hoge concentraties blauwwier, kan dan overwogen worden.

De methoden die zijn getest om blauwwieren in een zo hoog mogelijke concentratie uit het water te verwijderen, werken alle een beetje. Er is gewerkt met zelfgemaakte algenzuigers en skimmers. Deze waren moeilijk manoeuvreerbaar waardoor het niet mogelijk bleek gedurende langere tijd de drijfslag aan te zuigen. Commercieel gemaakte apparatuur om olie, licht slib en dergelijke van het wateroppervlak te verwijderen, is niet getest.

De met algenzuiger of skimmer verwijderde algenmassa heeft nog een hoog watergehalte. Uit oogpunt van opslagcapaciteit en transport is een zo laag mogelijk watergehalte gewenst. Verschillende methoden zijn beproefd. De demonstratie van de trillende zeefbocht was zeer geslaagd. In één indikingsstap wordt een hoog scheidingsrendement bereikt. Toepassing in de praktijk zal moeten uitwijzen of het gebruik van de zeefbocht rendabel is.

Na verwijdering en indikking dient de algenmassa een bestemming te krijgen. Bij verwerking op slibdroogvelden kunnen stankbezwaren of problemen met het dichtslaan van het zandbed ontstaan. Voorafgaand aan aërobe verwerking in een oxydatiesloot of actief-slibinstallatie moet de algenmassa verpulverd worden met een hogedrukpomp, dit om opdrijven in het zuiveringscircuit te voorkomen. Het verpulveren van de algenmassa onder 10 bar kan zonder problemen worden uitgevoerd; er ontstaat een fijne, donkergroene suspensie. Bij aërobe verwerking dient de slibbelasting van de RWZI liefst lager te zijn dan $0.05 \text{ kg BZV}^*(\text{kg droge stof})^{-1}$. Tevens moet de beluchtingscapaciteit ruim voldoende zijn.

Voor anaërobe verwerking in een slibgisting kan de ingedikte algenmassa zonder verdere voorbereiding worden gebracht in de slibgistingstank. De verblijfstijd dient ruim voldoende te zijn; 20 dagen is een kritische grens. Bij kortere verblijfstijden treedt verzuring op waardoor de gisting stopt. Omdat het algenmateriaal geen bacteriën bevat die al afbrekend werken, kan ook de slibbelasting van belang zijn. Dit moeten de praktijkresultaten uitwijzen.

De voorkeur gaat uit naar anaërobe verwerking vanwege:

- geen verbruik van beluchtingsenergie;
- geen directe invloed op de effluentkwaliteit;
- extra gasproductie.

Transport naar een RWZI is in principe mogelijk per as of via het riool. Voor actief-slibinstallaties geldt dat transport in principe alleen zinvol is via de riolering. Indien per as vervoerd moet worden, kan beter direct in een gistingstank worden gedoseerd. Per lokatie zal moeten worden bepaald welke transport-verwerkingscombinatie het beste toegepast kan worden.

De methoden voor verwijdering en verwerking van blauwwieren zijn uitgetest met Microcystis aeruginosa, de enige blauwwiersoort die massaal in de het Braassemermeer voorkomt. Voor het toepassen van de methoden voor verwijdering bij andere blauwwiersoorten is de mogelijkheid tot vorming van drijflagen essentieel. Tabel 6 geeft een overzicht van de bloeikarakteristieken van verschillende blauwwiersoorten. Voor de verwerkingstechnieken zijn de druk waarbij de gasvesikels in de cellen barsten en de afbreekbaarheid in een RWZI van belang. Deze zullen van de verschillende blauwwiersoorten in de praktijk moeten worden vastgesteld.

Op dit moment lijkt het niet opportuun verder onderzoek gericht op de lokale overlast door drijflagen voort te zetten, anders dan in combinatie

Anabaena

habitat : eutrofe meren, plassen, kanalen en rivieren
bloeikarakteristieken : drijflagen en verspreide kolonies

Aphanizomenon

habitat : eutrofe en - mogelijk - mesotrofe meren,
plassen, kanalen en rivieren
bloeikarakteristieken : drijflagen en verspreide kolonies

Gloeotrichia

habitat : eutrofe en mesotrofe meren en plassen
bloeikarakteristieken : zwevende kolonies

Lyngbya

habitat : eutrofe meren en plassen
bloeikarakteristieken : zwevende (draadvormige) kolonies

Microcystis

habitat : eutrofe meren, plassen , kanalen en rivieren
bloeikarakteristieken : drijflagen en verspreide kolonies

Nodularia

habitat : eutrofe meren en plassen
bloeikarakteristieken : drijflagen en verspreide kolonies

Oscillatoria

habitat : eutrofe en mesotrofe meren, plassen,
kanalen en rivieren
bloeikarakteristieken : drijflagen onder de wateroppervlakte en
verspreide (draadvormige) kolonies

Tabel 6. Habitat en bloeikarakteristieken van blauwwiersoorten (Paerl, 1988).

met daadwerkelijk te treffen maatregelen. Hierdoor kan wellicht in de loop der jaren genoeg praktijkervaring opgedaan worden om deze te gelegener tijd te evalueren.

9 LITERATUUR

- Bert, C.L.M. de, 1988. Bestrijding van overlast door drijfslagen van blauwwieren: ontwerp van een bellenscherm en een winddata aquisitionsysteem. Afstudeerverslag TUD.
- Bol, J. & W. Seinen, 1988. Een laboratoriumonderzoek naar de toxiciteit van Microcystis aeruginosa uit de Andelse Maas. Rapport Vakgroep Veterinaire Farmacologie, Farmacie en Toxicologie, RUU.
- Colebrook, 1960. Plankton and water movements in Windermere. J. Animal Ecol., 29, 217-240.
- Donze, M., J. Haveman & P. Schiereck, 1972. Absence of photosystem 2 in heterocysts of the blue-green alga Anabaena. Biochim. Biophys. Acta 256, 157-161.
- Donze, M., C. Nieuwendijk, A. van Boxtel & M. Quaak, 1990. Aquatic pollution and dredging in the European Community. 184 pp.; Delwel, The Hague. ISBN 90-6155-430-6.
- Dubelaar, G.B.J., C.S. van der Reijden & H.W. Balfoort, 1991. Flow cytometric determination of size distributions of phytoplankton colonies. In preparation.
- George, D.G. & R.W. Edwards, 1976. The effect of wind on the distribution of chlorophyll a and crustacean plankton in a shallow eutrophic reservoir. J. Appl. Ecol., 13, 667-690.
- Haines, D.A. & R.A. Bryson, 1961. An empirical study of wind factor in Lake Mendota. Limnol. Oceanogr., 6, 356-364.
- Hakvoort, J.H.M. & J. Krijgsman, 1991. In situ measurements of absorption-spectra: an approximative method for turbid surface water. In preparation.
- Hoekstra, A.C., J. Bol & W. Seinen, 1991. Blauwwieren en hun toxinen in voor drinkwaterproductie gebruikt oppervlaktewater. H₂O 24, 387-393.
- Honing, H. van der & M.L. Meijer, 1985. Bestrijding eutrofiëringsproblemen. Rapport Zuiveringsschap Hollandse Eilanden en Waarden.
- Jacobs, A.F.A. & M. Donze, 1986. Enkele waarnemingen vanuit de lucht over de dynamiek van drijfslagen van blauwwieren. KEMA-rapport 98391-MOB 86-3028.
- Kappers, F.I., 1984. On the population dynamics of the cyanobacterium Microcystis aeruginosa. Ph. D-thesis, University of Amsterdam, The Netherlands.
- Kappers, F. I., 1987. Effecten van cyanobacteriën (blauwwieren) op de gezondheid van waterrecreanten. RIVM rapport nr. 148701001.
- Kappers, F.I., P. Leeuwangh, M. Dekker & W. Koerselman, 1980. Investigation of the presence of toxins produced by cyanobacteria (blue-green algae) in the Netherlands. Sci total Environ 18, 359-361.
- Maxwell, W.H.C. & S. Tekeli, 1978. Behaviour of air bubble screens. Urbana,

University of Illinois, Dep. Civil Eng.

Meijer, M.L. & H. van der Honing, 1986. Drijfslagen van blauwalgen in het Brielse Meer. *H₂O* 19, 90-94.

Nortier, I.W. & H. van der Velde, 1971. *Hydraulica voor waterbouwkundigen*. Technische uitgeverij H. Stam N.V., ISBN 90-11-35550-4.

N.V. Waterwinningsbedrijf Brabantse Biesbosch, afdeling Laboratorium. 1981/1982. Jaarverslag.

Paerl, H.W., 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnol. Oceanogr.* 33 (4, part 2), 823-847.

Reynolds, C.S., 1973. Growth and buoyancy of Microcystis aeruginosa Kütz. emend. Elenkin in a shallow eutrophic lake. *Proc. R. Soc. Lond. B.*, 184, 29-50.

Reynolds, C.S., 1984. *The ecology of freshwater phytoplankton*. Cambridge University Press, ISBN 0-521-28222-5.

Reynolds, C.S. 1991. Toxic bleu-green algae: the "problem" in perspective. *Freshwater Forum* 1, 29-38.

Reynolds, C.S., R.L. Oliver & A.E. Walsby, 1987. Cyanobacterial dominance: the role of buoyancy regulation in dynamic lake environments. *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.* 21, 379-390.

Reynolds, C.S. & D.A. Rogers, 1976. Seasonal variations in the vertical distribution and buoyancy of Microcystis aeruginosa Kütz. emend. Elenkin in Roshterne mere, England. *Hydrobiologia* 48, 17-23.

Savelkoul, L., H. Ligthart, H. Oosting & G. Verwoert, 1989. Onderzoek in 1989 naar de verwijdering van algen in de woonschepenhaven bij het IJsbaanpad in het Nieuwe Meer. Dienst openbare werken Amsterdam, hoofdafdeling riolering en waterbeheersing, afdeling waterbeheer, rapportnr WB-89-007.

Small, 1963. Effect of wind on the distribution of chlorophyll-a in Clear Lake, Iowa. *Limnol. Oceanogr.* 8, 426-423.

Tsahalís, D.T. 1979. Theoretical and experimental study of wind and wave induced drift. *J. Phys. Oceanogr.*, 9, 1243-1257.

Stokkom, H.T.C. van & M. Donze, 1988. Optische remote sensing en oppervlaktewater nu. *H₂O* 21, 33-42.

Verduin, J., 1951. A comparison of phytoplankton data obtained by a mobile sampling method with those obtained from a single station. *Am. J. Bot.*, 38, 5-11.

Zohary, T., 1985. Hyperscums of the cyanobacterium Microcystis aeruginosa in a hypertrophic lake. (Hartbeespoort Dam, South Africa). *J. Plankton. Res.*, 7, 399-409.

SYMBOLENLIJST

$A_{\text{drijf laag}}$	oppervlakte van de drijf laag (m^2)
A_{meer}	oppervlakte van het meer (m^2)
B	breedte (m)
B_{eff}	effectieve breedte waarover <u>Microcystis</u> worden aan- gevoerd (m)
$D(x)$	dikte van de drijf laag ter plaatse van x (m)
D_0	dikte van de drijf laag ter plaatse van $x = 0$ (m)
D_{max}	maximale dikte van de drijf laag ter plaatse van een vertikale doorsnede (m)
g	zwaartekrachtsversnelling ($9,81 \text{ m*s}^{-2}$)
h	hoogte waterkolom (m)
H	golfhoogte (m)
H_a	atmosferische druk (bar)
L	lengte waarover drijf lagen worden aangevoerd (m)
L_{eff}	effectieve strijklengte van de wind (m)
P	tijdperiode (s)
q_a	luchtdebiet per strekkende meter ($\text{m}^3*\text{m}^{-1}*\text{s}^{-1}$)
q_M	aanvoer van <u>Microcystis</u> per tijdseenheid (m^3*s^{-1})
u_z	snelheid van een (water)deeltje op diepte z (m*s^{-1})
Q_M	q_M geïntegreerd naar tijd (m^3)
$Q_{M, \text{tot}}$	totale gevormde drijf massa gedurende periode T (m^3)
R	relatieve maat voor de ophoping van <u>Microcystis</u> in de haven ten opzichte van de totale hoeveelheid <u>Microcystis</u> in het meer gedurende een periode T (-)
T	periode waarin drijf massa wordt gevormd (s)
v	stroomsnelheid van het water (m*s^{-1})
v_{opp}	door bellenscherm geïnduceerde stroomsnelheid aan het oppervlak (m*s^{-1})
v_s	stroomsnelheid bij winddrift (m*s^{-1})
V	verplaatsingssnelheid <u>Microcystis</u> (m*s^{-1})
V_{flot}	schijnbare flotatiesnelheid van blauwwierkolonies (m*s^{-1})
V_{opp}	snelheid drijf laag aan het wateroppervlak (m*s^{-1})
V_{sed}	schijnbare sedimentatiesnelheid van blauwwierkolonies (m*s^{-1})
x	plaatscoördinaat in x-richting (m)
y	plaatscoördinaat in y-richting (m)
z	waterdiepte (m)
α	windrichting (graden)
μ	aangroeisnelheid van de drijf laag (m*s^{-1})
λ	golflengte (m)

BIJLAGE

BIJLAGE: BLAUWWIEREN MEETTECHNISCH GEZIEN

Microcystis is inhomogeen verdeeld op alle ruimtelijke schalen groter dan een cel, bovendien is de verplaatsingssnelheid groot. Verder is het soortelijk gewicht van de kolonies inhomogeen verdeeld in een enkel monster, terwijl het significant varieert in de loop van een dag: het gasgehalte en het gehalte aan koolhydraat zijn de belangrijkste. Deze verschijnselen maken nauwkeurig onderzoek naar het dynamisch gedrag moeilijk. In het hiernavolgende worden een aantal bepalingsmogelijkheden en hun voor- en nadelen besproken.

Volumetrische bepaling van blauwwieren

Bij het hier beschreven onderzoek is voornamelijk gewerkt met een volumetrische methode, geïntroduceerd door de N.V. Waterwinningsbedrijf Brabantse Biesbosch (1981/1982) en verder geoptimaliseerd door de TUD en de N.V. KEMA.

De methode maakt gebruik van het vermogen van blauwwieren om, bij afwezigheid van turbulentie, voornamelijk op te drijven of te zinken en juist in geringe mate te zweven. Een voldoende groot volume oppervlaktewater wordt gezeefd door gaas met een maaswijdte van 37 μm . Het ingedikte materiaal wordt in een buret met maatverdeling gebracht (figuur 34). Er is gewerkt met buretten met diameters variërend van 15 tot en met 270 mm. Binnen deze grenzen heeft de diameter van de buret geen invloed op het bepaalde volume % algen.

Uit resultaten van verdunningsreeksen is gebleken dat representatieve en goed reproduceerbare resultaten worden verkregen wanneer de blauwwierconcentratie van het monster dat in de buret wordt gebracht tussen 5 en 65 volume % ligt. De werkwijze kan goed met de chlorofylbepaling gecorreleerd worden. Het verloop van het af te lezen volume algen in de buret wordt na circa 24 uur onafhankelijk van het te bereiken eindvolume. Dit betekent dat voor het bepalen van conversiefactoren niet gewacht hoeft te worden tot het constant worden van het volume algen.

Een analist kan circa 80 monsters per dag behandelen. Het bepalen van eventuele conversiefactoren zal de meeste tijd vragen. De methode is niet zeer nauwkeurig door de tijdsafhankelijkheid en het variabel gehalte aan slijm in en rond de kolonies. In situaties waarin het gebruik van de methode waardevol is, namelijk in veld, is het niet relevant om een hoge nauwkeurigheid na te streven gezien de heterogene verdeling van blauwwierconcentraties in het oppervlaktewater. Bij onderzoek naar het horizontale en verticale migratiegedrag van blauwwieren is het kunnen beschikken over relatieve waarden voldoende.

Chlorofylbepaling

Als maat voor de hoeveelheid algen in bulk kan het pigmentgehalte chemisch of optisch bepaald worden. Chemische analyse van chlorofyl is duur: een analist kan circa 30 monsters per dag aan. Met direct-optische metingen in situ vanaf een schip werden even nauwkeurige resultaten behaald; deze meting kan geautomatiseerd worden tot ongeveer eenmaal per twee seconden. Er is geen reden spectroscopische bepalingen in het laboratorium uit te voeren (Hakvoort & Krijgsman, 1991).

Fluorimetrie

Fluorimetrie is ongeschikt daar in algenmassa's die aan het bederven zijn het gehalte aan los fycocyaan zo groot is dat het het fluorescentiesignaal bepaalt.

Flow-cytometrie

De deeltjesgrootteverdeling kan met behulp van flow-cytometrie bepaald worden, de basale optische vragen werden recent opgelost (Dubelaar et al., 1991). Een dergelijk duur instrument met een analist zou circa 40 monsters per dag kunnen verwerken. De verwerkingstijd van de vele gegevens kan door onderzoek beperkt worden. Flowcytometrie voor en na een drukschok levert het gehalte aan gas als functie van de koloniegrootte.

Bepaling aantal cellen

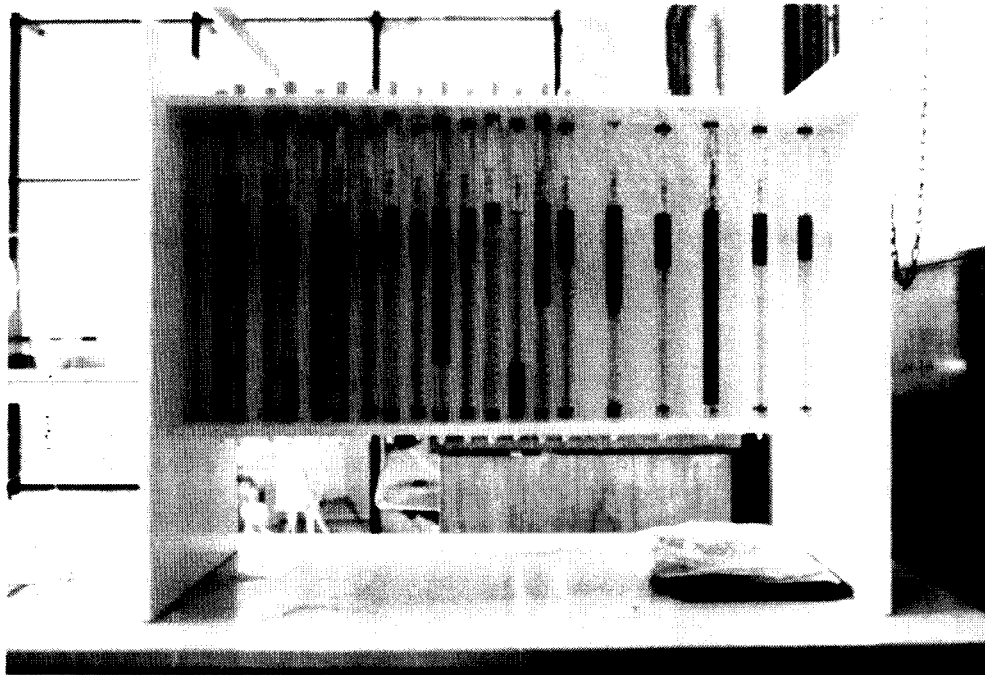
Het totaal aantal cellen kan microscopisch of met een flow-cytometer bepaald worden na verpulveren van het materiaal.

Optische metingen vanuit de lucht

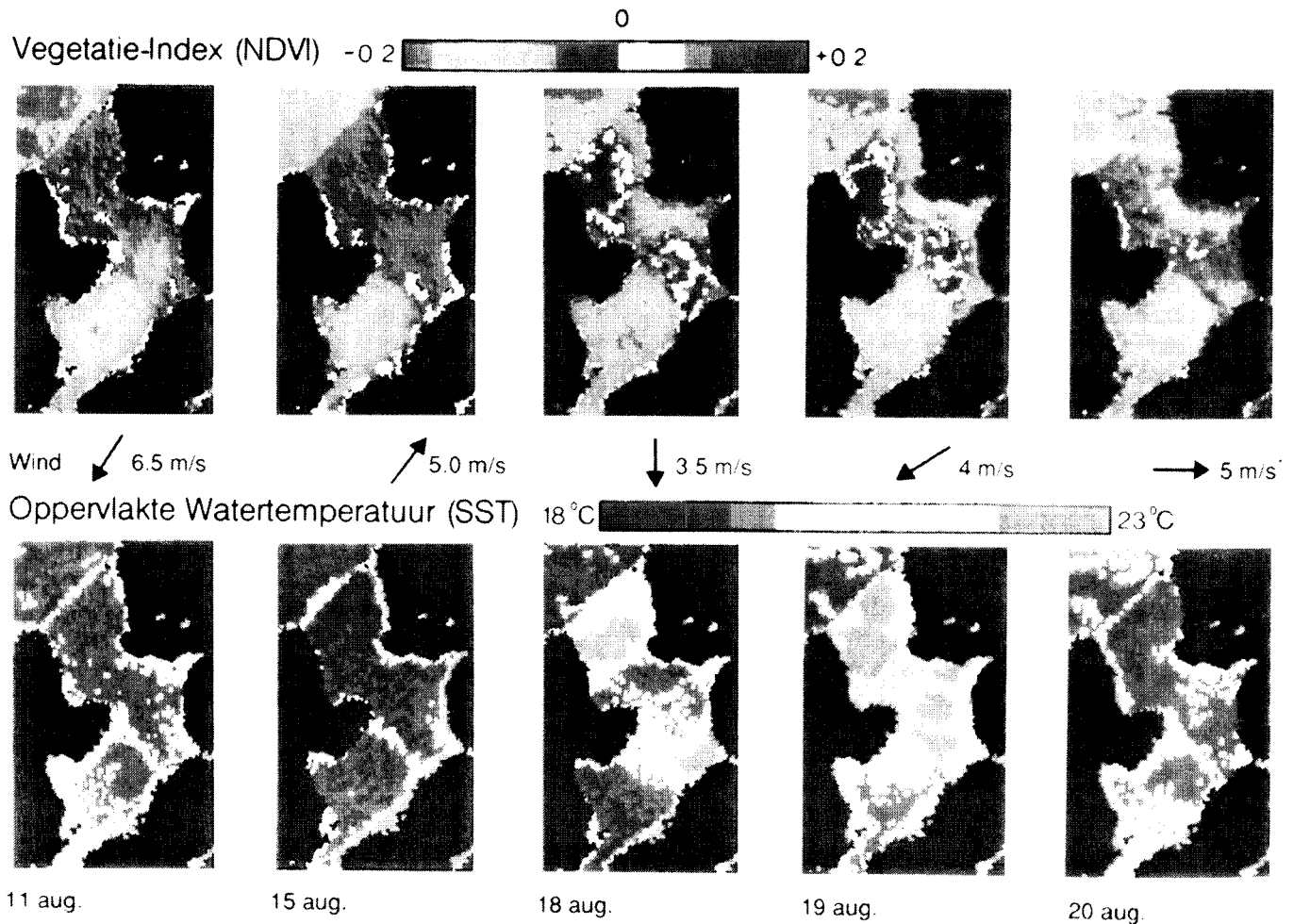
Het is mogelijk gebleken met optische metingen vanuit de lucht (in experimenten vanaf een schip en op de wal in vaten) de dikte van drijflagen tot circa 5 mm te meten. Dikkere lagen kunnen alleen als zodanig herkend worden. In principe maakt dit het mogelijk met vliegtuigen en satellietbeelden de drijvende fractie exact te kwantificeren over een groot oppervlak. Voorbeelden zijn te zien in de figuren 35 en 36.

De verdeling op grotere diepte kan met voornoemde optische detector snel bepaald worden vanaf een schip; voor de bepaling van een nauwkeurig profiel zijn circa 5 minuten nodig.

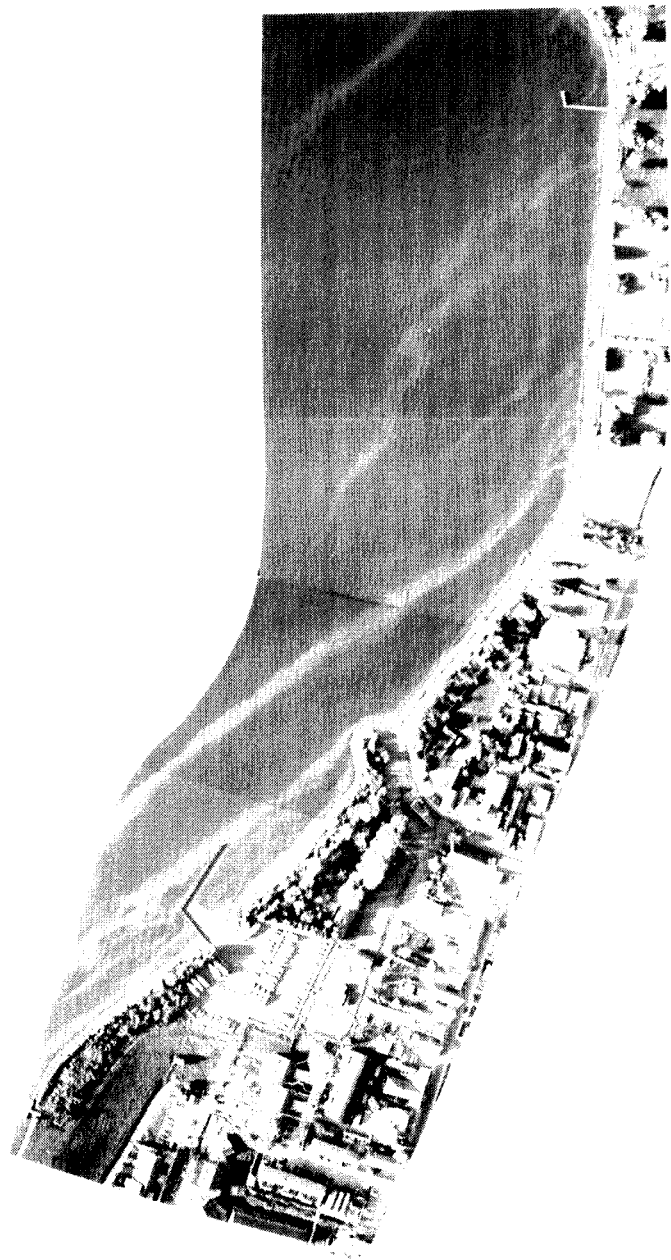
Het voornaamste probleem bij de kwantificering van de totale hoeveelheid Microcystis in een waterlichaam ligt in de onbekendheid van de hoeveelheid algen die zich bij de bodem ophoudt. Als dit een grote hoeveelheid is, is te verwachten dat de verdeling extreem inhomogeen is, het materiaal nauwelijks te bemonsteren en de snelheid van verandering groot. Net als aan het oppervlak in horizontale richting, maar in verticale richting is te verwachten dat de problemen veel groter zijn, zodat veel meer metingen op korte afstand van elkaar nodig zouden kunnen blijken. Adequate meetapparatuur hiervoor is tot nu toe niet voorhanden.



Figuur 34. Volumetrische bepaling van blauwwierconcentraties.



Figuur 35. Beelden van de NOAA satelliet van het IJsselmeer op een aantal dagen. NDVI-waarden groter dan 0 en hoge SST-waarden duiden op de aanwezigheid van drijfslagen. Het opkomen en verdwijnen van de drijfslagen correspondeert met de windkracht, de plaats met de windrichting.



Figuur 36. Wegvoeren van drijfvlagen bij windsnelheden groter dan 3 à 5 m*s⁻¹. Vertikaalopnamen gemaakt op 081086, 16:10 uur. Braassemeermeer, Gemeentehaven (boven) en jachthaven "Meerzicht" (onder).

