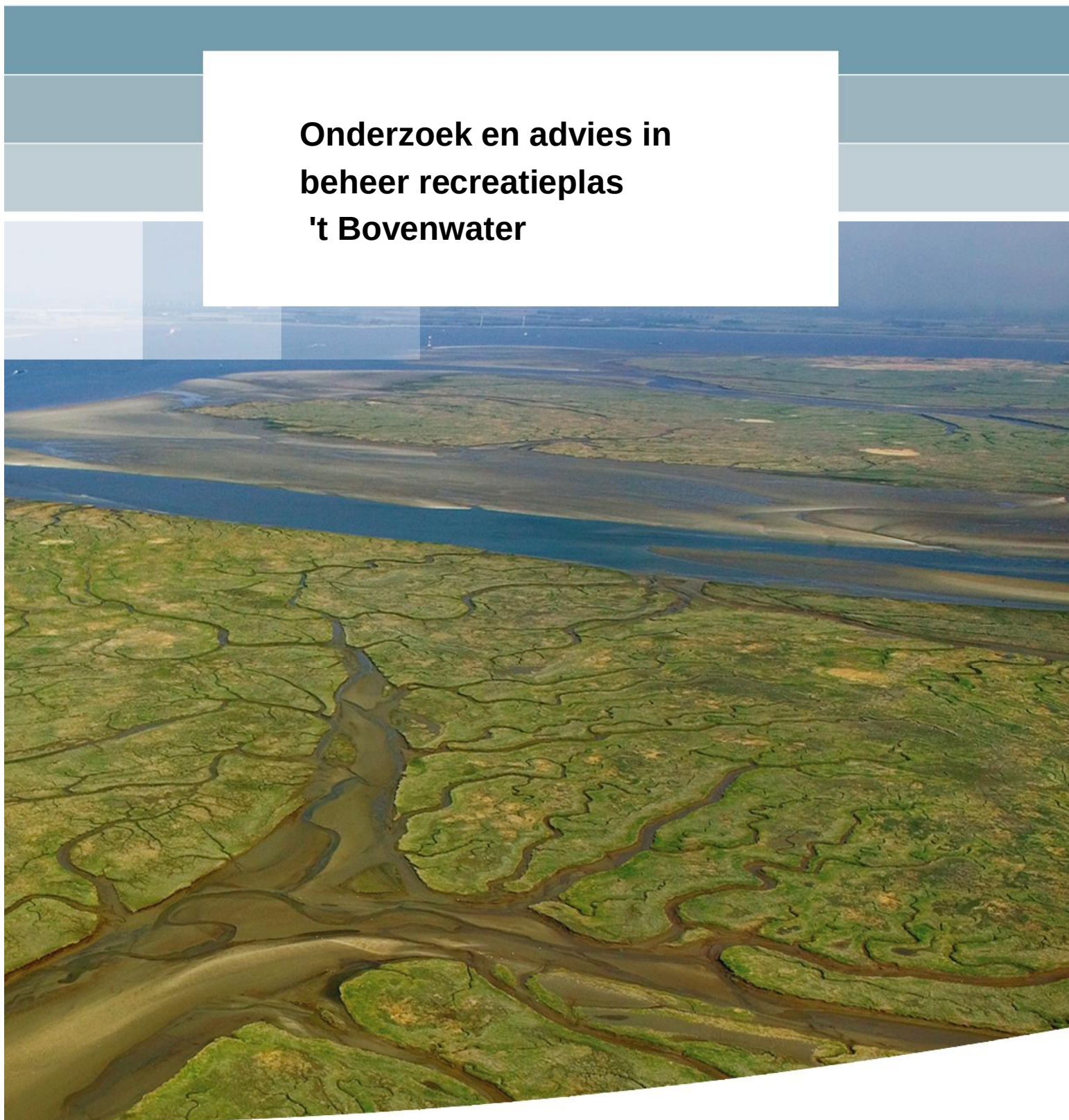


**Onderzoek en advies in
beheer recreatieplas
't Bovenwater**



Onderzoek en advies in beheer recreatieplas 't Bovenwater

Wilbert Verbruggen
Leo Postma
David Burger

1207439-000

Titel

Onderzoek en advies in beheer recreatieplas
't Bovenwater

Opdrachtgever

Gemeente Lelystad

Project

1207439-000

Kenmerk

1207439-000-ZWS-0004

Pagina's

46

Trefwoorden

't Bovenwater, maatregelen tegen drijfslagen

Samenvatting

Deltares heeft in opdracht van de gemeente Lelystad de waterstroming in 't Bovenwater berekend. Berekeningen zijn uitgevoerd voor de wind condities van 7 augustus 2012 tot 21 augustus 2012. Er is een berekening uitgevoerd voor de huidige situatie en voor de situatie met een brede duiker onder de Bunschotenlaan, die tot boven het wateroppervlak reikt. Met deze berekende waterstromingen heeft Deltares de stroming van drijfslagen in beeld gebracht voor zowel de huidige situatie als voor de situatie met de brede duiker.

Uit een vergelijking van de berekeningsresultaten voor beide situaties blijkt dat lokaal op korte afstanden significante verschillen in de te verwachten hoeveelheden drijfslagen kunnen ontstaan. Deze verschillen kunnen op dezelfde locatie op verschillende tijdstippen zowel positief als negatief zijn, afhankelijk van de wind condities en de oprijfhistorie. Voor de gebruikte periode met windgegevens levert de situatie met brede duiker naar verwachting geen systematische vermindering van de hoeveelheid drijfslagen tussen de woningen op.

De berekeningen gaan er van uit dat de totale hoeveelheid algen in 't Bovenwater niet wordt beïnvloed door de aanleg van een brede duiker. Deze hoeveelheid is afhankelijk van de voor algengroei beschikbare nutriënten en van de voor algengroei beschikbare hoeveelheid licht. De drijfslaag veroorzakende algensoorten zijn trage groeiers in vergelijking met de soorten die dat niet doen. Ze gaan wel efficiënter om met de beschikbare nutriënten en ze zijn in het geval van *Anabaena* zelfs in staat om in het water opgelost N₂ gas als bron van stikstof aan te wenden. Verder gaan zij efficiënter om met licht beperkte omstandigheden, doordat zij drijfvermogen ontwikkelen.

Een structurele vermindering van de drijfslagen in 't Bovenwater is alleen mogelijk door zo ver mogelijk doorgevoerde nutriënt reductie en dan met name reductie van fosfor. Een zo nauwkeurig mogelijke fosfaat boekhouding kan de basis zijn voor nutriënt reducerende maatregelen. Van het reduceren van die bronnen zal een structureel effect uitgaan zodra het niveau bereikt is waarop fosfaat beperkend is voor de groei. In de periode dat licht beperkend is voor de groei kunnen andere algensoorten in hun competitie met *Anabaena* geholpen worden door het meer zo lang mogelijk zo helder mogelijk te houden. Hiervoor is de bodembegroeiing essentieel.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	feb. 2013	Leo Postma		Jos van Gils		Gerard Blom	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Hydrodynamische modellering	3
2.1 Data analyse	3
2.1.1 Inleiding	3
2.1.2 Databronnen	3
2.1.3 Geometrie	3
2.1.4 Waterstand	3
2.1.5 In- uitstroomdebieten	3
2.1.6 Dieptegegevens	4
2.1.7 Wind	4
2.1.8 Vegetatie	5
2.1.9 Duikers	5
2.2 Opzet hydrodynamisch model	5
2.2.1 Inleiding	5
2.2.2 Rekenrooster	6
2.2.3 Bodemschematisatie	6
2.2.4 Overige geometrie schematisaties	6
2.2.5 Tijdschematisatie	6
2.2.6 Meegenomen processen	7
2.2.7 Randvoorwaarden en begincondities	7
2.3 Fysische parameters	7
2.3.1 Vegetatie	7
2.3.2 Wind	8
2.3.3 Duikers	8
2.3.4 Ruwheden	8
2.3.5 Eddy viscositeit	8
2.3.6 Overige parameters	9
2.3.7 Observatiepunten	9
2.3.8 Scenario's	9
2.4 Verificatie	9
2.5 Resultaten hydrodynamisch model	9
2.5.1 Algemene Observaties	10
2.5.2 Algemene observaties in de inhammen	10
2.5.3 Effecten van het plaatsen van de brede duiker	11
3 Drijfslag modellering	13
3.1 Inleiding	13
3.1.1 Het opdrijven	14
3.1.2 De horizontale diffusie coëfficiënt	15
3.1.3 Het starttijdstip voor de deeltjes	15
3.1.4 De rekentijdstap	16
3.1.5 De gebruikte windgegevens	16
3.2 Berekeningsresultaten	17
3.2.1 De huidige situatie, deeltjes starten op 8 augustus 00 uur	17
3.2.2 De huidige situatie, deeltjes starten op 14 augustus 00 uur	18
3.2.3 De situatie met de geprojecteerde brede duiker	18

3.3	Conclusies	18
4	Karakteristieken van Blauwalgen, drijfslagvorming en limiterende factoren	19
4.1	Soorten blauwalgen	19
4.2	Anabaena	20
4.3	Vorming van drijfslagen	21
4.4	Limiterende factoren	22
4.5	Samenvatting algemene ecologie bloeivormende blauwalgen	24
5	Mogelijke maatregelen tegen de drijfslagen	25
5.1	Korte termijn strategieën	25
5.1.1	Voorkoming transport drijfslagen en accumulatie:	25
5.1.2	Fysieke en mechanische verwijdering van drijfslagen:	26
5.1.3	In-situ vermindering van algen biomassa en drijfslagen	26
5.2	Middellange termijn strategieën (1-5 jaar)	29
5.2.1	Middelen die fysiek de menging en circulatie bevorderen:	29
5.2.2	Vermindering van interne nalevering:	29
5.2.3	Biomanipulatie:	30
5.3	Lange termijnstrategieën (>5 jaar)	32
6	Plausibele oplossingsrichtingen	33
6.1	Bestaande beheers strategieën	33
6.2	Bestaande situatie	33
6.2.1	Aanbevelingen voor aanvullende maatregelen ter vermindering van de biomassa en drijfslagen van cyanobacteriën.	34
7	Referenties	37
 Bijlage(n)		
A	Gevoeligheidsanalyse	A-1
B	Het Rouse profiel	B-1
C	Overzicht van genomen en overwogen maatregelen	C-1

Samenvatting en conclusies

Deltares heeft in opdracht van de gemeente Lelystad de waterstroming in 't Bovenwater berekend met het Delft3D hydrodynamische model. Berekeningen zijn uitgevoerd voor de windcondities van 7 augustus 2012 tot 21 augustus 2012. Er is een berekening uitgevoerd voor de huidige situatie en voor de situatie met een brede duiker onder de Bunschotenlaan, die tot boven het wateroppervlak reikt.

De kracht van de wind zorgt dat het water opgestuwd wordt in benedenwindse richting. Aan het wateroppervlak wordt het water met de wind meegenomen, op enige diepte vindt een retourstroming plaats. De diepte waarop dat gebeurt hangt af van de plaatselijke diepte van 't Bovenwater en van de weerstand van de begroeiing ter plaatse. De tegenwoordige in- en uitlaatdebieten zijn zodanig klein dat ze de stroming niet merkbaar beïnvloeden.

De stroomsnelheden in de westelijke inhammen zijn voor de gemodelleerde periode groter dan in de oostelijke inhammen. Het plaatsen van een brede duiker onder de Bunschotenlaan geeft voor de modelperiode lokaal een vermindering van de stroomsnelheden aan het oppervlak van de inham tussen de Beulakerwiede en de Belterwiede. De stroomsnelheden in diepere lagen nemen toe.

Met deze berekende waterstromingen heeft Deltares de stroming van drijfslagen in beeld gebracht voor zowel de huidige situatie als voor de situatie met de brede duiker. Er zijn twee berekeningen uitgevoerd. Voor de eerste is aangenomen dat opdrijving ontstond aan het begin van 8 augustus 2012. Voor de tweede is aangenomen dat de opdrijving ontstond aan het begin van 14 augustus 2012. Het precieze tijdstip van ontstaan van opdrijven is niet bekend. Het is ook niet bekend of groei en opdrijving een langere periode in beslag nemen en welke periode dat dan was. De vergelijking van beide berekeningsresultaten geeft een goed idee van de gevoeligheid van het transport van de drijfslagen voor tijdstippen en periodes van hun ontstaan.

Uit een vergelijking van de berekeningsresultaten voor beide situaties blijkt dat lokaal op korte afstanden significante verschillen in de te verwachten hoeveelheden drijfslagen kunnen ontstaan. Deze verschillen kunnen op dezelfde locatie op verschillende tijdstippen zowel positief als negatief zijn, afhankelijk van de windcondities en de opdrijfshistorie. Voor de gebruikte periode met windgegevens levert de situatie met brede duiker naar verwachting geen systematische vermindering van de hoeveelheid drijfslagen tussen de woningen op. Zelfs voor de inham tussen de Beulakerwiede en de Belterwiede zijn er fasen in de berekening die een tijdelijke toename van drijfslagen kunnen doen verwachten.

We gaan er van uit dat de totale hoeveelheid algen in 't Bovenwater niet wordt beïnvloed door de aanleg van een brede duiker. Deze hoeveelheid is afhankelijk van de voor algengroei beschikbare nutriënten en van de voor algengroei beschikbare hoeveelheid licht. De drijfslaagveroorzakende algensoorten zijn trage groeiers in vergelijking met de soorten die dat niet doen. Ze gaan wel efficiënter om met de beschikbare nutriënten en ze zijn in het geval van *Anabaena* zelfs in staat om in het water opgelost N₂-gas als bron van stikstof aan te wenden. Verder gaan zij efficiënter om met licht, doordat zij drijfvermogen ontwikkelen.

Een structurele vermindering van de drijfslagen in 't Bovenwater is alleen mogelijk door zo ver mogelijk doorgevoerde nutriëntreductie en dan met name reductie van fosfor. Een zo nauwkeurig mogelijke fosfaatboekhouding kan de basis zijn voor effectieve nutriëntreducerende maatregelen.

Hieruit kan blijken welke bronnen de belangrijkste bijdrage leveren. Afhankelijk van de grootte van de verschillende fosfaatbronnen kunnen de omwonenden in samenwerking met de gemeente wellicht ook een rol hebben in het terugdringen van de fosfaatbelasting. Van het reduceren van die bronnen zal een structureel effect uitgaan zodra het niveau bereikt is waarop fosfaat beperkend is voor de groei. In de periode dat licht beperkend is voor de groei kunnen andere algensoorten in hun competitie met *Anabaena* geholpen worden door het meer zo lang mogelijk zo helder mogelijk te houden. Hiervoor is de bodembegroeiing essentieel. Het is zeer wel mogelijk dat het huidige beleid het best haalbare resultaat oplevert binnen de grenzen van de regelgeving ten aanzien van de omgeving, flora en fauna en binnen de belangen van de verschillende gebruikers. 't Bovenwater bevindt zich in een relatief gunstige omstandigheid met jaarlijks terugkerende bodembegroeiers die het meer relatief helder kunnen houden. Het is zaak maatregelen te vermijden die deze jaarlijkse terugkeer in gevaar kunnen brengen.

Lokale vermindering van drijfslagen door afzuigen kan naast het verminderen van al aanwezige drijfslagen ook een structurele rol spelen omdat daarmee fosfaat uit 't Bovenwater verwijderd kan worden. Het staat nog te bezien of deze hoeveelheid in de fosforbalans aantelt. Er kan geëxperimenteerd worden met het weghouden van drijfslagen uit de kanalen tussen de woningen door de kanalen af te sluiten met een luchtbellenscherm. De bevaarbaarheid wordt in stand gehouden en drijfslagen kunnen mogelijk buiten het gebied tussen de woningen gehouden worden.

1 Inleiding

Bij brief van 16 oktober 2012 heeft de gemeente Lelystad aan Deltares verzocht een prijsaanbieding te doen voor het opstellen van een stromings- en transport model van de drijfslagen in de recreatieplas 't Bovenwater. Hiermee zou:

- De stroming van de drijfslagen in de huidige situatie in beeld gebracht moeten worden.
- De stroming van de drijfslagen in beeld gebracht moeten worden uitgaande van de aanwezigheid van een duiker onder de Bunschotenlaan.

Verder werd gevraagd om:

- Een beschrijving van de wijze van ontstaan van de drijfslagen.
- Antwoord op de vraag naar wanneer, in hoeverre en op welke wijze het mogelijk is maatregelen te treffen tegen drijfslagen en de beweerdde (stank-) overlast.

Deltares heeft op 26 oktober 2012 aan de gemeente Lelystad offerte gedaan voor deze werkzaamheden en op 14 november per Email opdracht gekregen tot uitvoering van genoemde werkzaamheden. Deze opdracht is bij brief van 20 november 2012 van de gemeente Lelystad aan Deltares bevestigd.

In dit rapport wordt verslag gedaan van de gevraagde werkzaamheden. Het verslag bevat de volgende onderdelen:

- De opzet en de resultaten van de modellering van de water stroming in 't Bovenwater zonder en met brede duiker onder de Bunschotenlaan.
- De opzet en de resultaten van de modellering van drijfslagen op basis van de waterstroming zonder en met brede duiker.
- Een beschrijving van de wijze van ontstaan van drijfslagen.
- Een beschrijving van mogelijke maatregelen en hun kansen op succes.
- Samenvatting en conclusies van de verrichte studies. (Dit hoofdstuk is voor deze inleiding geplaatst).

2 Hydrodynamische modellering

2.1 Data analyse

2.1.1 Inleiding

Voor deze studie is data beschikbaar gesteld om het gebied beter te begrijpen en om een zo betrouwbaar mogelijke modellering van de waterbeweging te kunnen realiseren. Belangrijke en noodzakelijke data voor deze studie waren onder andere windgegevens, vegetatiegegevens, duikerafmetingen, etc. De bronnen van de gebruikte data zullen in de volgende paragrafen besproken worden. Een beknopte analyse van de relevante data is beschreven in de daaropvolgende paragrafen.

2.1.2 Databronnen

De bronnen van de gebruikte data zijn weergegeven in tabel 2.1.

Tabel 2.1 Databronnen

Data	Bron
Geometrie	Gemeente Lelystad
Waterstand	Gemeente Lelystad
In- uitstroomdebieten	Gemeente Lelystad
Dieptegegevens	Gemeente Lelystad
Vegetatiekaarten	Gemeente Lelystad
Windgegevens	KNMI
Duikerafmetingen	Gemeente Lelystad

2.1.3 Geometrie

Een polygoon die de grens volgt tussen land en water is aangeleverd door de Gemeente Lelystad (per mail van dhr. Buth op 20 november 2012). Deze polygoon is onder andere te zien in Figuur 2.3, achterin dit rapport.

2.1.4 Waterstand

De Gemeente Lelystad (per mail van dhr. Buth op 20 november 2012) heeft aangegeven dat de waterstand in het Bovenwater constant op NAP -2.88 m wordt gehouden. In het vervolg van deze studie wordt dit niveau als het referentieniveau gebruikt.

2.1.5 In- uitstroomdebieten

Aan het Bovenwater zijn twee locaties waar water uitgewisseld wordt met andere waterpartijen, zie Figuur 2.1. De hevel aan de Houtribweg/Oostvaardersdijk laat water in vanuit het Markermeer. De Gemeente Lelystad (per mail van dhr. Buth op 14 november 2012) heeft gespecificeerd dat het totale instroomdebiet tussen 1 april en 1 oktober 450.000 m³ bedraagt. In deze studie is aangenomen dat het debiet uniform verdeeld is over de tijd, wat leidt tot gemiddeld een debiet van ongeveer 0.029 m³/s.

Ter plaatse van de stuw, ten zuiden van de Weerribben, wordt water afgevoerd naar de Buizerdtocht. Uitstroom debieten zijn niet gemeten. Daarom is in overleg met de gemeente Lelystad in deze studie geen regenval en verdamping meegenomen en is het uitstroomdebiet gelijk aan het instroomdebiet genomen.



Figuur 2.1 Overzicht Bovenwater

2.1.6 Dieptegegevens

Via de Gemeente Lelystad (per mail van dhr. Buth op 20 november 2012) zijn 29 dieptepunten ontvangen, die voortkomen uit het archief van Waterschap Zuiderzeeland en uit een baggercampagne van 2009. De dichtheid van de dieptepunten in de grote plas (hierna wordt naar deze plas gerefereerd als 'de Zeilplas') was zeer gering. Ter plaatse van de inhammen tussen de Weerribben, Lemmerstraat, Beulakerwiede en Belterwiede (in het vervolg van deze studie naar gerefereerd als 'Inhammen') was de dichtheid van de dieptepunten het grootst. Hoe de bodem geschematiseerd is voor de numerieke modellering wordt besproken in Paragraaf 2.2.3.

2.1.7 Wind

Voor de windgegevens (snelheid en richting) is gebruik gemaakt van meetgegevens van weerstation Lelystad met een meetinterval van 1 uur. Het weerstation ligt op een afstand van enkele kilometers van het Bovenwater en is voldoende betrouwbaar geacht voor deze studie. De windmetingen bij weerstation Lelystad zijn weergegeven als tijdseries van windsnelheden en richtingen in Figuur 2.4 en als een windroos voor de periode 8 augustus 2012 t/m 21 augustus 2012 (de periode waarover de modellering plaatsvindt) in Figuur 2.5. Figuur 2.4 laat duidelijk een dagelijkse variatie zien in de windsnelheid. Overdag komen de hoogste windsnelheden voor, terwijl 's nachts de wind afzwakt. De windtypering is meest matige wind met maximale wind van 4 Bft. In beide figuren is de windrichting gedefinieerd als de richting waar de wind vandaan komt. Dus 0 en 360 voor wind uit het Noorden en 90 voor wind uit het Oosten. De windroos toont aan dat een oostelijke wind in deze periode dominant was. De windrichtingen W, ZW, Z en ZO zijn redelijk uniform verdeeld en komen regelmatig voor. De sterkste winden (matige wind), met windsnelheden tot 6,5 m/s komen voornamelijk uit

oostelijke en zuidoostelijke richting. Zwakke windsnelheden komen voornamelijk uit noordoostelijke richting.

2.1.8 Vegetatie

In het Bovenwater is veel watervegetatie aanwezig, dat sinds 2003 in een groot gedeelte van het meer op een bepaalde diepte wordt gemaaid. De laatste jaren wordt de vegetatie afgemaaid tot op een diepte van 0.8 m onder de waterspiegel. De Gemeente Lelystad heeft, per mail van dhr. Buth op 20 november 2012, de locaties gegeven van de verschillende maaistrategieën. Daarnaast is ook voor een rooster, met resolutie van 100 m, de procentuele aanwezigheid van kranswier aangeleverd. Deze data is weergegeven in Figuur 2.6.

Uit de data kan opgemaakt worden dat daar waar gemaaid wordt, kranswier dominant is. Op de locaties waar niet gemaaid wordt is vrijwel geen kranswier aanwezig en is fonteinkruid dominant. Kranswier bereikt een hoogte van ongeveer 0.5 m, terwijl fonteinkruid doorgroeit tot het wateroppervlak. In Figuur 2.6 kan ook gezien worden dat er op een aantal locaties geen vegetatie groeit. De Gemeente Lelystad gaf aan dat het fonteinkruid in de inhammen een lagere dichtheid (minder stengels per m²) heeft dan het fonteinkruid aan de rand van de zeilplas.

2.1.9 Duikers

De Gemeente Lelystad (per mail van dhr. Buth op 28 januari 2013) heeft de afmetingen geleverd van vier duikers die in de huidige situatie aanwezig zijn. De in- en uitstroompunten van de duikers (genummerd van 1 tot 4) zijn weergegeven in Figuur 2.3. De duikers hebben geen vaste doorstroomrichting: water kan door de duiker beide kanten op stromen. De afmetingen en verticale positie van de duikers is weergegeven in Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Afmetingen en verticale positie van de duikers.

Duiker	Afmetingen	Verticale positie bovenkant duiker
Referentiesituatie		
Duiker 1	1 m vierkant (diameter)	12 cm onder waterspiegel
Duiker 2	2 m x 1.5 m (b x h)	23 cm boven waterspiegel*
Duiker 3	0.4 m rond (diameter)	25 cm onder waterspiegel
Duiker 4	0.4 m rond (diameter)	25 cm onder waterspiegel
Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan		
Duiker 5	15 m x 2 m (bxh)	Boven waterspiegel

*De bovenkant van Duiker 2 bevindt zich 13 cm boven de waterspiegel aan de westzijde en 33 cm boven de waterspiegel aan de oostzijde

Voor de alternatieve brede duiker, in plaats van duiker 3 en duiker 4, als onderzocht in dit rapport zijn afmetingen van 15 m x 2 m verstrekt door de Gemeente Lelystad. De bovenkant van de duiker is boven de waterspiegel, de onderkant van de duiker tot op de bodem. In het vervolg van deze studie wordt naar deze duiker gerefereerd als Duiker 5.

2.2 Opzet hydrodynamisch model

2.2.1 Inleiding

De vorming van drijfslagen is mede afhankelijk van de hydrodynamica in het Bovenwater. De hydrodynamica in het Bovenwater is gesimuleerd met behulp van een Delft3D model. Delft3D

is een van de meest gebruikte modellen in Nederland voor stromingen in oppervlaktewateren (rivieren, meren, zee, etc.). Gemodelleerd wordt de 3D waterbeweging onder de invloed van wind, de instroom van water vanuit het Markermeer en de uitstroom van water naar de Buizerdtocht. In de modellering wordt het effect van de vegetatie op de stroming meegenomen. De opzet van het model wordt in dit hoofdstuk besproken.

2.2.2 Rekenrooster

Om voor een systeem de hydrodynamica (waterstanden en stromingen) te kunnen simuleren is het noodzakelijk om het gebied te vereenvoudigen (te schematiseren). Een gebied wordt daarom verdeeld in kleine cellen, waarvoor de hydrodynamische parameters (waterstanden, stroomsnelheden, etc.) voor een discreet aantal tijdstappen uitgerekend worden. De berekende waarde voor iedere parameter is constant over de gehele cel. In Figuur 2.7 is het rekenrooster te zien voor deze studie.

Om een goede representatie te hebben van de werkelijkheid is het van belang dat de cellen in gebieden waar de stroming ruimtelijk sterk varieert en in het gebied van interesse klein genoeg zijn. Ter plaatse van de inhammen hebben de cellen een grootte van ongeveer 5 m bij 5 m, over de breedte van de inhammen zijn dus 3 a 4 cellen aanwezig. Dit wordt voldoende fijn geacht voor het representeren van de processen die gerelateerd zijn aan de vorming van drijfslagen.

In de verticaal worden 6 lagen gebruikt, op basis van sigma coördinaten. Dit betekent dat de procentuele dikte van iedere laag ruimtelijk constant is. Dus bij een variërende diepte zal ook de dikte van de lagen variëren. De verdeling van de laagdikten in de verticaal is, van bodem naar oppervlak, 10, 15, 25, 25, 15 en 10% van de waterdiepte. De dunnere laag aan de oppervlakte is nodig om grote snelheidsgradiënten te kunnen weergeven die veroorzaakt worden door de wind. Bij de bodem is de laag dun om de wrijving met de bodem beter mee te kunnen nemen. Met behulp van deze lagen kan 3D stroming berekend worden.

2.2.3 Bodemschematisatie

Zoals besproken in Paragraaf 2.1.6, waren er weinig dieptegegevens beschikbaar voor de Zeilplas. Het verloop van de bodem was daarmee niet in detail bekend, waardoor voor de plaatsen waar geen dieptegegevens beschikbaar waren inschattingen gemaakt moesten worden. Hiervoor is in overeenstemming met de Gemeente Lelystad gekozen om de bodem van de Zeilplas redelijk vlak te houden, wat gezien de oorsprong van de plas een betrouwbare aanname lijkt. Het bovenwater is namelijk destijds aangelegd op (vlak) agrarisch land. De bodemschematisatie die gebruikt is in de numerieke modellering is te zien in Figuur 2.8.

2.2.4 Overige geometrie schematisaties

De schematisatie van de modelgeometrie is compleet gemaakt door het effect van smalle constructies, zoals de dam bij de zeilvereniging in het zuidwesten van het Bovenwater, mee te nemen door celwanden dicht te zetten. Voor grotere constructies is ervoor gekozen om de stromingen in een gehele cel te blokkeren. In Figuur 2.9 is te zien hoe met behulp van deze aanpassingen het rekenrooster de geometrie volgt.

2.2.5 Tijdschematisatie

Zoals eerder beschreven berekent het model na het verstrijken van een rekentijdstap nieuwe waarden voor de hydrodynamische parameters in iedere cel. De rekentijdstap moet voldoende klein zijn om de nauwkeurigheid en stabiliteit van de simulatie te waarborgen. In

deze studie is een rekentijdstap van 12 s gebruikt. Een gevoeligheidsstudie heeft aangetoond dat de modelresultaten gelijk blijven indien de rekentijdstappen verder verkleind worden.

De gemeente Lelystad is aangeboden de hydrodynamica voor 1 periode te berekenen. Hiervoor is de periode van 8 augustus 2012 t/m 21 augustus 2012 genomen. Deze simulatieperiode is bepaald door het moment waarop drijfvlagen zijn aangetroffen en afgezogen (onder andere op 14, 15, 16, 17, 19 en 20 augustus 2012) in het Bovenwater en is afgestemd met de Gemeente Lelystad (per mail van dhr Buth op 4 december 2012). De periode die het model nodig heeft om in te spelen bedraagt 12 uur. De simulaties zijn daarom op 7 augustus gestart, zodat een ingespeeld model gebruikt wordt voor de studie.

2.2.6 Meegenomen processen

In de modellering wordt de forcering van de wind op het wateroppervlak meegenomen. De generatie van golven door de wind is echter niet meegenomen. Berekend is dat de residuele stroming ten gevolge van golven in deze situatie een orde kleiner is dan de stroomsnelheden die direct door de wind veroorzaakt worden. In de modellering wordt ook in het bijzonder de geschatte weerstand door vegetatie op de stroming meegenomen, zie Paragraaf 2.3.1.

2.2.7 Randvoorwaarden en begincondities

De relevante externe factoren die voor een forcering zorgen zijn bij het opzetten van het model opgelegd. Zoals besproken in Paragraaf 2.1.5 wordt in deze studie het instroomdebiet bij de hevel aan de Houtribweg/Oostvaardersdijk en het uitstroomdebiet bij de stuw die het Bovenwater en de Buizerdtocht verbindt meegenomen, zie Figuur 2.3. Het instroomdebiet en uitstroomdebiet bedragen beide $0.029 \text{ m}^3/\text{s}$.

Aangezien het model snel inspeelt, zie Paragraaf 2.2.5, kan er gebruik worden gemaakt van een uniforme initiële conditie. Als initiële conditie is een waterstand van 0 m aangehouden (referentieniveau is NAP -2.88 m).

2.3 Fysische parameters

2.3.1 Vegetatie

De vegetatie in het Bovenwater veroorzaakt weerstand op de stromingen. Vegetatie is in deze studie gemodelleerd als verticale structuren die de stroomsnelheid en turbulentie beïnvloeden. Gezien de geringe stroomsnelheden in het bovenwater kan de vegetatie als stijf gezien worden (i.e. de vegetatie buigt nauwelijks mee met de stroming). Het model biedt de mogelijkheid om verschillende vegetatietypen te definiëren. Voor iedere vegetatietype moet de hoogte, stengeldiameter en het aantal stengels per m^2 gedefinieerd worden die overeenkomen met een bedekkingsfactor van 1. Vervolgens kan voor iedere vegetatietype een ruimtelijk variërende bedekkingsfactor opgegeven worden. Zo kunnen dichtheidsvariaties in het model meegenomen worden.

Op basis van ervaring uit experimenten en projecten in het Markermeer is voor kranswier en fonteinkruid een inschatting gemaakt voor de stengeldiameter en het aantal stengels per m^2 . Een overzicht hiervan is gegeven in Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Schematisatie van Fonteinkruid en kranswier

Vegetatietype	Stengeldiameter	Aantal stengels per m^2	Hoogte
Fonteinkruid	3 mm	1.400	Tot aan waterspiegel
Kranswier	2 mm	10.000	0.5 m

Op basis van de vegetatiedata, zoals beschreven in Paragraaf 2.1.8 en gevisualiseerd in Figuur 2.6, is onderscheid gemaakt tussen drie gebieden:

- Het gebied waar niet gemaaid wordt: In dit gebied is alleen fonteinkruid aanwezig. Zoals beschreven in Paragraaf 2.1.8 is de dichtheid van fonteinkruid in de inhammen lager dan in de rest van het Bovenwater waar niet gemaaid wordt. Om deze reden is aangenomen dat de bedekkingsfactor ter plaatse van de inhammen 0.5 is, in de rest van het gebied waar niet gemaaid wordt is de bedekkingsfactor 1, zie Figuur 2.10 (linksboven).
- Het gebied waar wel gemaaid wordt: In dit gebied is een combinatie van kranswier en fonteinkruid aanwezig. Aangenomen is dat het fonteinkruid in dit gebied 0.8 m hoog is vanaf de bodem (waardoor een vegetatievrije waterschijf van ongeveer 0.8 m overblijft), het kranswier heeft een hoogte van 0.5 m vanaf de bodem. De bedekkingsfactoren voor fonteinkruid in het gemaaide gebied is weergegeven in Figuur 2.10 (rechtsboven). De bedekkingsfactoren voor kranswier is ook gevisualiseerd in Figuur 2.10 (onder).
- Het gebied waar geen vegetatie aanwezig is: Hier is de dekkingsfactor van alle vegetatietypen 0.

2.3.2 Wind

Wind is voorgeschreven als variërend in de ruimte en in de tijd. De huizen aan de Weerribben, Belterwiede, Beulakerwiede en omliggende straten zorgen voor een zekere mate van beschutting voor de tussenliggende waterpartijen. Voor een gedetailleerde modellering in de buurt van de Bunschotenlaan (het gebied van interesse) is het dan ook noodzakelijk om de windsnelheden te reduceren. De reductie is bepaald door de windsnelheid op 10 m hoogte (invoer voor de modelstudie) uit te rekenen voor verschillende ruwheidshoogtes. Ter plaatse van de bebouwing is de ruwheidshoogte veel groter dan ter plaatse van het weerstation Lelystad. Met behulp van de Davenport (1960) classificatie zijn de ruwheidshoogtes vastgesteld. De gemeten windsnelheden bij weerstation Lelystad zijn op basis van deze methode gereduceerd met 72% voor het gebied rondom de inhammen. Daarnaast is op basis van ervaring met andere meren in Nederland, de windsnelheid ter plaatse van het Bovenwater met 20% gereduceerd ten opzichte van de gemeten windsnelheden bij weerstation Lelystad. Het windreductievelld dat gebruikt is in deze studie is weergegeven in Figuur 2.11.

De windwrijvingscoëfficiënten zijn gedefinieerd volgens Smith & Banke (1975).

2.3.3 Duikers

De afmetingen en locaties van de duikers zijn beschreven in Paragraaf 2.1.9. De duikers zijn in het model schematisch ingebracht door rekencellen aan te brengen en daaraan een weerstandscoefficiënt toe te kennen. Daarbij zijn de meest geschikte verticale modellen open gezet voor stroming en andere gesloten. De gesimuleerde debieten door de duikers komen goed overeen met de verwachte debieten op basis van een theoretische benadering.

2.3.4 Ruwheden

Voor de bodemruwheidscoefficiënt voor de Zeilplas is op basis van expertise gekozen voor een Manningcoëfficiënt van $0.024 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$. De wandwrijving die geïntroduceerd wordt door de beschoeiingen, damwanden, etc. is in het model in rekening gebracht door de bodemruwheden rondom de oevers met 10% te verhogen.

2.3.5 Eddy viscositeit

Processen met ruimteschalen kleiner dan de resolutie van het model, zoals turbulentie en kleinschalige circulaties, worden niet expliciet uitgerekend in de numerieke modellering,

omdat er in de simulatie voor iedere cel een gemiddelde waarde wordt uitgerekend voor alle parameters.

Om het effect van impulsuitwisseling en menging ten gevolge van deze processen toch mee te kunnen nemen in de modellering worden deze processen gerepresenteerd door gebruik te maken van een horizontale eddy viscositeit. In de huidige studie is een horizontale eddy viscositeit gebruikt van $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$, gebaseerd op de resolutie van het rekenrooster.

2.3.6 Overige parameters

De instelling van diverse overige constanten is als volgt:

- de Coriolisversnelling is ingesteld voor 52° N
- de versnelling van de zwaartekracht is $9.813 \text{ m}^2/\text{s}$
- de referentie dichtheid van het water is $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$
- de dichtheid van lucht is $1.2 \text{ kg}/\text{m}^3$

2.3.7 Observatiepunten

Over het gehele domein verspreid zijn observatiepunten gedefinieerd. Vooral in alle inhammen is de dichtheid van de observatiepunten groot. Tijdens de simulaties zijn tijdseries van stroomsnelheden en waterstanden weggeschreven vanuit alle observatiepunten met een interval van 10 min. Daarnaast zijn 'mapvelden' weggeschreven die het gehele modelgebied beslaan met een interval van 1 uur. De observatiepunten die in dit rapport gebruikt zijn, zijn weergegeven in Figuur 2.7.

2.3.8 Scenario's

Uiteindelijk zijn er voor deze studie twee scenario's doorgerekend met de instellingen zoals ze in dit rapport beschreven staan, namelijk:

- Referentiescenario: De huidige situatie met de 4 duikers zoals beschreven in Paragraaf 2.1.9 is gesimuleerd voor de periode van 8 augustus 2012 t/m 21 augustus 2012.
- Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan: In dit scenario zijn Duiker 3 en Duiker 4 vervangen door Duiker 5, zoals beschreven in Paragraaf 2.1.9. Ook dit scenario is gesimuleerd voor de periode van 8 augustus 2012 t/m 21 augustus 2012.

2.4 Verificatie

Voor deze studie was geen meetdata beschikbaar met betrekking tot stroomsnelheden, stroomrichtingen, waterstanden, etc voor verificatie. Het model is daarom is afgeregeld op basis van modelleerervaring en op basis van ervaring met betrekking tot andere meren in Nederland, waaronder het Markermeer.

De gevoeligheden van het model voor een aantal parameters is onderzocht. Een beknopt overzicht hiervan is gegeven in bijlage A.

2.5 Resultaten hydrodynamisch model

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de hydrodynamische simulaties beschreven. Allereerst wordt ingegaan op de grootschalige hydrodynamische verschijnselen. Deze observaties zijn gelijk voor beide scenario's, omdat de hydrodynamica vooral lokaal bij de Bunschotenlaan beïnvloedt wordt door het aanleggen van de brede duiker. Vervolgens wordt ingegaan op het effect van het aanleggen van de brede duiker op de hydrodynamica.

2.5.1 Algemene Observaties

In deze paragraaf wordt achtereenvolgens het effect van de wind, de vegetatie en als laatste het effect van de in- en uitlaatdebieten op de grootschalige hydrodynamica besproken.

Effect van de wind

Figuur 2.12 laat duidelijk zien dat er een hoge correlatie is tussen de windsnelheid en de stromingsnelheid aan de oppervlakte. Ook de richting van de stroming wordt zo goed als volledig bepaald door de richting van de wind. Figuur 2.14 en 2.17 tonen aan dat dit voor het gehele Bovenwater het geval is, voor beide scenario's. Ter plaatse van de inhammen zorgt de geïmplementeerde windreductie voor een sterke reductie van de stroomsnelheid. Echter ook in dit gebied wordt de stroomsnelheid en richting aan het oppervlak gedomineerd door de wind (zie bijvoorbeeld Figuur 2.15 en Figuur 2.18).

De schuifspanning die de wind veroorzaakt op het wateroppervlak wordt gecompenseerd door het feit dat de waterspiegel een verhang zal aannemen. Aan de kant van het meer waar de wind vandaan komt zal de waterspiegel dalen (windafzet) en aan de andere zijde zal de waterspiegel stijgen (windopzet), zie Figuur 2.13. Aangezien er sprake is van een balans van water zal de stroming in diepere lagen tegengesteld zijn aan de stroomrichting aan het oppervlak. Deze retourstroom is duidelijk zichtbaar in Figuur 2.14. In plaatsen waar de geometrie een 'obstakel' vormt zal de stroming de geometrie zoveel mogelijk volgen. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 2.15, waar de stroming aan het oppervlak in de inham tussen de Beulakerwiede en de Belterwiede exact de windrichting volgt, terwijl de stroming in het midden van de waterkolom evenwijdig met de oevers van het kanaal stroomt.

Effect van de vegetatie

Op welke diepte de stroming verandert van richting hangt af van de waterdiepte en ook zeer sterk van hoogte en dichtheid van de vegetatie. De stroming zal altijd de weg kiezen van de minste weerstand. Aangezien vegetatie voor veel energieverlies zorgt en daardoor veel weerstand biedt, zal het grootste deel van de retourstroming plaatsvinden boven de vegetatiehoogte.

Het effect van vegetatie op de stroomsnelheidsverdeling over de waterdiepte is getoond in Figuur 2.20. De bovenste figuren zijn van een observatiestation in het midden van de zeilplas, waar de vegetatie laag is vanwege het maaibeheer. Onder de vegetatielijn vindt nauwelijks stroming plaats. De onderste figuren zijn van een observatiestation in het gebied waar niet gemaaid is, en het fonteinkruid dus tot aan de waterspiegel gegroeid is. In dit geval wordt de stroomsnelheid over een zeer korte diepte sterk gedempt.

Figuur 2.14 en Figuur 2.17 laten zien dat de stroomsnelheid aan de oppervlakte naast de windsnelheid ook sterk beïnvloed wordt door de hoogte van de vegetatie. Aan de randen van de zeilplas, waar niet gemaaid wordt is de stroomsnelheid ruim een factor 2 kleiner dan in het midden van de Zeilplas.

Effect van in- en uitlaat debieten

De in- en uitlaat debieten, zoals beschreven in Paragraaf 2.1.5, zijn van een dusdanig kleine grootte dat de stroming hierdoor niet significant beïnvloed wordt.

2.5.2 Algemene observaties in de inhammen

Figuur 2.15 en 2.18 laten zien dat de stroomsnelheden in de westelijke inhammen groter zijn dan in de oostelijke inhammen. In de oostelijke inhammen is vooral de stroomsnelheid in diepere lagen klein.

Daarnaast laten Figuur 2.15 en Figuur 2.18 zien dat in de inham tussen de weerribben de stroomrichting aan het oppervlak en in het midden van de waterkolom gelijk zijn op de afgebeelde tijdstippen. Dit stroompatroon zal verklaard worden aan de hand van Figuur 2.15. Figuur 2.15 laat een situatie zien waarbij de wind vanuit 100° komt (ongeveer vanuit het oosten). Door windopzet is de waterstand in het westelijke gedeelte van het Bovenwater hoger dan in het oostelijke gedeelte. Als gevolg van deze waterstandverschillen ontstaat er over Duiker 1 en 2 (de duikers die de inhammen tussen de Weerribben verbinden) een verval. Het debiet door de duikers zal ten gevolge van dit verval in oostelijke richting zijn en is dus tegengesteld aan de forcering van de wind aan het oppervlak. Of het water aan het oppervlak uiteindelijk in oostelijke of westelijke richting stroomt, hangt af van de balans tussen de invloed van de duiker en de invloed van de lokale wind. In deze situatie is te zien dat de stroomsnelheden ten gevolge van de duiker groter zijn dan de stroomsnelheden (in tegengestelde richting) ten gevolge van de wind, waardoor de oppervlaktestroming in de inham tussen de Weerribben tegengesteld is aan de wind.

De stroomsnelheden aan het oppervlak zijn voor de situatie met oosten wind (Figuur 2.15) groter dan voor de situatie met zuidwesten wind (Figuur 2.18). Dit wordt veroorzaakt doordat het verval over Duiker 1 en 2 bij oosten wind groter is dan bij zuidwesten wind (bij gelijke windsnelheden).

2.5.3 Effecten van het plaatsen van de brede duiker



Figuur 2.2 Detail inham tussen Beulakerwiede en Belterwiede

De focus van deze studie en deze paragraaf in het bijzonder is op de inham tussen de Beulakerwiede en de Belterwiede, zie Figuur 2.2. In Figuur 2.21 t/m Figuur 2.24 worden de stroomsnelheden en richtingen aan het oppervlak en midden van de waterkolom vergeleken voor het Referentiescenario en het Scenario met de brede duiker t.p.v. de Bunschotenlaan. Het plaatsen van de brede duiker leidt ertoe dat de stroomsnelheden aan het oppervlak reduceren. De stroomsnelheden in diepere lagen nemen echter toe. De stroomrichtingen worden nauwelijks tot niet beïnvloed door het aanleggen van de brede duiker.

De oorzaak van de reductie van de oppervlaktestroming is gevisualiseerd in Figuur 2.25 voor een situatie met een sterke zuidwesten wind. In de figuur wordt een overzicht gegeven van de waterstanden en stromingen voor beide scenario's. Door de zuidwesten wind wordt de

waterstand in het noordoosten van het Bovenwater verhoogd en in het zuidwesten verlaagd. In het referentiescenario is het verval over de duiker ongeveer 0.2 mm. Dit verval wordt veroorzaakt door het feit dat de waterstand in de inham minder stijgt (lagere windbelasting) dan de waterstand aan de andere zijde van de duiker. Indien de duikers in het referentiescenario vervangen worden door de brede duiker zal de waterstand in de inham de waterstand buiten de inham meer benaderen. In deze situatie van zuidwesten wind nemen de waterstanden dus toe in de inham. Ook kan in de figuur gezien worden dat het verhang van de waterspiegel toeneemt in de inham. Dit verhang is tegengesteld aan de stromingsrichting aan het oppervlak en werkt dus de oppervlaktestroming tegen. Het vergrote verhang zorgt wel voor een toename van de retourstroom, aangezien beide in dezelfde richting werken. Dat dit samenspel van verhang en stromingen niet alleen in de hierboven beschreven situatie voorkomt is weergegeven in Figuur 2.26. Voor de gehele simulatieperiode is het verval over de duiker en het verval in de inham (maat voor het verhang) weergegeven. Het verhang in de inham is onder alle windomstandigheden groter voor het scenario met de brede duiker. In de onderste grafiek is het dieptegemiddelde (netto) debiet door de inham weergegeven voor beide scenario's. De richting van het netto debiet blijft gelijk, de grootte neemt echter toe door het aanleggen van de brede duiker. Bovenstaande verklaringen worden visueel onderbouwd in Figuur 2.27 en Figuur 2.28.

Samenvattend zijn de gevolgen van het aanleggen van de brede duiker voor de hydrodynamica als volgt:

- De stroomsnelheid aan het oppervlak neemt iets af.
- De stroomsnelheden in de diepere lagen nemen toe.
- Het dieptegemiddelde debiet door de inham neemt toe.

3 Drijfslag modellering

3.1 Inleiding

Aansluitend aan de hydrodynamische modellering van het Bovenwater heeft modellering van drijfslagen plaatsgevonden. Voor het modelleren van drijfslagen is gebruik gemaakt van een zogenaamd 'deeltjesmodel', het model DELPAR, onderdeel van het Delft3D model instrumentarium. Een dergelijk model heeft als voordeel dat de verplaatsing van stoffen, samen met de verplaatsing van het water zoals die door het hydrodynamische model is berekend, exact wordt berekend en er geen numerieke fouten worden gemaakt. Verder is een deeltjesmodel in staat voor de horizontale menging te rekenen met de lage diffusie constanten die voor het Bovenwater als realistisch worden beschouwd.

De deeltjes representeren de algen die een opwaartse snelheid ondervinden, die in de biologische hoofdstukken 4, 5 en 6 verder wordt besproken. De algen biomassa zelf wordt NIET gemodelleerd. Daarvoor zou een omvangrijker model inspanning nodig zijn. De resultaten van de drijfslag modellering zijn genormaliseerd in de zin dat ze nog moeten worden vermenigvuldigd met de in de tijd variërende actuele algen biomassa in het Bovenwater. Ook het opdrijfproces is niet gemodelleerd. Het is beschreven in de hoofdstuk 4. Voor de drijfslag modellering is aangenomen dat de algen continu opdrijven. Hiervoor is een opdrijfsnelheid van 2,5 m / uur gebruikt, die nog nader zal worden verantwoord.

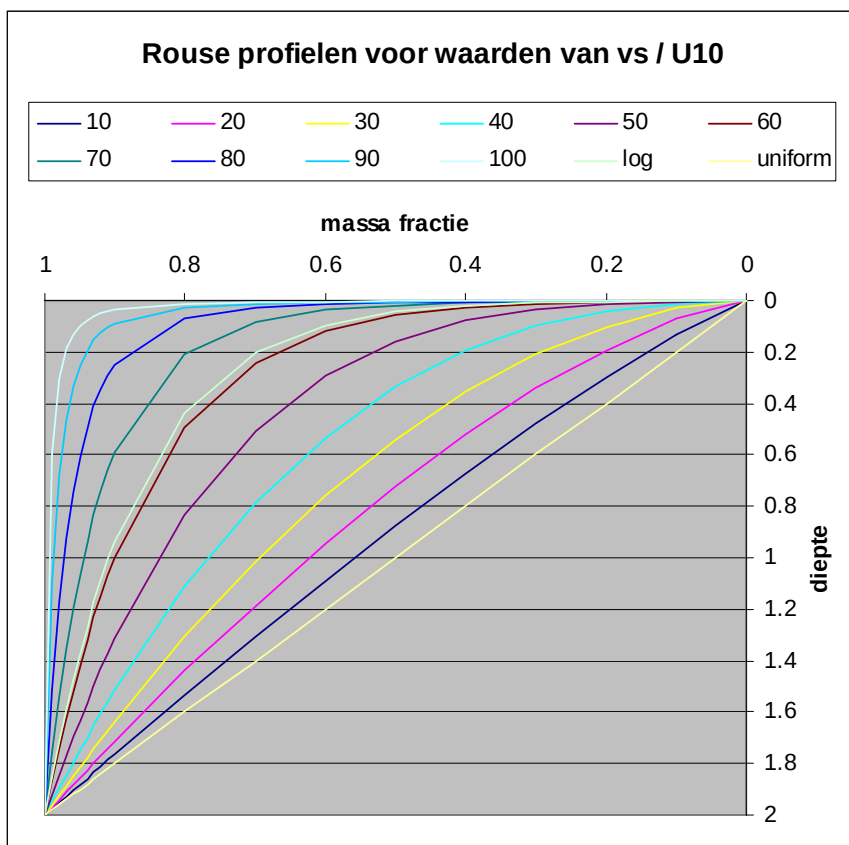
De drijfslag modellering start met een uniforme verdeling van deeltjes over het Bovenwater. Hiervoor is 1 deeltje per m³ aangehouden, resulterend in het gebruik van 1,95 miljoen deeltjes omdat de schematisatie van het Bovenwater een volume van 1,95 miljoen m³ laat zien. Zowel voor de situatie met als zonder brede duiker onder de Bunschotenlaan is eerst een testberekening uitgevoerd, waarbij de deeltjes niet opstijgen en niet diffusief verspreiden, maar slechts met het water worden meegevoerd. In zo'n situatie zou de concentratie overal gemiddeld 1 deeltje per m³ moeten blijven en deeltjes zouden zich nergens mogen ophopen. Aan deze zogenaamde 'constancy preserving' test is voldaan.

Voor de drijfslag berekeningen hebben de deeltjes direct bij het loslaten hun verticale snelheid meegekregen. Loslaten vond plaats bij het begin van de simulatie periode op 8 augustus 2012 - 00 uur. Vanwege de stijgsnelheid, de diepte van het Bovenwater en de rekentijdstap grootte van 1 uur, is de aanname gerechtvaardigd dat de deeltjes binnen een tijdstap hun evenwichtsverdeling op het verticale profiel aannemen. Deze evenwichtsverdeling tussen stijgsnelheid en verticale menging door wind wordt nader toegelicht. De deeltjes zijn gevolgd tot het einde van de simulatie periode op 21 augustus 2012 - 00 uur. Ook de invloed van een ander tijdstip van loslaten op het resultaat is onderzocht.

Gevoeligheidsonderzoek van de uitkomst voor andere aannamen voor de horizontale diffusie coëfficiënt, voor andere stijgsnelheden en andere rekentijdstap grootte heeft plaatsgehad en worden besproken. De berekeningen hebben plaats gehad voor de referentie situatie die is beschreven in hoofdstuk 1 (zie tabel 1.2) en voor een brede duiker onder de Bunschotenlaan die tot boven het wateroppervlak reikt. De verschillen tussen beide uitkomsten zijn onderzocht. Zoals eerder genoemd moeten de uitkomsten beschouwd worden als genormaliseerd op een voor het Bovenwater gemiddelde concentratie van 1 deeltje per m³ en moeten de uitkomsten worden vermenigvuldigd met de gemiddelde actuele algen biomassa in het Bovenwater die niet is gemodelleerd.

3.1.1 Het opdrijven

Uit de theorie van het sediment transport is een formulering afkomstig die de evenwichtsverdeling van vallende zandkorrels in een turbulent gemengde waterlaag bij de bodem beschrijft. Deze verdeling is proportioneel met z^β , waarbij z de afstand is tot een referentiepunt dat net iets onder de bodem ligt. Dit wordt het Rouse profiel genoemd. Dit profiel is voor deze studie omgekeerd aan het oppervlak toegepast voor stijgende algen die daar een evenwichtsverdeling vertonen tussen de stijgsnelheid en de door wind turbulent gemengde waterlaag. Hierbij is de z dan de afstand tot een referentie punt vlak boven het wateroppervlak. Dit profiel is nader beschreven in Bijlage B. Daar blijkt ook dat de coëfficiënt β recht evenredig is met de stijgsnelheid in m/s en omgekeerd evenredig met de windsnelheid. De windsnelheid die is gebruikt is gelijk aan de windsnelheid die is gebruikt voor de hydrodynamische modellering. Deze is gelijk aan de gemeten windsnelheid en richting voor vliegveld Lelystad, met een correctie factor voor bebouwing en strijklengte zoals aangegeven in hoofdstuk 2 en figuur 2.11. Figuur 3.1 geeft een indruk van het zo gemodelleerde opdrijven voor verschillende waarden van het quotiënt stijgsnelheid (v_s in m/d) en windsnelheid (U_{10} in m/s). De figuur geeft de cumulatieve fractie van de massa naar de diepte voor een 2 meter diepe locatie. Op 0 m diepte is geen massa aanwezig, op 2 m diepte is de totale massa fractie 1.0 aanwezig.



Figuur 3.1 Cumulatieve massa fractie verdeling over de waterkolom bij verschillende v_s/U_{10} .

De steilste curve met $v_s/U_{10} = 100$ geeft aan dat 97% van de massa zich hoger dan 0.2 m in de 2 meter diepe water kolom bevindt. De uniforme verdeling is een rechte lijn met 10% van de massa hoger dan 0.2 m in de 2 meter diepe water kolom. De lichte curve met de aanduiding log is de curve die hoort bij $\beta = 1$.

Berekeningen zijn uitgevoerd voor een stijgsnelheid van 60 m/dag (2,5 m/uur), 70 m/dag en 50 m/dag. Onder ecologen wordt een stijgsnelheid van 2 m/uur genoemd, wat overeen zou komen met bijna 50 m/dag.

Voor die stijgsnelheid en de gebruikte windgegevens zou maar beperkt opdrijving plaats hebben. Voor een stijgsnelheid van 60m/dag zou deze duidelijker en geprononceerder zijn. In het vervolg van de rapportage zullen dan ook de resultaten bereikt met een stijgsnelheid van 60 m/dag worden getoond. Dat neemt niet weg dat de stijgsnelheid best 50 m/dag had kunnen zijn, maar dat ook de effectieve windsnelheid zoals afgeleid voor het Bovenwater licht overschat kan zijn. De daarbij gebruikte correctie factoren voor bebouwing en strijklengte hebben immers ook zo hun onzekerheden. De coëfficiënt β in het Rouse profiel hangt af van stijgsnelheid / windsnelheid. Zo ontstaat eenzelfde uitkomst als beiden 20% hoger of als beiden 20% lager zouden zijn.

Op iedere horizontale plaats zijn de deeltjes random, volgens het Rouse profiel voor die plaats over de vertikaal verdeeld. Op de diepte waarop zij zo terecht kwamen volgden zij de watersnelheid. Voor sommige kolonie vormende blauwalgen zoals *Microcystis* is het bekend dat de kolonies boven het water uitsteken en meer of minder direct de wind kunnen volgen. Het blauwalg *Anabaena* vormt echter draadvormige kolonies, die waarschijnlijk veel minder direct vatbaar voor de wind zullen zijn. In de modelberekeningen is daarop geanticipeerd door ze alleen de waterbeweging op de diepte van hun aanwezigheid te laten volgen.

3.1.2 De horizontale diffusie coëfficiënt

De deeltjes worden getransporteerd met de locale snelheid van het water. De deeltjesbaan wordt analytisch berekend en is dus exact. Daarmee wordt echter een transport mechanisme achterwege gelaten. Dat is het transport door wervels die een ruimteschaal hebben kleiner dan een grid-cel. Nu is die ruimte schaal klein voor het grid van het Bovenwater (orde 5 m. grid afstand). Verder zijn de snelheden en dus ook de snelheidsverschillen tussen grid-cellen, die aanleiding geven tot zulke turbulenties, niet groot. Er is onderzoek gedaan naar de meest waarschijnlijke horizontale turbulente diffusie die toegevoegd zal moeten worden om met dit verschijnsel rekening te houden. Hiervoor is het zogenaamde HLES model (Horizontal Large Eddy Simulation) gebruikt. Daaruit kwamen verwachte horizontale diffusie coëfficiënten van de orde van 0,001 m²/s of lager. Er is gevoeligheids onderzoek gedaan door berekeningen uit te voeren voor 0; 0,001; 0,01 en 0,1 m²/s. Dit leverde op dat de simulaties met 0,001 en 0,01 m²/s sterk op elkaar lijken, maar de laatste toch iets meer menging oplevert dan op grond van onze ervaring voor zulke situaties als reëel gezien kan worden. De wel vaker gebruikte waarde van 0,1 m²/s leverde duidelijk te veel horizontale menging. De waarde 0 liet deeltjes die via de bovenste waterlaag een modelrand of –wand bereikten daar maar moeilijk meer door de stroming alleen vandaan komen, terwijl toch respons op draaiende wind verwacht mag worden. Dit heeft er toe geleid dat verder is gerekend met de waarde die ook op grond van de HLES berekeningen realistisch geacht wordt: 0,001 m²/s.

3.1.3 Het starttijdstip voor de deeltjes

De deeltjes zijn op 8-augustus-2012, 00 uur allen tegelijk losgelaten en gevolgd. Afhankelijk van de windsnelheid (mate van opdrijven) en de windrichting (stromingsrichting van de bovenste waterlaag) verplaatsen deeltjes zich naar randen van het Bovenwater. Als de wind draait worden ze meegenomen naar de benedenwindse locaties van de dan geldende wind. Dit houdt in dat het uit kan maken of alle deeltjes uniform over het Bovenwater verdeeld zijn op de vorige dag, dan wel of de deeltjes al enkele dagen onderweg waren en zich aan een van de kanten van het Bovenwater concentreerden. De gevoeligheid voor het tijdstip van loslaten en opdrijven van de deeltjes is onderzocht door ook simulaties uit te voeren met een deeltjes populatie die op 14-augustus-2012, 00 uur is losgelaten.

Het is ons niet bekend wanneer precies in 2012 drijfslagen ontstonden. Ook het gebruikte middernachtelijke uur zal vast niet volledig representatief zijn. Maar het gebruik van andere data en tijdstippen zou bij gebrek aan exacte gegevens waarschijnlijk een grotere nauwkeurigheid suggereren dan feitelijk aanwezig is. Dit temeer omdat algen groeien in de tijd. Zo kan zich in het centrum van het Bovenwater nieuwe biomassa vormen als de nog aanwezige voedingstoffen dat daar toelaten, terwijl al wel een deel van de populatie naar de kant is gewaaid. Omdat voldoende gegevens over het verloop in de tijd van de biomassa in het centrum van het Bovenwater ontbreken kon hiermee geen rekening gehouden worden met de deeltjes modellering.

Naar ons oordeel geeft een vergelijking van de berekening voor de huidige situatie met die van een brede duiker voor de twee gebruikte start tijdstippen van opdrijven een voldoende stellige indicatie voor de impact van de brede duiker op de ruimtelijke verdeling van drijfslagen en de gevoeligheid daarvan voor het tijdstip van opdrijven.

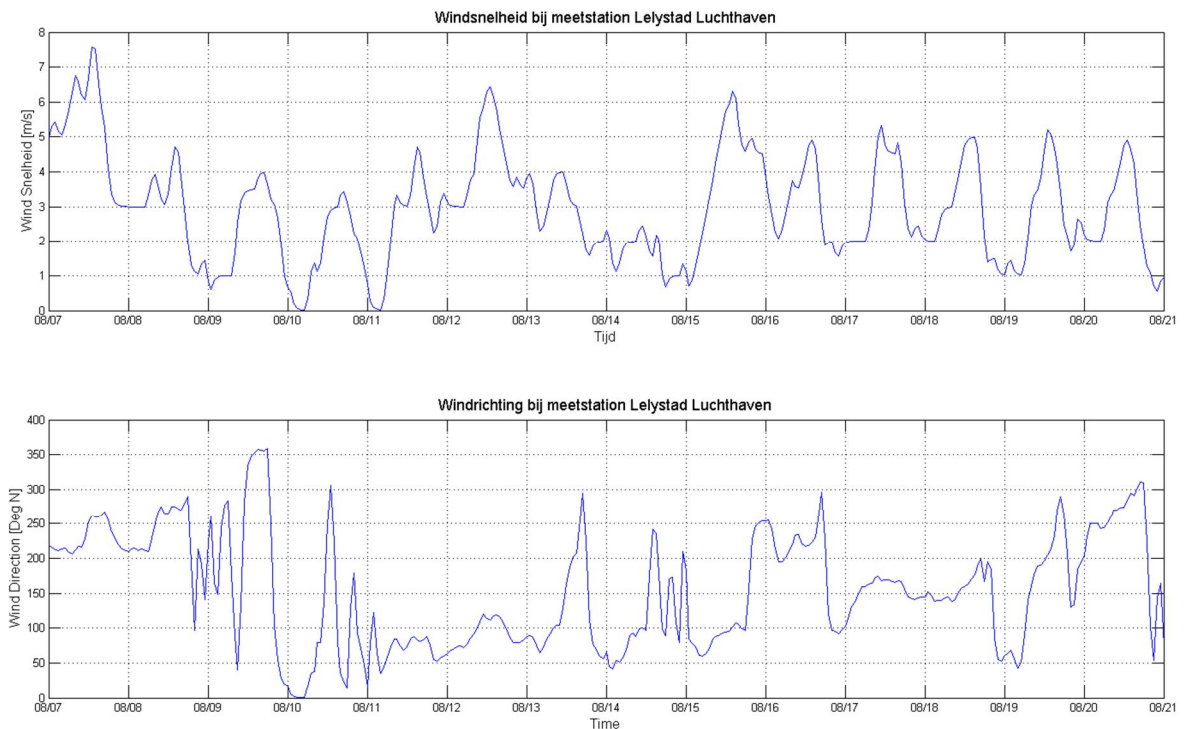
3.1.4 De rekentijdstap

De berekeningen zijn verricht met een tijdstap van 1 uur. Als alleen verplaatsing met het water een rol zou spelen, dan zou het achtereenvolgens zetten van 2 stappen van een half uur exact dezelfde uitkomst opleveren, omdat de berekening analytisch wordt verricht. Er wordt ook een random diffusieve verplaatsing gezet die correspondeert met $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$. Door dat in twee halve uren te doen kan dan toch de eindpositie anders zijn dan na één uur en dan een diffusieve verplaatsing. Controle berekeningen hebben aangetoond dat het resultaat met tijdstappen van een half uur heel weinig en willekeurig afwijkt van dat met tijdstappen van een heel uur. Alle gerapporteerde berekeningen zijn verder gedaan met tijdstappen van één uur.

3.1.5 De gebruikte windgegevens

De windsnelheid en windrichting voor de simulatie periode zijn weergegeven in figuur 3.2. Uit de windrichtingen blijkt dat vooral van 10 augustus tot 15 augustus de wind overwegend uit het Oosten kwam (rond 90°). Wind uit het ZW (rond 225°) is vooral in de eerste paar dagen, op 16 augustus en 20 augustus te constateren. De snelheid toont een duidelijk dag ritme. De in de figuur getoonde windsnelheden zijn nog niet gecorrigeerd voor omliggende bebouwing. Die correctie is plaats afhankelijk (zie hoofdstuk 2 en figuur 2.11).

De opdrijvende krachten in een algenpopulatie zijn doorgaans in de ochtend het grootst, maar bij gebrek aan gedetailleerde informatie is met een dag-nacht ritme van de opdrijfsnelheid geen rekening gehouden.



Figuur 3.2 Windsnelheid en richting bij meetstation de luchthaven voor de model periode

3.2 Berekeningsresultaten

In het vervolg zullen alleen berekeningsresultaten van de bovenste water laag getoond worden omdat zich daarin de oprijvende algen bevinden.

3.2.1 De huidige situatie, deeltjes starten op 8 augustus 00 uur

In figuur 3.3 en 3.4 zijn de resultaten voor 14 en 15 augustus 00 uur te zien. De invloed van oostelijke wind in de voorafgaande periode is duidelijk te zien aan de opeenhoping van deeltjes tegen westelijke kaden en beschoeiingen. Deeltjes zijn zo ook 'gevangen' in het water tussen de woningen en tussen en tegen andere dammen. Een gehalte van 45 wil zeggen dat ter plaatse 45 maal de start concentratie is opgehoopt. Dat komt enerzijds door horizontaal transport en anderzijds door het opdrijven vanuit diepere waterlagen. Voor 15 augustus is duidelijk te zien dat deeltjes zich door de kort voorafgaande wind hebben losgemaakt van de westelijke oever, maar dat het merendeel daar nog steeds te vinden is. De opdrijving is groter op 15 augustus omdat de windsnelheid dan lager is dan op 14 augustus.

In figuur 3.5 is het resultaat van 16 augustus 00 uur te zien, met beduidend meer verticale menging door de hardere voorafgaande wind. De resultaten in figuren 3.6 en 3.7 voor 17 en 18 augustus 00 uur lijken hier sterk op door vergelijkbare windsterkten, terwijl ook zichtbaar is dat de wind dan meer uit zuidelijke richtingen is gaan waaien.

Voor 19 augustus 00 uur toont figuur 3.8 de massale opdrijving ten gevolge van de lage voorafgaande windsnelheden. De hogere windsnelheden vlak voor 20 augustus zijn in figuur 3.9 terug te vinden in het goeddeels afwezig zijn van opdrijven in het bovenwater. In het water tussen de woningen is dan nog steeds opdrijving omdat de correctie factor op de windsnelheid van de luchthaven een grotere reductie geeft van de wind snelheid tussen de

woningen. Tot slot toont figuur 3.10 van 21 augustus 00 uur weer een behoorlijke opdrijving op de plas.

3.2.2 De huidige situatie, deeltjes starten op 14 augustus 00 uur

Deze situatie is weergegeven in figuren 3.11 t/m 3.15. Uit figuren 3.11 en 3.12 blijkt duidelijk de invloed van het latere start tijdstip. De deeltjes zijn nog veel meer verdeeld over het Bovenwater. Figuren 3.13 t/m 3.15 geven aan dat de verschillen na een week een stuk kleiner zijn, maar dat nog steeds wel is te zien dat de deeltjes de voorgeschiedenis van de oostelijke wind in de periode voorafgaand aan 14 augustus missen.

3.2.3 De situatie met de geprojecteerde brede duiker

De berekeningen zijn herhaald voor de situatie met de geprojecteerde brede duiker onder de Bunschoterlaan. Het is mogelijk ook daarvan de figuren te tonen, maar het lijkt ons voor de lezer inzichtelijker om figuren van de verschillen tussen beide berekeningen te tonen. De verschillen zijn steeds voor een situatie 'met brede duiker' minus 'huidige situatie'. Positieve getallen betekenen dus een achteruitgang (meer drijfslagen) en negatieve getallen een vooruitgang (minder drijfslagen). De verschillen hebben ook weer als eenheid 'deeltjes / m³', zoals ook in de andere figuren gebruikt.

De figuren 3.16 t/m 3.22 tonen de resultaten bij een start van de deeltjes op 8 augustus 00 uur. Zij laten zien dat de systematische verschillen beperkt blijven tot het water tussen de woningen. Hier zijn locaties te zien met een toename aan drijvende deeltjes en locaties met een afname.

Bij een start van de deeltjes op 14 augustus 00 uur geven figuren 3.23 en 3.24 voor 15 en 16 augustus aan dat de verschillen dan nog erg klein zijn. De figuren 3.25 t/m 3.27 voor 19 t/m 21 augustus 00 uur zijn niet volledig gelijk aan figuren 3.20 t/m 3.22 maar lijken daar toch wel behoorlijk op. Figuren 3.28 en 3.29 tonen voor beide start tijdstippen een tijdreeks met close-up's voor het water tussen de woningen.

3.3 Conclusies

De hydrodynamische simulaties en de daarop volgende deeltjes simulaties tonen aan dat het aanbrengen van een brede duiker tot boven het wateroppervlak onder de Bunschotenlaan duidelijk zichtbare lokale gevolgen heeft voor de te verwachten aanwezigheid van opdrijvende deeltjes. Die gevolgen zijn op sommige locaties gunstig (minder drijvende deeltjes, blauwe kleur) en op sommige locaties ongunstig (meer drijvende deeltjes, rode kleur).

In sectie 2.5.3 is aangegeven welke fysische processen een rol spelen bij de waterbeweging in de verschillende lagen rond de duiker bij Zuidwesten wind. De resultaten van het deeltjes model tonen een hiermee consistent beeld voor deze inhammen. Zoals eerder aangegeven zullen de resultaten er anders uit zien voor andere scenario's voor de het start tijdstip van de deeltjes en voor andere windsnelheden en windrichtingen.

Dat neemt echter niet weg dat naar onze verwachting het aanbrengen van de brede duiker onder de Bunschotenlaan zal leiden tot een in de tijd variërend patroon van afname van drijfslagen op sommige locaties en toename op andere locaties en niet tot een algemene systematische afname. Op welke locaties een toename zal plaats hebben en op welke locaties een afname zal waarschijnlijk variëren met de actuele wind geschiedenis en met het tijdstip van het ontstaan van de drijfslagen.

4 Karakteristieken van Blauwalgen, drijfslagvorming en limiterende factoren

Blauwalgen, feitelijk juist aangeduid als cyanobacteria, komen met name veel voor in eutrofe meren waarin de nutriënten concentraties hoog zijn. Deze groep bezit een aantal eigenschappen, waardoor ze zeer competitief zijn binnen de fytoplankton gemeenschap. Eigenschappen als drijfvermogen in combinatie met grote stijgsnelheden door de aanwezigheid van gasvacuoles (sommige soorten), productie van natuurlijke toxines, atmosferische stikstof fixatie en een geringe eetbaarheid door grazers doordat cellen groot zijn. Verder kunnen koloniën en allelopathische stoffen gevormd worden (Walsby, 1971; Reynolds en Walsby, 1975; Oliver en Ganf, 2000; Reynolds, 2006). Deze eigenschappen worden nader besproken in de volgende secties.

De aanwezigheid van drijfslagen van cyanobacteriën kan verschillende effecten hebben op de waterkwaliteit, de ecologie en de esthetische en economische waarden van zoetwatersystemen. Voorbeelden zijn een aanzienlijke vermindering van het doorzicht, stank, vermindering van de opgeloste zuurstofconcentratie en daarmee samenhangende ecologische effecten (vissterfte), verhoogde mineralisatie van nutriënten, en vergiftiging van mensen en dieren. Van ten minste 46 soorten van cyanobacteria is bekend dat deze in de cel toxines kunnen produceren (Chorus et al., 2000), waaronder hepatotoxines, neurotoxines, endotoxines en huidtoxines. Cyanotoxines kunnen diverse symptomen bij mensen veroorzaken waaronder huid en maagklachten, griepachtige verschijnselen en chronische leverbeschadiging. In hoge concentraties kunnen acute vergiftigingsverschijnselen worden veroorzaakt bij mens en dier (zie bijvoorbeeld Carmichael, 2001; Chorus et al., 2000).

De meeste blauwalgen zijn aerobe, foto-autotrofe organismen. Dat wil zeggen dat ze, in omgevingen waar zuurstof aanwezig is, biomassa (suikers) produceren door middel van licht als energiebron, waarbij tevens zuurstof wordt geproduceerd. Voor zover onderzocht (bijv. voor de soort *Microcystis*) blijken veel blauwalgen overigens ook in staat onder anaerobe (zuurstofloze) condities te groeien, o.a. door het uitvoeren van melkzuurgisting. Cyanobacteriën hebben normaliter slechts water, CO₂, anorganische stoffen en licht nodig. Ze worden in alle habitats ter wereld gevonden, ook in terrestrische maar vooral in zoetwater- en zoutwatermilieus. Het feit dat ze onder vrijwel alle omstandigheden kunnen voorkomen (zoet-, brak- en zoutwater, warme en koude waterbronnen) laat zien dat ze zich hebben aangepast aan een veelvoud van omstandigheden en 'tegen een stootje kunnen'. Het is goed bekend dat door eutrofiëring de omvang van en overlast door blauwalgenbloei zijn toegenomen, maar het is een illusie te denken dat het mogelijk is de groei van blauwalgen volledig te beheersen door manipulatie van externe condities.

4.1 Soorten blauwalgen

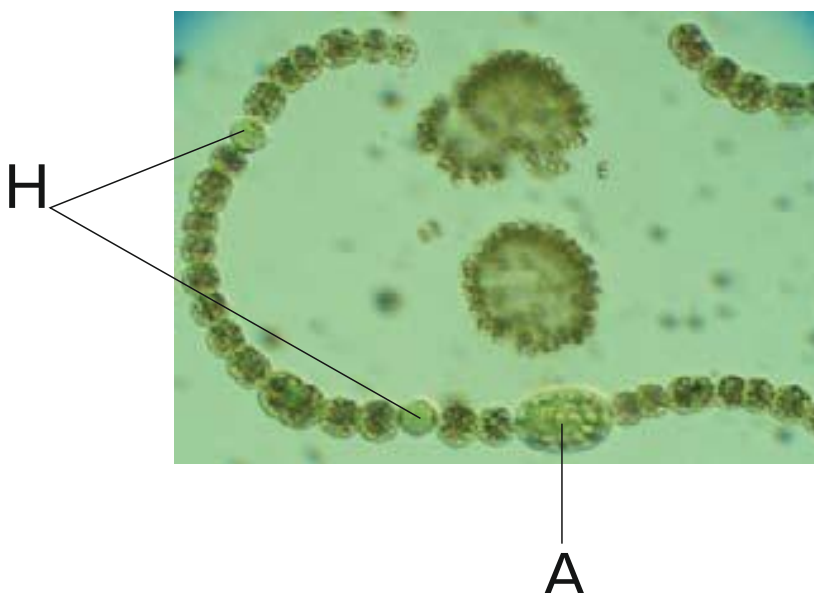
De situatie in 't Bovenwater is niet uniek. In Nederland komen verschillende soorten blauwalgen veelvuldig in zoet water voor. Vele Nederlandse waterbeheerders zijn al decennia lang met het probleem van drijfslagen in hun oppervlaktewateren geconfronteerd. Ons zijn al rapporteringen van Rijnland bekend met betrekking tot drijfslagvorming door blauwalgen in de jaren '30 van de vorige eeuw. De meest algemene soorten (en ook de soorten die de meeste overlast veroorzaken) zijn soorten uit de geslachten *Microcystis*, *Anabaena*, *Aphanizomenon* en *Planktothrix*. *Microcystis* en *Aphanizomenon* zijn in Nederland vooral bekend van bloeien in het IJsselmeer en diepe meren. *Aphanizomenon* vormt vaak al in de lente (mei) bloeien, terwijl *Microcystis* dominant aanwezig is in de zomermaanden en zelfs in de nazomer nog

voor overlast kan zorgen. *Planktothrix* heeft in het verleden (jaren zeventig en tachtig) in de Veluwerandmeren voor overlast gezorgd.

De hoogste *Planktothrix*-concentraties worden in het algemeen aan het eind van de zomer of in de herfst aangetroffen. In zeer eutrofe wateren echter, kan de piekdichtheid al eerder plaatsvinden of kan men zelfs het hele jaar door *Planktothrix* in de waterkolom aantreffen, zelfs in de wintermaanden. Indien dit gebeurt dan is er een grote ent aanwezig voor het jaar daarop. *Anabaena*-soorten komen in Nederland veelvuldig voor in kleinere meren en plassen en vormen vaak eerder in het jaar bloeien (april/mei). *Microcystis*-soorten staan erom bekend dat ze echte drijfblazen vormen, mede omdat ze gasvacuoles bezitten waardoor ze een hoog drijfvermogen halen en zo aan de oppervlakte kunnen accumuleren. Ook *Aphanizomenon* (waar de filamenten vaak in bundels bijeen zitten en zo tezamen grote deeltjes vormen) en *Anabaena* (door de vaak wat opgekrulde vorm van de filamenten) kunnen relatief grote stijgsnelheden ontwikkelen bij het wegvallen van wind en dus ook drijfblazen vormen. *Planktothrix* accumuleert in principe niet in drijfblazen aan het oppervlak, zoals *Microcystis*. Dit komt omdat *Planktothrix* als draadvormende blauwalg slechts een geringe diameter heeft.

4.2 Anabaena

Anabaena, het dominante blauwalgengeslacht in 't Bovenwater, behoort tot de Orde van de *Nostocales*, die gekenmerkt worden door het bezit van heterocysten (Figuur 4.1). Deze heterocysten worden gebruikt om atmosferische stikstof (N_2) te binden. Deze reactie wordt gekatalyseerd door het enzym nitrogenase. De werking van dit enzym wordt geremd door zuurstof, vandaar het uitvoeren van stikstoffixatie in gespecialiseerde cellen (heterocysten) waarin zuurstofproductie door fotosynthese afwezig is. Daarnaast bezitten ze akineten (Figuur 4.1). Dit zijn cellen die reservestoffen bevatten om te overleven gedurende ongunstige omstandigheden. Stikstoffixeerders zijn in staat om onder stikstofarme condities wel door te groeien, waar andere algensoorten het opgeven (Mur et al. 1999). Voorwaarde is wel dat andere voedingsstoffen, zoals fosfaat, niet limiterend zijn. *Anabaena*-soorten domineren vaak in systemen waar (periodiek) lage concentraties van opgelost anorganische stikstof optreden. Het is echter niet zo dat meren en plassen die stikstof-gelimiteerd zijn daarom ook per definitie een dominantie meemaken van *Anabaena* (of een andere N_2 -fixeerder als *Aphanizomenon*). Een beperkende voorwaarde voor dominantie door stikstoffixeerders lijkt dat er voldoende licht beschikbaar is (Zevenboom & Mur 1980).



Figuur 4.1 *Anabaena*-Keten

Figuur 4.1 toont een *Anabaena*-keten (met in het midden twee kolonies van *Woronichinia*) met daarin twee heterocysten (H) en een akineet (A). De foto is afkomstig uit Lurling & van Dam (2009).

Schreurs (1992) definieerde concentraties (grenswaarden) in totaal stikstof en fosfaat voor eutrofe meren waarbij verschillende cyanobacteriën het fytoplankton domineren. Het blijkt dat voor zowel stikstof als fosfaat, *Anabaena* andere optimale concentraties heeft dan andere blauwalggroepen. Voor fosfaat ligt het optimum voor *Anabaena* tussen de 100 en 200 µgP/l terwijl dat voor de andere blauwalgen boven de 200 µgP/l is. Voor stikstof ligt het optimum voor *Anabaena* tussen 1.5 en 2.5 mgN/l, terwijl andere blauwalgen stikstof concentraties prefereren tussen 2.5 en 4.5 mgN/l.

4.3 Vorming van drijfslagen

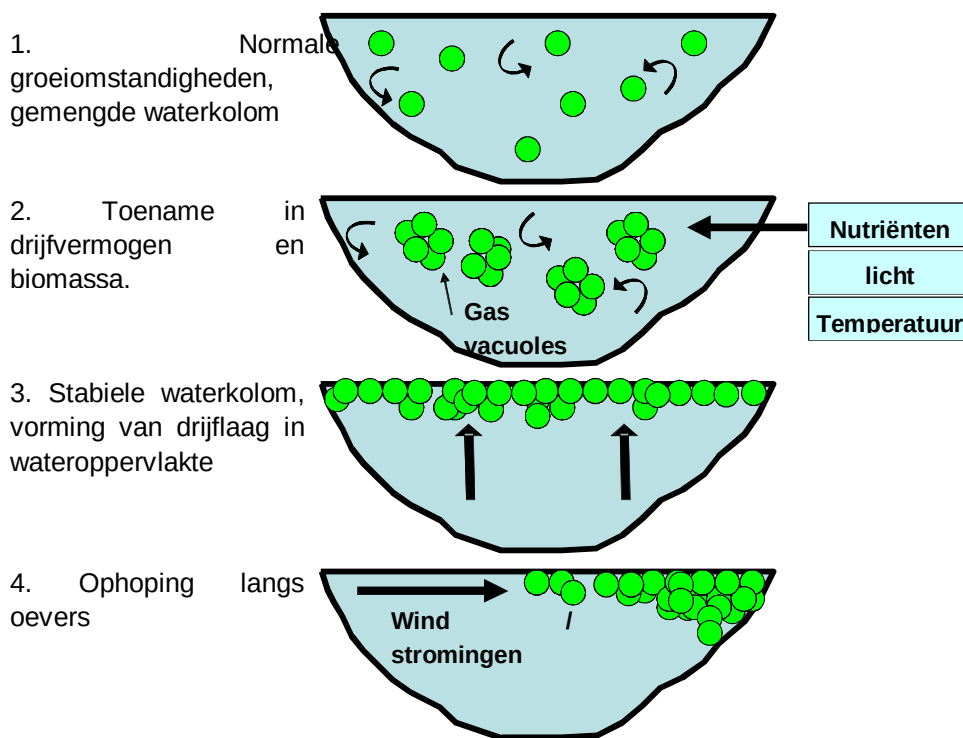
Veel blauwalgsoorten hebben gasvacuoles waarmee ze hun dichtheid en drijfvermogen kunnen aanpassen aan de omstandigheden en zo hoger of lager in de waterkolom kunnen drijven. Hiertoe behoren ook *Microcystis* en *Anabaena* soorten. Het bezit van drijfvermogen is een belangrijke competitieve eigenschap, vooral in watersystemen met onvolledige menging.

Het drijfvermogen van cyanobacteria kan sterk toenemen tijdens periodes van rustig en warm weer wanneer de turbulentie van het water gering is en hoge concentraties aan het oppervlak kunnen ontstaan, een proces wat in de Engelstalige literatuur wordt aangeduid als 'lelescoping' (Figuur 4.2). Drijfslaagvorming is een zeer dynamisch fysisch proces, dat sterk varieert in de tijd, afhankelijk van veranderingen in de stabiliteit van de waterkolom. Cellen kunnen binnen een paar uur aan het oppervlak geconcentreerd worden. Periodiek kunnen de concentraties hierbij oplopen tot meer dan 100.000 cellen per milliliter water. Door een geringe wind kunnen de drijvende cellen vervolgens naar de lijzijde worden getransporteerd, waar in de loop van de tijd een steeds grotere massa kolonies verzameld wordt en zich een dichte oppervlakte drijfslaag vormt.

Afhankelijk van de weerscondities en stabiliteit van de waterkolom kan een dergelijke drijfslaag geruime tijd aanwezig blijven voordat deze verdwijnt door toegenomen menging of sterfte van cellen. In het Nederlandse klimaat zijn langdurige windstille periodes zelfs in de zomer vrij zeldzaam. Toch is ook in Nederland een langere aanwezigheid wel waargenomen, met name langs de oevers. Dat wordt dan geweten aan het feit dat de invloed van de wind en daardoor de menging daar relatief gering is en doordat de aanwezigheid van de drijfslaag zelf ook nog eens zorgt voor een extra vermindering van de menging door een sterke demping van de golfwerking.

Systematisch onderzoek dat de frequentie en langdurigheid van drijfslagen in Nederland registreert is niet beschikbaar, zodat hierover geen kwantitatief inzicht bestaat. Voor het Bovenwater blijkt uit communicatie met de gemeente Lelystad dat dergelijke langdurige aanwezigheid niet is waargenomen. Als zich drijfslagen vormen, worden die snel na het ontstaan er van weggezogen en waar dat niet tot de mogelijkheden behoort worden ze doorgaans na een vrij korte periode door neerslag uiteen geslagen.

In diep water kan de vorming van drijfslagen worden tegengegaan door menging van het water, waardoor stratificatie van de waterkolom wordt opgeheven. Voorbeelden van het mengen van de waterkolom, waardoor drijfslaagvorming verhinderd of beperkt wordt, zijn stromingen opgewekt door (wind-)golven en door scheepvaart en artificiële menging door middel van 'bellenschermen' of 'propellers'. In ondiep water heeft alleen menging echter weinig effect op de vorming van drijfslagen.



Figuur 4.2 overzicht van drijf laagvorming van cyanobacteria

Figuur 4.2 geeft een overzicht van drijf laagvorming van cyanobacteria. (1) Cellen zijn gelijkmatig verdeeld over de gehele kolom onder goed gemengde omstandigheden, (2) zomer biomassa's nemen toe door verhoging van de watertemperatuur, door nutriënten en de lichtbeschikbaarheid. Binnen de cellen van de cyanobacteria ontwikkelen zich gas vacuoles waardoor het natuurlijk drijfvermogen toeneemt en tevens kolonies en filamenten gevormd worden. (3) vorming van oppervlaktebloei begint in periodes met kalm weer en lage licht condities, waardoor accumulatie van biomassa aan het oppervlak plaats vindt, (4) Lichte wind en horizontale waterbeweging transporteert de biomassa naar de lei zijde, waar drijf lagen steeds omvangrijker worden en blijven bestaan.

4.4 Limiterende factoren

Bij het bestrijden van de hinder van blauwalgen kan enerzijds worden gedacht aan het beïnvloeden van één of meerdere limiterende factoren voor de groei van blauwalgen ofwel de vorming van biomassa. Anderzijds kan gedacht worden aan het beïnvloeden van het proces dat leidt tot de vorming van drijf lagen. Enkele belangrijke factoren, die het succes van blauwalgen en daarmee de vorming van biomassa bepalen, en die daardoor ook als een limiterende factor kunnen optreden, worden hieronder beschreven.

Verblijftijd van water

De groeisnelheid van blauwalgen is meestal lager dan die van andere fytoplanktongroepen. Daarmee zijn cyanobacteria relatief gevoelig voor de effecten van doorspoeling. Onder zomerse omstandigheden bij een water temperatuur van ca. 20 graden is de theoretisch maximale groeisnelheid van cyanobacteria ca. 0.8 per dag. Rekening houdend met de daglengte en variaties in lichtbeschikbaarheid over de mengdiepte van de waterkolom en gedurende de dag, is de praktisch haalbare maximale groeisnelheid in het veld onder Nederlandse omstandigheden ongeveer de helft van 0.8 dus ca. 0.4 per dag. Verliezen door processen als respiratie en sterfte bedragen ca. 0.3 per dag zodat in theorie nog een netto groeisnelheid van ca. 0.1 per dag resteert. Dat betekent dat bij een verversing van ca. 0.1 per

dag of wel bij een verblijftijd van ca. 10 dagen de netto groei ongeveer 0 is. Doordat andere soorten een hogere maximale groeisnelheid hebben en dus een competitief voordeel hebben bij hoge verversing, is onder praktische omstandigheden ook bij een wat hogere verblijftijd (tot ca. 20 dagen) de kans op dominantie door cyanobacteria zeer gering.

Naast dit directe effect op de netto groei zijn er ook indirecte effecten van doorspoeling op de gehalten van nutriënten en licht-absorberende componenten. Ook spelen factoren als graas, diepte en eventuele stratificatie een rol. Deze factoren worden (deels) beïnvloed door de verblijftijd. Empirisch kan worden vastgesteld dat de kans op blauwalgenbloei toeneemt bij langere verblijftijden maar of in een specifiek watersysteem met een lange verblijftijd daadwerkelijk dominantie van cyanobacteria optreedt, kan niet worden voorspeld zonder de lokale condities in beschouwing te nemen.

Temperatuur

De maximale groeisnelheid van de meeste bloeivormende blauwalgen (zoals voorkomend in Nederlandse wateren) wordt bereikt boven de 25 °C. Deze optimale temperatuur ligt hoger dan die voor groenalgen en diatomeeën. De temperatuur is daarom een belangrijke factor in het ontstaan van blauwalgenbloei in de zomer. Ervaring leert dat bij watertemperaturen boven de 20 °C het selectief voordeel verschuift naar de blauwalgen. Klimaatscenario's voorspellen dat de temperatuur in Nederland zal blijven stijgen met geregeld zachte winters en warme zomers (KNMI Scientific Report WR 2006-01) wat in het voordeel zal zijn van blauwalgen.

Nutriënten

Ondanks dat bloeien van blauwalgen vaak in eutrofe plassen optreden is het niet zo dat blauwalgen veel stikstof (N) en fosfor (P) nodig hebben. Op het moment waarop de bloeien zich voordoen is, zelfs in eutrofe systemen, de hoeveelheid direct opneembaar P en N vaak gering (vrijwel alle nutriënten zijn al opgenomen en opgeslagen in biomassa). Het blijkt dat blauwalgen ten opzichte van ander fytoplankton een hogere affiniteit hebben voor nutriënten als fosfor en stikstof. Dit betekent dat ze bij lage externe nutriëntenconcentraties beter nutriënten kunnen (blijven) opnemen dan andere organismen en daardoor onder limiterende nutriëntenconcentraties ander fytoplankton efficiënt kunnen beconcurreren. Verder kunnen blauwalgen fosfor opslaan tot concentraties die genoeg zijn om twee tot vier celdelingen uit te voeren. Voor stikstof hebben sommige soorten, zoals die uit het geslacht *Anabaena*, zelfs gespecialiseerde cellen om stikstof uit de atmosfeer op te nemen, waardoor ze minder afhankelijk zijn van de stikstofconcentraties in het water (zie ook sectie 4.2).

Licht

Hoewel ze, net als alle fytoplanktongroepen, licht nodig hebben, zijn veel blauwalgen gevoelig voor langdurige blootstelling aan hoge lichtintensiteit. Blauwalgen zijn zeker in staat zich aan te passen aan hoge lichtomstandigheden, o.a. door het aanpassen van hun fotosystemen en cel-pigmentatie. Aanpassing kost echter tijd. Plotselinge blootstelling aan veel licht kan schadelijk zijn voor de cellen. Waar (sommige) blauwalgen in uitblinken is het omgaan met weinig licht. Dit geldt vooral voor draadvormende soorten uit de groep *Planktothrix/Limnithrix*. De morfologie van hun draden en de aard van de licht oogstende pigmenten stelt deze blauwalgen in staat uiterst efficiënt licht in te vangen voor fotosynthese. Hun efficiënte groei bij laag licht heeft ook te maken met het feit dat blauwalgen weinig energie nodig hebben om cel functies te laten doorgaan. Het resultaat hiervan is dat blauwalgen een competitief voordeel hebben in meren die troebel zijn. Troebelheid is het gevolg van lichtuitdoving door zowel anorganische deeltjes zoals slib, als door fytoplankton (in hoge dichtheden). Dit troebele water selecteert ten gunste van draadvormende blauwalgen en is in het nadeel van ander fytoplankton.

Troebel water kan ook een gevolg zijn van ander fytoplankton, zoals groenalgen, maar ook van de bloei van blauwalgen zelf. In wezen bevorderen blauwalgen zo de condities (troebel

water) die leiden tot hun eigen succes. Essentieel is hier te benadrukken dat het algemene beeld van blauwalgen als 'kampioenen bij weinig licht' niet correct is. Dit geldt uitsluitend voor draadvormende blauwalgen zoals *Planktothrix agardhii*. Kolonievormende blauwalgen zoals *Microcystis spp.* zijn veel minder goed in staat met weinig licht tot bloei te komen. Deze soorten zijn veeleer afhankelijk van hun drijfvermogen in de competitie met andere soorten.

Graas

Blauwalgen worden in het algemeen weinig of niet gegeten door zoöplankton zoals watervlooien, rotiferen en copepoden. Dit komt doordat ze:

- 1) toxines bevatten,
- 2) kolonies vormen waarbij veel cellen bij elkaar zitten in een slijmlaag (bijvoorbeeld *Microcystis*) en daardoor te groot zijn of te taai of,
- 3) draden vormen en daardoor ook te groot zijn om uit het water gefiltreerd te worden.

Deze verschillende afweermechanismen hebben ervoor gezorgd dat blauwalgen moeilijk door zoöplankton worden gegeten en hebben in het verleden het succes van actief biologisch beheer (biomanipulatie waarbij o.a. filter-feeders ingezet worden om helder water te krijgen) in de weg gestaan.

4.5 Samenvatting algemene ecologie bloeivormende blauwalgen

Blauwalgen zijn overduidelijk een evolutionair succesvolle groep. Ze zijn wijd verbreid, hebben vele habitats veroverd, waaronder die met extreme condities. Het zijn niet de snelste groeiers, integendeel, alhoewel sommigen wel uitzonderlijk sterk reageren op een toename in temperatuur. Blauwalgen zijn vooral zuinig op hun biomassa. Verliesposten zijn laag. Ze hebben een goede weerstand tegen graas. Sedimentatieverliezen zijn gering door het bezit van drijfvermogen. Ze handhaven hun populatie ook als de condities verslechteren, bijv. als direct opneembare voedingsstoffen uitgeput raken (stikstoffixeerders schakelen over op atmosferische stikstof als N-bron) of als het water erg troebel wordt. De relatief lage maximale groeisnelheid zorgt er wel voor dat blauwalgen in vergelijking tot andere groepen gevoelig zijn voor verliesfactoren zoals met name uitspoeling door het verkorten van de verblijftijd.

5 Mogelijke maatregelen tegen de drijfslagen

Er bestaat een breed scala aan maatregelen om de biomassa van cyanobacteria te verminderen en om de gevolgen van de vorming van oppervlakte drijfslagen te voorkomen of te beperken. Deze strategieën zijn vooral gericht op drie aspecten:

1. Korte termijn strategieën gericht op verminderen van hoge algen biomassa's en drijfslagen in specifieke delen van het water, vaak nadat de drijfslaag al gevormd is. Hiertoe behoren fysische, mechanische of chemische verwijdering van biomassa's en strategieën om de verdere verspreiding van de drijfslaag naar andere gebieden te voorkomen, waar de esthetische en recreatieve functies het belangrijkste zijn.
2. Middellange termijn strategieën op de schaal van een meer, gericht op de preventie of controle van processen, die leiden tot drijfslaagvorming door kunstmatige beluchting ter bevordering van verticale menging, toevoeging van chemische verbindingen om nutriënten te verminderen en het beheer van biologische componenten zoals vis, waterplanten en zoöplankton om de groei en sterfte van fytoplankton te beïnvloeden.
3. Lange termijn strategieën waarbij zowel het eigenlijke watersysteem als het stroomgebied en het soort omgeving in beschouwing worden genomen. Doel is beperking van de fytoplanktonbiomassa in het meer door reductie van de externe en interne nutriëntenbelasting in samenhang met actief ecologisch beheer van het ecosysteem.

Deze strategieën worden in de volgende secties in meer detail besproken.

5.1 Korte termijn strategieën

Korte termijn strategieën zijn vooral gericht op verwijdering of het tegenhouden van algenmateriaal na de vorming van een drijfslaag. Hoewel deze methoden snel inzetbaar zijn om een direct resultaat te bewerkstelligen, hebben ze geen effect op de eigenlijke oorzaak van de hoge algen biomassa. Deze methoden moeten daarom vooral worden gezien als tussenoplossing, die steeds herhaald moet worden wanneer drijfslagen worden gevormd. Voorbeelden van dergelijke korte termijn beheersmaatregelen omvatten:

5.1.1 Voorkoming transport drijfslagen en accumulatie:

- a. **Fysische barrières** om transport van drijfslagen te voorkomen nadat deze zijn gevormd (olieschermen). Deze aanpak heeft tot doel de verspreiding van drijfslagen te voorkomen naar gevoelige gebieden zoals havens, recreatie stranden en water inlaatpunten. Vaak worden vanwege de lage kosten en gemakkelijke inzetbaarheid drijvende olieschermen gebruikt, maar er bestaan ook meer permanente oplossingen zoals verlenging van dijken (Fig. 5.1a-b). De barrière moet loodrecht op de wind georiënteerd zijn.
- b. **Bellenschermen** om drijfslagen te isoleren wanneer fysische barrières niet kunnen worden ingezet, bijvoorbeeld vanwege de scheepvaart (Fig. 5.1c). Deze methode is het meest effectief onder erg kalme weersomstandigheden wanneer de golfwerking gering is en bij voorkeur in combinatie met andere strategieën, hoewel de wetenschappelijke rapportage hiervan ontbreekt. Deze methode is ook succesvol ingezet bij de scheiding van zoet en zout water in sluizen en bij het begrenzen van de verspreiding van (verontreinigd) slib nabij baggerwerkzaamheden. Door de werking van de luchtcompressoren ontstaat geluidsoverlast. Bellenschermen moeten blijven functioneren gedurende periodes waarin drijfslaagvorming waarschijnlijk is.

- c. **Horizontale menging** heeft tot doel de bevordering van watercirculatie ter voorkoming van stagnantie en van accumulatie van drijfslagen langs oevers met name in dode hoeken. De horizontale menging wordt meestal opgewekt met behulp van spuitinstallaties, fontein en de strategische positionering van in- en uitlaten. Hier kan gebruik worden gemaakt van propellers dicht onder het wateroppervlak zoals in Almere Haven en in andere havens in Nederland. Bij inzet van deze methode ontstaat geluidsoverlast, wat vooral 's nachts overlast geeft. Gebruik van propellers in erg ondiep water kan ook leiden tot toename van de nutriënten concentraties en de vertroebeling door opwerveling van bodemmateriaal. De propellers zijn vrij gevoelig voor verstoring, bijvoorbeeld wanneer drijvend afval wordt aangezogen (Kardinaal et al. 2008).

5.1.2 Fysieke en mechanische verwijdering van drijfslagen:

- a. **Fysieke verwijdering** van drijfslagen met behulp van netten en draagbare vacuümpompen is zeer arbeidsintensief en niet effectief bij grote of omvangrijke bloeien. Vervoer en dumpen van het verwijderde materiaal moet ook in beschouwing worden genomen vanwege het hoge watergehalte en de potentiële aanwezigheid van cyanotoxines en de daarmee samenhangende wettelijke bepalingen.
- b. **Afzuigen** van geaccumuleerd algen materiaal, bijvoorbeeld met behulp van kolkenzuigers. Gebruik van kolkenzuigers is alleen effectief op kleine schaal gedurende een beperkte periode (Fig. 5.1d). Ook bij gebruik van kolkenzuigers kan geluidsoverlast ontstaan. Verwerking van het verwijderde materiaal dient zorgvuldig te geschieden vanwege de aanwezigheid van cyanotoxines (Fig. 5.1e).
- c. **Speciale boten** kunnen ook worden ingezet om drijfslagen te verwijderen volgens een lopende band principe (Fig. 3f). Deze methode kan effectief zijn ter verwijdering van aanhoudende drijfslagen, die over een groot oppervlak verspreid zijn en die niet met behulp van kolkenzuigers of andere verwijderingstechnieken kunnen worden aangepakt. De biomassa van de algen neemt echter niet af en er is geen effect op de drijfslaagvorming elders in het meer.

5.1.3 In-situ vermindering van algen biomassa en drijfslagen

- a. **Ultrasonische bestraling** om de biomassa terug te brengen door gerichte ultrasonische geluidsproductie onder het wateroppervlak. Succesvolle laboratoriumresultaten op kleine schaal zijn over het algemeen niet bevestigd door experimenten in het veld (Aalsmeer, Warmond, haven van Tholen, De gouden Ham). Lurling en Tolman (2008) vonden geen effect van ultrasonische behandeling van een 85 liter groot aquarium gedurende twee weken. Gedurende de ultrasonische behandeling groeide de biomassa van cyanobacteriën zelfs door afname van begrazing door zooplankton. Ultrasonische behandeling kan ook leiden tot het vrijkomen van toxines.
- b. **Flocculatie** en sedimentatie van de cellen en oppervlakkig schuim door gebruik van natuurlijke klei deeltjes. Tot heden zijn er in Nederland geen ervaringen in het veld met deze techniek bekend. Flocculatie heeft waarschijnlijk slechts een tijdelijk resultaat zolang de onderliggende oorzaak; de hoge algenbiomassa, blijft bestaan. De toepassing van klei kan ook tijdelijk het doorzicht van de waterkolom beïnvloeden.
- c. **Rottend stro en fruit schillen** met als doel de groei van cyanobacteriën te beperken. Deze techniek is zowel met laboratorium experimenten als in het veld op kleine schaal gedemonstreerd (bijvoorbeeld Ball et al., 2001; Ferrier et al., 2005). Proeven in twee Nederlandse meren (Parklaanvijver in Roosendaal en Wiel te Waspik) door het Hoogheemraadschap West-Brabant suggereren dat rottend stro geen effect heeft op algenbloeien en niet effectief is in het onderdrukken van de

fytoplankton biomassa tot niveaus beneden wat normaal wordt waargenomen in de zomer. De afbraak van organisch materiaal kan ook meer nutriënten in de waterkolom brengen. Het gebruik van fruitschillen op de schaal van hele meren is niet haalbaar.

- d. **Waterstofperoxide** dosering in lage concentraties in de waterkolom om cyanobacteriën te doden. Uit experimenteel onderzoek van de Universiteit van Amsterdam blijkt dat cyanobacteriën vatbaarder zijn voor peroxide dan andere algengroepen. Deze methode is op beperkte schaal in het veld getest, maar er zijn (nog) geen algemeen geldende richtlijnen met betrekking tot de toelating van deze methode. Verder moet er rekening mee gehouden worden dat afstervende algen een tijdelijke verhoging van extracellulaire cyanotoxine concentraties kunnen veroorzaken.
- e. **EM Bokashi balls** (EM Bokashi balls, EM America, 2007). Lurling et al. (2007) vond in laboratoriumexperimenten dat Effectieve Microorganismen (EM) geen effect hadden op de groei van *Microcystis* of op het verminderen van schuimvorming. De biomassa van cyanobacteriën vertoonde een afname vlak na de toediening van een extreem hoge concentratie EM Bokashi balls, maar dit werd toegeschreven aan het effect van de klei toevoegingen en flocculatie. Daarna nam de biomassa in het experiment toe door de nutriënten die uit de klei vrij kwamen. Deze behandeling wordt als niet effectief beschouwd.

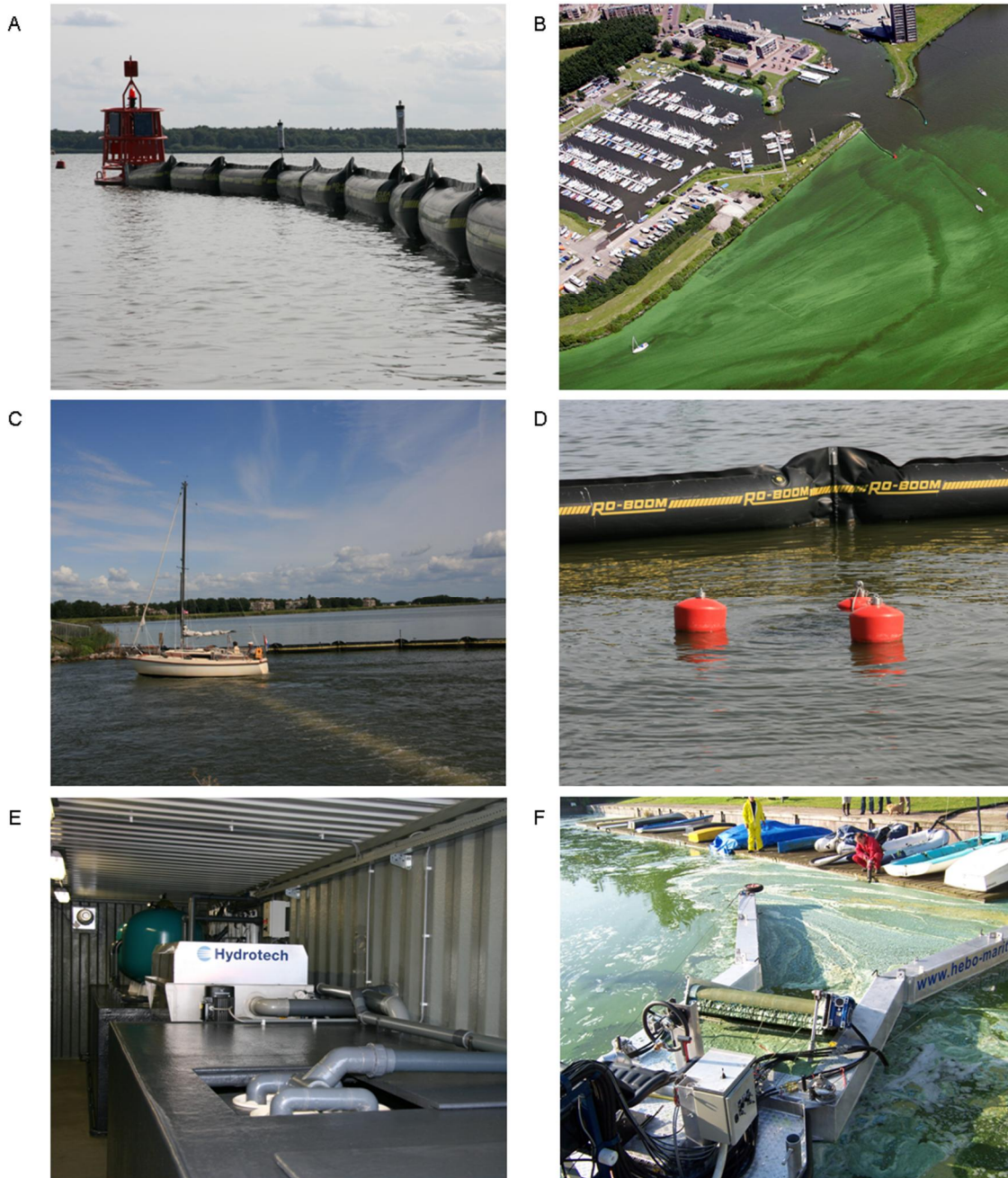
Verschillende andere methoden ter vermindering van de algen biomassa bestaan op laboratorioschaal. Deze methoden worden niet haalbaar geacht voor toepassing op de schaal van hele meren, hetzij doordat ze waarschijnlijke niet werken, hetzij door hun invloed op overige organismen en/of de mens, hetzij door het verwachte vrijkomen van intracellulaire toxines. Hieronder vallen **UV bestraling**, dosering van **chloordioxide en ozon**, **membraan filtratie** en **elektro-pulsen**.

Fysieke barrières om drijfslagen buiten te houden zijn op een aantal locaties in Nederland beproefd, zoals bij Almere haven en de aanpalende recreatiestranden (Fig. 5.1a-b). De tests hadden gemengde resultaten en deze methode moet altijd gebruikt worden in combinatie met andere methoden. De barrières waren heel effectief in het tegenhouden van een aantal drijfslagen, maar openingen voor boten betekenden toch een mogelijkheid voor de algen om binnen te dringen. Eenmaal binnen in de relatieve beschutte wateren mengen de drijfslagen moeilijker over de waterkolom en er is ook geen mechanisme voor transport terug naar het open water. De drijfslaag kan daardoor langer blijven bestaan achter de barrières dan in het open water. De permanente aanwezigheid van barrières kan ook uit esthetisch oogpunt ongewenst zijn. Het hanteren van bellenschermen als barrières zou deze nadelen wellicht kunnen ondervangen.

Ook skimmers zijn gebruikt in Almere haven, samen met fysieke barrières en lijn-diffusors. Emissieregelgeving verhindert het lozen van potentieel toxisch materiaal terug in het water, ongeacht de oorsprong van dat materiaal. Zodoende is de biomassa blauwalgen die is verwijderd door de skimmers naar een kleine lokale zuiveringsinstallatie geleid (Figuur 5.1e).

Mechanische menging met propellers is geprobeerd in ten minste twee kleine en ondiepe (diepte < 3m) havens in Nederland. Het precieze resultaat van menging op biomassa en drijfslaag vorming in deze systemen is niet wetenschappelijk vastgelegd, maar het gebruik van propellers lijkt in ieder geval effectief in het voorkomen dat drijfslagen de beschoeiing van de haven bereiken. Menging is waarschijnlijk niet effectief voor grotere ondiepe systemen zoals 't Bovenwater waar ook de vele inhammen tussen de bebouwing een horizontale menging nog in de weg staat. De invloed van menging op cyanobacteriën door lucht injectie in een ondiep (1.3 m) eutroof meer is onderzocht met microcosm experimenten in het veld door Tolman (2007). De beluchting vergrootte de omwoeling van het sediment met verhoogde

concentraties organisch materiaal en nutriënten in de water kolom tot gevolg. Er was geen effect van de beluchting op chlorofyl-a gehalten in de water kolom.



Figuur 5.1 Illustratie van algemene blauwalgbestrijdingsmaatregelen

Figuur 5.1: Illustratie van algemene blauwalgbestrijdingsmaatregelen in werking, waaronder (A-B) Drijvende blauwalgen afkomstig vanuit het Gooimeer voor de ingang van Almere Haven, met olieschermen in werking (zomer 2007, foto Ton Kastermans fotografie), (C) Geactiveerd bellenscherm over de gehele breedte van de havenmonding, (D) skimmer in de monding van Almere Haven, (E) Lokale zuiveringsinstallatie om afvalwater van de skimmers te behandelen en (F) Inzet vaartuig om drijfslagen te verwijderen.

5.2 Middellange termijn strategieën (1-5 jaar)

Deze beheersmaatregelen hebben betrekking op de schaal van hele meren en betreffen het fysiek bestrijden van drijfslagen van cyanobacteriën of het beperken van de groei door licht limitatie en competitie met andere fytoplankton soorten (door menging), nutriënt limitatie (door chemische verwijdering) of begrazing (biomanipulatie). De meest gebruikte middelen zijn:

5.2.1 Middelen die fysiek de menging en circulatie bevorderen:

- f. **Kunstmatige beluchting** om 1) de diepte van de bovenste menglaag te vergroten en licht limitatie te bevorderen om de competitie tussen soorten te vergroten en 2) de verticale watersnelheden toe te laten nemen om zo drijfslagvorming tegen te gaan. Deze methode is alleen geschikt voor diepere meren (> 15m) en is heel effectief gebleken in bijvoorbeeld Nieuwe Meer en de Bergse Plassen.
- g. **Verdunding en/of doorstroming** om de nutriënt concentraties in de waterkolom te verminderen en om de biomassa te verlagen door verkleining van de verblijftijd die beschikbaar is voor groei. De bruikbaarheid van deze methode is afhankelijk van de aanwezigheid van voldoende water met de vereiste kwaliteit en van de vraag of de verblijftijd voldoende terug gebracht kan worden. De methode zou gedurende de zomer toegepast moeten worden, wanneer de algengroei het sterkst is.
- h. **Toename van de waterdiepte** om de invloed van bodemsedimenten op de waterkolom terug te dringen en om de temperatuur van de waterkolom te verlagen. Dit kan bereikt worden door het graven van diepe putten om nutriënten, organisch stof en zwevend sediment af te vangen en om het doorzicht te vergroten. Het baggeren van het meer of verhoging van de waterstand zijn alternatieven. Voor erg ondiepe meren zal de vermindering van algenbiomassa op deze manier maar beperkt zijn, maar de overall waterkwaliteit kan verbeteren.
- i. **Herinrichting van de beschoeing en doorstromingsmogelijkheden (zoals duikers) ter bevordering van autonome menging en circulatiepatronen**, bijvoorbeeld door a) heroriëntatie van recreatieve stranden en haven ingangen zodanig dat instroming van drijfslagen door dominante windrichtingen wordt voorkomen en b) veranderingen in of openingen in beschoeiingen van stagnant water of doodlopende kanalen om stagnantie te verminderen. Deze methode kan effectief zijn op lokale schaal, maar zal de overall biomassa in het meer niet verminderen. Uit de eerdere hoofdstukken van dit rapport blijkt dat voor de specifieke situatie van 't Bovenwater er weliswaar verplaatsing van drijfslagen verwacht mag worden op kleine schaal, maar dat die verplaatsing lokaal verbeteringen en verslechtingen op zal leveren die in tijd en plaats zullen variëren met de wind en met de opdrijfhistorie.

5.2.2 Vermindering van interne nalevering:

- j. **Gebruik van chemicaliën** om de nutriëntconcentratie in de waterkolom en sedimenten te verminderen en hoge algen biomassa te reduceren. Voorbeelden zijn **Phoslock** (bijv. Robb et al. 2007), **Alum**, **Aqual-P**, **calcium**, **iron chloride** etc. Er zijn in Nederland verschillende studies op dit gebied uitgevoerd, zoals in het Rauwbrakenmeer en in een geïsoleerd deel van de Gouden Ham. Het lijkt erop dat deze strategie effectiever is voor diepe meren (> 10m) samen met de reductie van externe belasting. Voor ondiepe meren kan de nalevering moeilijker te controleren zijn door de effecten van sedimentatie en resuspensie en door het kleine ratio water: sediment.
- k. **Beluchting** van water bij de bodem om het vrijkomen van fosfor tegen te gaan. Deze methode wordt toegepast als het beluchten van de waterkolom alleen onvoldoende is en bestaat uit injecteren van zuivere zuurstof in de bodemlagen.

- l. **Baggeren** om nutriëntrijk sediment te verwijderen en nalevering te verminderen. Deze methode kan in combinatie met andere beheersmaatregelen effectief zijn als de nalevering groot is. De lange termijn effecten hangen mede af van de vermindering van de externe belasting, die voor een voortdurende verrijking van het sediment zorgt. Verder is deze methode niet effectief bij van nature rijke sedimenten. Baggeren kan ook worden gebruikt om uitbundige groei van macrofyten te bestrijden of om de waterdiepte te vergroten en lichtlimitatie te bevorderen. Baggeren zal leiden tot hoge resuspensie van sediment, vrijkomen van nutriënten en verminderd doorzicht tijdens de werkzaamheden. Ook kunnen toxische stoffen zoals zware metalen vrij komen. Ook de depositie van het sediment verdient aandacht. Baggeren vermindert tijdelijk de habitat van macrofyten. Voor 't Bovenwater moet men zich afvragen of men het risico wil lopen dat macrofyten na het baggeren niet meer terug kunnen komen.
- m. **Afdekken van het sediment** om dat te isoleren van de water kolom en om nalevering te verminderen. Afdekken kan een goedkopere oplossing zijn dan baggeren, maar de effectiviteit is meer afhankelijk van de reductie van de externe belasting en van de omvang van de sedimentatie. Ook de gevolgen voor de visstand verdienen aandacht. Verschillende soorten materiaal worden gebruikt, klei en zand maar ook chemisch gemodificeerd klei ter vergroting van de binding van fosfor (Phoslock, Zeolite).

5.2.3 Biomanipulatie:

- n. **Zoetwater mosselen** worden toegepast als middel om de hoge fytoplankton biomassa terug te dringen door begrazing. Het uitzetten of bevorderen van een mosselpopulatie (*Dreissena polymorpha*) was alleen succesvol in meren met een in aanzet goede waterkwaliteit, voldoende hard substraat en lage sedimentatie. Deze condities vallen in de regel samen met lage brasem populaties. Eenmaal aangeslagen kan het moeilijk zijn om de mosselgroei te beheersen, terwijl in sommige systemen de aanwezigheid van mosselen de blauwalgen groei juist bevorderde. Mosselen kunnen gevoelig zijn voor de hogere water temperaturen die in de zomer voorkomen in erg ondiepe meren. Mosselen zijn niet geschikt voor de begrazing van kolonievormende soorten zoals *Microcystis*.
- o. **Beheer van de visstand** om die vissoorten te bestrijden die het zoöplankton verminderen (en daarmee de graas van algen) of die door omwoelen van de bodem de turbiditeit en het vrijkomen van nutriënten bevorderen. Deze methode moet samen met reductie van de externe belasting worden toegepast. Ze is succesvol geweest in een aantal meren samen met bevordering van de mosselstand en vermindering van de externe nutriëntbelasting. Tegenwoordig mag actief biologisch beheer in de vorm van afvissen (van voornamelijk brasem) niet zomaar meer worden toegepast (Stand van zaken Motie Jacobi Koppejan 25-08-2010).
- p. **Beheer van waterplanten ten behoeve van nutriënt verwijdering en toename van het doorzicht:**
 - **Vergroten van de biomassa macrofyten om in de zomer de nutriënt opname te bevorderen.** Door vermindering van het maaien van macrofyten of door verbetering van het lichtklimaat onder water kan de biomassa macrofyten worden vergroot. Hoge biomassaniveaus kunnen echter ook een negatieve invloed op de esthetische en recreatiewaarde van het water hebben.
 - **Regelmatig maaien en verwijderen van macrofyten** uit het meer. Oogsten van macrofyten kan een negatieve impact hebben op de waterkwaliteit als daardoor tijdelijk het doorzicht vermindert door resuspensie of als daardoor

meer nutriënten uit het sediment vrij komen of de habitat voor vis worden verstoord. Het voordeel van het verwijderen van macrofyten is dat voedingsstoffen ook worden verwijderd. Voorwaarde hierbij is wel dat de externe nutriëntenstroom laag moet zijn.

q. **Cyanofagen:**

- Het gebruik van virussen die het speciaal op cyanobacteriën gemunt hebben. Deze benadering wordt nog op laboratoriumschaal getest en is nog niet toepasbaar in het veld.

Het gebruik van kunstmatige menging om fytoplanktonbiomassa en drijfslagvorming te onderdrukken is succesvol toegepast op grotere schaal in veel diepe (> 15m) systemen in Nederland. (bijv. Deltares, 2008; Ibelings et al., 1997; Visser et al., 1996; Jöhnk et al., 2007). Deze techniek was uiterst succesvol in Nieuwe Meer, een klein (1.3 km²) diep (gemiddelde diepte 18m), eutroof meer bij Amsterdam. Een bellenzuilbeluchtingssysteem werd in 1993 op de bodem van het meer geïnstalleerd. Het beste reaeratie schema werd bepaald met behulp van veld experimenten, metingen en hydrodynamische modellering. De *Microcystis* biomassa in dit meer is significant teruggebracht door de vergroting van de bovenste menglaag in het meer. Dit heeft de licht limitering veroorzaakt en de competitie met andere planktonsoorten bevordert (Huisman et al., 2004; Jöhnk et al., 2007; Jungo et al., 1993). Ook de vorming van drijfslagen van *Microcystis* sp. werd verhinderd door de verhoging van de turbulentie tot een niveau waarbij de oprijfsnelheid van de cellen voldoende wordt geneutraliseerd. Proeven met intermitterende menging waren niet succesvol en momenteel staat het beluchtingssysteem gedurende de zomer maanden continu aan (Jöhnk et al., 2007). Deze strategie werkt alleen voor diepe meren.

Het gebruik van zoetwatermosselen als biologische methode om fytoplanktonbiomassa's te verwijderen heeft recentelijk veel belangstelling gewekt in Nederland (Dionisio Pires, 2005). Ofschoon het een exotische soort is, wordt de zebra mossel (*Dreissena polymorpha*) al sinds 1872 hier aangetroffen (Reeders 1990). In de vroege '90-er jaren zijn een aantal testen uitgevoerd (Veluwemeer en Volkerak) die tot doel hadden om daar een lokale populatie te vestigen en bevorderen door natuurlijke kolonisatie en toevoeging van hard substraat. In het Veluwemeer (30 km², gemiddelde diepte 1.6 m) was dit in het begin geen succes vanwege de slechte waterkwaliteit en de hoge sedimentatie, waardoor het harde substraat begraven raakte. Na verbetering van de waterkwaliteit door nutriënt reductie en visbeheer slaagde de natuurlijke kolonisatie in 1994 wel. De aanwezigheid van een grote mosselpopulatie leidde tot verdere vergroting van het doorzicht in de opvolgende jaren (Lammens et al., 2004) maar het continue visbeheer wordt hiervoor toch als de belangrijkste factor gezien.

Ook in de zuidelijke delen van het IJsselmeer bestaan grote natuurlijke mosselpopulaties. Hun effect op de biomassa van cyanobacteriën is echter onbekend. Ook in het Volkerak-Zoommeer was de toevoeging van vast substraat in de vroege 90-er jaren onvoldoende om een natuurlijke mossel kolonisatie te bevorderen. Eerst bij veldexperimenten in 2003 werd natuurlijke kolonisatie waargenomen. De hoeveelheid benodigd vast substraat om voldoende filter capaciteit op de schaal van het hele meer te bereiken werd echter als onhaalbaar gezien. Een aantal succesvolle tests zijn uitgevoerd in heel kleine meren (Waay en kleine meren naast de Roggebotsluis), waar het uitzetten van zebramossels heeft geleid tot een verbetering van het doorzicht. Verdere test zijn opgezet in 2007 en begin 2008 in drie systemen: Zwemlust (NIOO), Linievijver (Deltares en Waterschap Brabantse Delta) en de Gaatskerplas (Hoogheemraadschap Hollandse Delta). De resultaten variëren van mislukt (Zwemlust) tot gelukt (Linievijver) en onbekend (Gaatskerplas). Momenteel is de mening dat toepassing van de zebramossel ten behoeve van verbetering van de waterkwaliteit nog veel onderzoek in het veld verlangt.

Ook biomanipulatie door beheer van de visstand kan de algenbiomassa terugbrengen door het bevorderen van begrazing van algen door zoöplankton. In Nederland is dit het meest succesvol toegepast in het Veluwemeer in combinatie met vermindering van de nutriëntbelasting en het bevorderen van zebromosselen. Deze vorm van biomanipulatie is alleen succesvol als ze er toe kan leiden dat macrofyten terugkeren door het vergrote doorzicht. Tegenwoordig mag actief biologisch beheer in de vorm van afvissen (van voornamelijk brasem) niet zomaar meer worden toegepast.

5.3 Lange termijnstrategieën (>5 jaar)

Het beheer op de lange termijn concentreert zich op hele watersystemen, zowel op de schaal van een heel meer als op de schaal van een stroomgebied. Lange termijnreductie van de nutriëntbelastingen zal uiteindelijk leiden tot de vermindering van de nutriëntconcentratie in de waterkolom en tot vermindering van de fytoplanktonbiomassa. Dit is in veel studies wereldwijd aangetoond. Maatregelen op de korte en middellange termijn zullen slechts een beperkte invloed hebben op vermindering van de algenbiomassa en drijfslagen als niet ook de nutriëntbelasting wordt vermindert.

Gangbare methoden voor vermindering van de externe nutriëntbelasting komen kort gezegd neer op:

- a. **Afleiden, zuivering en/of regulering van alle belangrijke toestromingen** en afvalwaterlozingen. Afleiden heeft ook gevolgen voor de watertoevoer tot een meer en daarmee voor de verblijftijd. Dit kan de waterkwaliteit negatief beïnvloeden ondanks de verminderde belasting. Zuivering van het influent is de beste optie, maar deze kan kostbaar zijn omdat continue zuivering vereist is. Regelgeving en controle van alle lozingen en bronnen van verontreiniging op niveau van het hele stroomgebied is op de lange termijn de beste methode.
- b. **Optimaal beheer** toegesneden op vermindering van de toestroming van nutriënten die verband houden met landgebruik zoals bemesting, beheer van de omliggende groenvoorzieningen, diffuse toestroming en beheer van afwateringen etc.
- c. **Inrichting van kunstmatige natuurlijke moerassen, helofytenfilters, omliggende buffer zones en natuurvriendelijke oevers** om de toestroming te verminderen en vastleggen te bevorderen van nutriënten en andere verontreiniging. Periodieke verwijdering van de begroeiing van omliggende gebieden en moerassen om de nutriënten te verwijderen die daar door de planten opgenomen waren.
- d. **Beheersing van de regenwater afvoer** met inbegrip van de verzameling en afleiding naar zuiveringsinstallaties, slibafvang en sedimentatiebekkens voor verwijdering van nutriënten, zwevend stof en organisch materiaal. Ook de inspectie van riolen op lekkages kan belangrijk zijn.

6 Plausibele oplossingsrichtingen

6.1 Bestaande beheers strategieën

De gemeente Lelystad heeft een aantal beheers strategieën geprobeerd die zich richten op verwijderen en voorkomen van drijfslagen van algen (Bijlage C). In 2013 en 2014 zullen de maatregelen ter bevordering van het ecologisch herstel en een optimaal beheer van waterplanten worden geëvalueerd. Momenteel wordt het fonteinkruid in de plas regelmatig gemaaid vanwege de bevaarbaarheid van de plas. Het is te hopen dat deze methode gunstig zal uitpakken voor de verdere ontwikkeling van het kranswier dat nu al aanwezig is in het centrum van het meer en dat geen invloed heeft op de bevaarbaarheid.

Een aantal aanvullende maatregelen is door de gemeente Lelystad overwogen, maar niet haalbaar bevonden en daarom niet toegepast (Bijlage C). Genoemd kunnen worden de slibschermen die in Almere Haven effectief bleken maar die in 't Bovenwater niet zijn toegepast vanwege de hinder voor de scheepvaart. Ook de behandeling met chemicaliën voor nutriëntverwijdering (ijzerchloride) en voor biomassaverwijdering (waterstofperoxide) is overwogen maar ontraden door het Waterschap in verband met de gevolgen voor het milieu en het te verwachten beperkte effect op grotere ruimtelijke schaal.

Verder zijn de externe nutriënt belastingen via de instromingen al afgenomen door gebruik van Markermeer water in plaats van water uit de Lage Dwarsvaart sinds 2004. Nutriënt gehalten in het Markermeerwater (1.34 mg/l N en 0.11 mg/l P, Arcadis 2011) zijn veel lager dan die in de Lage Dwarsvaart (ongeveer 4 mg/l N en 0.8 mg/l P) en het Markermeerwater kan als nutriëntarm worden beschouwd in vergelijking met andere bronnen van water in de buurt.

6.2 Bestaande situatie

1. De relatief lange verblijftijd van het Bovenwater (meer dan 100 dagen) werkt in het voordeel van de blauwalgen (beter gezegd niet in hun nadeel, zoals dat het geval zou zijn indien de verblijftijd duidelijk korter zou worden), omdat hun groeisnelheid laag is.
2. Watertemperaturen boven de 20 °C kunnen sterk in het voordeel van bloeivormende blauwalgen werken. Vooral voor *Microcystis* is bekend dat de overlast toeneemt als de watertemperatuur stijgt. De optimale temperatuur voor de groei van deze soort cyanobacteriën wordt weliswaar nog niet vaak bereikt (25 °C), maar dat wil niet zeggen dat hogere watertemperaturen niet nu al bevorderend werken.
3. De huidige nutriëntenbalans van 't Bovenwater wordt verondersteld beneden het kritieke niveau liggen voor de omslag van helder naar troebel (Arcadis, 2011). De terugkerende dominantie van cyanobacteriën gedurende de zomermaanden geeft toch echter de indruk dat de nutriëntgehalten nog steeds te hoog zijn en dan met name voor fosfor.
4. Volgens Schreurs (1992) zijn de gemiddelde zomer concentraties van TN en TP in 't Bovenwater (2.06 mg/l TN en 0.16 mg/l TP in 2010, Arcadis 2011) optimaal voor de dominantie van *Anabaena* species. Het succes van *Anabaena* in 't Bovenwater hoeft daarom ook geen verbazing te wekken. Ook de gemiddelde TN:TP ratio van minder dan 29:1 is over het algemeen bevorderlijk voor de dominantie van cyanobacteriën.
5. Beheers opties om de algenbiomassa en drijfslagen te verminderen worden beperkt door de verschillende vormen van gebruik van 't Bovenwater. Genoemd kunnen worden de recreatie (bevaarbaarheid, geen hinder van planten) en de bewoners

(geen drijfslagen, geen geluidsoverlast). Verder spelen de beperkingen van het watersysteem zelf een rol: ondiep, lange verblijftijd, beperkte water toevoer gedurende de zomermaanden, bestaande nutriëntbelasting uit het Markermeer en de kwel. Hoewel de nutriëntconcentraties in het Markermeerwater laag zijn, is de belasting in de zomer het hoogst door de noodzaak water in te laten voor het peilbeheer. Ook de sedimenten kunnen een belangrijke bron van nutriënten zijn.

6. Iedere structurele verandering aan het watersysteem zoals bijvoorbeeld verdieping door baggeren of doorspoeling ter vermindering van de verblijftijd zijn waarschijnlijk te kostbaar of niet toepasbaar gezien de grootte van het meer. Alternatieve strategieën direct gericht op de drijfslagen of het transport daarvan zullen alleen tijdelijke en lokale resultaten hebben. De verzameling van mogelijke maatregelen ter vermindering van biomassa en drijfslagen naast datgene wat nu al gebeurt wordt daarmee, mede gezien de randvoorwaarden van de gebruikers, erg beperkt.

6.2.1 Aanbevelingen voor aanvullende maatregelen ter vermindering van de biomassa en drijfslagen van cyanobacteriën.

Aanvullende maatregelen met betrekking tot het algenprobleem vallen in twee categorieën uiteen, 1) symptoombestrijding zoals de beïnvloeding van het transport van drijfslagen en de lokale accumulatie daarvan in gebieden met woningen en havens en 2) de structurele reductie van de biomassa door de vermindering van de nutriënt concentratie (met name fosfor) en de beïnvloeding van het onderwater lichtklimaat ten gunste van andere soorten dan *Anabaena* en/of andere blauwalgen species.

Het is belangrijk om te constateren:

- a) Dat er bij geen enkele maatregel (behalve drastische nutriënt reductie) garantie op succes is.
- b) Dat het zeer wel mogelijk is dat het huidig beleid het best haalbare resultaat oplevert binnen de grenzen van de regelgeving ten aanzien van omgeving, flora en fauna en binnen de verlangens van recreatievaart e.d.
- c) Dat 't Bovenwater zich in een relatief gunstige omstandigheid bevindt met jaarlijks terugkerende bodembegroeiers die het meer relatief helder kunnen houden. Het is belangrijk om voorzichtig met maatregelen om te gaan.

Aanbevelingen voor bestrijding van al gevormde drijfslagen:

De mogelijkheden voor lokale doorspoeling van de kanalen tussen de woningen is zeer beperkt. Dit blijkt ook uit de model studies van hoofdstuk 2 en 3. Er zijn doodlopende kanalen die niet met benedenwinds water verbonden kunnen worden omdat ze zelf t.o.v. een Zuidwesten wind het meest benedenwindse punt zijn in 't Bovenwater. Uit de modelstudie blijkt ook dat de kanalen die met de brede duiker onder de Bunschotenlaan met elkaar een open verbinding zouden krijgen, zich toch niet door een windgedreven stroming laten doorstromen omdat de kanalen loodrecht op elkaar staan. Op zo'n manier zullen drijfslagen het kanalenstelsel tussen de huizen maar moeilijk kunnen verlaten, ook al worden er extra verbindingen aangelegd. Verder blijft windgedreven stroming altijd afhankelijk van de windrichting en pakt voor verschillende windrichtingen verschillend uit. Daarenboven treden drijfslagen vooral op bij weinig wind en dan is ook de windgedreven stroming in omsloten kanalenstelsels gering.

Het gebruik van bellenschermen voor de ingangen van het kanalenstelsel kan verhinderen dat drijfslagen vanuit het open water van de plas het kanalenstelsel binnen komen. De bellenschermen zouden de gehele ingang van het kanalenstelsel

moeten afsluiten en continu in werking blijven gedurende de kritieke perioden in het jaar. Boten kunnen hier gewoon doorheen varen. De benodigde intensiteit van het scherm zal mede afhangen van windsnelheid en windrichting. Het principe is gebaseerd op een door het scherm veroorzaakte verticale waterstroming die aan het wateroppervlak loodrecht op het scherm naar weerskanten zal afbuigen.

Lokaal wegzuigen van drijfslagen kan plaats hebben zodra de drijfslagen zijn geconstateerd. Het weggezogen materiaal zal zorgvuldig moeten worden verwerkt vanwege de cyanotoxinen die vrij kunnen komen. Afhankelijk van de hoeveelheid zo verwijderde biomassa wordt ook een hoeveelheid nutriënten (met name fosfor) uit het systeem verwijderd.

Het gebruik van barrières kan effectief zijn om drijfslagen tegen te houden (e.g. Fig 5.1a). Deze oplossing is echter niet toepasbaar in 't Bovenwater vanwege hinder voor de scheepvaart.

Aanbevelingen voor de vermindering van algenbiomassa:

1. Zoveel mogelijk verminderen van de nutriëntbelasting, zodat het eutrofiëringniveau teruggedrongen wordt. Nutriëntvermindering moet zich richten op fosfor want momenteel dominante soort *Anabaena* heeft het vermogen om N_2 gas dat in het water is opgelost te binden en heeft in de competitie dus baat bij lage N gehalten. Door het stikstof gehalte hoger te laten worden kan *Anabaena* verdwijnen, maar de cyanobacterie *Microcystis* die daarvoor in de plaats kan komen zal geen verbetering brengen. Onder vermindering van de P-belasting valt een scala van maatregelen zoals:
 - a. verminderen van het P-gehalte in het instromende water tijdens het groeiseizoen in de zomer.
 - b. vermindering van de P-belasting door uitwerpselen van vogels en andere bronnen (bemesting en afstroming van percelen?);
 - c. direct verwijderen van gemaaide waterplanten etc.
2. Beïnvloeding van het lichtregime in 't Bovenwater. Door het water zo lang mogelijk helder te houden kan er wellicht voor gezorgd worden dat *Anabaena*, die bevoordeeld wordt door troebel water, minder wordt bevoordeeld. Aan de belanghebbenden zou voorgelegd kunnen worden om een jaar niet te maaien (en dus ook om minder te varen) om te zien of dat 't Bovenwater voldoende helder maakt en houdt en het gewenste resultaat heeft. Het verdient dan wel aanbeveling om later in het jaar wel te maaien om de nutriënten in de begroeiing uit 't Bovenwater uiteindelijk te verwijderen. Hierbij past de aantekening dat als andere algensoorten winnen, zoals groenalgen, er zich dan geen drijfslagen vormen, maar het water kan wel troebel worden. In dit troebele water ontstaan dan weer de voorwaarden voor een opkomst van cyanobacteriën zoals *Anabaena*. en kunnen alsnog drijfslagen ontstaan.
3. Als het maaien van macrofyten onvermijdelijk is dan moet er alles aan gedaan worden om de groei van het kranswier te bevorderen door selectief fonteinkruid biomassa te verwijderen. Het kranswier neemt zijn nutriënten uit het water op terwijl het fonteinkruid zijn nutriënten uit de bodem betreft. Alle gemaaide biomassa moet ook uit het watersysteem verwijderd worden om de daarin opgeslagen nutriënten te verwijderen.
4. Zo precies mogelijke kwantificering van de fosforbalans inclusief de nalevering uit de bodem, om een precies inzicht te krijgen in het belang van de verschillende balansposten. Dit geeft de mogelijkheid om te evalueren of in hoeverre netto fosfor uit het systeem verwijderd wordt.

5. Biomanipulatie door het uitzetten van mossels is waarschijnlijk niet effectief te realiseren vanwege de geringe diepte van 't Bovenwater, de troebelheid gedurende de zomermaanden in de geringe mogelijkheden voor vast substraat
6. Beheer van de visstand is naar verwachting niet effectief. De huidige begroeiing met macrophyten geeft zooplankton al voldoende habitat om tot ontwikkeling te komen en het draadvormige *Anabaena* wordt niet gemakkelijk gegeten door zooplankton.
7. Vergroting van de waterdiepte door baggeren zal invloed hebben op de biomassa macrofyten en op de habitats die essentieel zijn voor het behoud van de bestaande waterkwaliteit en het doorzicht gedurende een groot deel van het jaar. Hier moet dus uiterst voorzichtig mee omgegaan worden. Vergroting van de waterdiepte door peilverhoging kan overwogen worden als die mogelijkheid technisch bestaat.

7 Referenties

- DAVENPORT, A. G. 1960. A Rationale for the Determination of Design Wind Velocities. Proceedings ASCE Structural Division, 39-66.
- Arcardis, 2011. Evaluatie Bovenwater 2008-2010. Report voor waterschaap Zuiderland 075345215:0.1
- Ball, A. S., M. Williams, D. Vincent, & J. Robinson (2001): Algal growth control by a barley straw extract. *Bioresource Technology* 77(2): 177-181.
- Carmichael, W.W. (2001): Health effects of toxin-producing cyanobacteria: the cyanoHABs. *Human and Ecological Risk Assessment* 7: 1393-1407.
- Chorus, I., I.R. Falconer, H.J. Salas & J. Bartram, (2000): Health risks caused by freshwater cyanobacteria in recreational waters. *Journal of toxicology and Environmental Health, Part B*, 3: 323-347.
- Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson & S.A. Nichols (2005): Restoration and management of lakes and reservoirs. Taylor and Frances. 591 p.
- Deltares, (2008): Hydrodynamic modelling to support considerations of aeration to suppress cyanobacterial blooms in Vlietland. Report to Rijnland District Water Control Board, Delft. 59 p.
- Dionisio Pires L.M. (2005): Grazing for clarity: Zebra mussels as a potential tool in biomanipulation of lakes. PhD Thesis, University of Amsterdam.
- EM America (2007): <http://www.emamerica.com/data/>
- Ferrier, M. D., B.R. Butler, D.E. Terlizzi & R. Lacouture (2005): The effects of barley straw (*Hordeum vulgare*) on the growth of freshwater algae. *Bioresource Technology* 96(16): 1788-1795.
- Huisman, J., J. Sharples, J. Stroom, P. Visser, W. Kardinaal, J. Verspagen & B. Sommeijer 2004. Changes in turbulent mixing shift competition for light between phytoplankton species. *Ecology* 85(11): 2960-2970.
- Ibelings, B.W., W.M. Wiegant, R.H. Aalderink, H.A.M. Ketelaars, G.W.A M. Waajen & J. Koedood (1997): Modelling the competition between buoyant cyanobacteria, green algae and dinoflagellates to assist the implementation of artificial mixing in lakes and reservoirs. In Roijackers, R., Aalderink, R.H. & Blom, G. (eds). *Eutrophication Research*, 211-218.
- Kardinaal, E., M. de Haan & H. Ruiter (2008): Maatregelen ter voorkoming blauwalgen werken onvoldoende. *H2O* 7: 4-7.
- KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006-01.
- Jungo, E., P. Visser, J. Stroom & L. MulR (1993): Artificial mixing to reduce growth of the blue green alga *Microcystis* in Lake Nieuwe Meer, Amsterdam: an evaluation of 7 years of experience. *Water Science and Technology: Water Supply* 1(1), pp. 17-23.
- Jöhnk, K.D., J. Huisman, J. Sharples, B. Sommeijer, P. Visser & J. Stroom (2007): Summer heatwaves promote blooms of harmful Cyanobacteria. *Global Change Biology* 14: 1-18,
- Lammens, E. (1999) Het voedselweb van IJsselmeer en Markermeer: Veldgegevens, hypotheses, modellen en scenario's (in Dutch). RIZA report 99.008. Rijksinstituut voor

- Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Lelystad, The Netherlands. (In Dutch).
- Lurling, M., M. Euwe & T. Tolman (2007): Onderzoek naar bestrijding van Blauwalgen door middel van Effective Micro-organismen. Wageningen University Report Number M342, 71 p. (In Dutch).
- Lurling, M. & Y. Tolman (2008): Onderzoek naar Ultrageluid en Aluminium/Phoslock om blauwalgenoverlast te voorkomen. Wageningen University Report Number M343, 91 p. (In Dutch).
- Lurling, M., & H. van Dam (2009): Blauwalgen: giftig groen. Stowa rapportnummer 43.
- Oliver, R. L. & G.G. Ganf, (2000): Freshwater blooms. In: B. A. Whitton and M. Potts (eds), *The Ecology of Cyanobacteria*, pp. 149-194. Kluwer, Amsterdam.
- Mur L.R., O.M. Skulberg & H. Utkilen (1999) Cyanobacteria in the environment. Pages 15-40 in I. Chorus and J. Bartram, eds. *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management*. E & FN Spon, London.
- Reeders, H.H. (1990): De driehoeksmossel (*Dreissena polymorpha*) als biofilter voor het oppervlaktewater (in Dutch). *De Levende Natuur* 4: 119-125 (In Dutch).
- Reynolds, C. (2006): *Ecology of Phytoplankton*. Cambridge University Press. 535 p.
- Reynolds, C.S. & A.E. Walsby (1975): Water blooms. *Biol. Rev.* 50: 437-481.
- Robb, M., B. Greenop, Z. Goss, G. Douglas & J. Adeney (2003): Application of Phoslock an innovative phosphorous binding clay, to two Western Australian waterways: preliminary findings. *Hydrobiologia* 494: 237-243.
- Tolman, Y. (2007): Control and prevention of cyanobacterial blooms. MSc. Thesis, Wageningen University 42 p.
- Verspagen, J. M. H., P. Visser & J. Huisman (2006): Aggregation with clay causes sedimentation of the buoyant cyanobacterium *Microcystis*. *Aquatic Microbial Ecology* 44(2): 165-174.
- Verspagen J.M.H., P. Boers, H.J.Laanbroek & J. Huisman (2005) Doorspoelen of opzouten? Bestrijding van blauwalgen in het Volkerak-Zoommeer. RIZA rapport Maart 2005.
- Visser et al., H.A.M. Ketelaars, L.W.C.A van Breemen & L.R. Mur (1996): Diurnal buoyancy changes of *Microcystis* in an artificially mixed storage reservoir *Hydrobiologia* 331: 131-141.
- Walsby, A. E. (1970): The nuisance algae: Curiosities in the biology of planktonic blue-green algae. *Water Treat. Exam.* 19: 359–373.
- Zevenboom W. & L.R. Mur (1980) N2 fixing cyanobacteria, why they do not become dominant in dutch hypertrophic lakes. *Developments in Hydrobiology* 2: 123- 131.

A Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheden van verschillende modelparameters zijn getest om mogelijke effecten van aannames op de resultaten te onderzoeken. In deze bijlage wordt een beknopt overzicht gegeven van de belangrijkste parameters die getest zijn en de geobserveerde gevoeligheden van de hydrodynamica met betrekking tot deze parameters. Bij het bespreken van de gevoeligheden is vooral gekeken naar het effect op de hydrodynamica in het gebied van interesse (rondom de inham tussen de Beulakerwiede en de Belterwiede).

Hoogte fonteinkruid

Het fonteinkruid wordt in de Zeilplas gemaaid tot 0.8 m onder de waterspiegel. Tussen de maaiperiode en de gesimuleerde periode is het fonteinkruid mogelijk gegroeid. Om de gevoeligheid voor de vegetatiehoogte te testen zijn er simulaties gedaan met fonteinkruid dat 10% hoger was (0.88 m i.p.v. 0.8 m). Bij een grotere vegetatiehoogte zal de stroming op een minder diep punt omkeren. Aan het oppervlak zijn de stroomsnelheden maximaal 10% kleiner. Ter plaatse van de inhammen is het verschil niet waarneembaar. De grootschalige stroompatronen blijven gelijk.

Dichtheid fonteinkruid

Verschillende simulaties zijn gedaan voor een variërend aantal stengels per m² aan fonteinkruid. In de definitieve sommen is gebruik gemaakt van 1400 stengels per m². De gevoeligheid van de resultaten voor de dichtheid is getest met behulp van simulaties met een factor 2 grotere en een factor 2 kleinere dichtheid. Voor alle simulaties bleven de grootschalige stroompatronen gelijk. In de simulatie met 700 stengels per m² namen de stroomsnelheden met ongeveer 50% toe bij hoge windsnelheden. In de simulatie met 2400 stengels per m² namen de stroomsnelheden ongeveer 30% af bij hoge windsnelheden.

Wind

Zoals beschreven in Paragraaf 2.5.1. hebben de stroomsnelheden een hoge correlatie met de windsnelheden en zijn de stroomsnelheden daarom gevoelig voor de gekozen windsnelheden. De verschillen in stroomsnelheden zijn daarom bij benadering evenredig met de verandering in windreductiefactoren.

Bodem

Zoals beschreven in Paragraaf 2.2.3 was er weinig informatie beschikbaar voor de diepte van de Zeilplas. Om de gevoeligheid van het model voor de bodemkeuze in de Zeilplas te testen zijn er simulaties gedaan met andere bodemhoogtes. Ter plaatse van de Zeilplas had dit een lokaal effect op de stroomgroottes, het effect op de hydrodynamica in de inhammen was echter niet significant.

Viscositeit

In de definitieve simulaties is een horizontale eddy viscositeit van 0.1 m²/s toegepast. Er is ook een simulatie gedaan met een horizontale eddy viscositeit van 0.5 m²/s. De stroompatronen worden door de keuze van de eddy viscositeit niet beïnvloed. Op locaties waar de stroming ruimtelijk sterk varieert (bij een overgang tussen twee verschillende vegetatievelden bijvoorbeeld) wordt wel de lokale stroomsnelheid beïnvloed. De verschillen in stroomsnelheden tussen beide simulaties waren in de orde van 10%.

Rekentijdstappen

Om de rekentijdstap te bepalen zijn simulaties gedaan met rekentijdstappen van 1.5 s tot 12 s. De verschillen in stroompatronen en waterstanden bleken niet significant te zijn, waardoor er is gekozen om met een rekentijdstap van 12 s te werken in de definitieve simulaties.

Conclusie

Op basis van de hierboven beschreven gevoeligheden kan geconcludeerd worden dat de grootschalige stroompatronen in het meer niet gevoelig zijn voor de keuze van de onderzochte parameters. De stroomsnelheden bleken wel afhankelijk in enige mate van de keuze van vooral de dichtheid van de vegetatie en de windsnelheden. Echter, bij alle simulaties waarin de gevoeligheden getest zijn bleven de stroomsnelheden ondanks de absolute afwijkingen in dezelfde orde van grootte en wordt de hydrodynamica daarom voldoende betrouwbaar geacht om gebruikt te worden in de drijfslag modellering. Eventuele effecten op de drijfslag modellering worden in het volgende deel van dit rapport besproken.

B Het Rouse profiel

Het Rouse profiel is afkomstig uit de morfologie, uit het sediment transport in stromend water. Het profiel beschrijft het evenwicht tussen deeltjes met een valsnelheid en de menging door turbulentie in het water. De turbulente stroming over een ruw oppervlak leidt voldoende dicht bij dat oppervlak tot een eddy viscositeit $\nu_T = \kappa \cdot u_* \cdot z$ met κ : de constante van von Karman (~ 0.4); u_* de schuifspanningssnelheid en z de hoogte boven de bodem. Dit leidt tot een logaritmisch snelheids profiel met de diepte. De oorsprong van dit profiel ligt iets onder de bodem. Deze kleine afstand wordt de ruwheidshoogte genoemd. Hiervoor wordt $9 \cdot d_{50}$ gebruikt met d_{50} = de mediaan van de diameter van de zandkorrels.

De evenwichtsconcentratie verdeling van zandkorrels met valsnelheid w_s bij de genoemde eddy viscositeit, vlak bij de bodem, laat zich dan schrijven als:

$$c(z) = k \cdot z^{-\beta}$$

$$\beta = \frac{v_s \cdot \sigma_T}{\kappa \cdot u_*} = \frac{0.7 \cdot w_s}{0.4 \cdot u_*}$$

De coëfficiënt σ_T is de factor tussen viscositeit en diffusie, het Prandtl/Schmidt getal. De constante 'k' is hier een evenredigheidsconstante die zorgt dat de hoeveelheid zand in de waterkolom correspondeert.

Voor oprijvende algen is dit profiel omgekeerd ook aan het wateroppervlak toepasbaar. Nu is z de diepte vanaf het wateroppervlak ten opzichte van een punt dat iets boven dat oppervlak ligt. Hiervoor is 1 mm genomen. De stijgsnelheid in m/s wordt nu weergegeven door v_s . De schuifspanningssnelheid u_* ontstaat nu door de wind boven het wateroppervlak volgens:

$$u_* = U_{10} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{lucht}}}{\rho_{\text{water}}} \cdot c_{\text{drag}}}$$

Hierin staat U_{10} voor de windsnelheid 10 m boven het grond oppervlak. Hiervoor is de snelheid gebruikt die ook voor het hydrodynamisch model is gebruikt, dus gecorrigeerd voor bebouwing en strijklengte. Voor de dichtheid van lucht en water zijn de getallen zoals genoemd in 1.2.8.6 gebruikt, te weten 1.2 kg/m^3 en 1000 kg/m^3 respectievelijk. Voor de drag coëfficiënt is 0,0013 gebruikt, een waarde die bij de omstandigheden en de winsnelheden van het Bovenwater past.

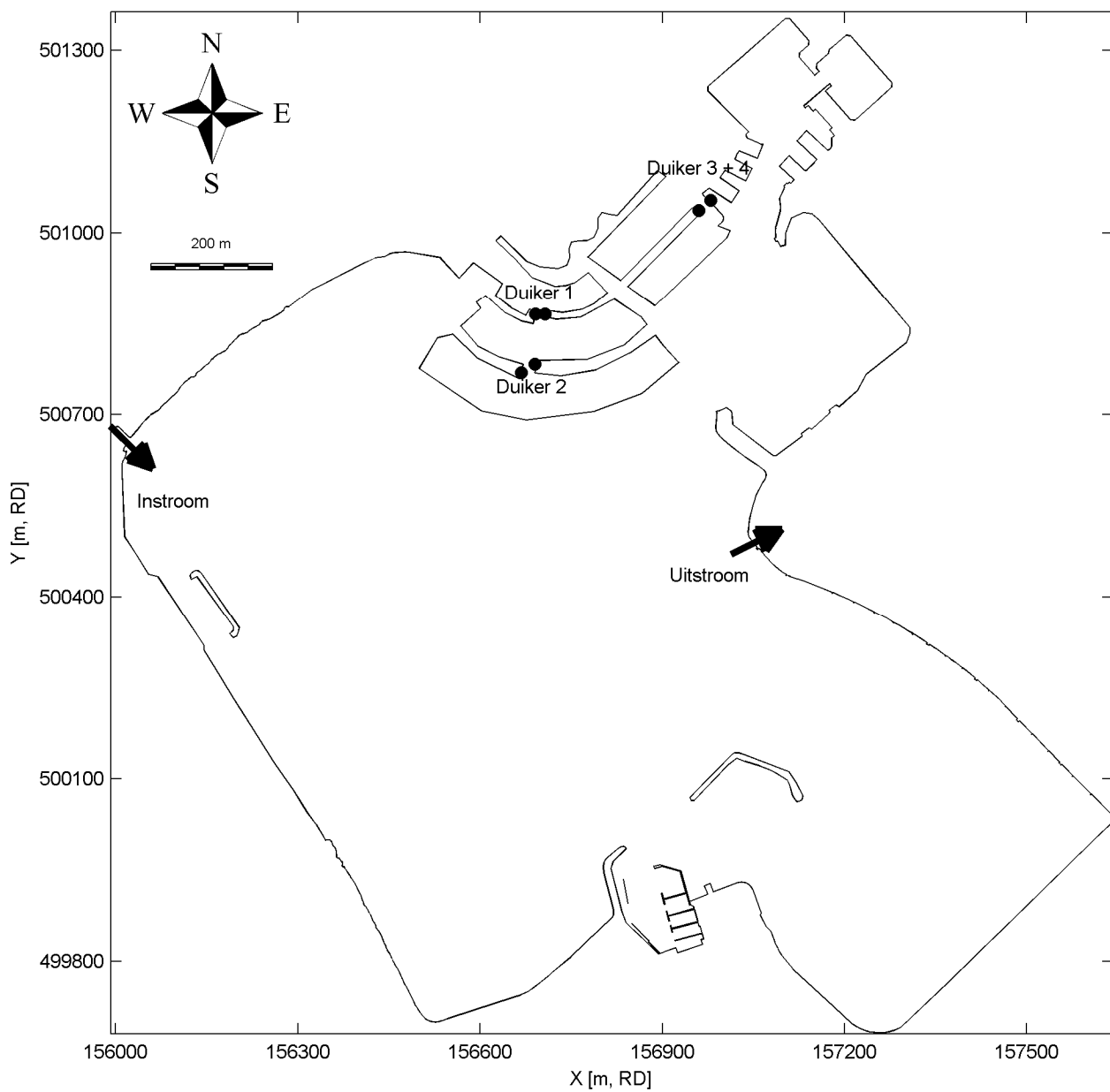
Dit alles leidt uiteindelijk tot $\beta = 0.0162 \cdot \frac{v_s}{U_{10}}$. Nu is v_s uitgedrukt in m/dag en U_{10} in m/s.

Voor een stijgsnelheid van 60 m/dag en een gecorrigeerde U_{10} van 1 m/s is de β dus ongeveer 1. De relatieve massa verdeling over de verticaal die zo ontstaat voor verschillende waarden van v_s/U_{10} is in figuur 2.1 van hoofdstuk 2 opgenomen.

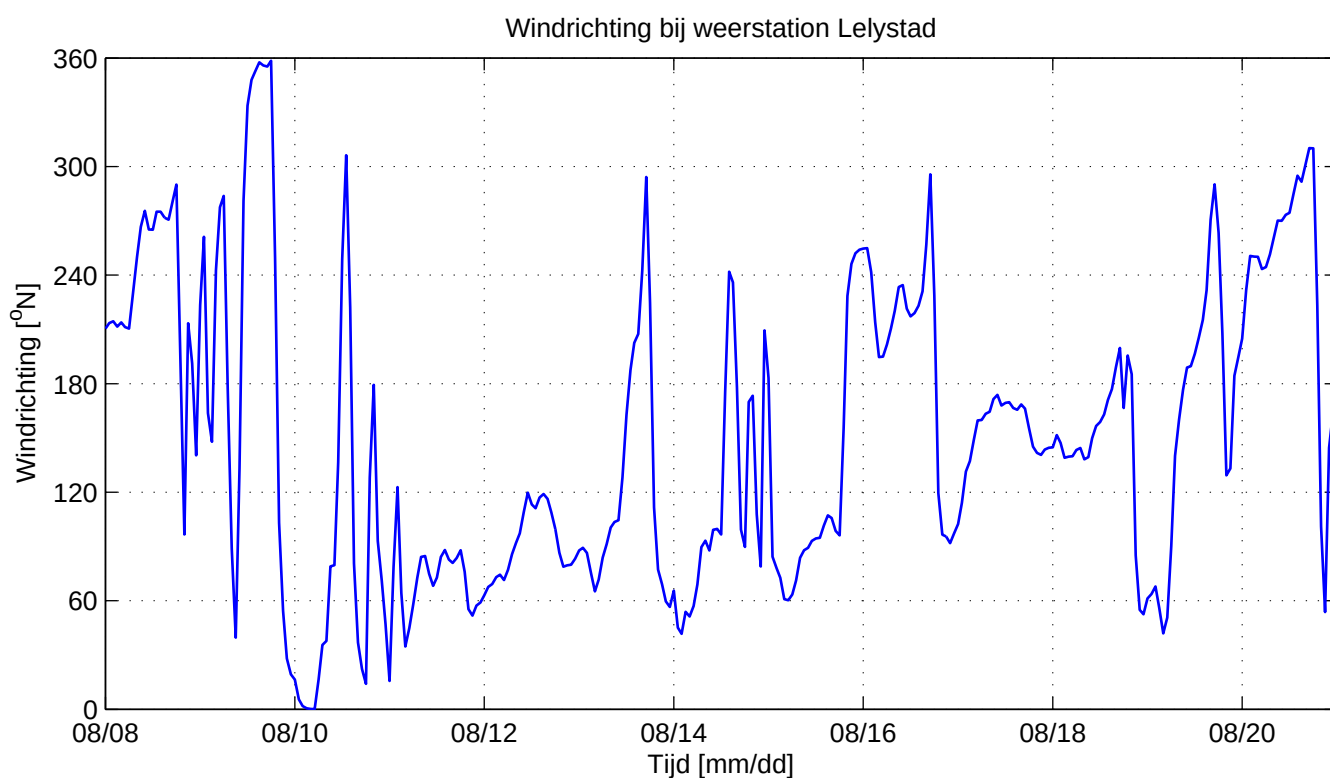
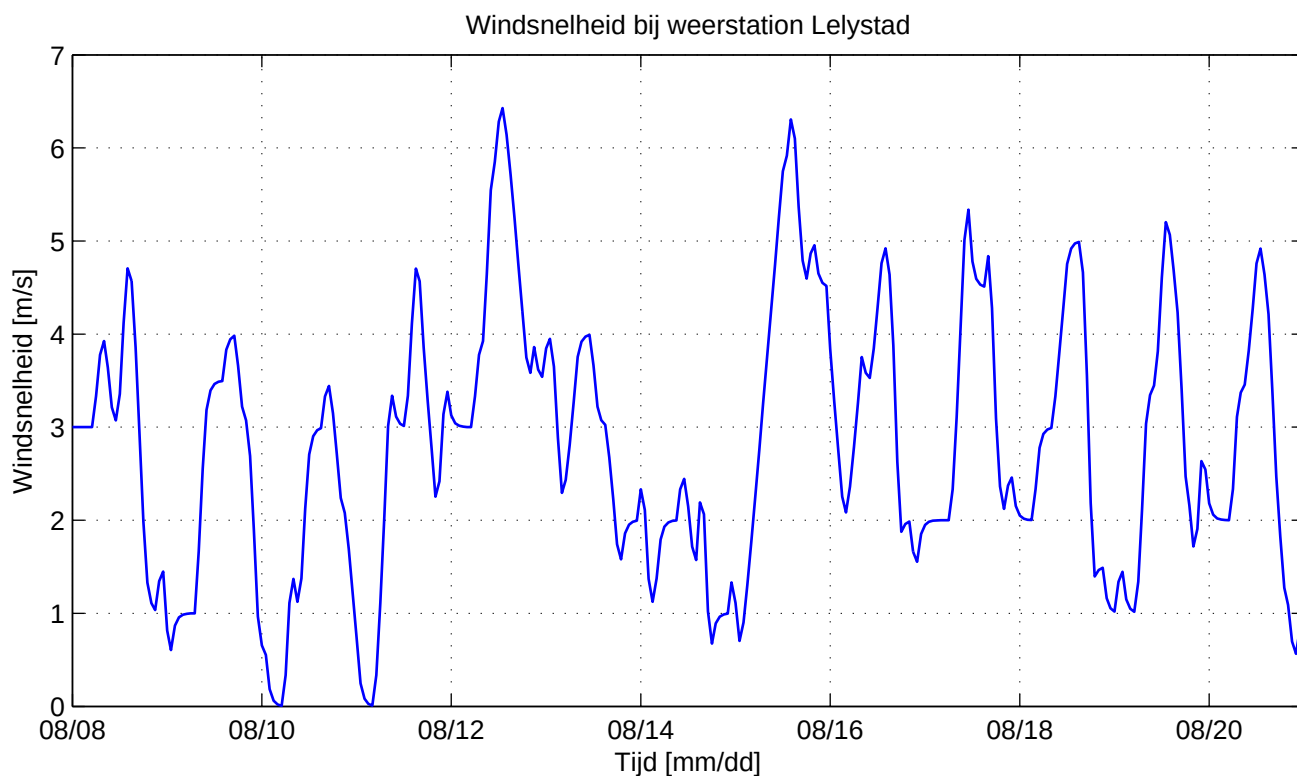
C Overzicht van genomen en overwogen maatregelen

Deze tabel is gebaseerd op gegevens van de gemeente Lelystad.

Maatregel	Werking	
Ecologisch herstel	voorkomen	Fonteinkruid wordt in de plas gemaaid i.v.m. de bevaarbaarheid. In theorie zal het gewenste kranswier het fonteinkruid kunnen gaan verdringen.
De-icer	verspreiding	Een ventilator (doorsnede ca. 0,6m) zorgt voor stroming. De de-icers worden in de "armen" geplaatst.
Afzuigen van drijfslagen	verwijderen	Afzuigen van drijfslagen om o.a. stankoverlast tegen te gaan.
Baggeren	voorkomen	De waterkolom wordt ontdaan van voedselrijk bagger. Naast een afname aan voedingsstoffen kan de waterkolom ook minder snel opwarmen.
Rotor in duiker	verspreiding	Een rotor breng de bovenste 0,2m in beweging, waardoor zich geen drijfslagen kunnen vormen
Slibschermb	voorkomen	Een slibscherm vormt een fysieke belemmering voor het verplaatsen van een drijfslaag van de plas richting de woningen.
Luchtbellenscherm	voorkomen	een bellenscherm (in de lengterichting van de watergang) voorkomt de vorming van drijfslagen
IJzerchloride etc.	voorkomen	Door de voedingsstof fosfaat te onttrekken aan het water hebben de blauwalgen niets te eten.
Waterstofperoxide etc.	voorkomen	Blauwalgen kunnen waterstofperoxide vermoedelijk minder goed afbreken. Blauwalgen worden door waterstofperoxyde afgebroken.



Locatie van in- uitstroompunten en duikers
Bron: Gemeente Lelystad

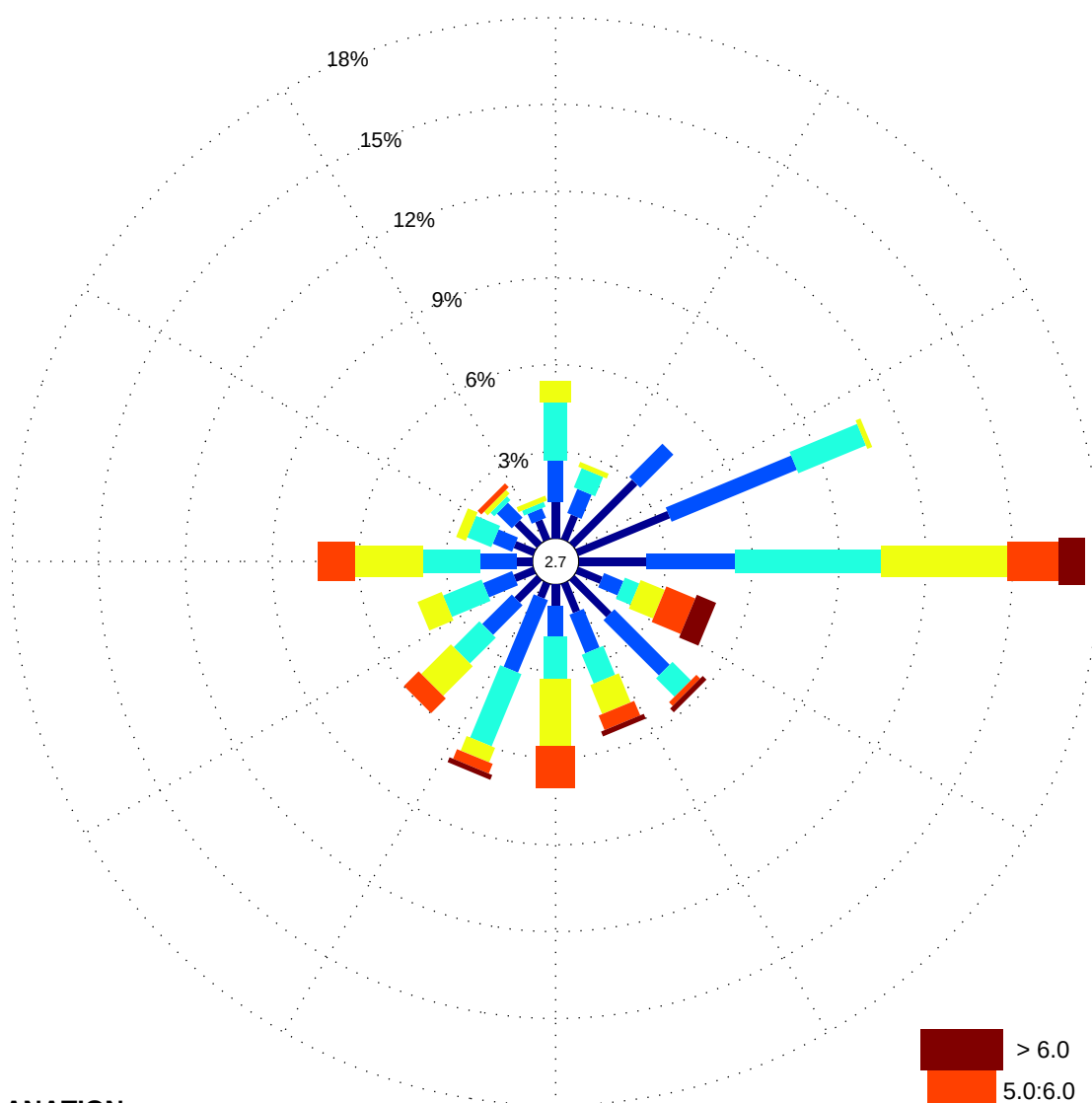


Gemeten windsnelheid en windrichting bij weerstation Lelystad
Periode: 8 augustus 2012 t/m 21 augustus 2012

Deltares

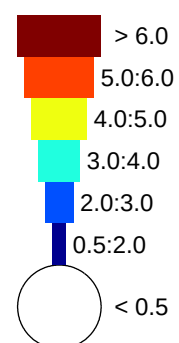
1207439

Figuur 2.4



EXPLANATION

Item:	Represents:
Type of bar	Windsnelheid (m/s)
Direction of bar (to centre of rose)	Direction
Length of bar	Occurrence (%)
Number in centre of rose	Occurrence (%) in lowest class
Undetermined data	1.99 %



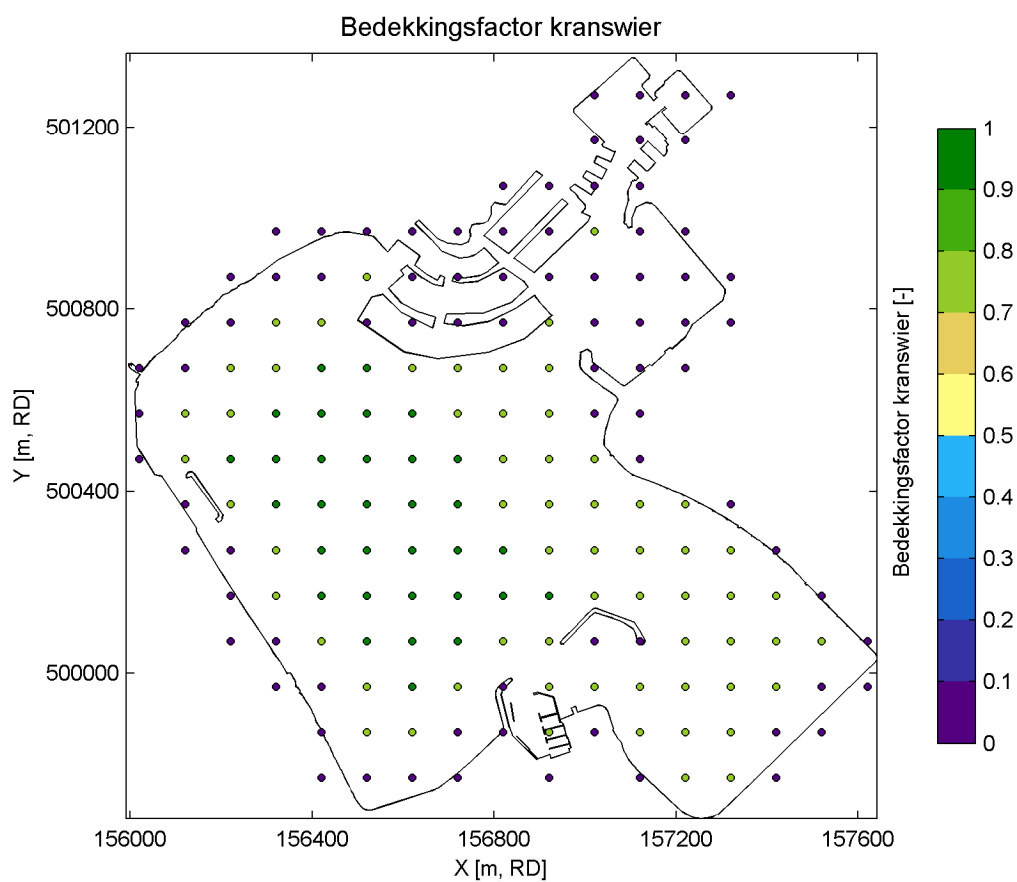
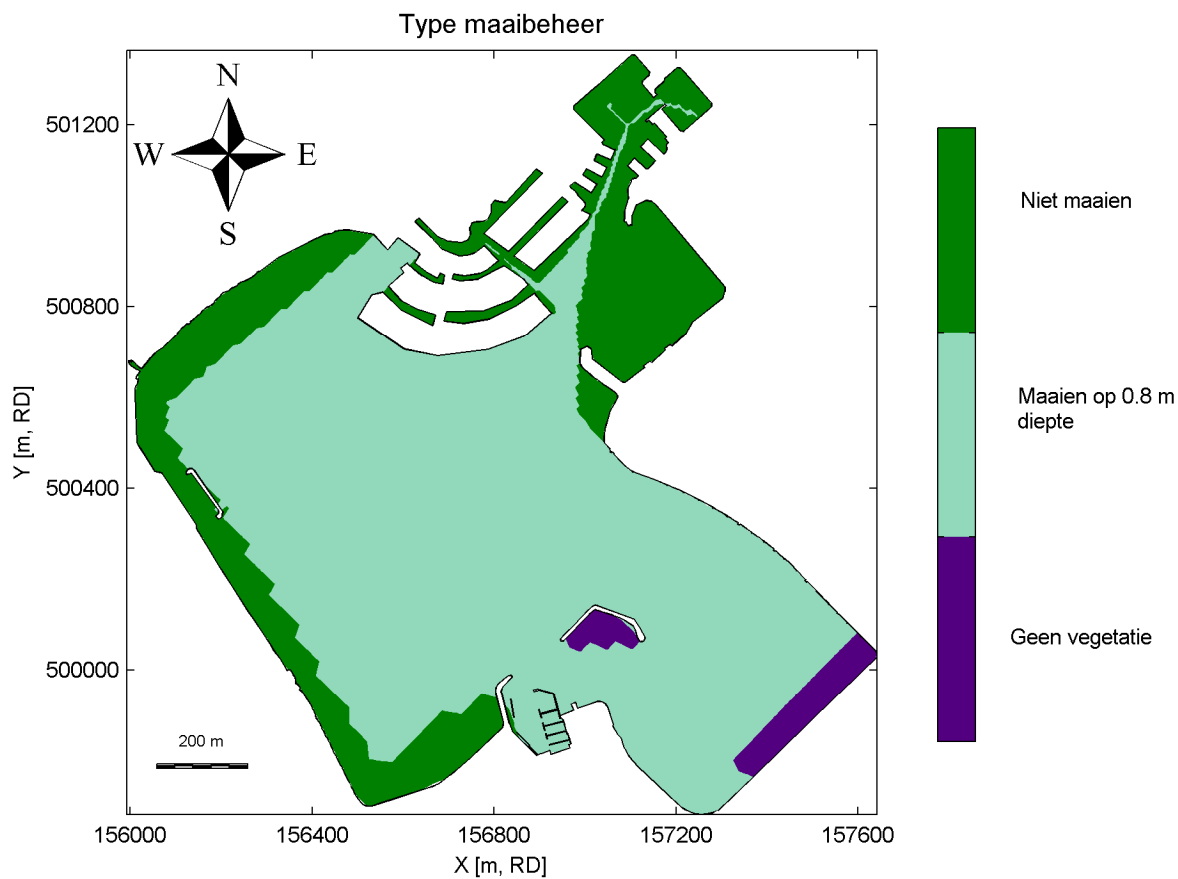
Windsnelheid (m/s)

Windroos van gemeten windsnelheden en richtingen
Locatie: weerstation Lelystad
Periode: 8 augustus 2012 t/m 21 augustus 2012

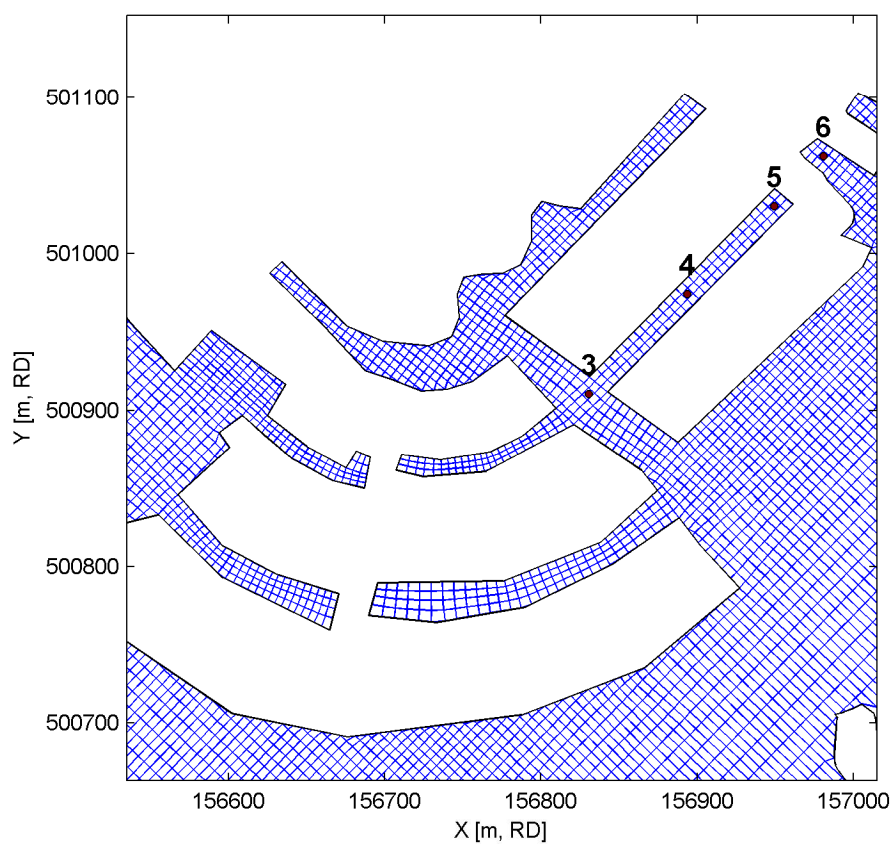
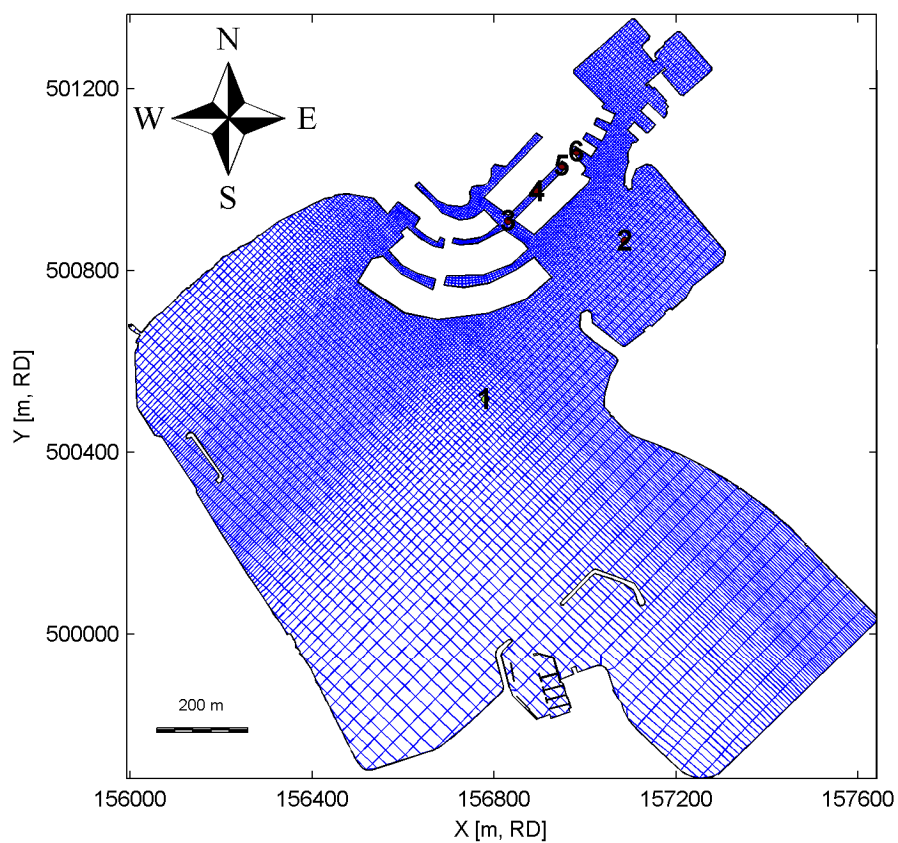
Deltares

1207439

Figuur 2.5

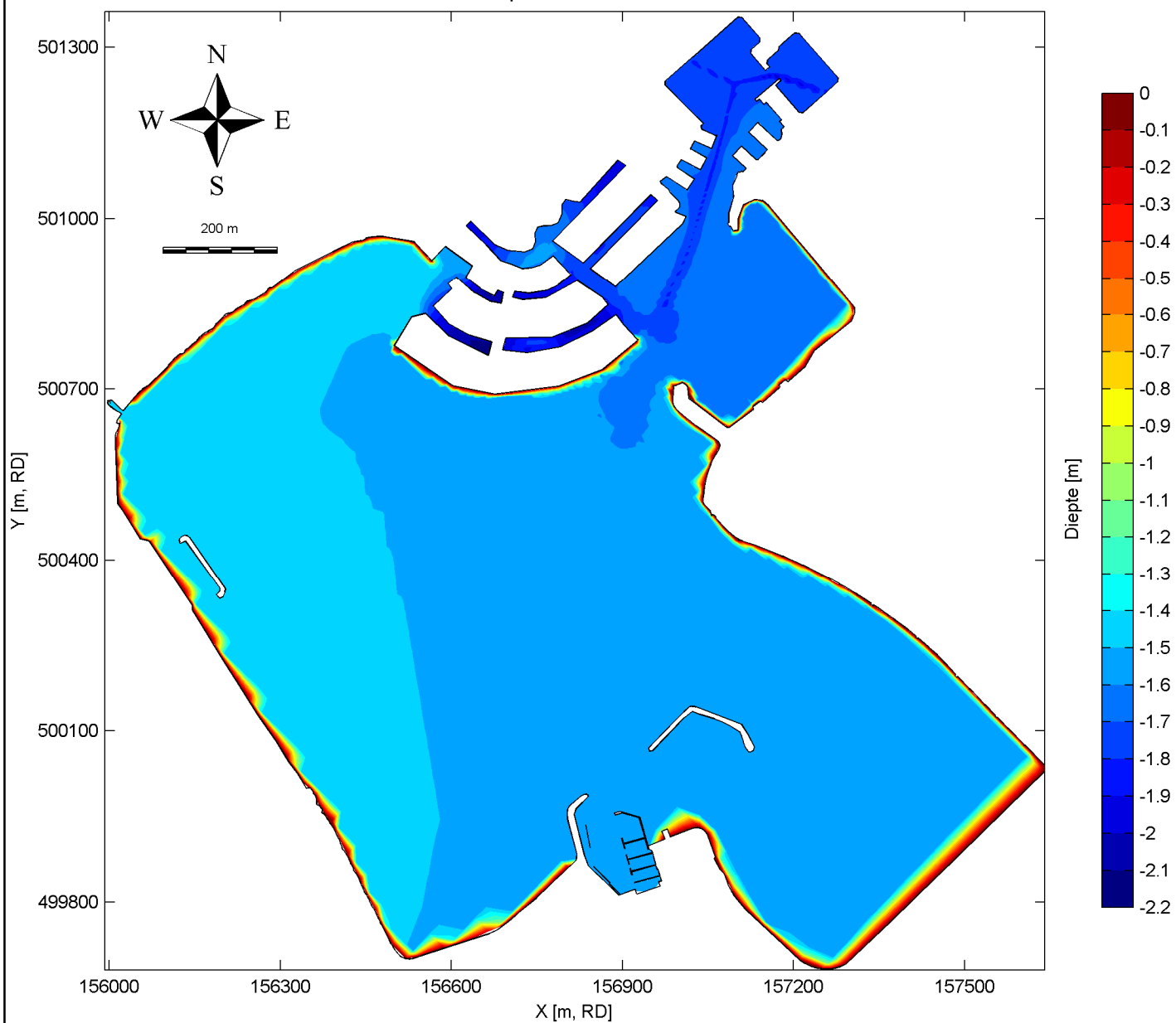


Bovenste figuur: Maaibeheer Bovenwater
 Onderste figuur: Bedekkingsfactor kranswier
 Bron: Gemeente Lelystad

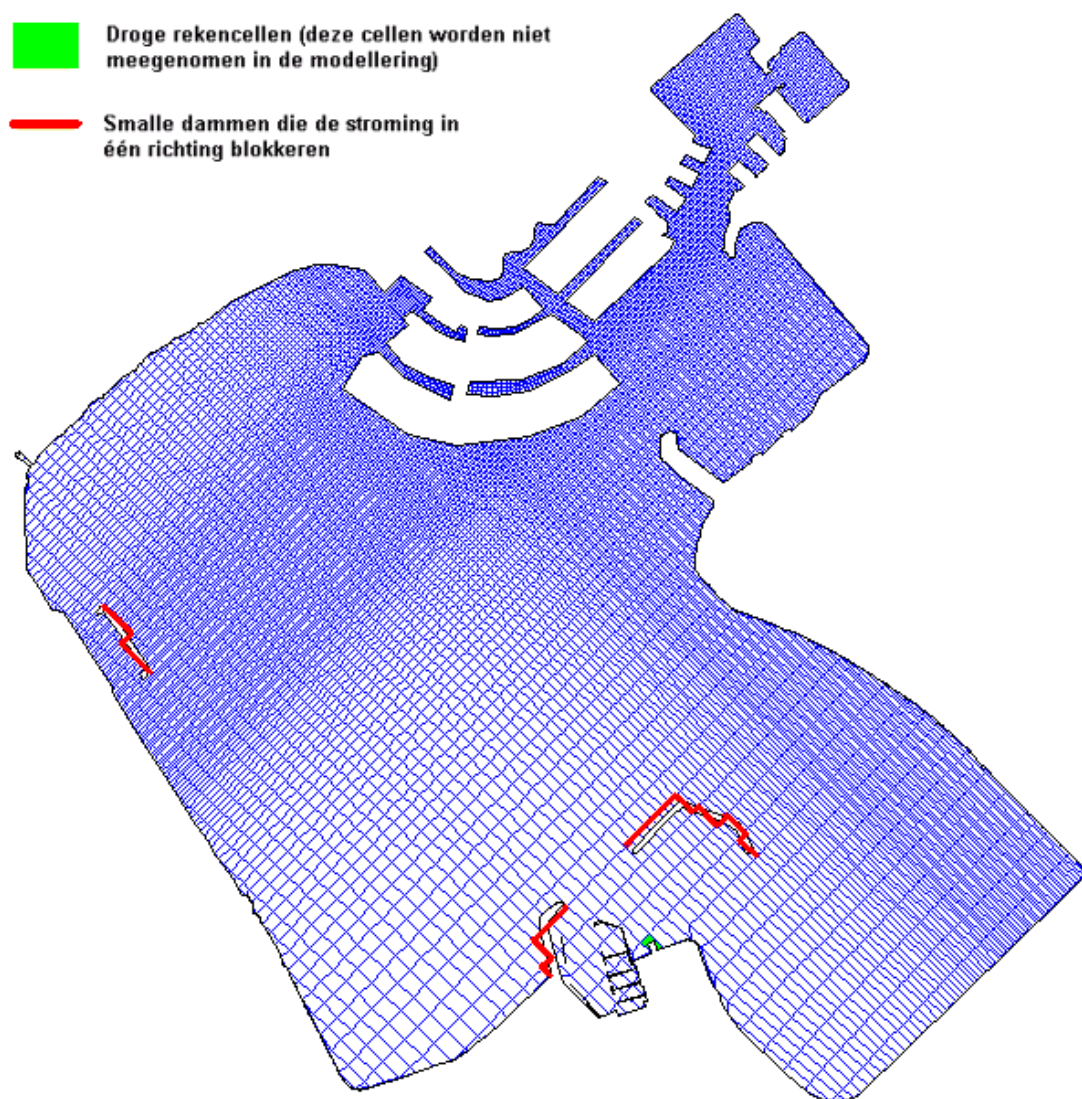


Delft3D-Flow rekenrooster Bovenwater
De gebruikte observatiepunten zijn in de figuur weergegeven

Diepteschematisatie

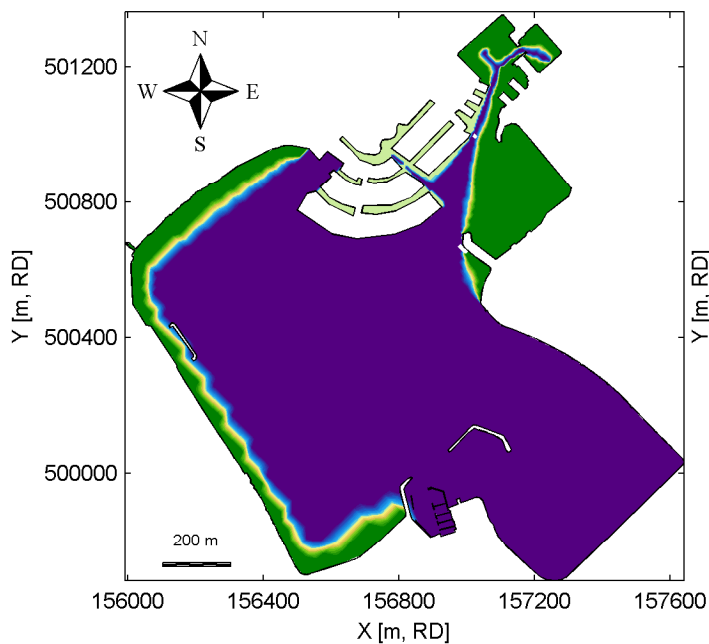


Diepteschematisatie Bovenwater

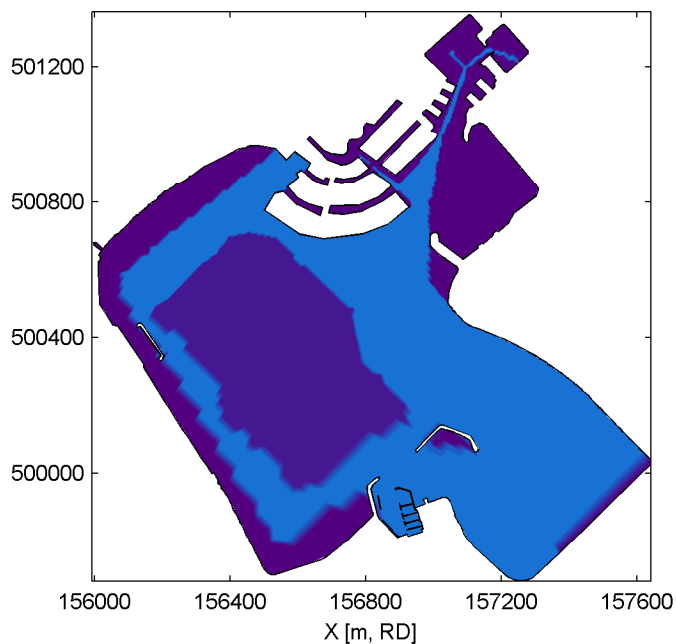


Schematisatie van dunne dammen en droge cellen

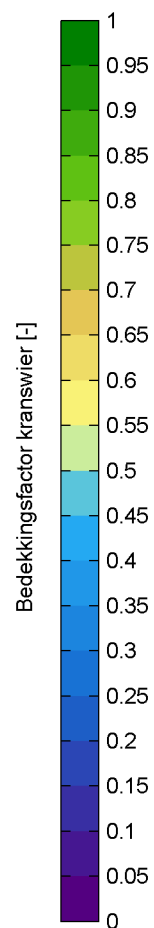
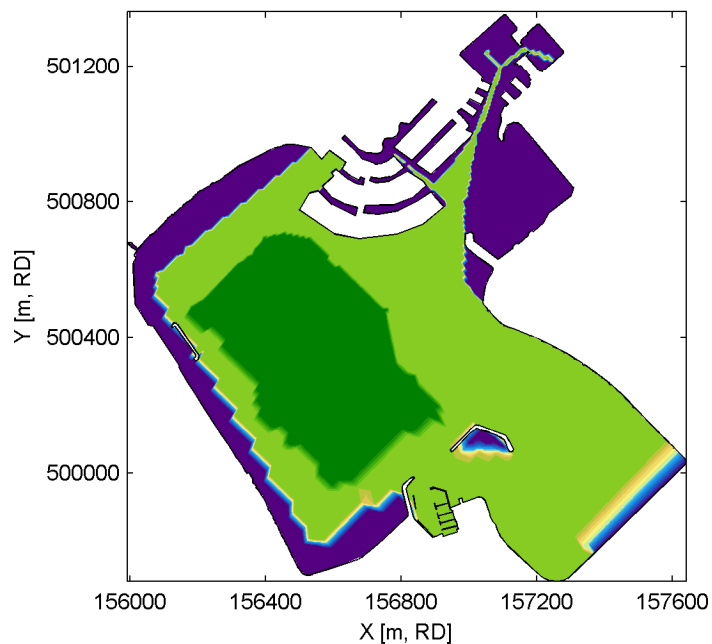
Bedekkingsfactor fonteinkruid met hoogte tot waterspiegel



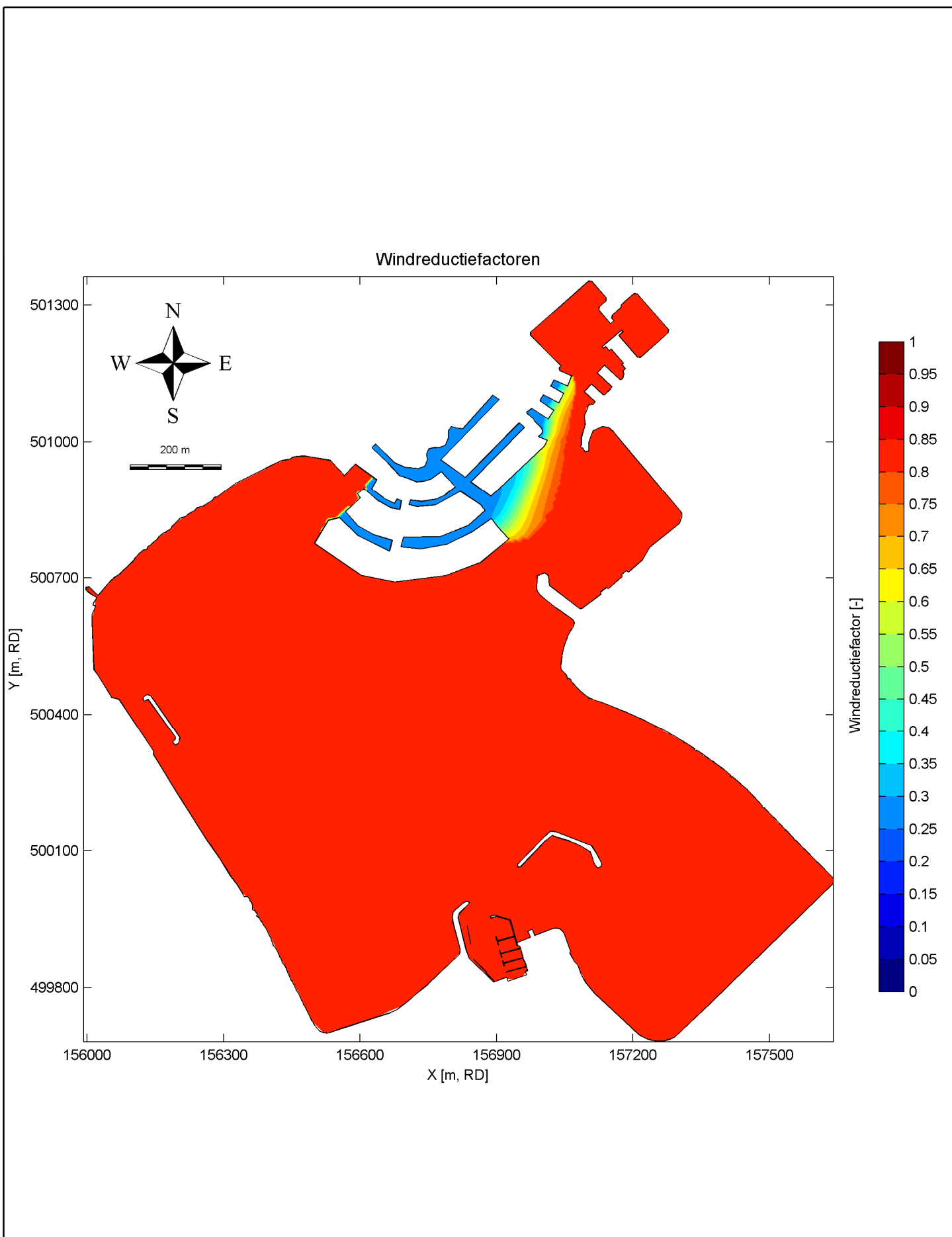
Bedekkingsfactor fonteinkruid met hoogte tot 0.8 m



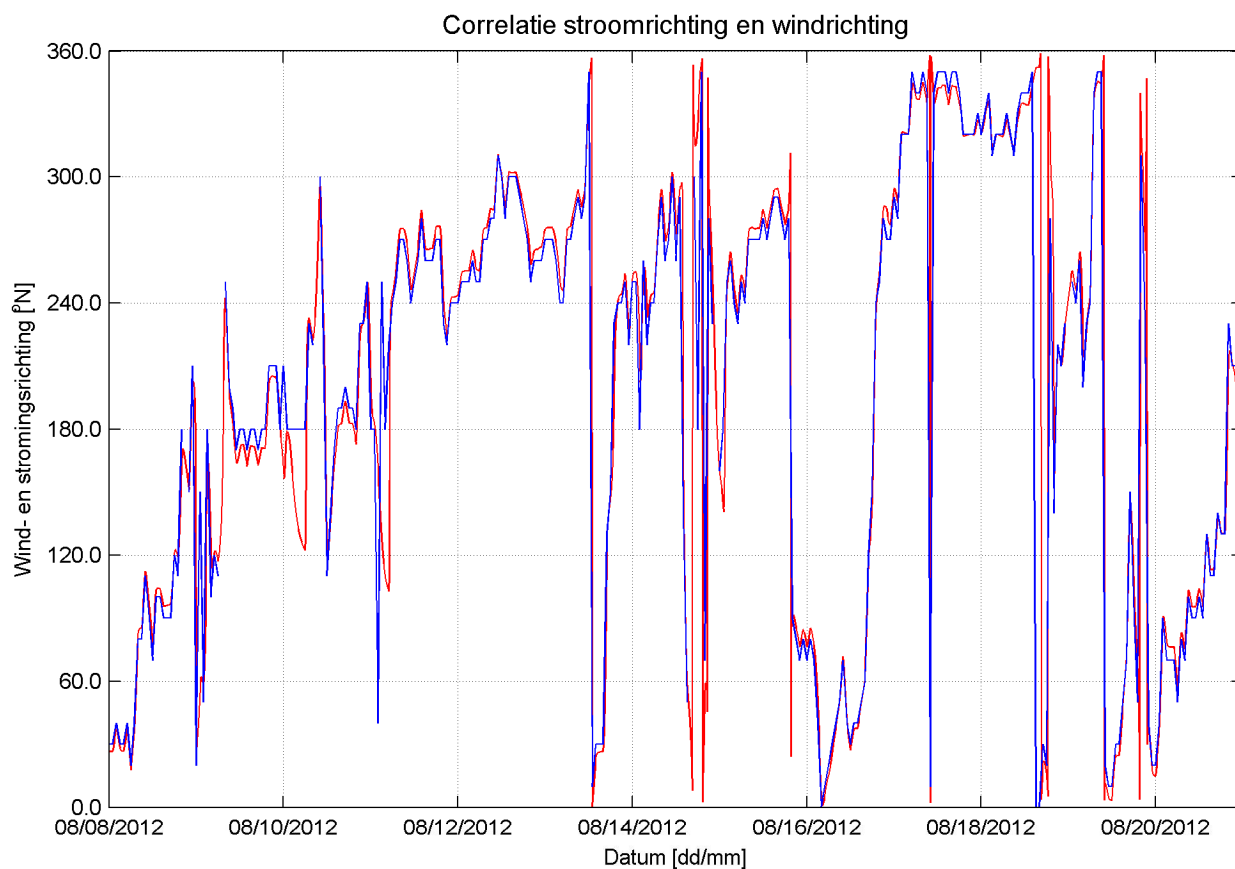
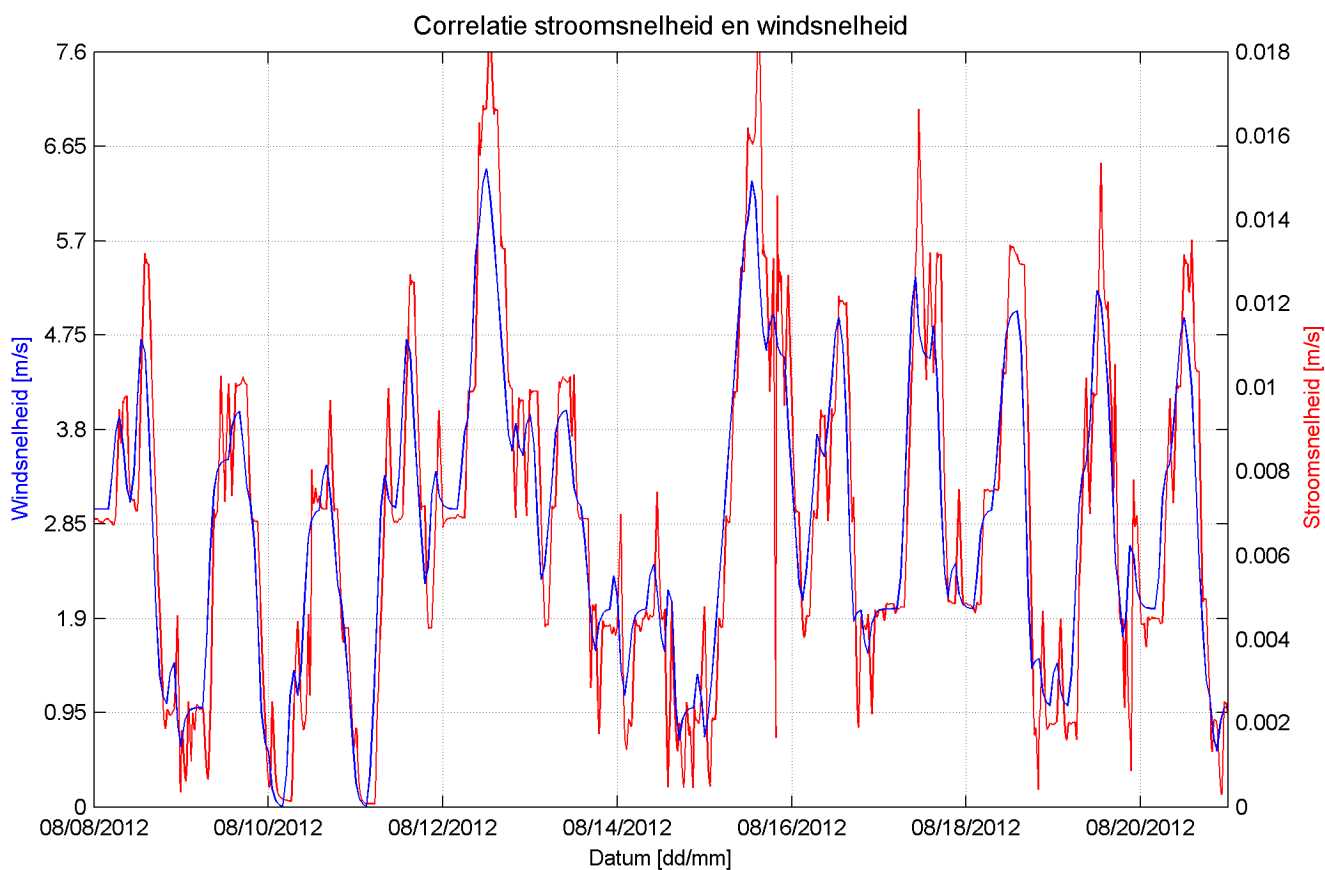
Bedekkingsfactor Kranswier met hoogte tot 50 cm



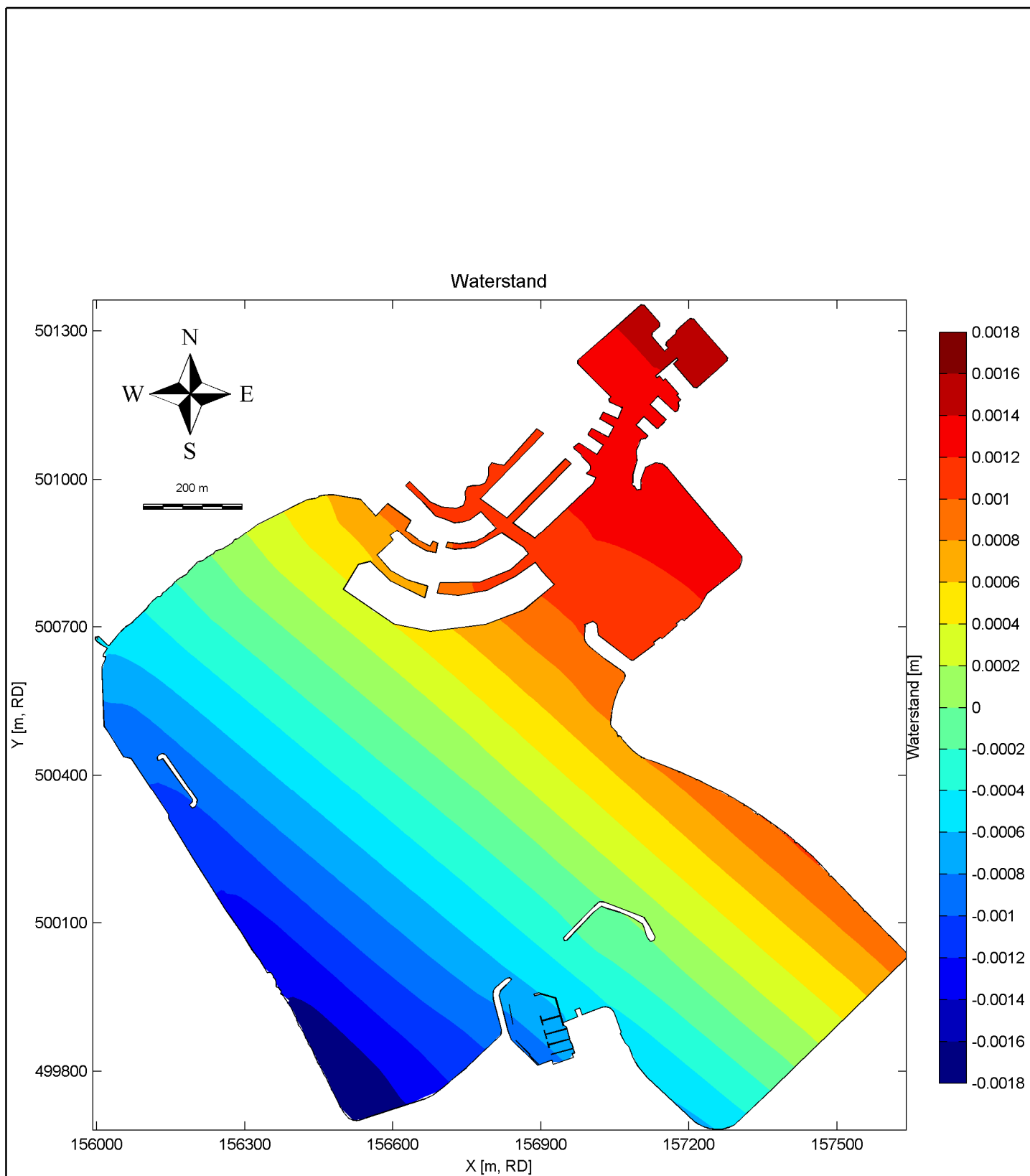
Vegetatieschematisatie in numerieke modellering. Bedekkingsfactoren van:
Niet gemaaid fonteinkruid (linksboven), gemaaid fonteinkruid (rechtsboven) en
kranswier (onder)



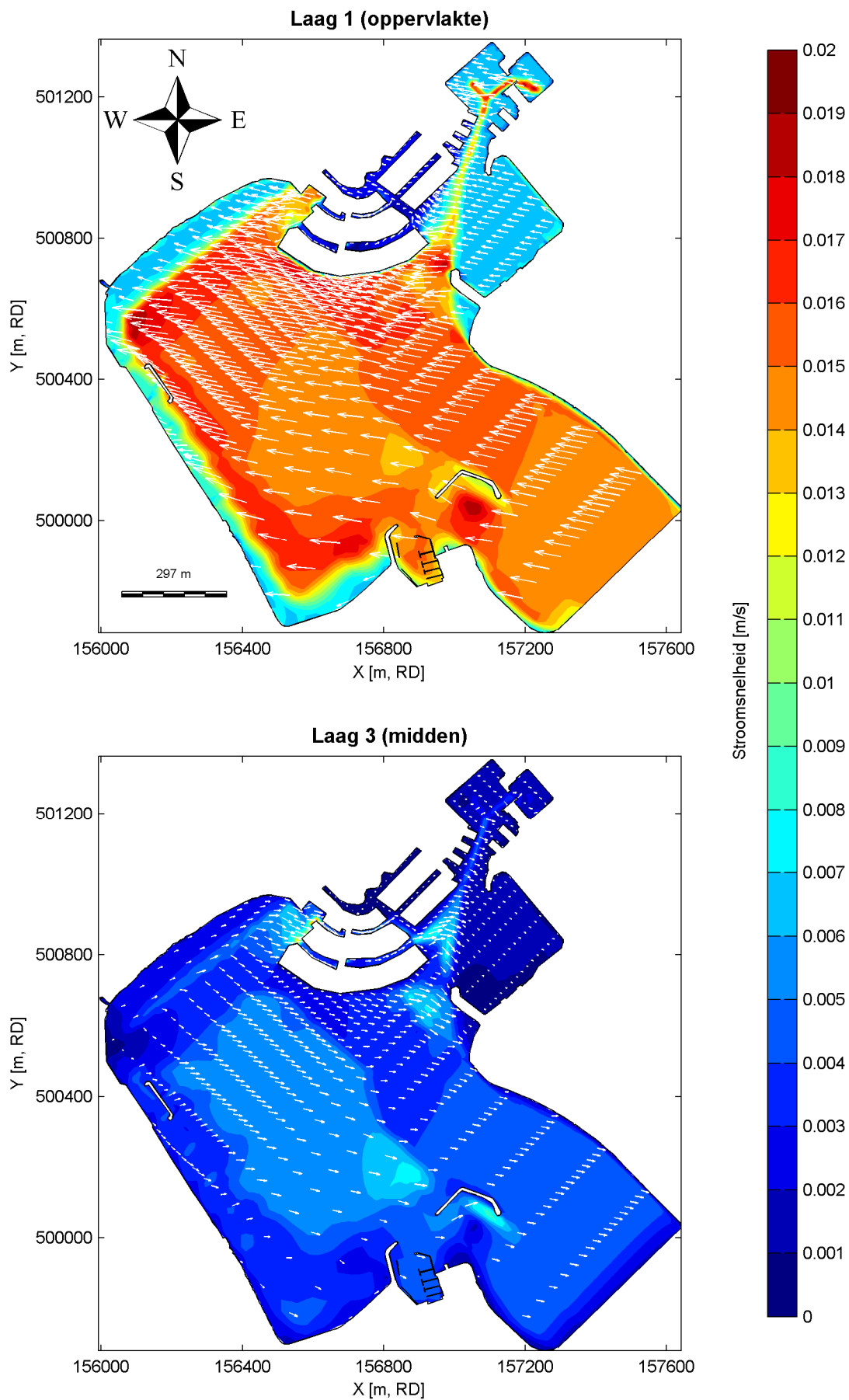
Windreductiefactoren Bovenwater
t.b.v modellering van inhammen tussen Weerribben, Lemmerstraat, Beulakerwiede
en Belterwiede



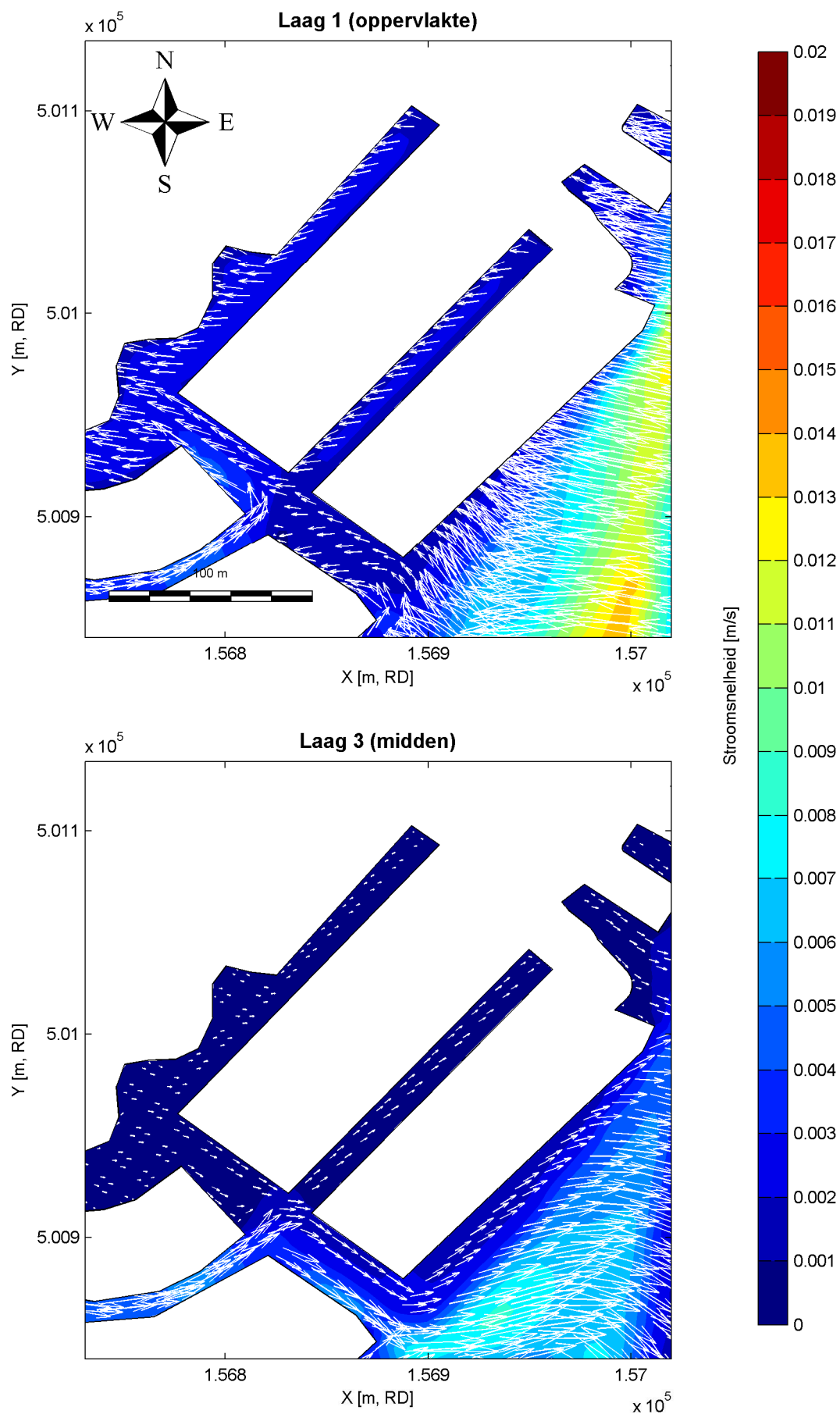
Correlatie van windsnelheden en richtingen met oppervlakte stroomsnelheden en richting. Observatiepunt 1. NB: De windrichting is in tegenstelling tot de rest van dit rapport gedefinieerd als de richting waarnaar de wind gaat



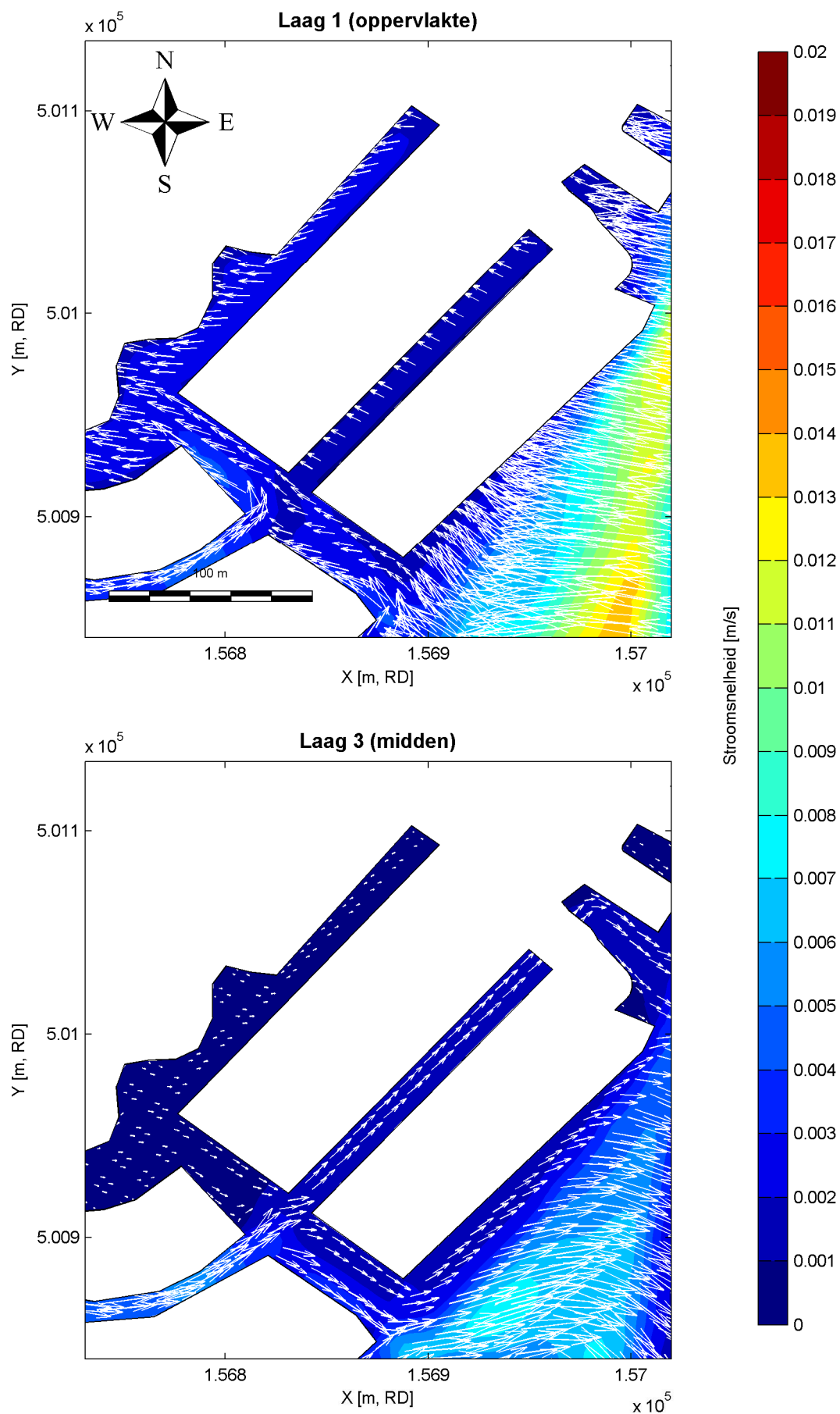
Typische waterstand ten gevolge van winbelasting vanuit ZW richting
2012-08-16 14:00:00



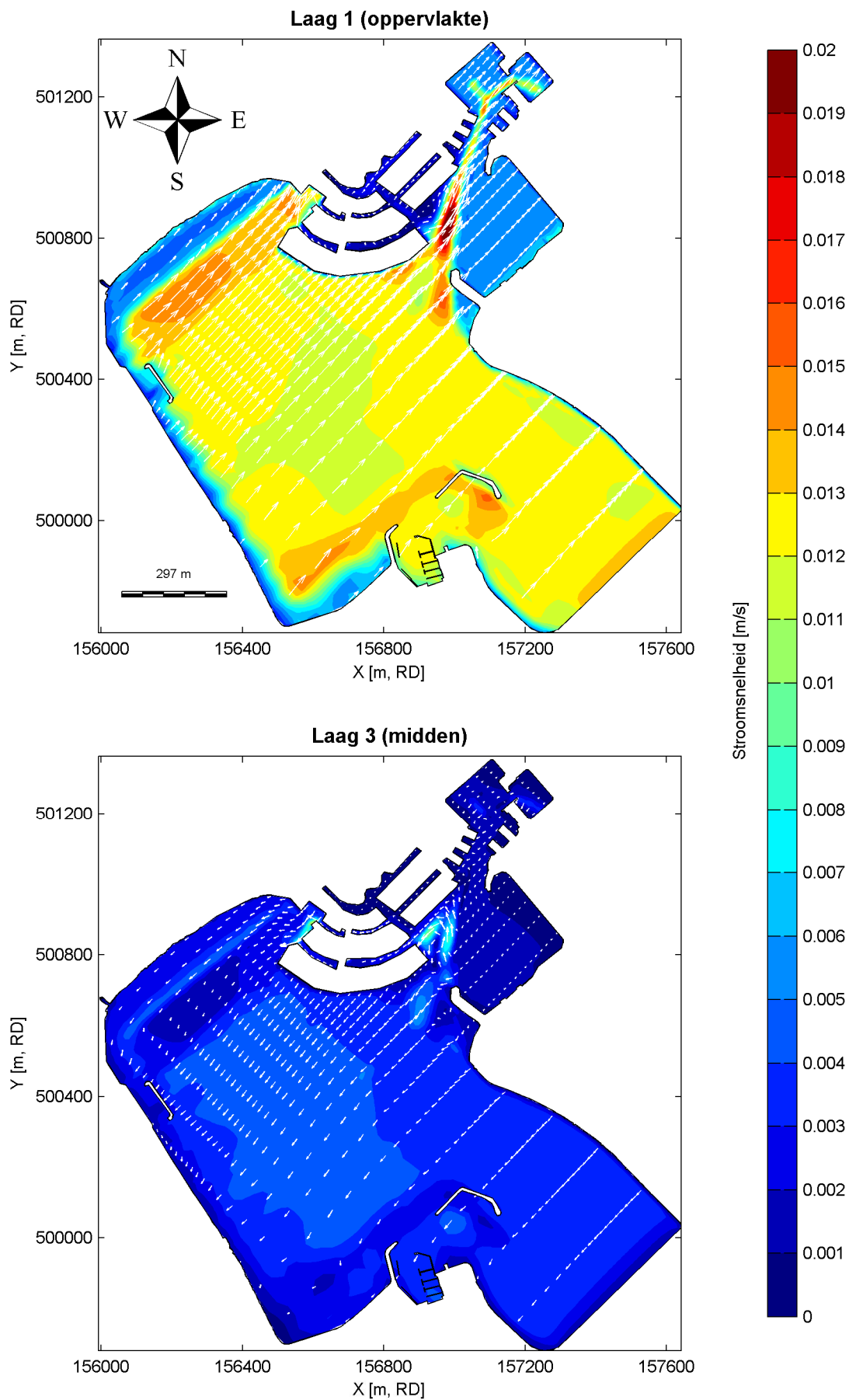
Stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 100° op 2012-08-15 14:00:00
Referentiescenario



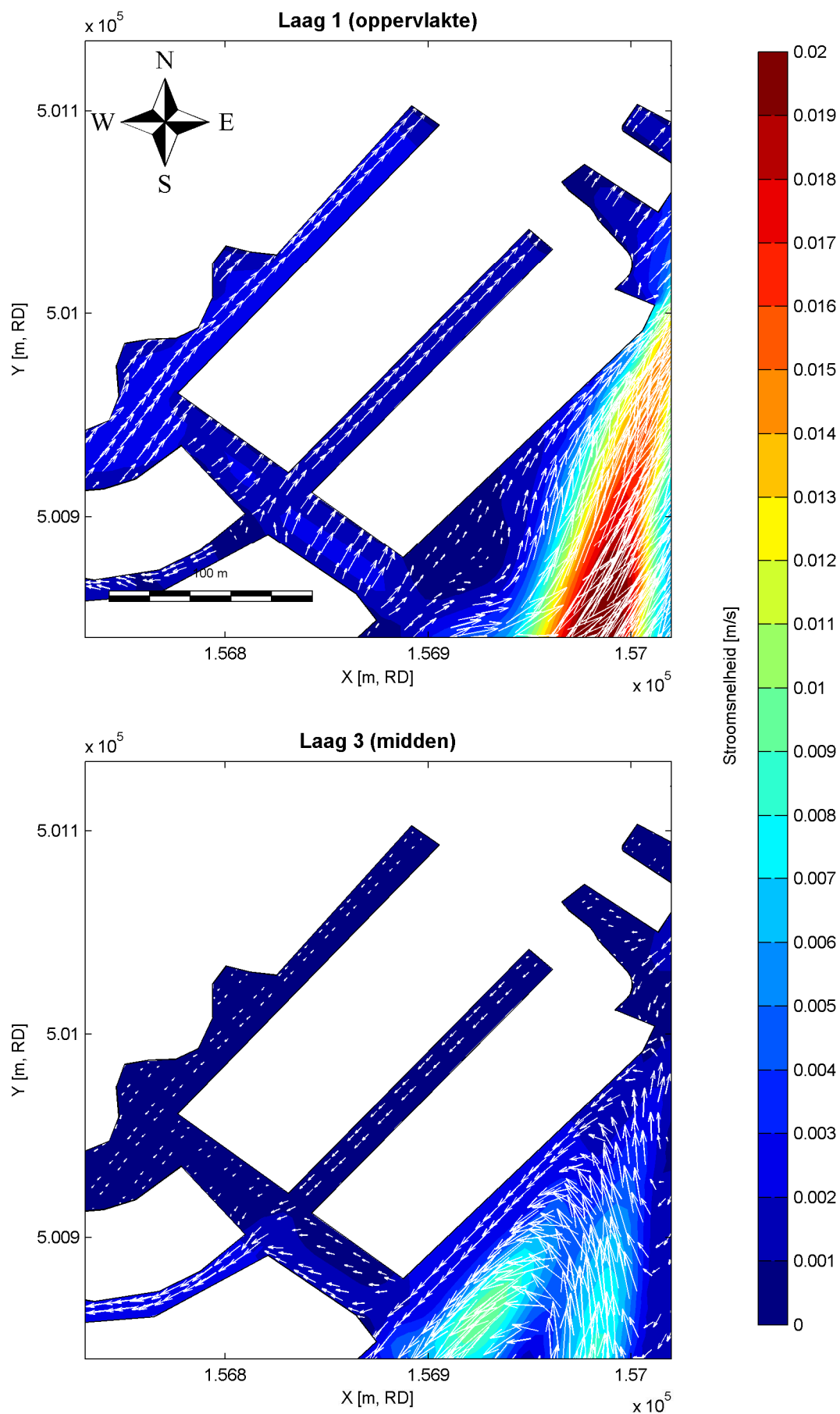
Stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 100° op 2012-08-15 14:00:00
Detail van inhammen
Referentiescenario



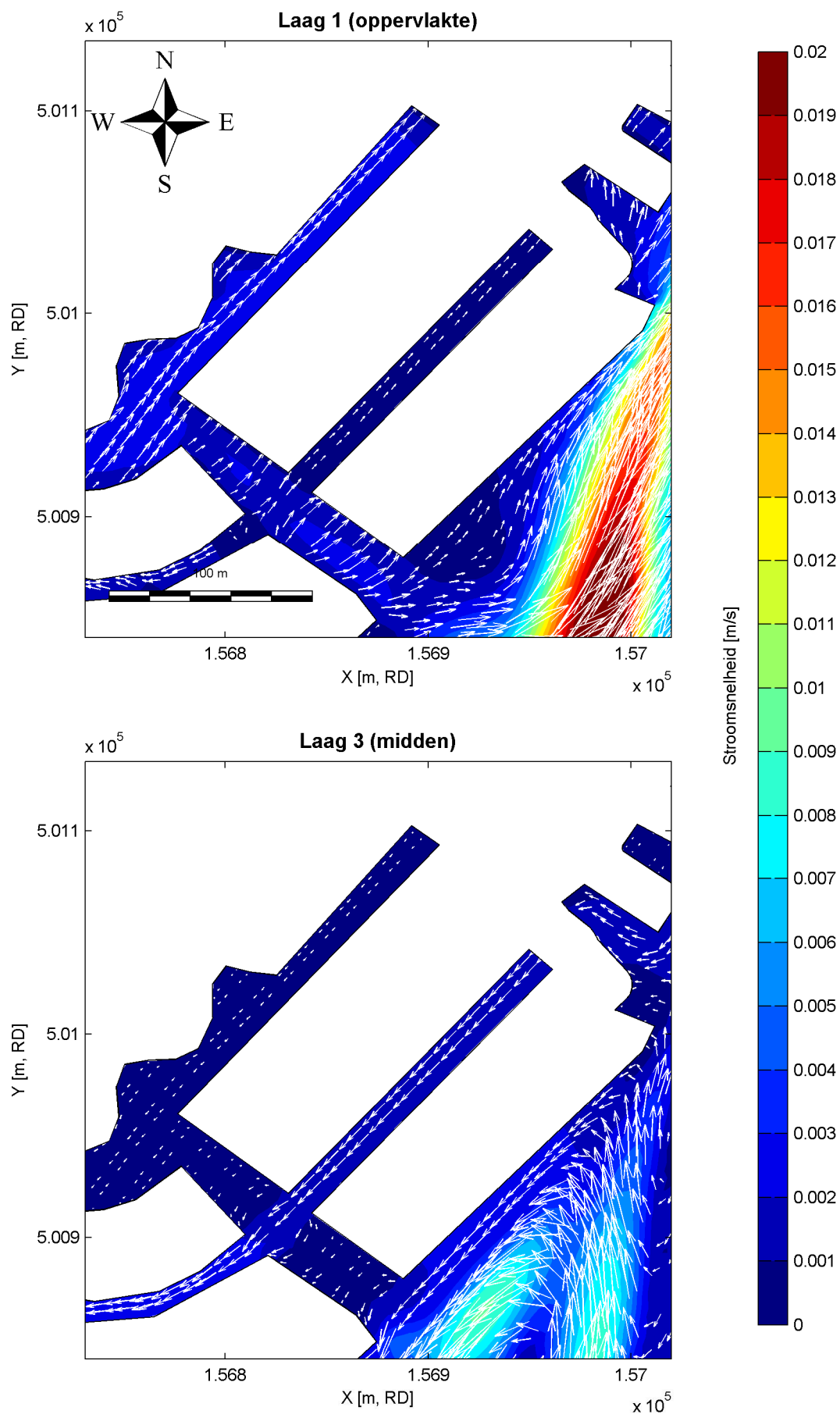
Stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 100° op 2012-08-15 14:00:00
 Detail van inhammen
 Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan



Stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 225° op 2012-08-16 14:00:00
Referentiescenario

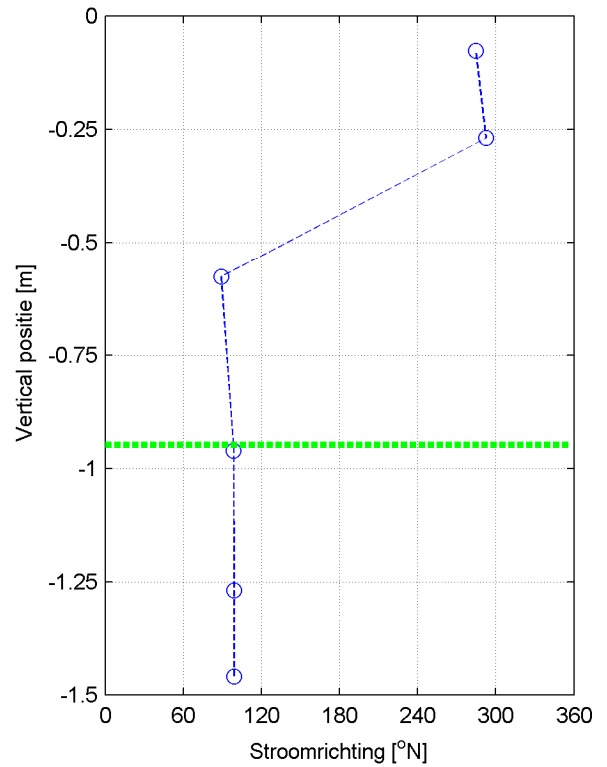
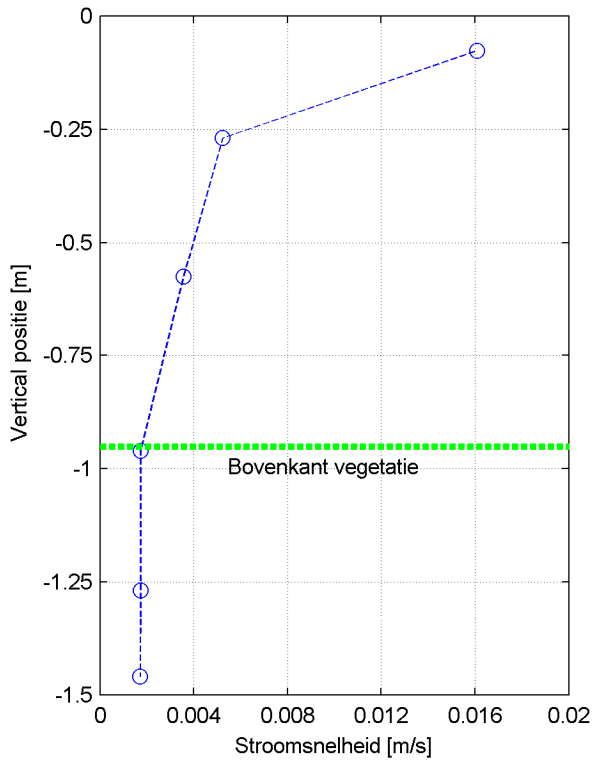


Stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 225° op 2012-08-16 14:00:00
 Detail van inhammen
 Referentiescenario

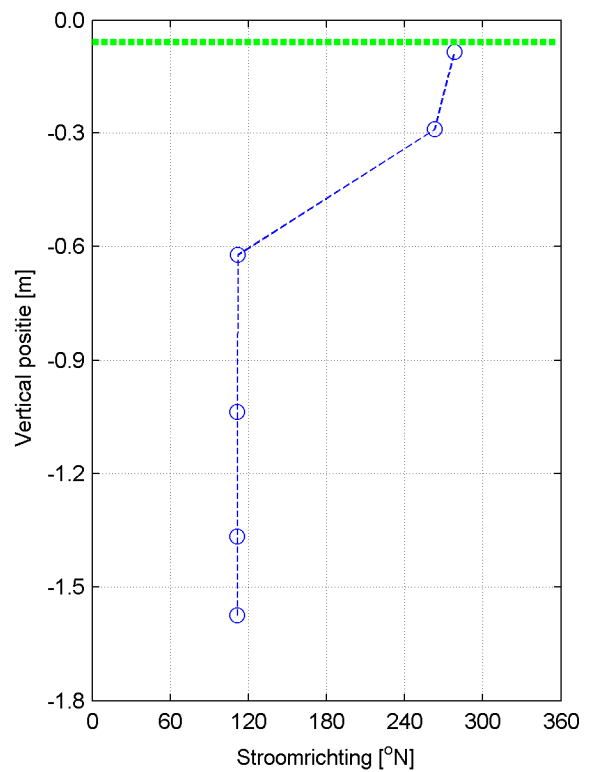
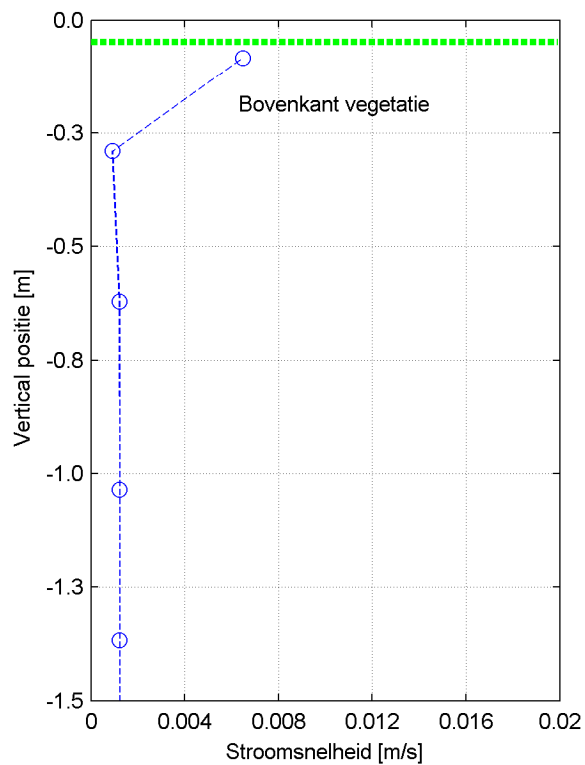


Stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 225° op 2012-08-16 14:00:00
 Detail van inhammen
 Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan

Verticale stromingsverdeling, observatiepunt 1



Verticale stromingsverdeling, observatiepunt 2



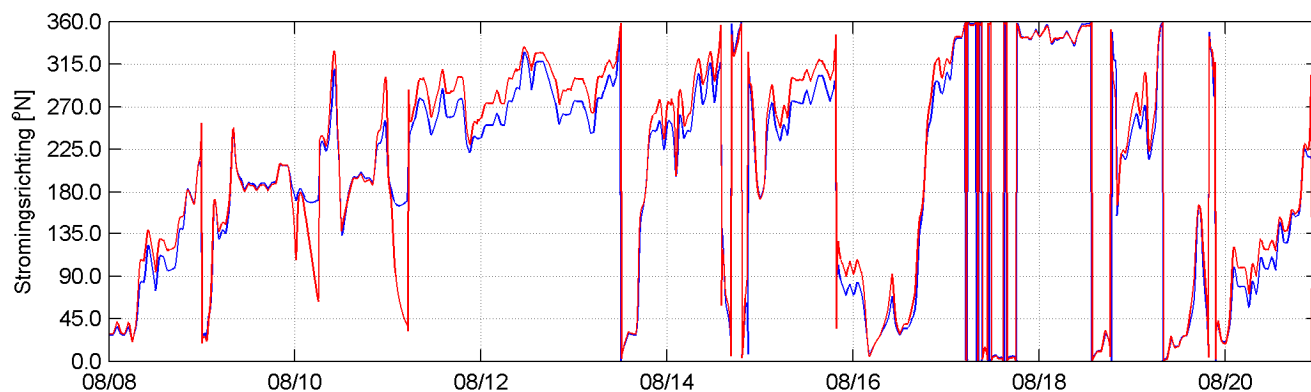
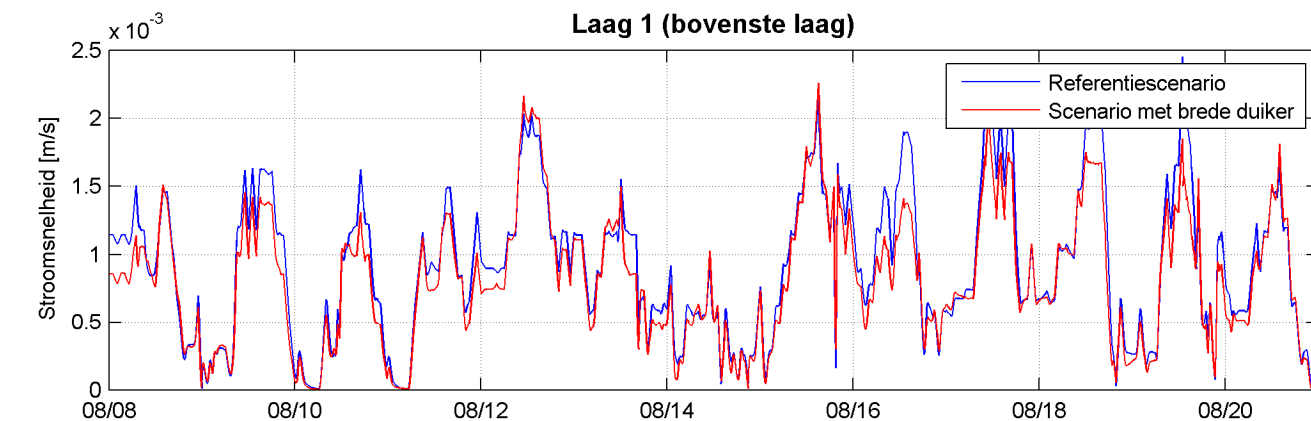
Verticale stromingsverdeling onder invloed van vegetatie

Boven: observatiepunt 1 (vegetatiehoogte = 0.5 m)

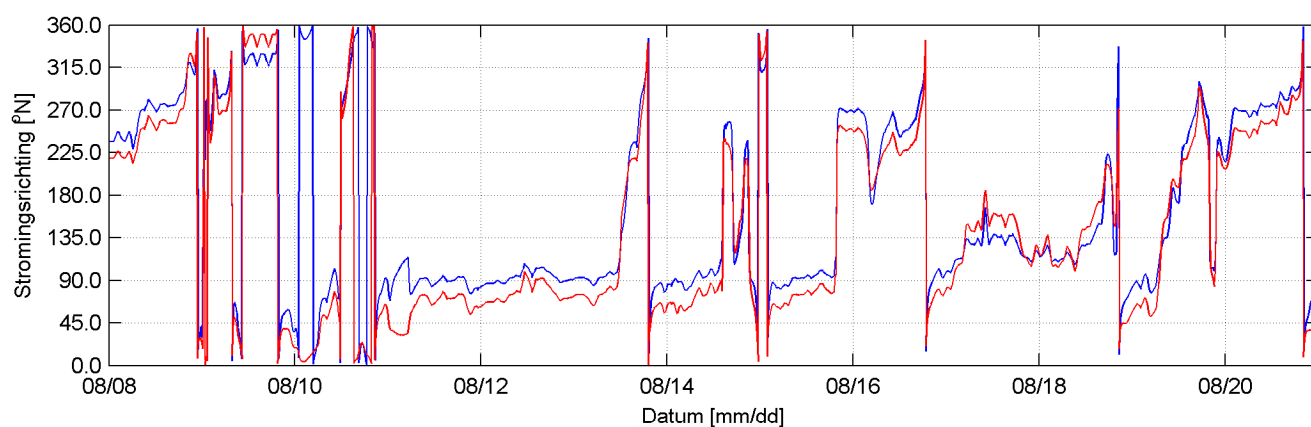
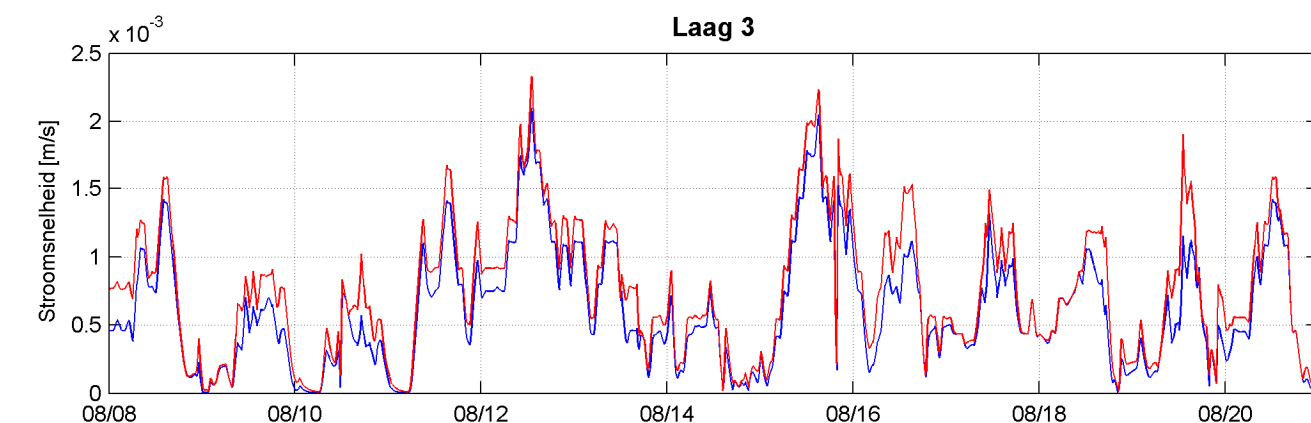
Onder: observatiepunt 2 (vegetatiehoogte = tot aan waterspiegel)

21-08-2012 00:00

Laag 1 (bovenste laag)



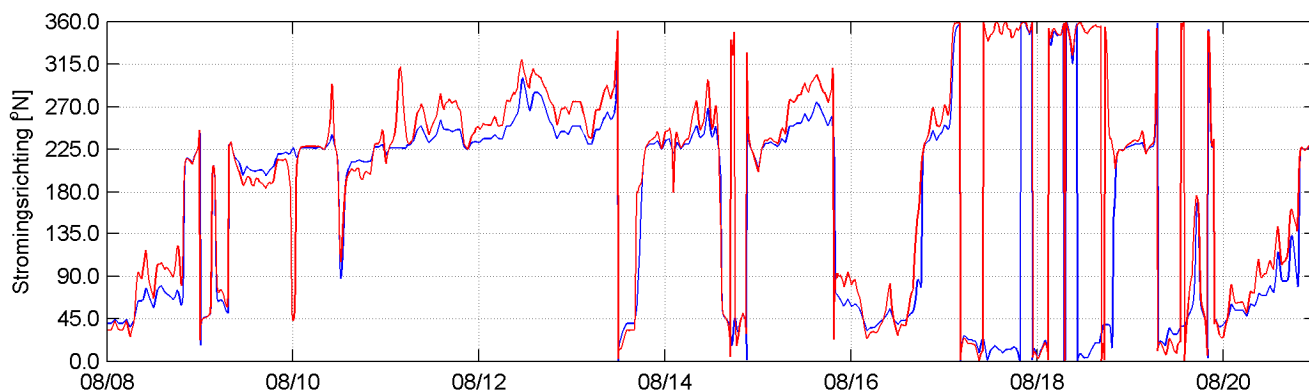
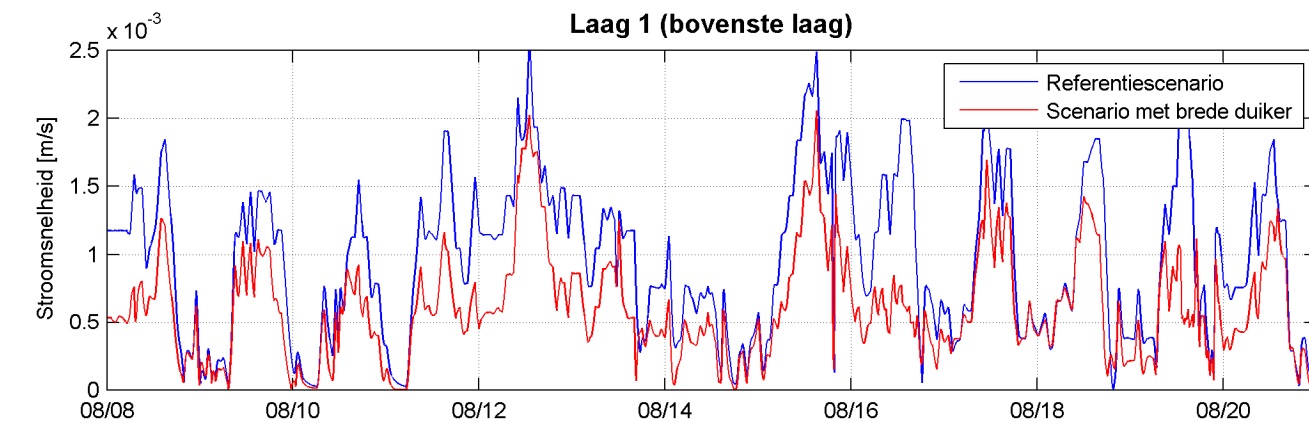
Laag 3



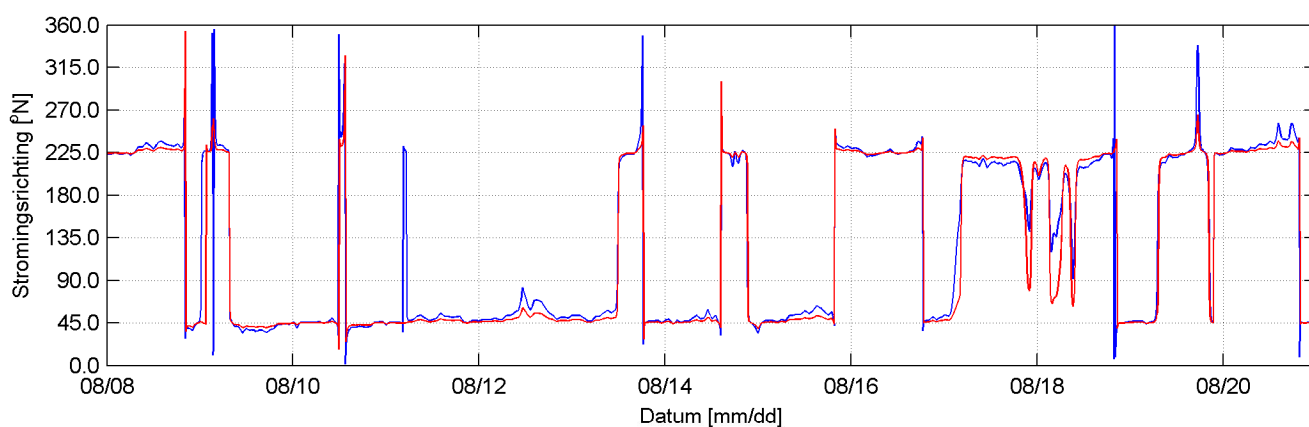
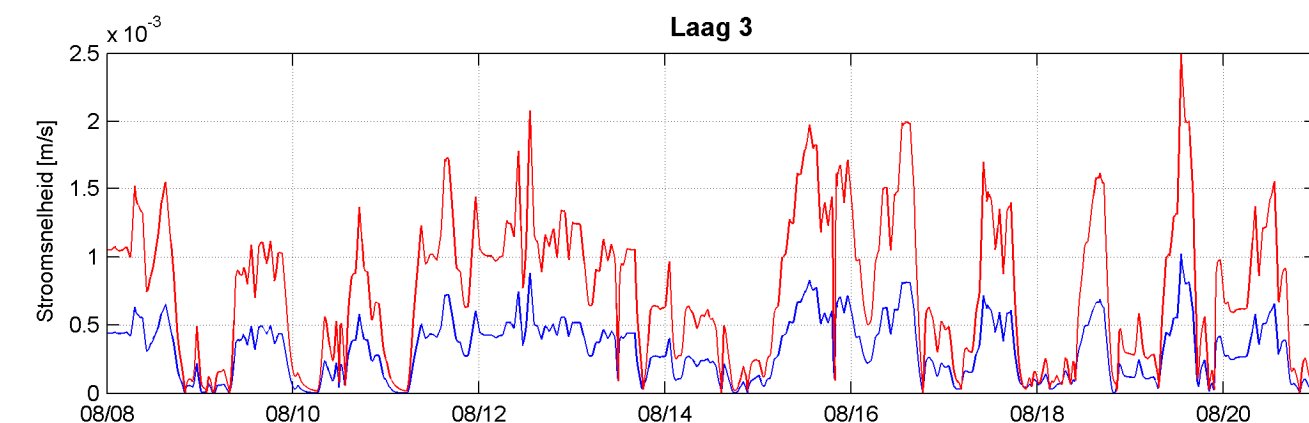
Stroomsnelheid en richting voor het Referentiescenario (blauw)
en het Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan (rood)
Observatiepunt 3

2012

Laag 1 (bovenste laag)



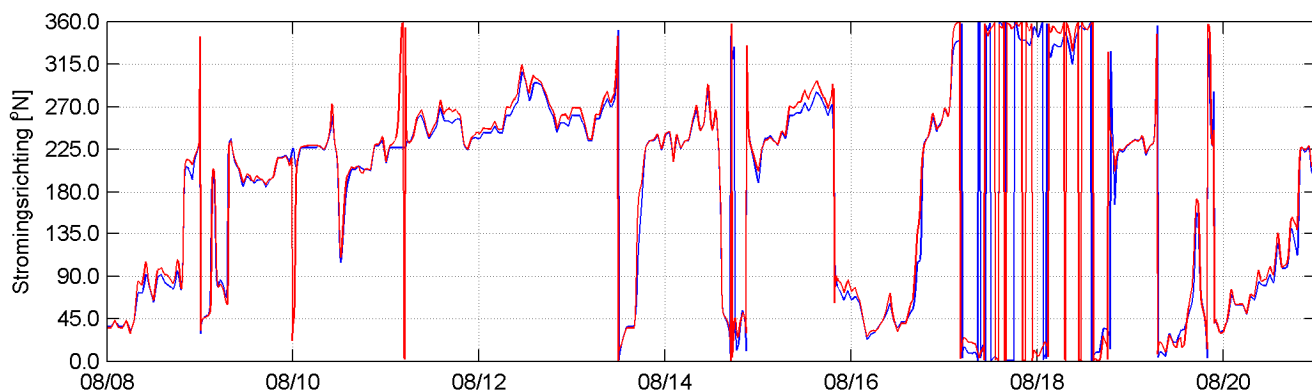
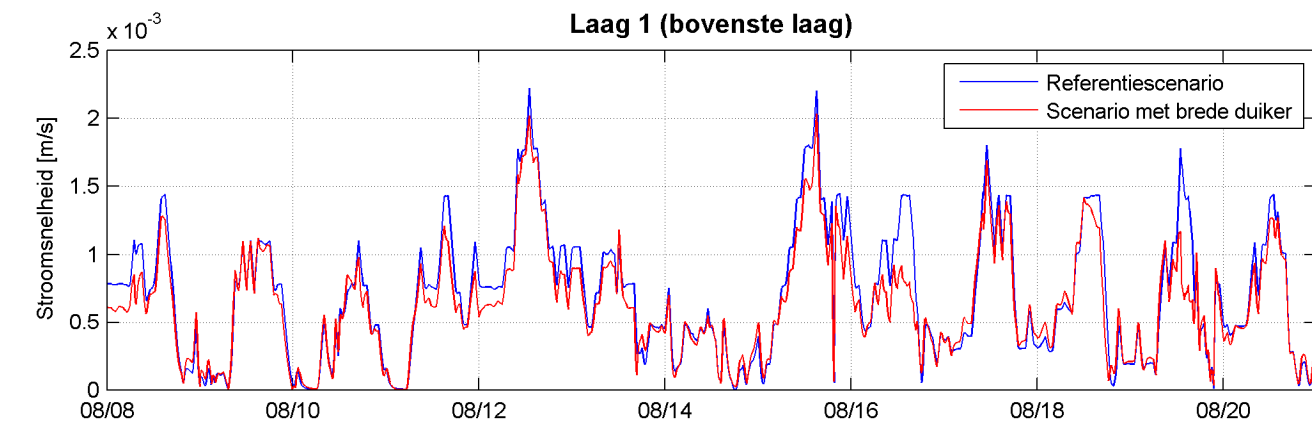
Laag 3



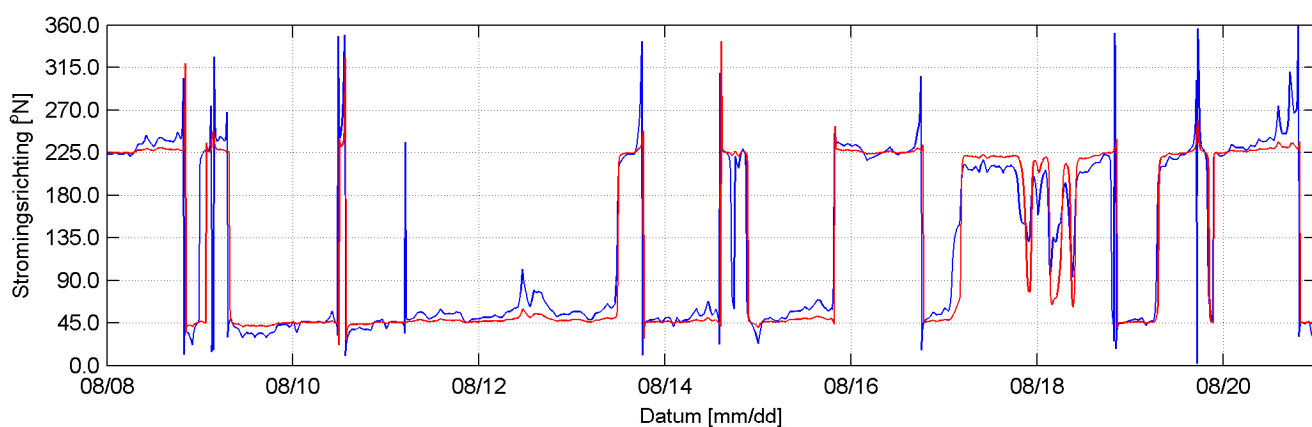
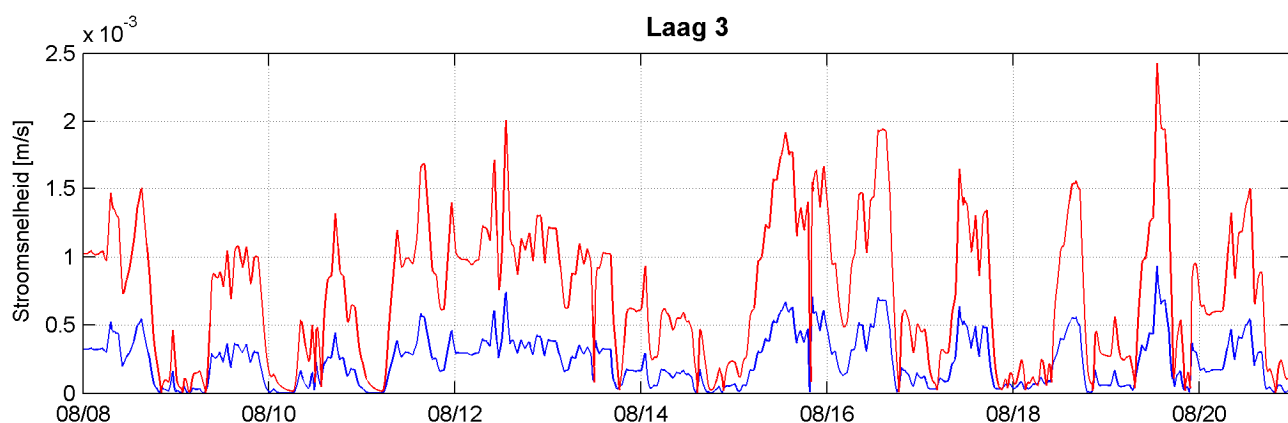
Stroomsnelheid en richting voor het Referentiescenario (blauw)
en het Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan (rood)
Observatiepunt 4

2012

Laag 1 (bovenste laag)

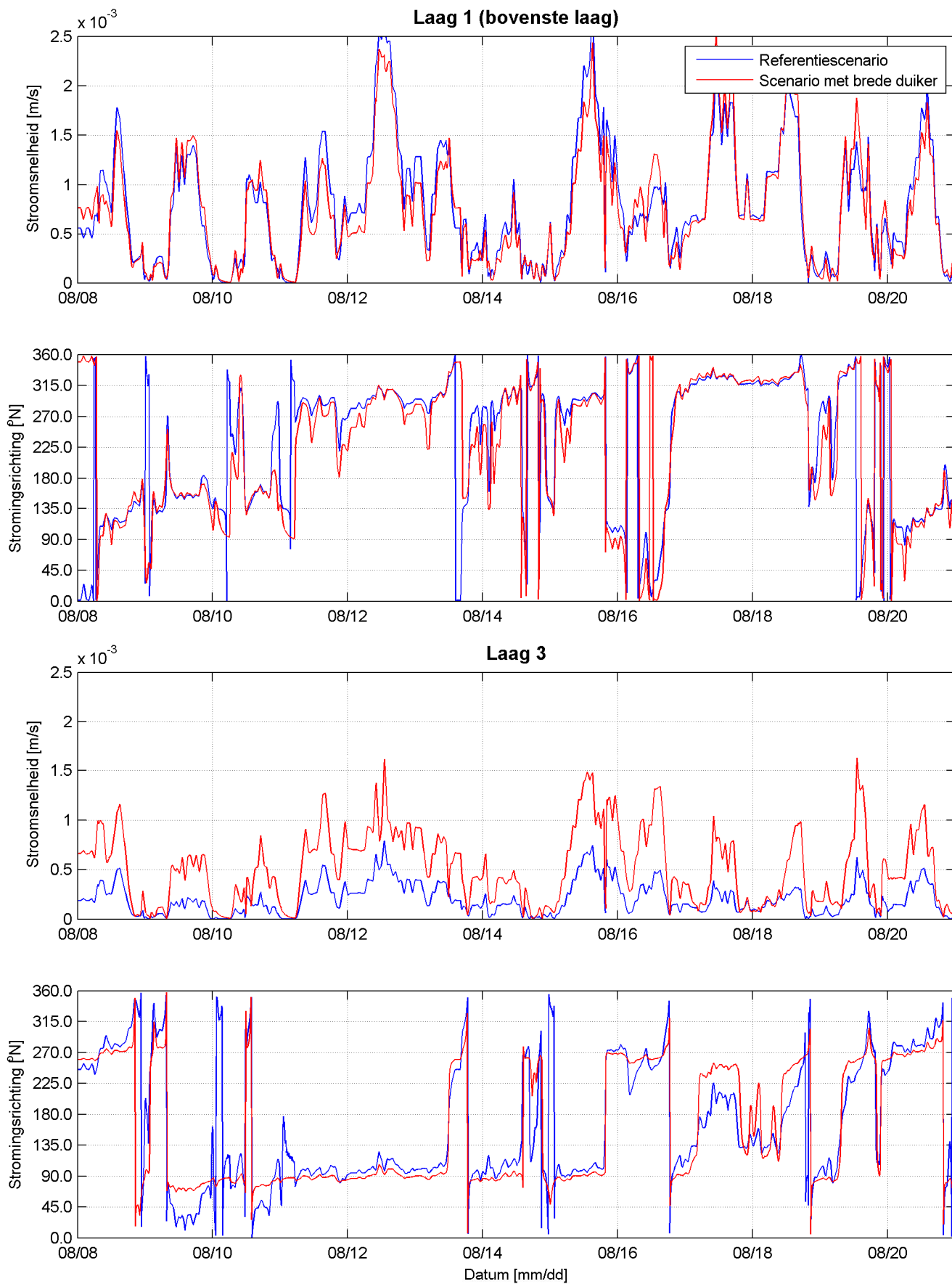


Laag 3



Stroomsnelheid en richting voor het Referentiescenario (blauw)
en het Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan (rood)
Observatiepunt 5

2012

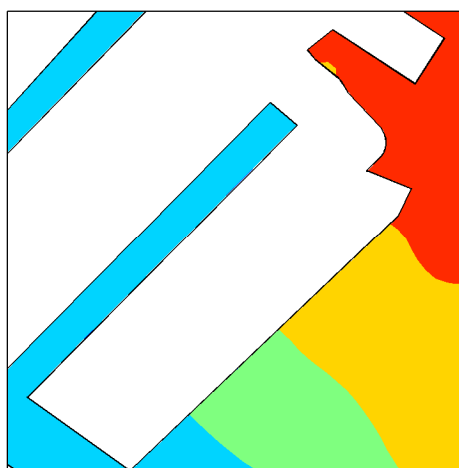


Stroomsnelheid en richting voor het Referentiescenario (blauw)
 en het Scenario met brede duiker bij Bunschotenlaan (rood)
 Observatiepunt 6

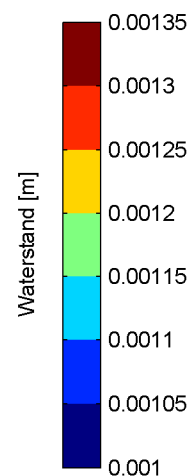
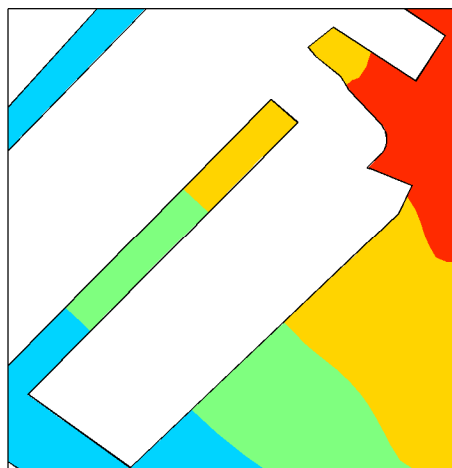
2012

Waterstand

Referentiescenario

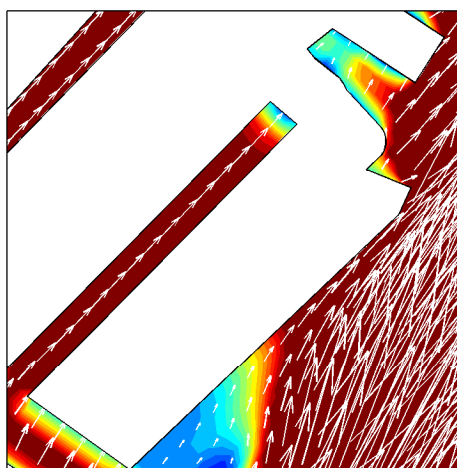


Scenario met brede duiker

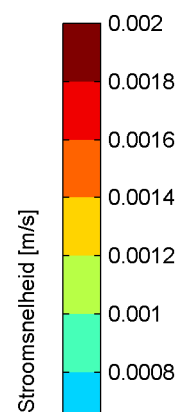
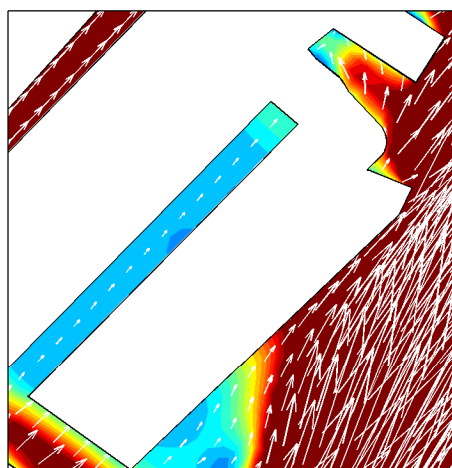


Stroming laag 1 (oppervlak)

Referentiescenario

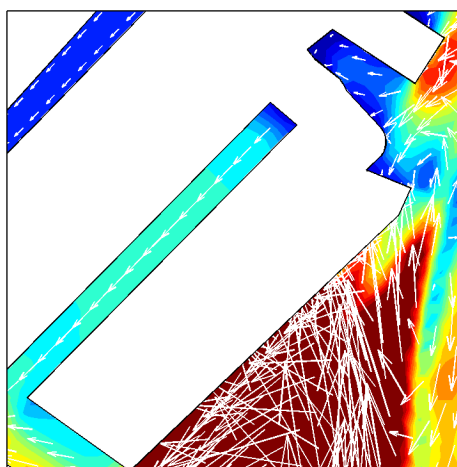


Scenario met brede duiker

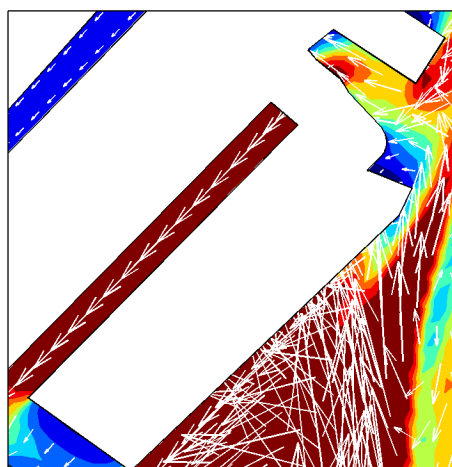


Stroming laag 3 (midden)

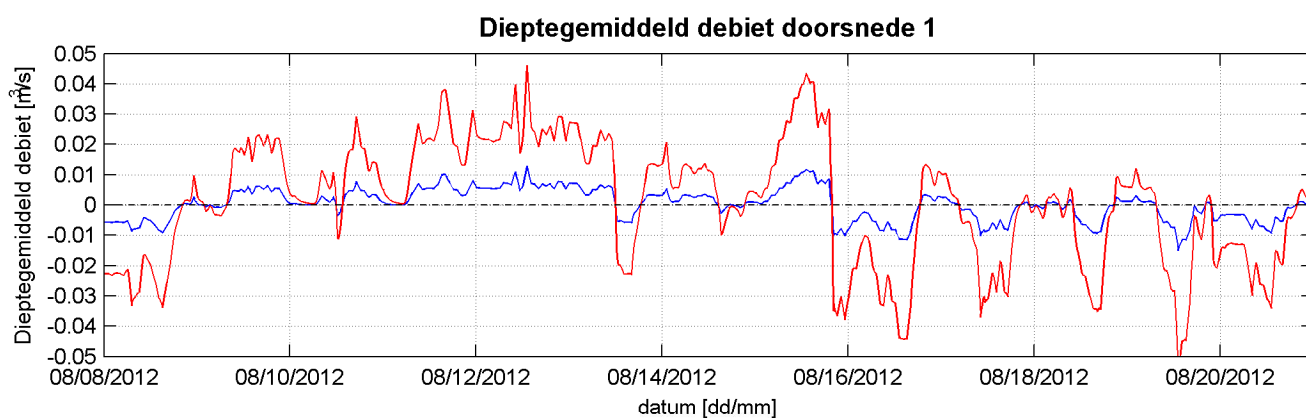
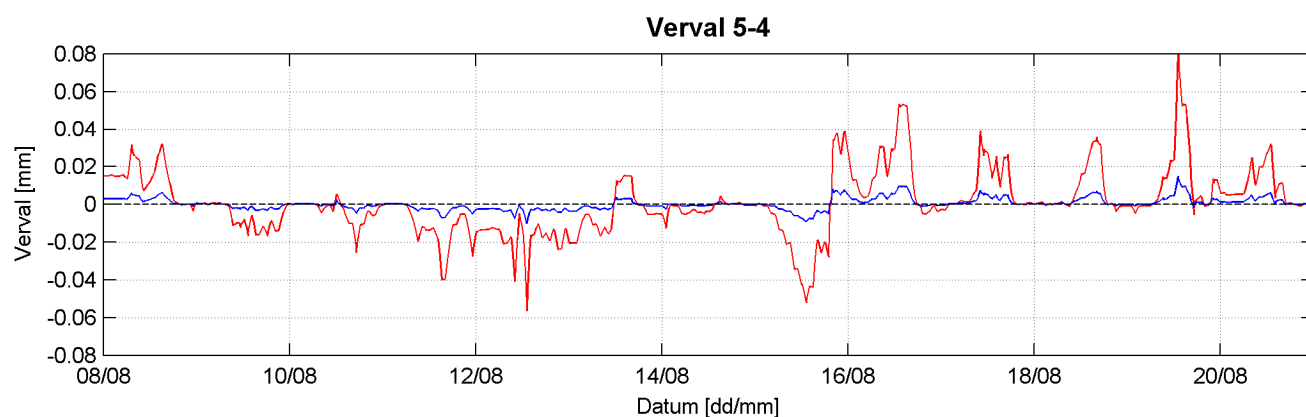
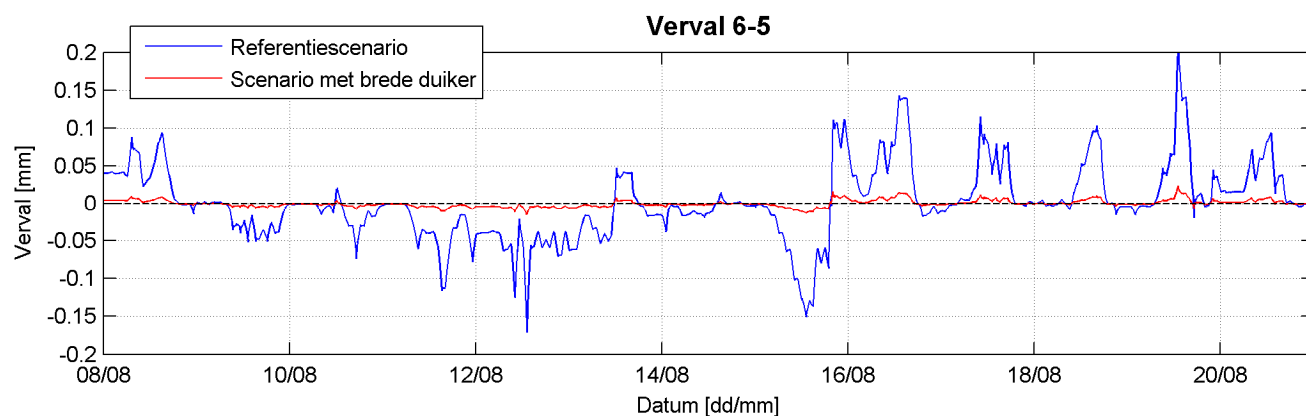
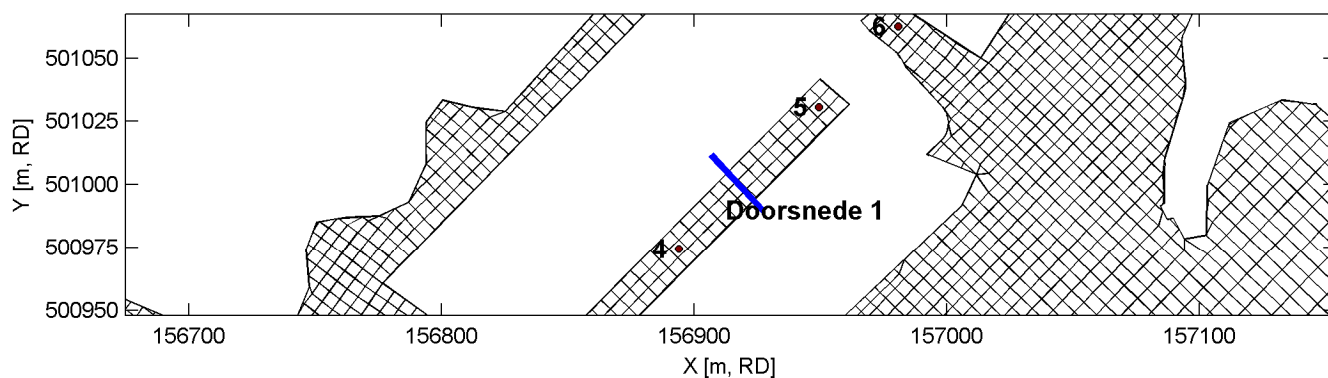
Referentiescenario



Scenario met brede duiker



Waterstanden en stromingspatroon tijdens wind vanuit richting 225°
Referentiescenario en Scenario met brede duiker
2012-08-16 14:00:00



Verval over duiker en inham
Referentiescenario en Scenario met brede duiker



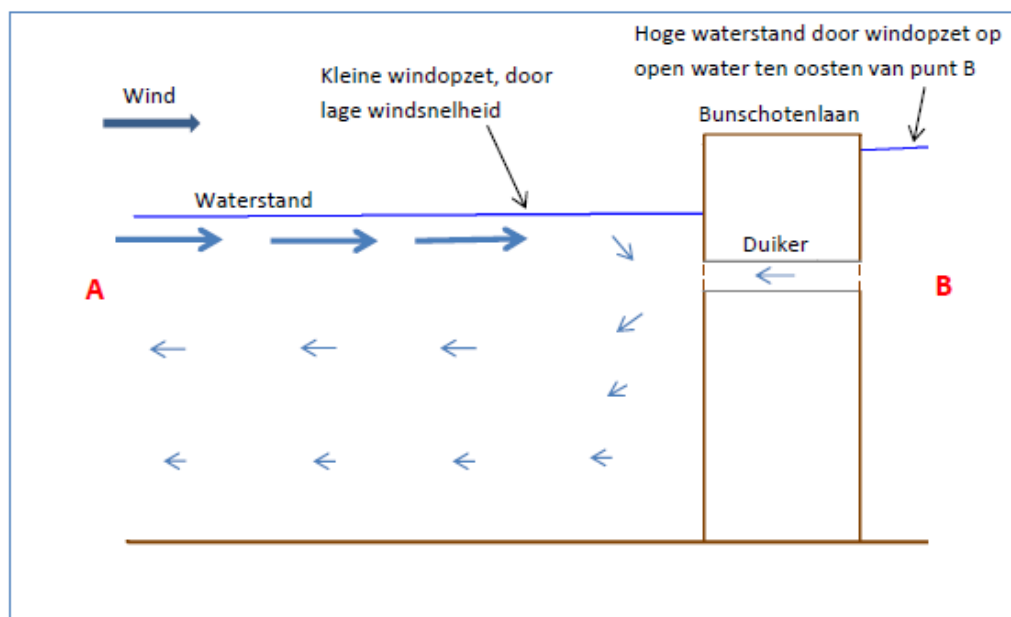
Doorsnede A-B, zie Figuur 2.28

Deltares

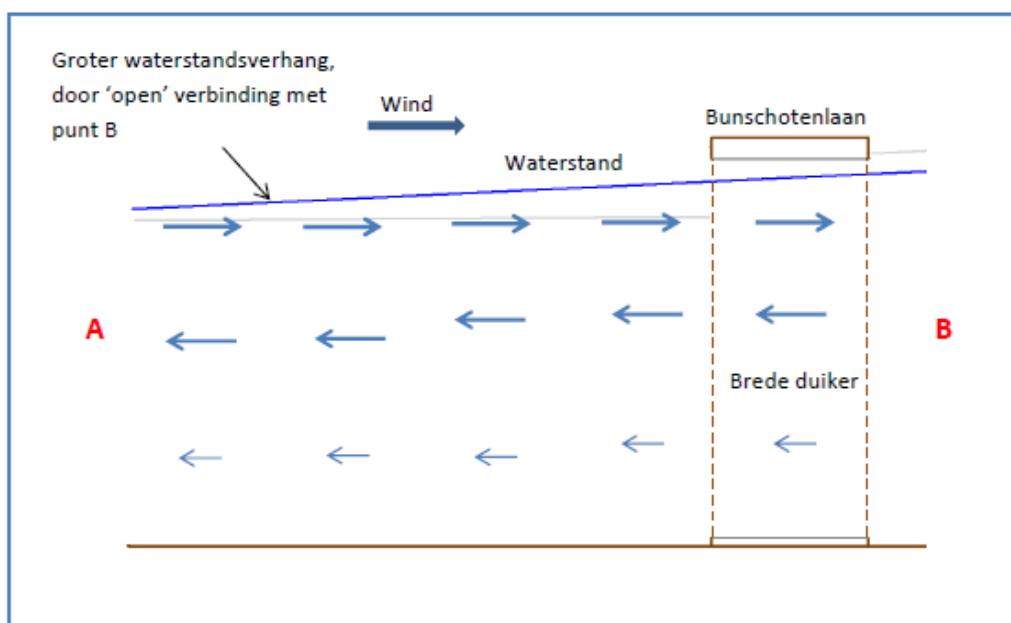
1207439

Figuur 2.27

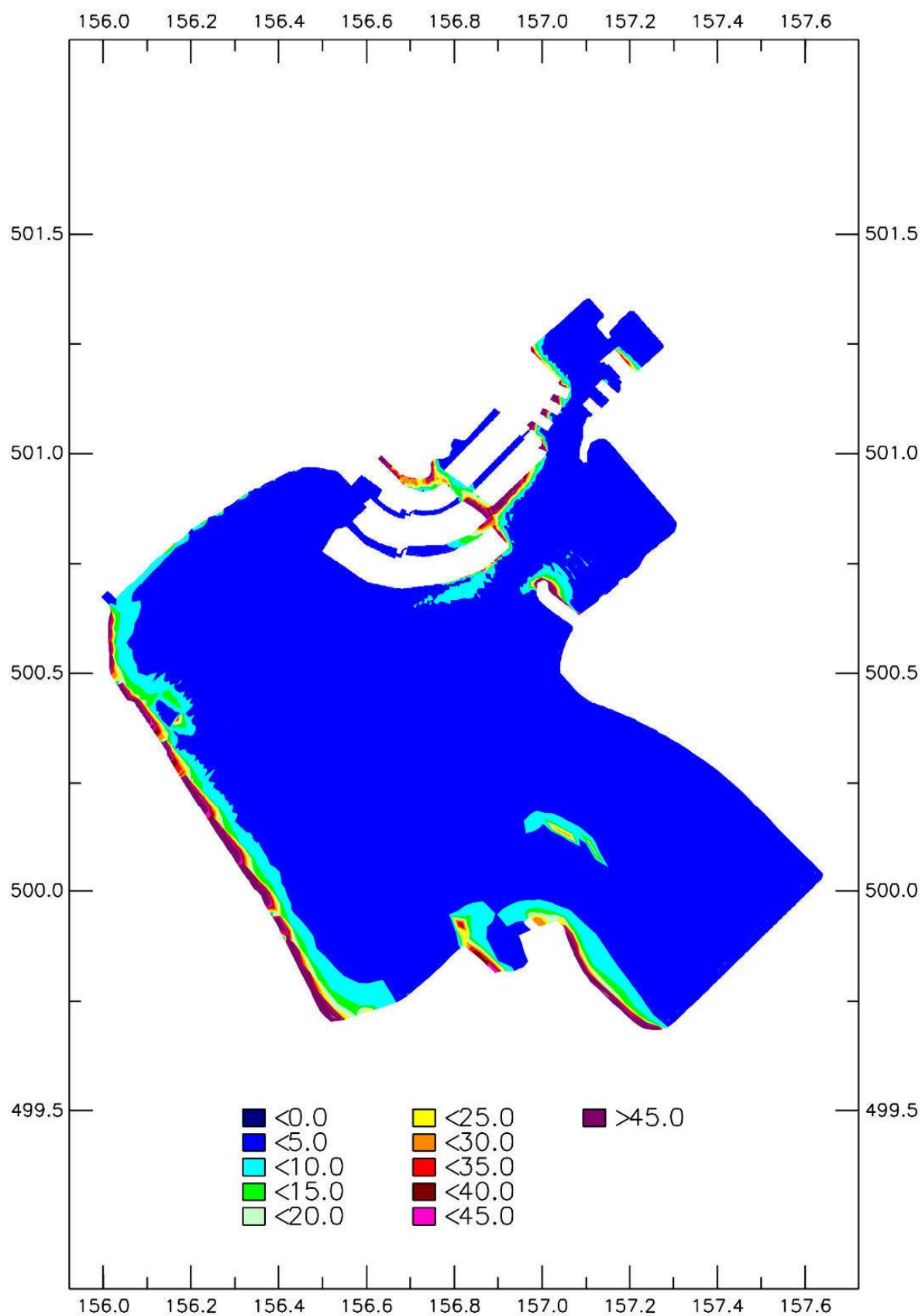
Referentiescenario



Scenario met brede duiker

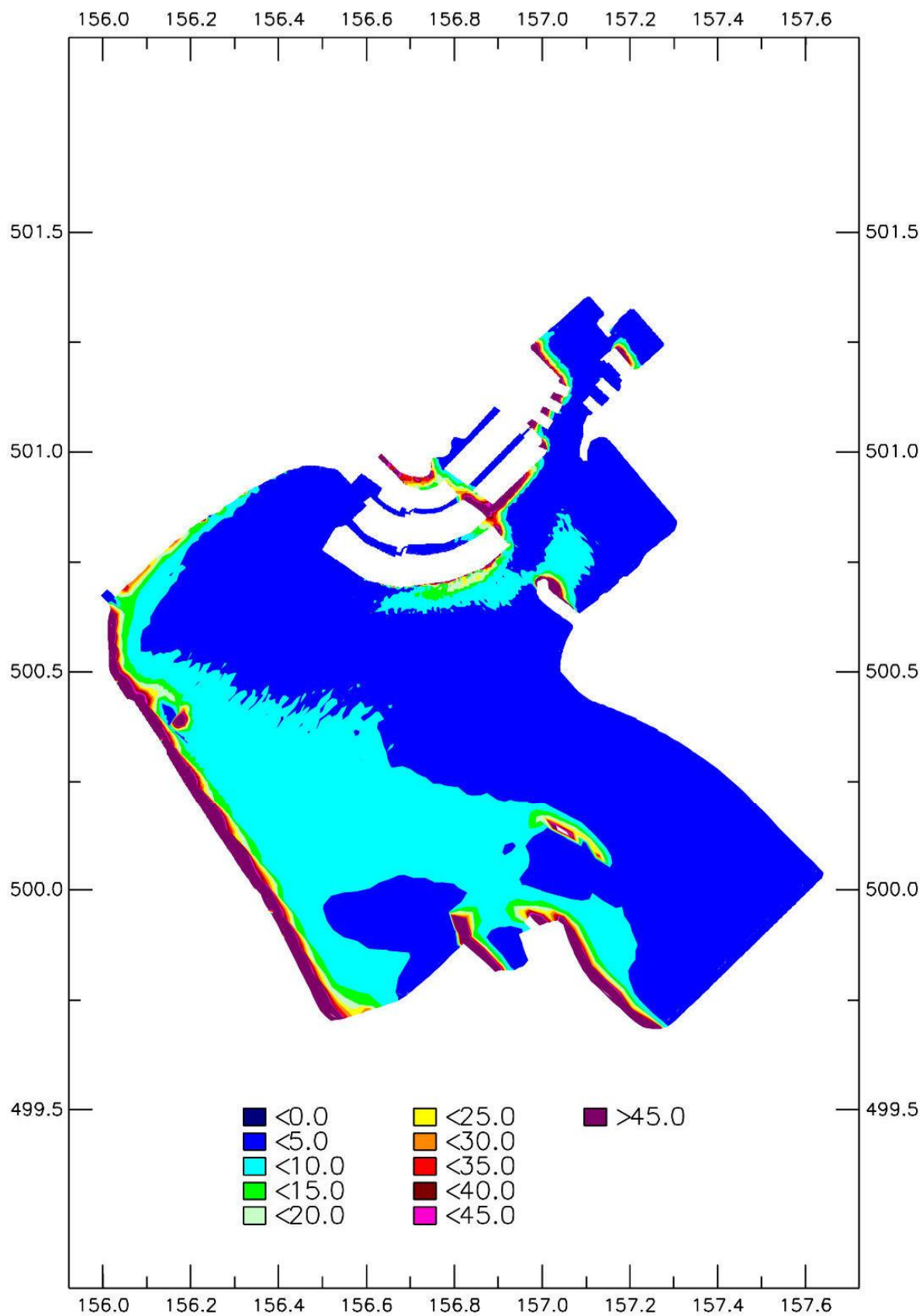


Schematische visualisatie van hydrodynamica in inham tussen de Beulakerwiede en Belterwiede voor het referentiescenario (boven) en het scenario met brede duiker (beneden)



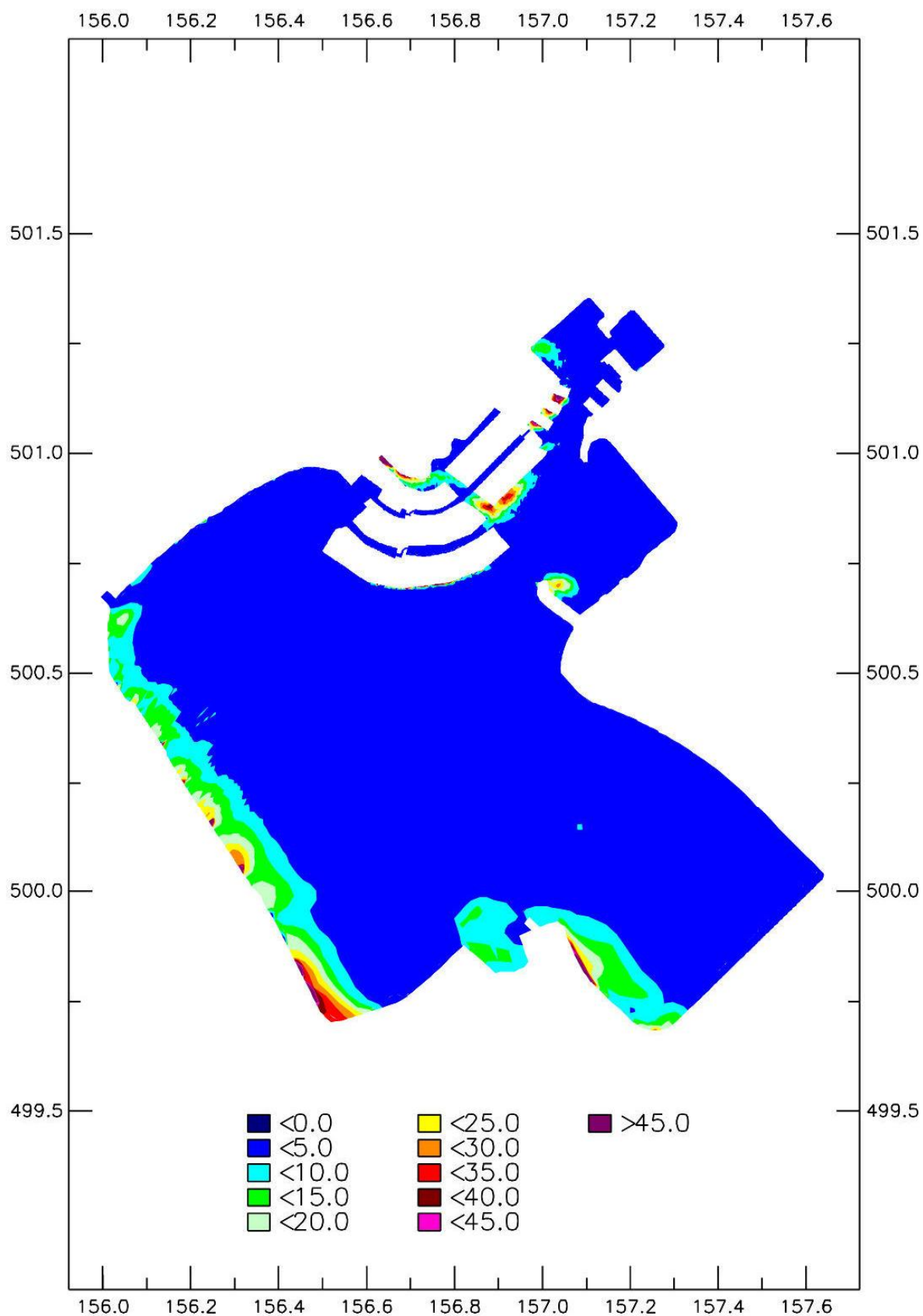
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 14-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



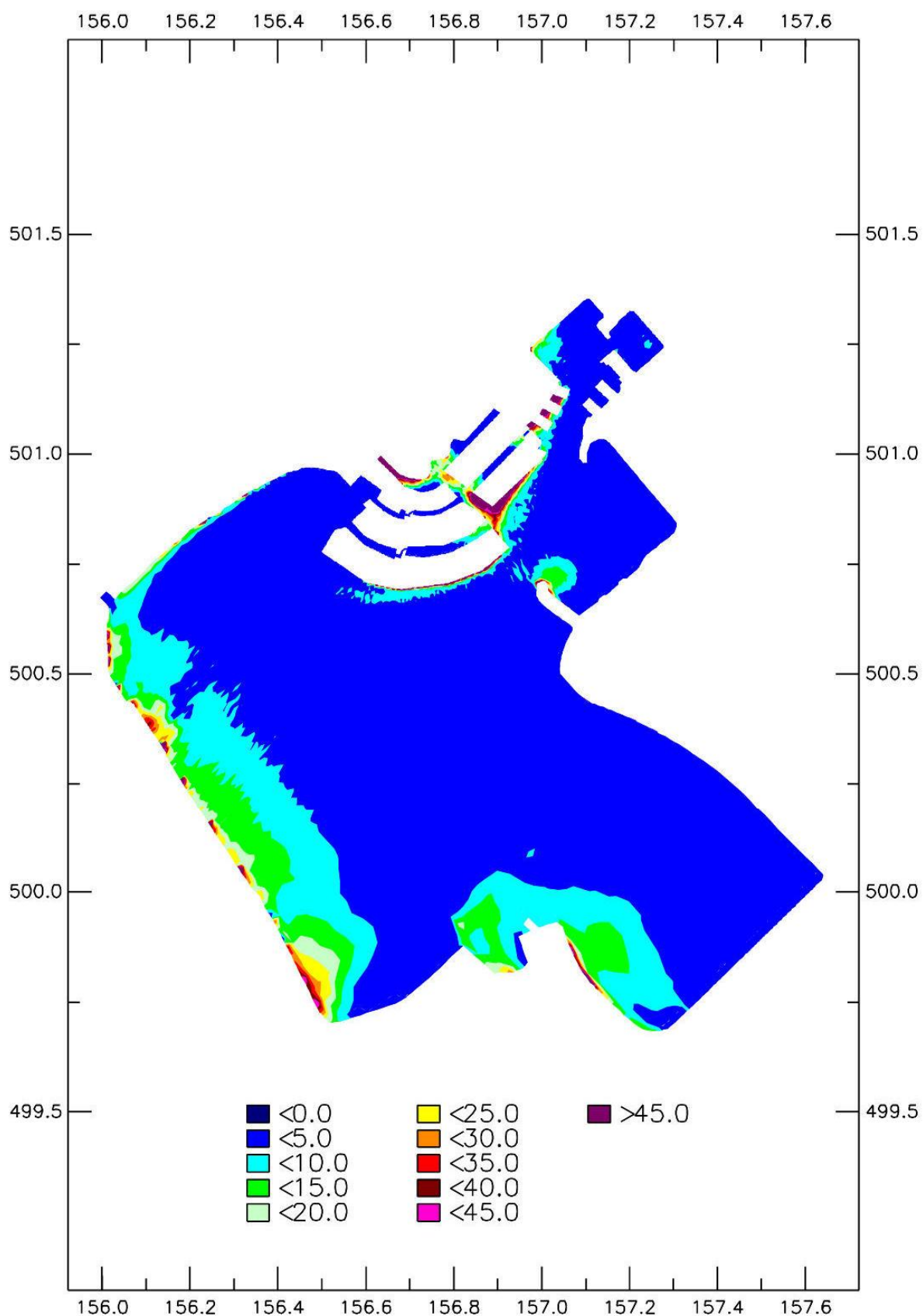
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 15-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



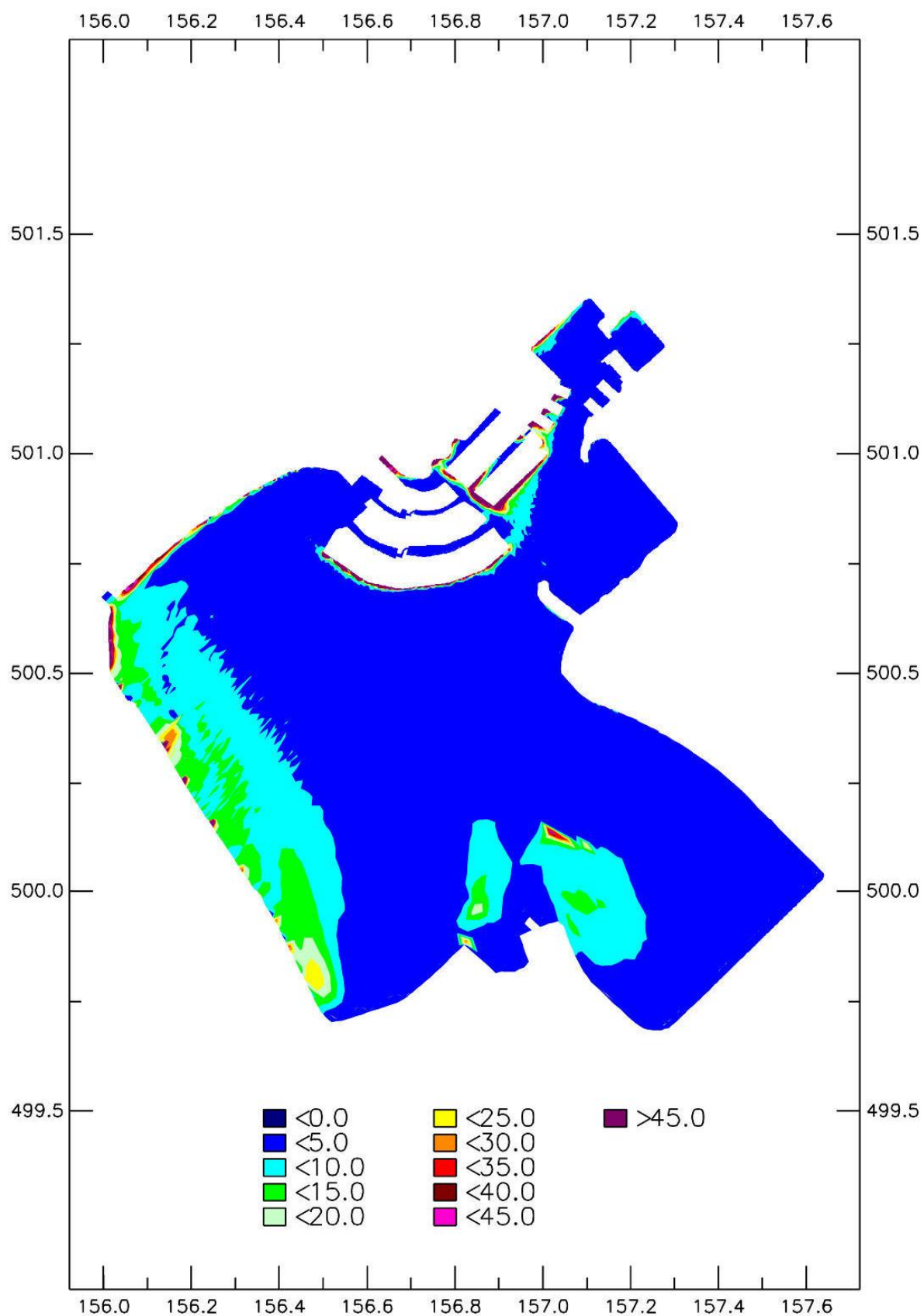
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 16-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



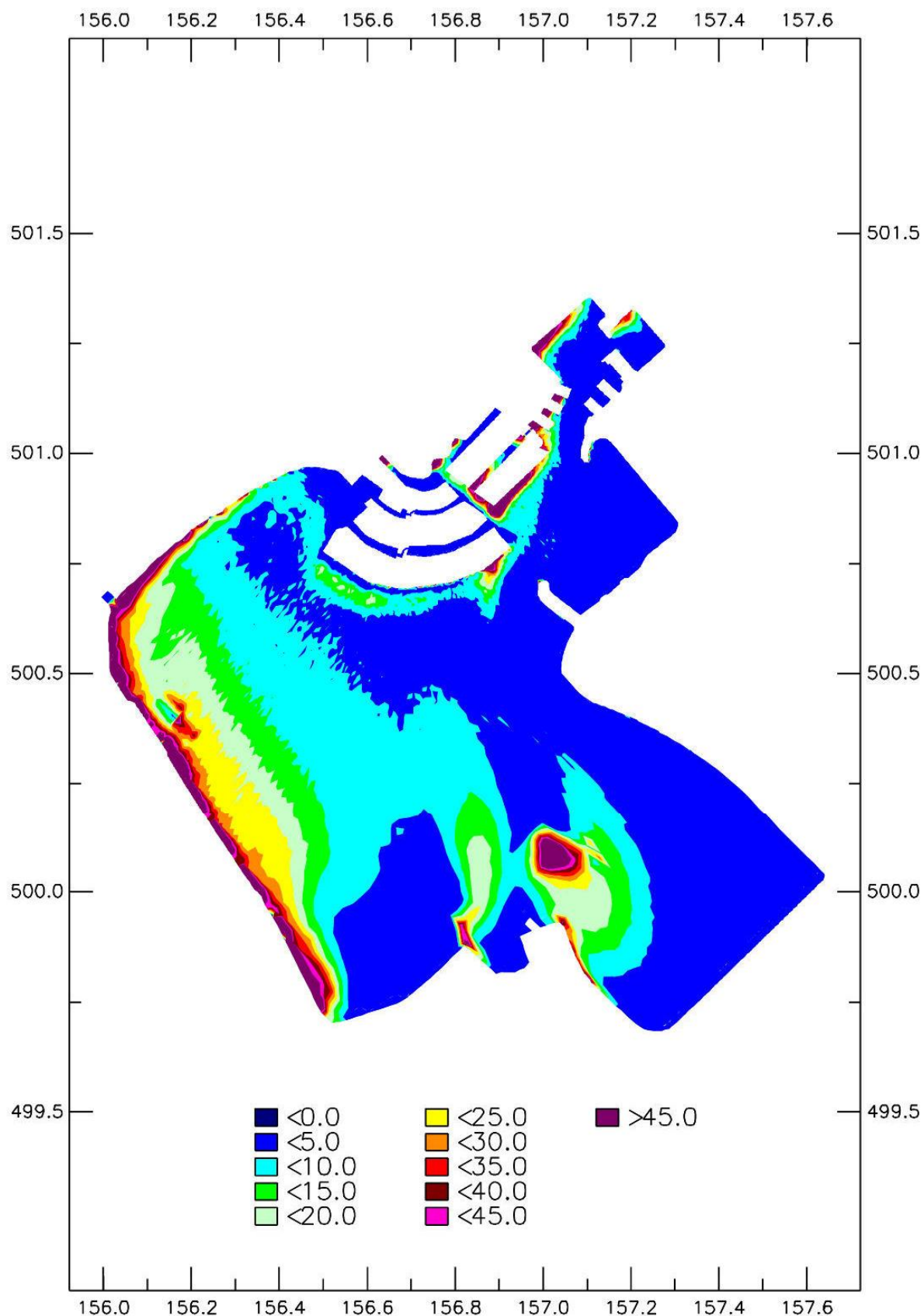
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 17-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



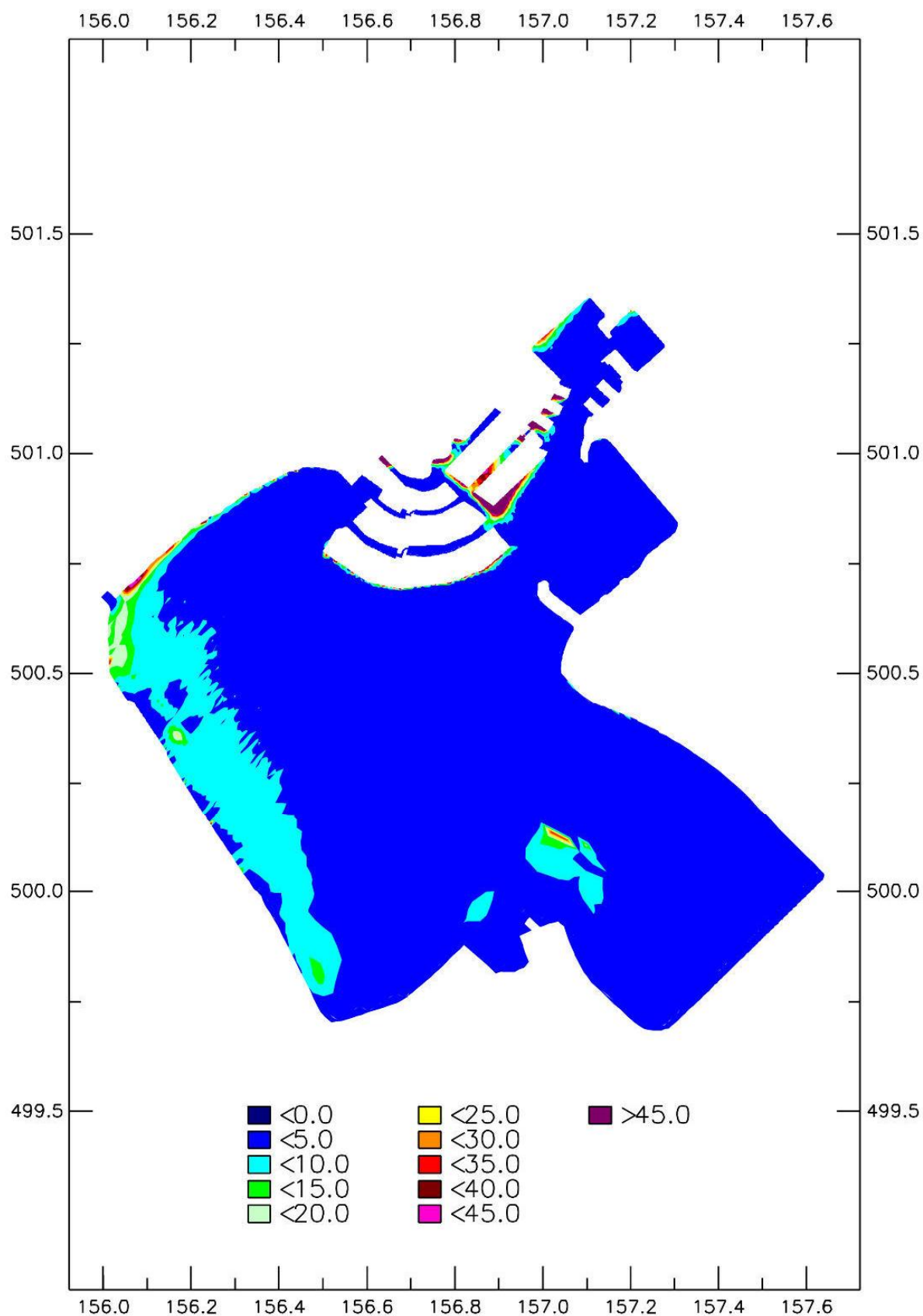
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 18-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



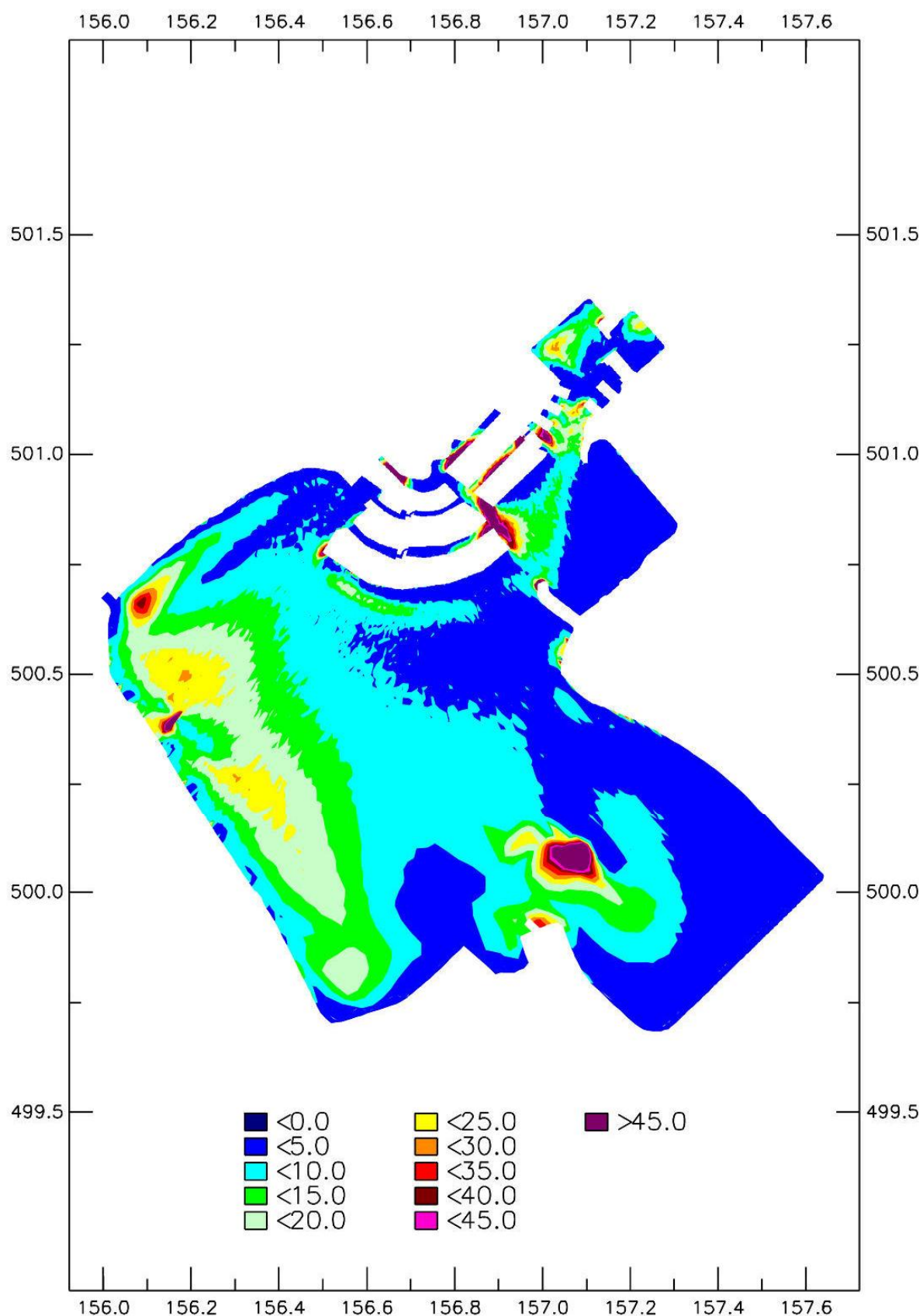
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 19-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



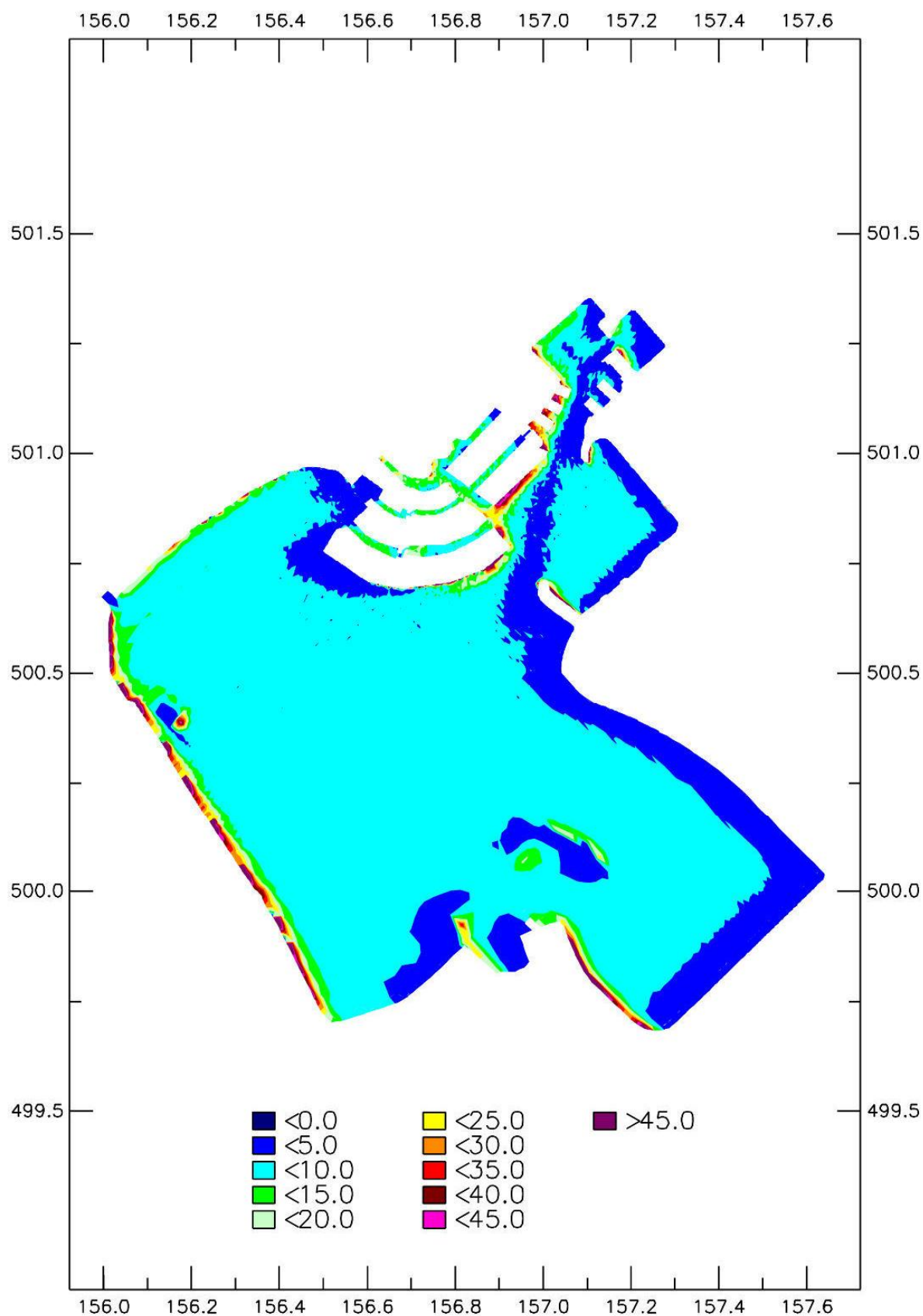
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 20-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



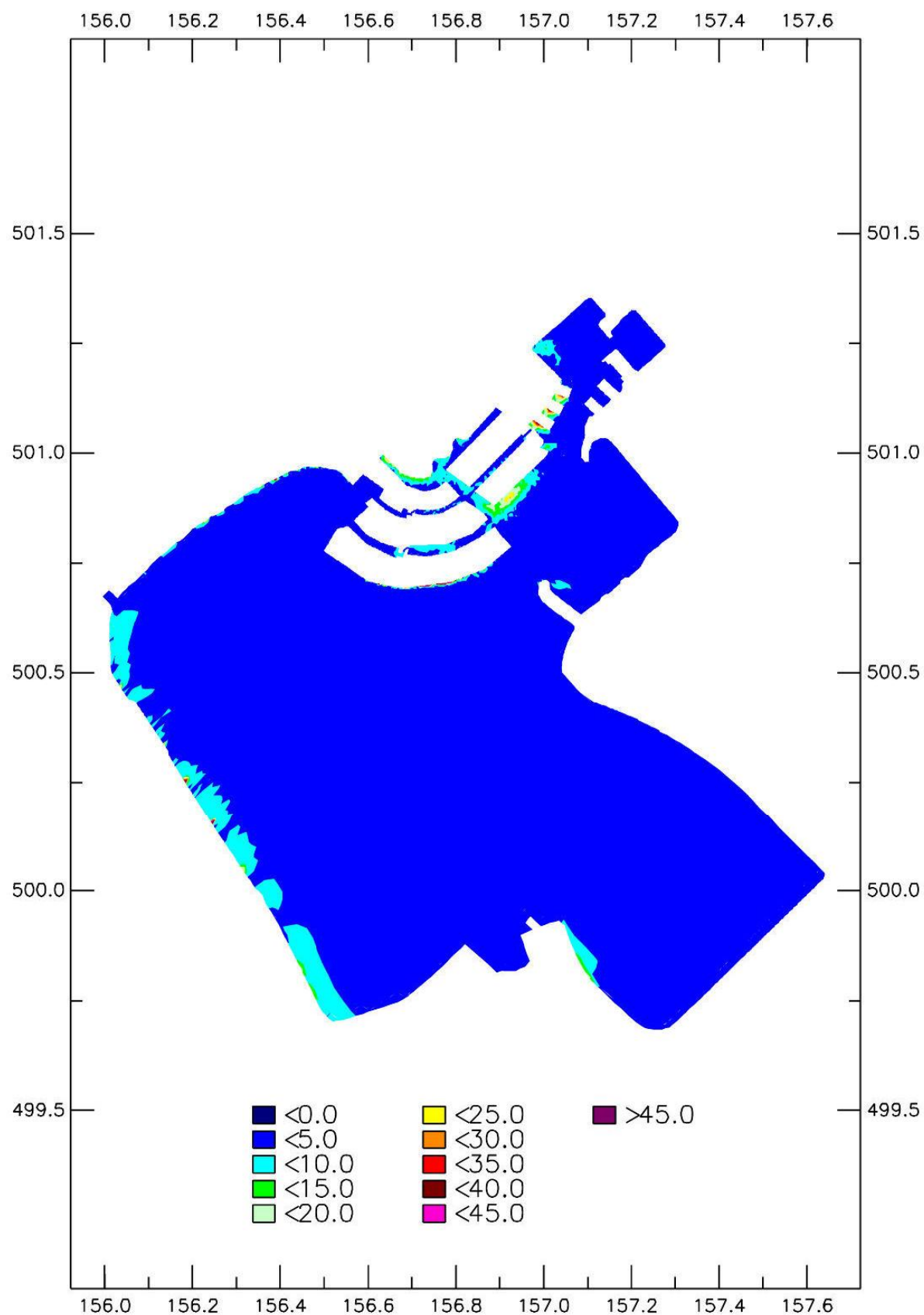
Referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 21-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



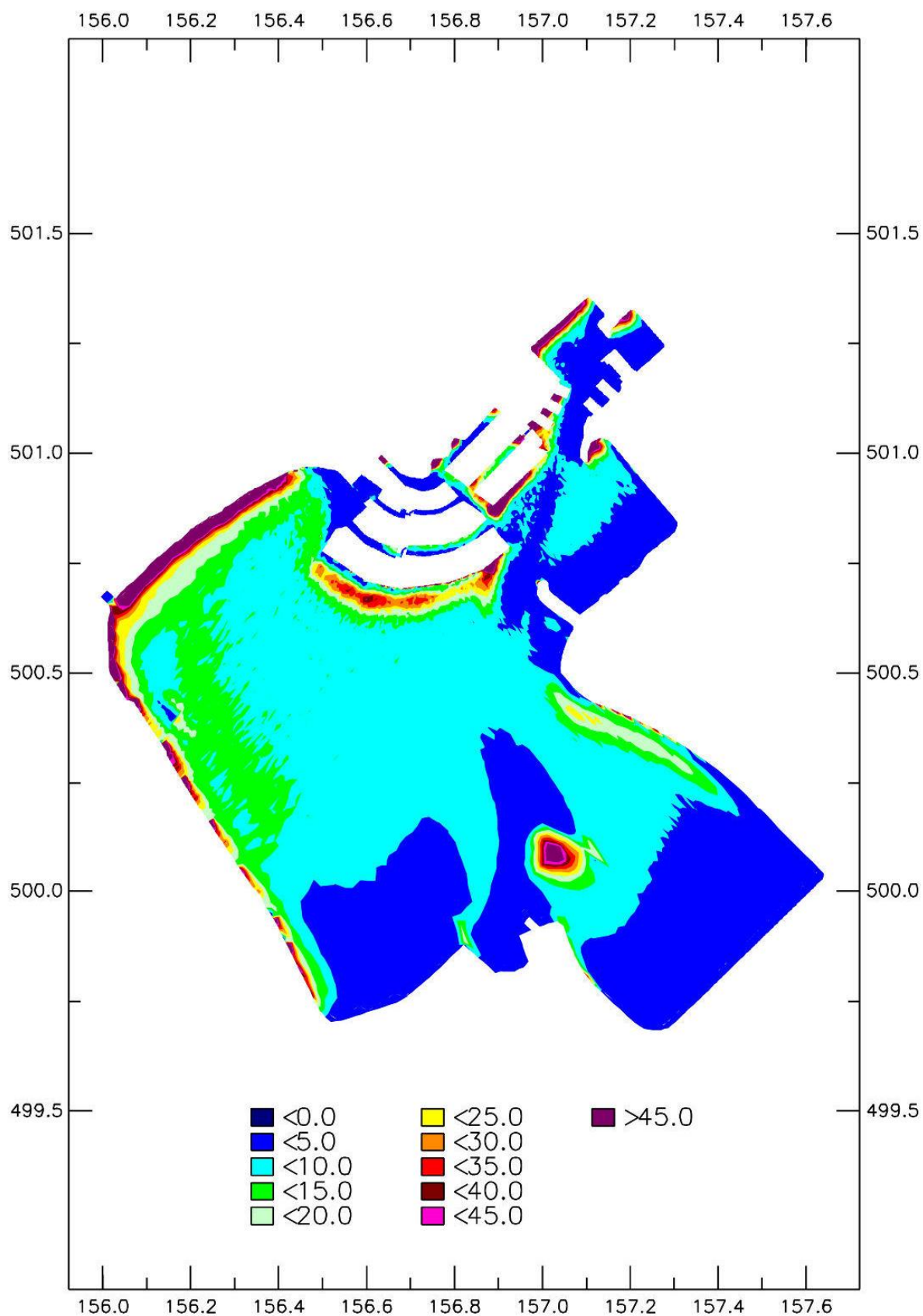
Referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 15-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



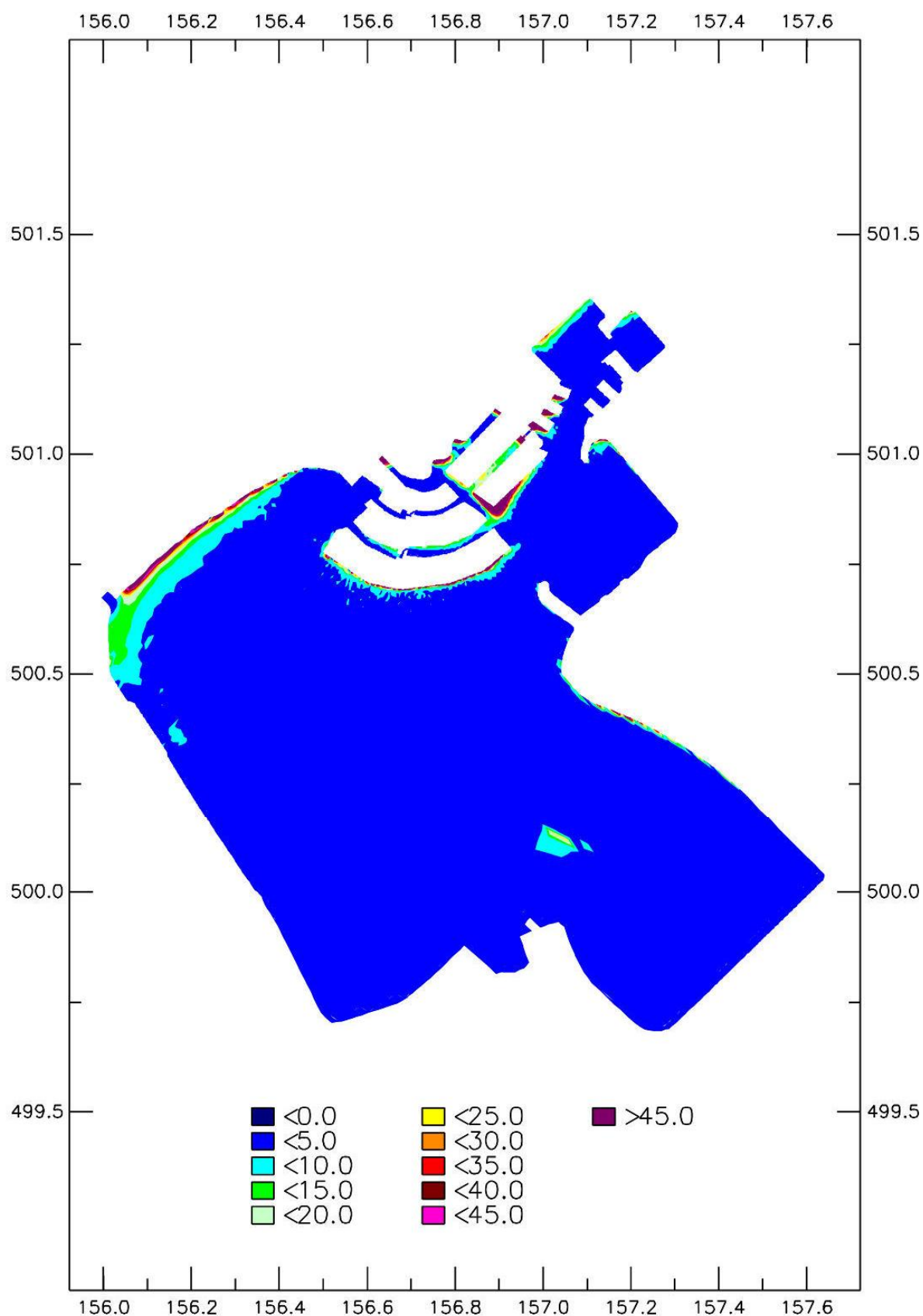
Referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 16-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



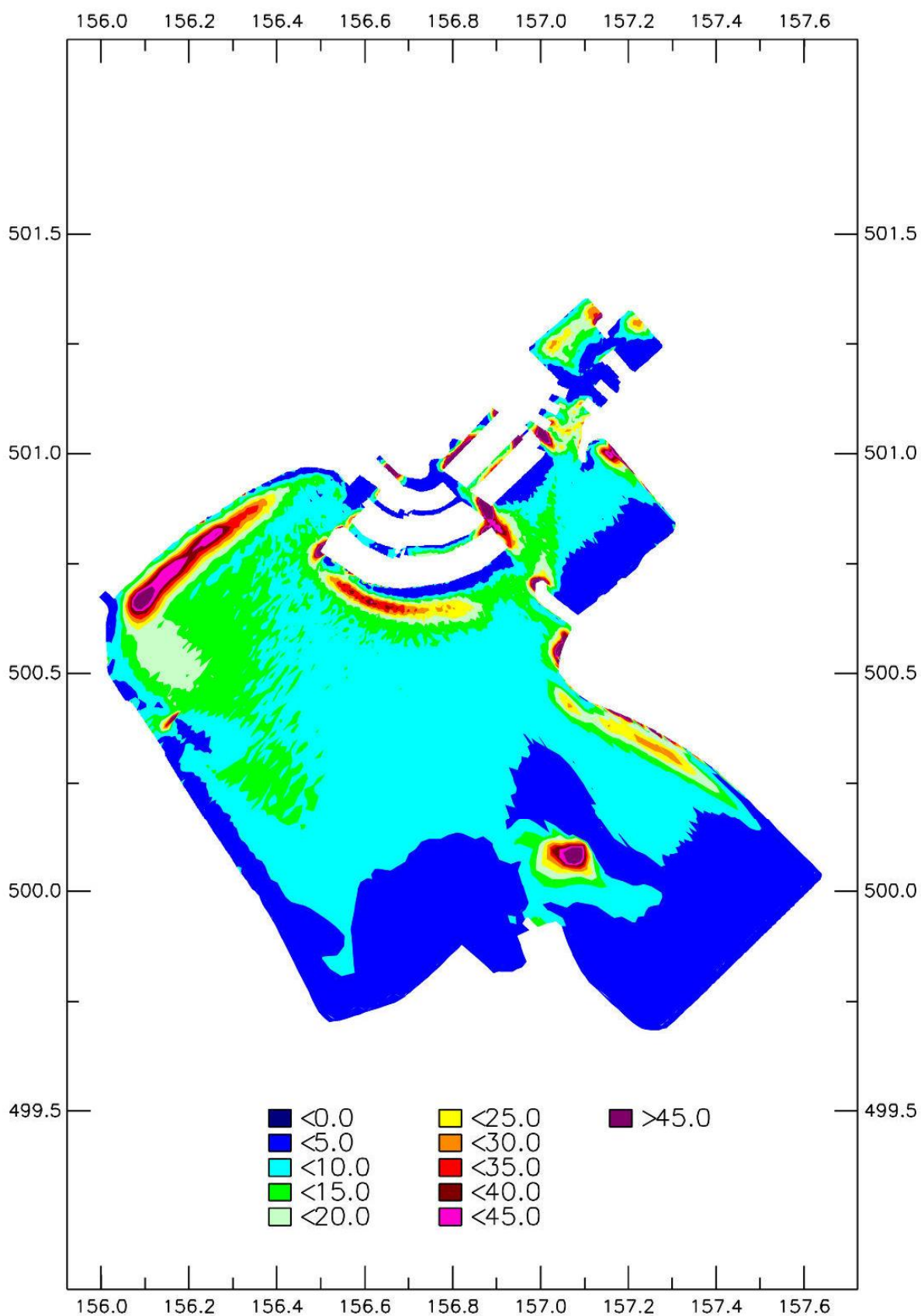
Referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 19-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



Referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 20-aug-2012 00u

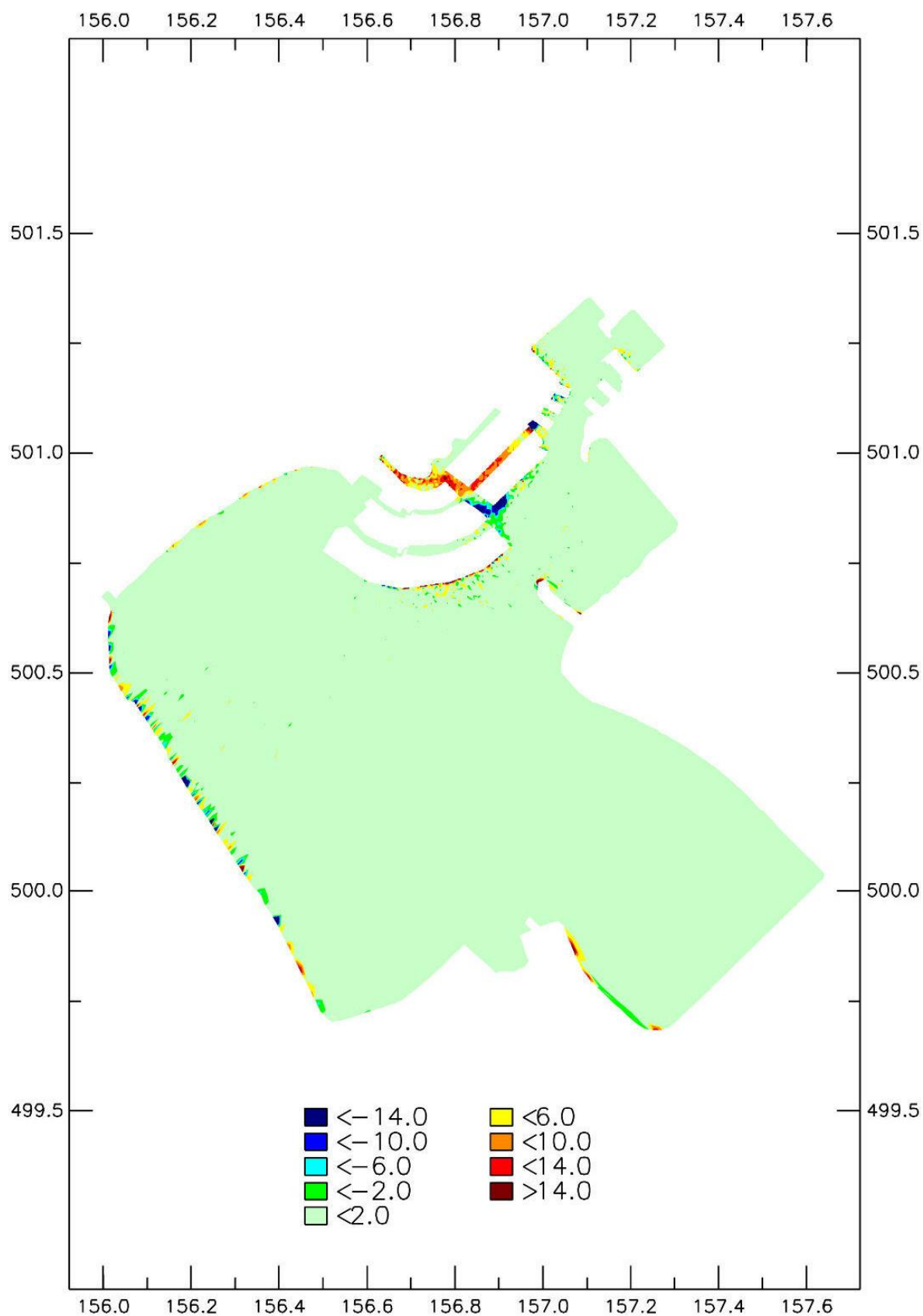
D-hor = 0.001 m²/s v = 60 m/dag



Referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 21-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

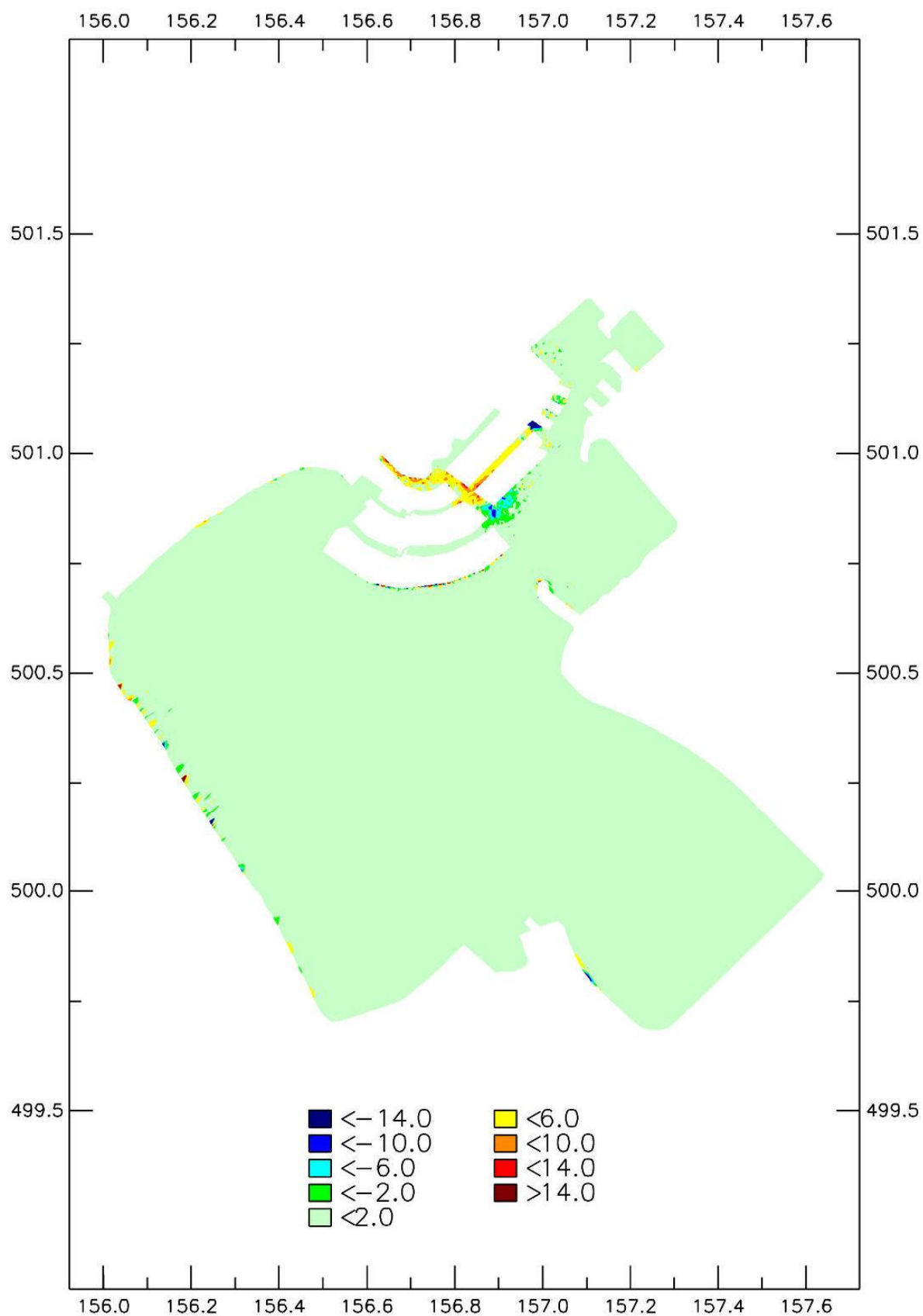
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
start deeltjes: 8-aug-2012 00u
berekenings resultaat: 15-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

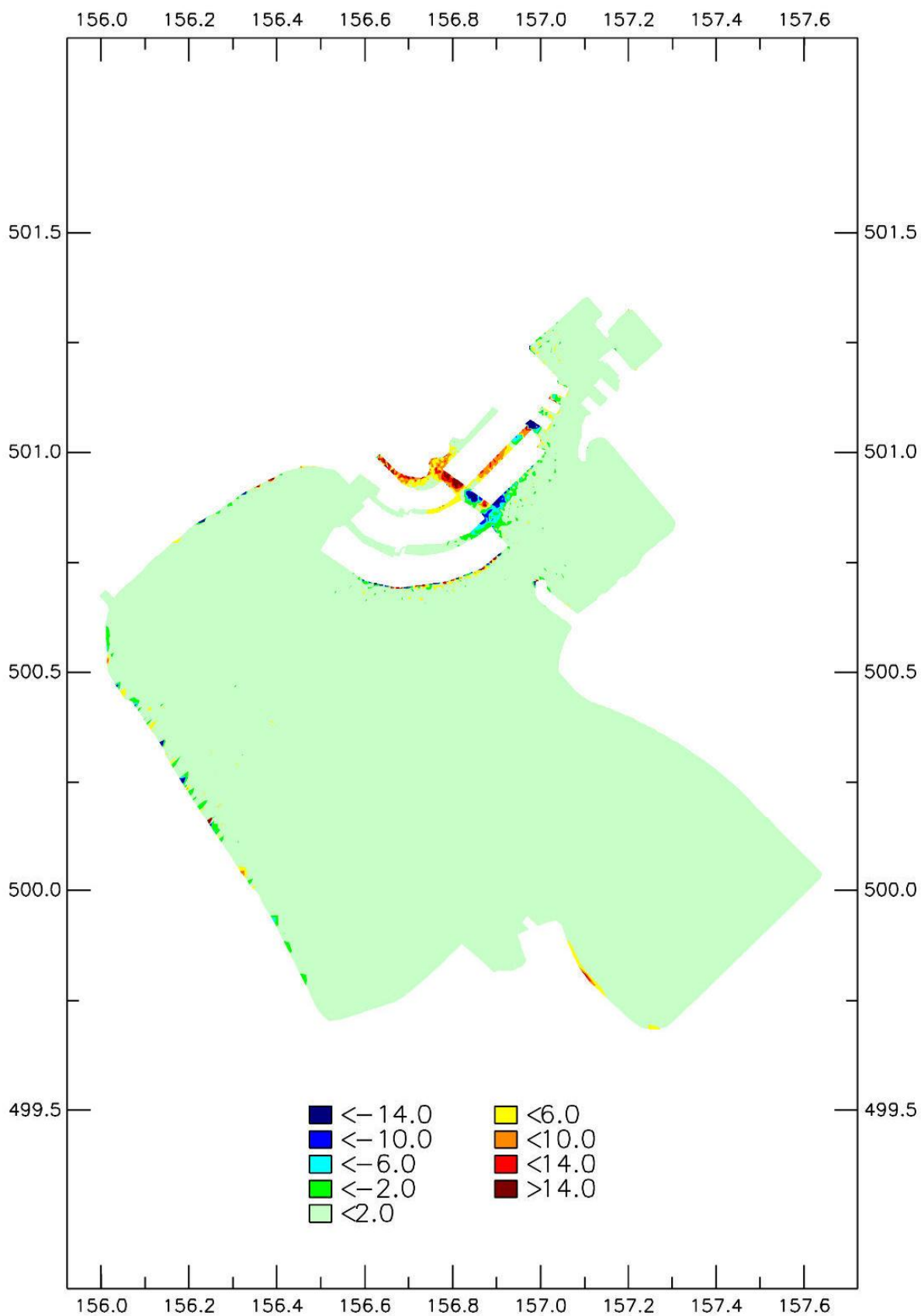
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
start deeltjes: 8-aug-2012 00u
berekenings resultaat: 16-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

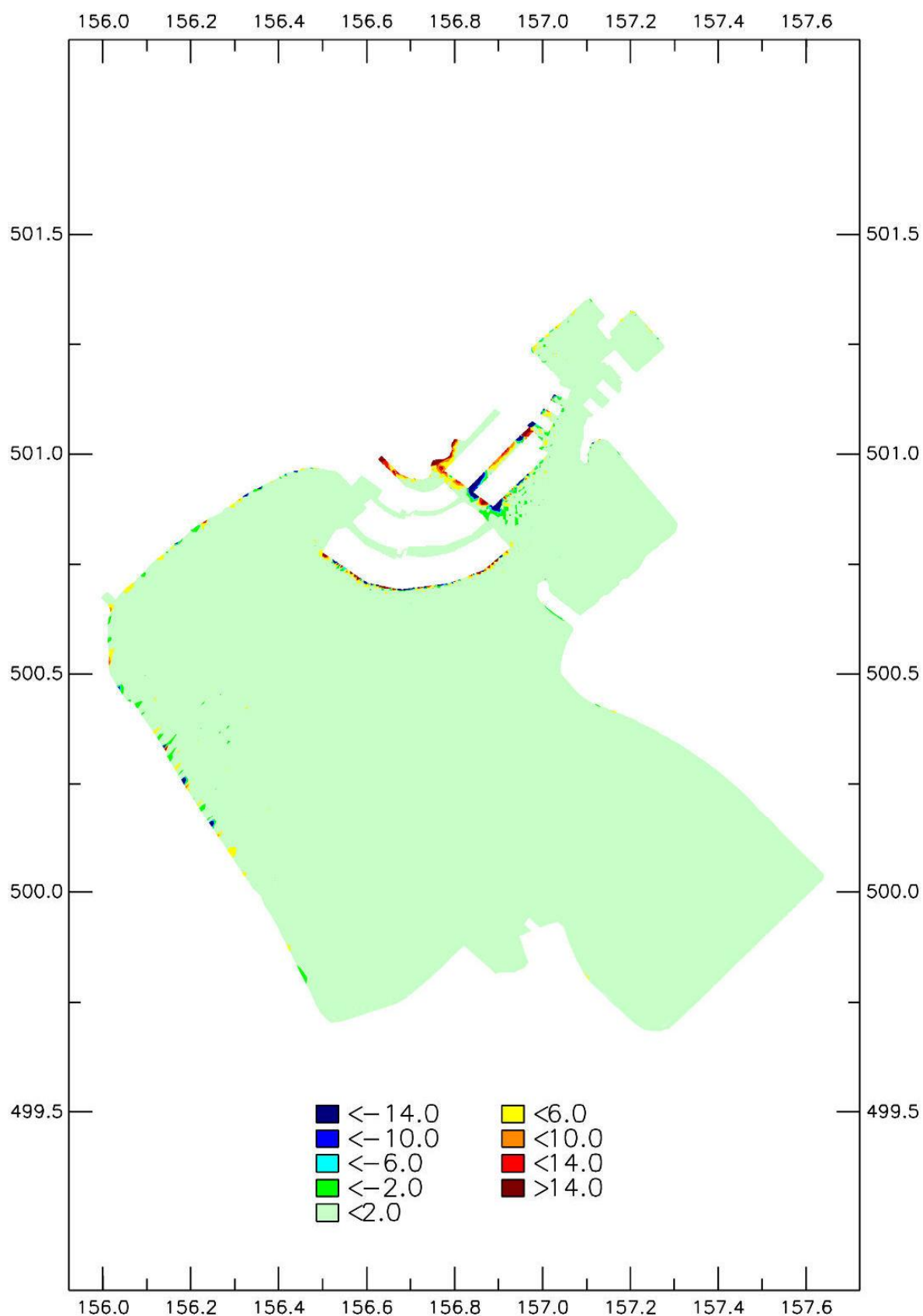
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 17-aug-2012 00u

D-hor = $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$

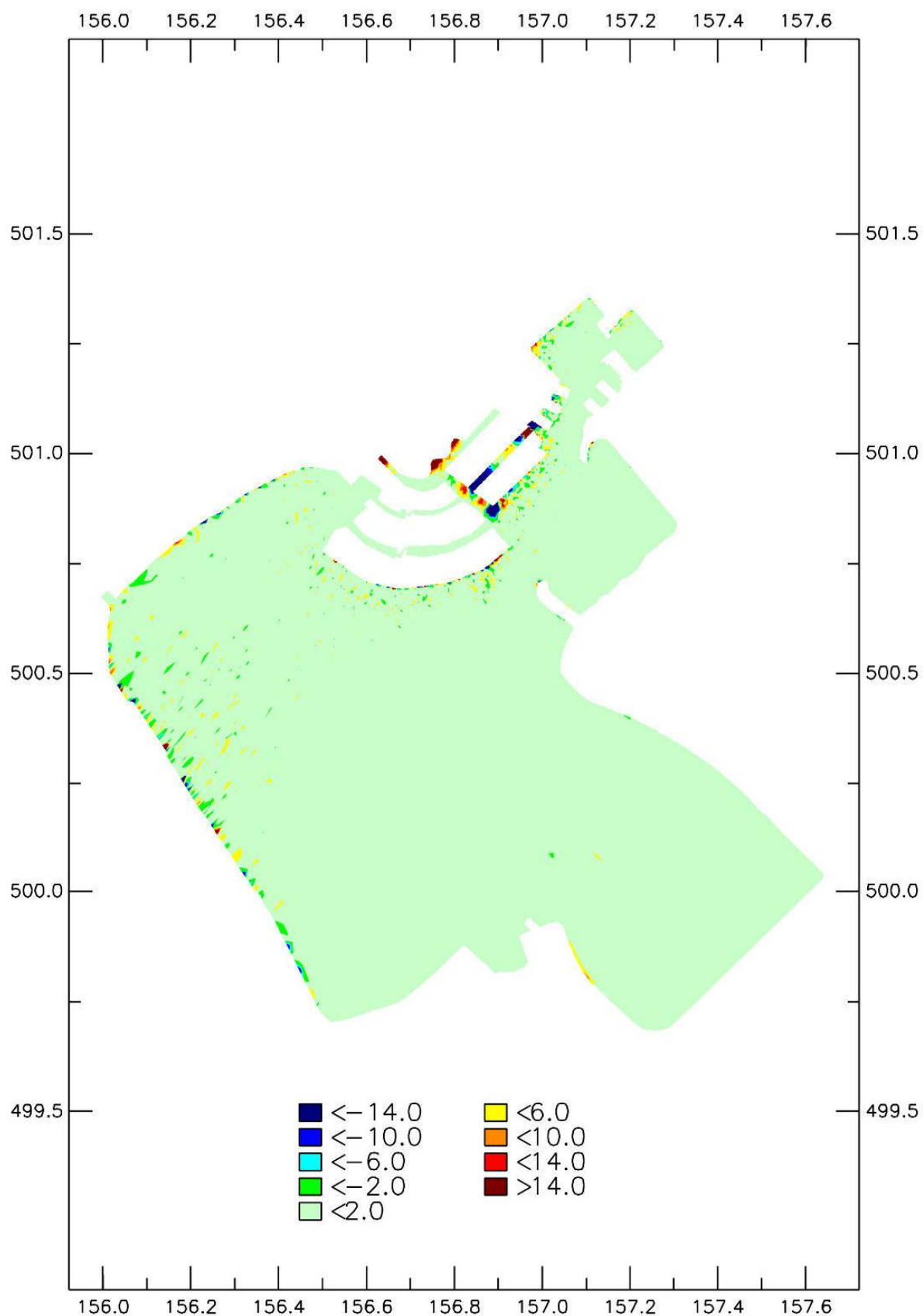
$v = 60 \text{ m/dag}$



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 18-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

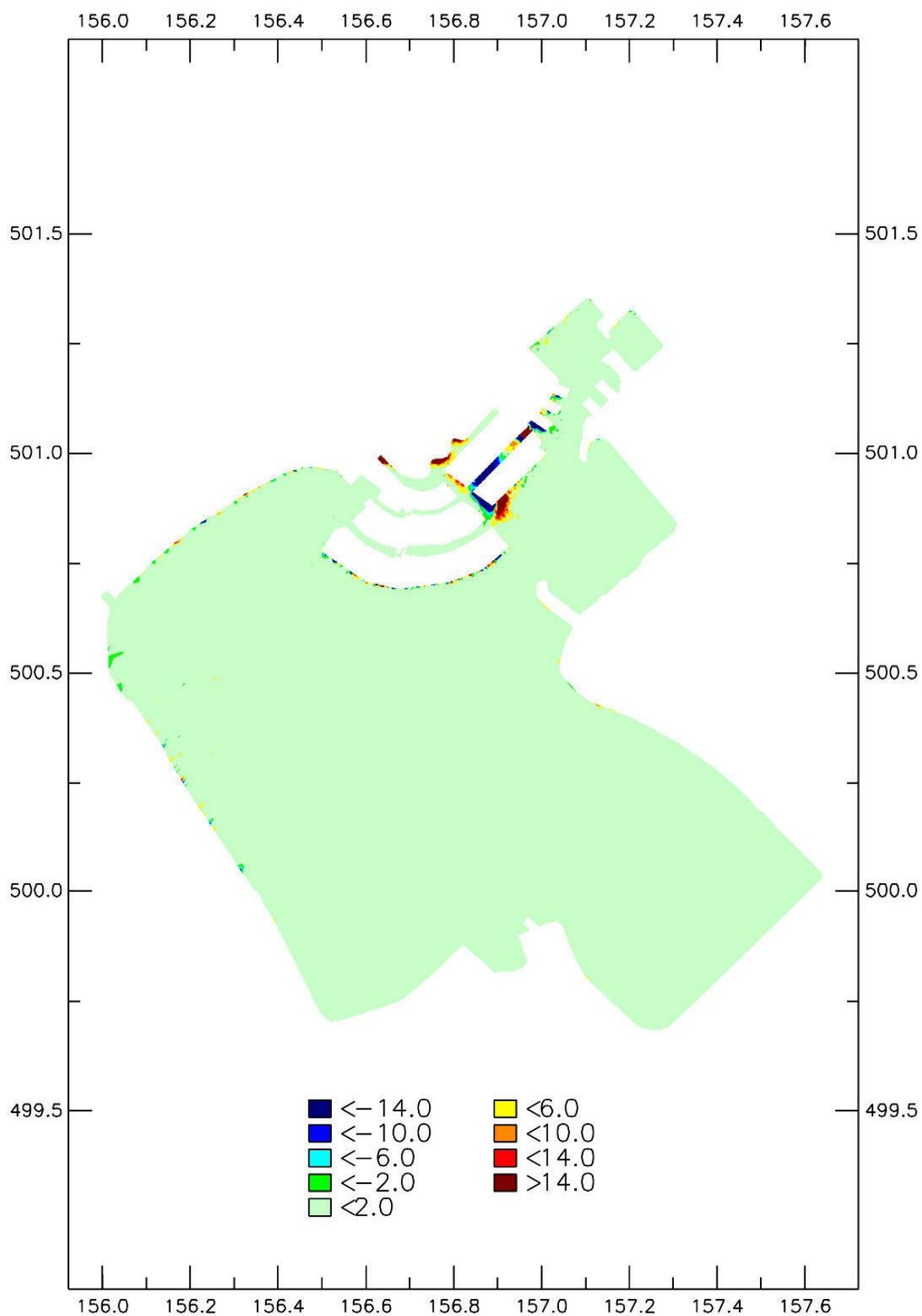
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 19-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

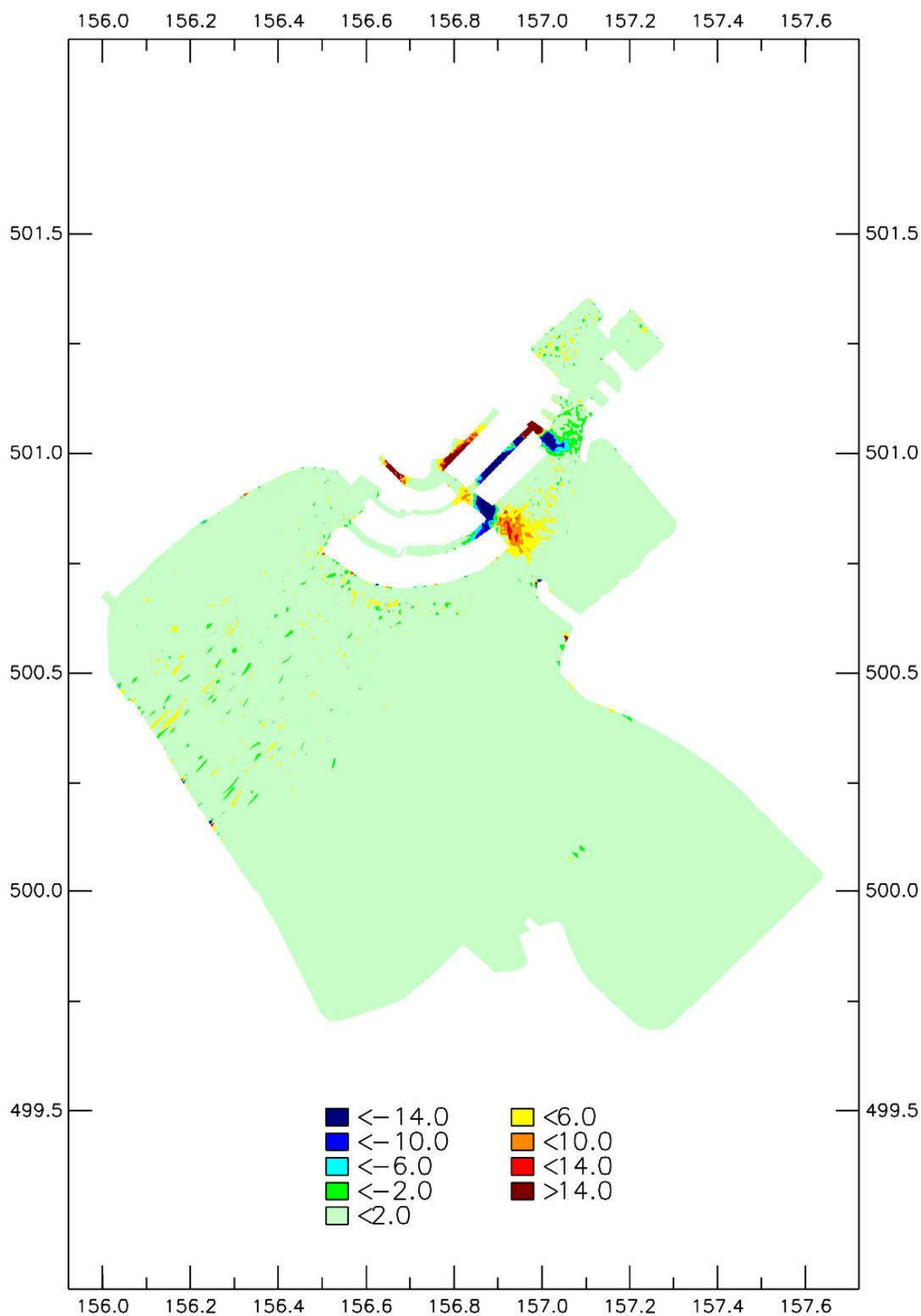
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 20-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

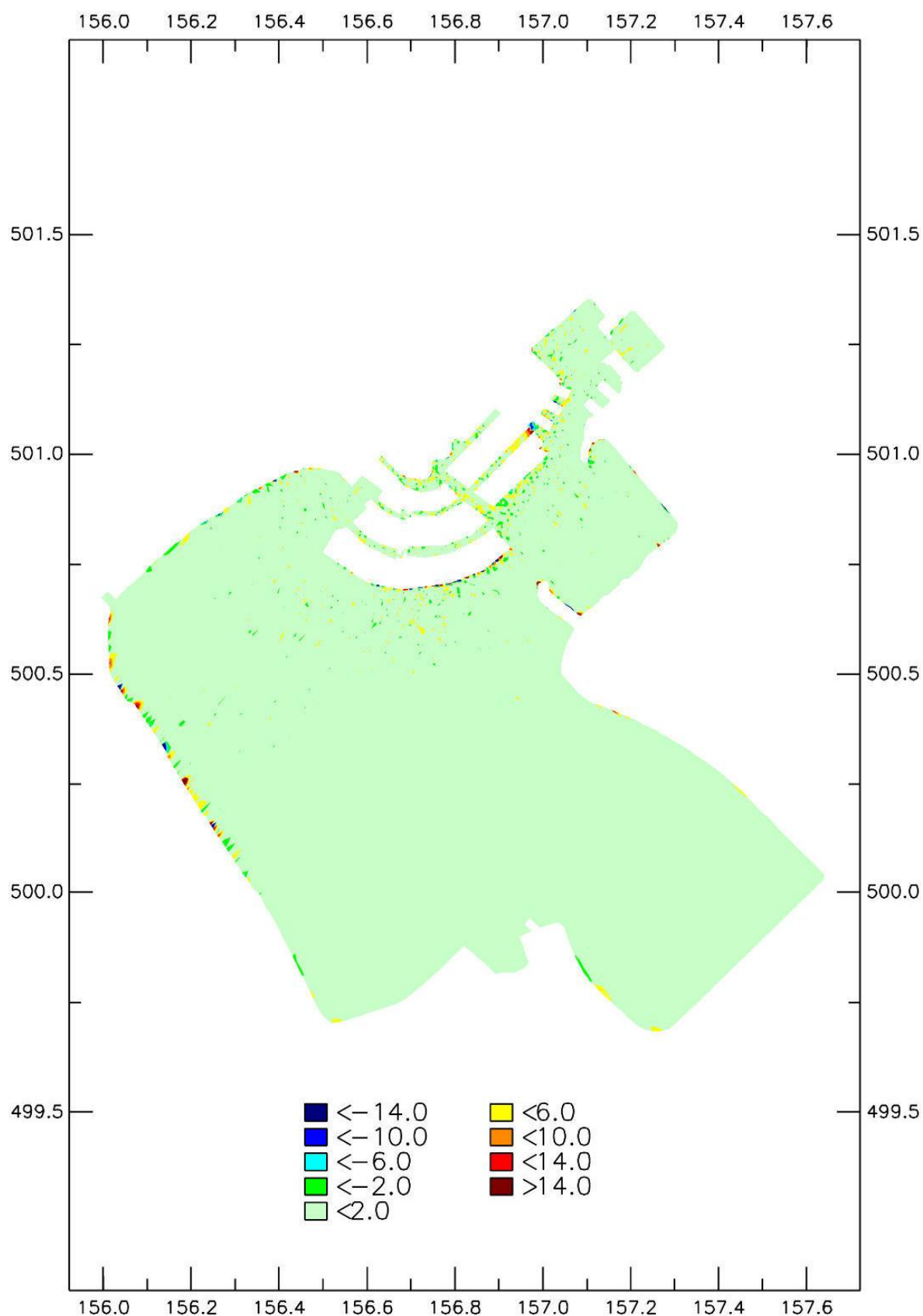
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 8-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 21-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

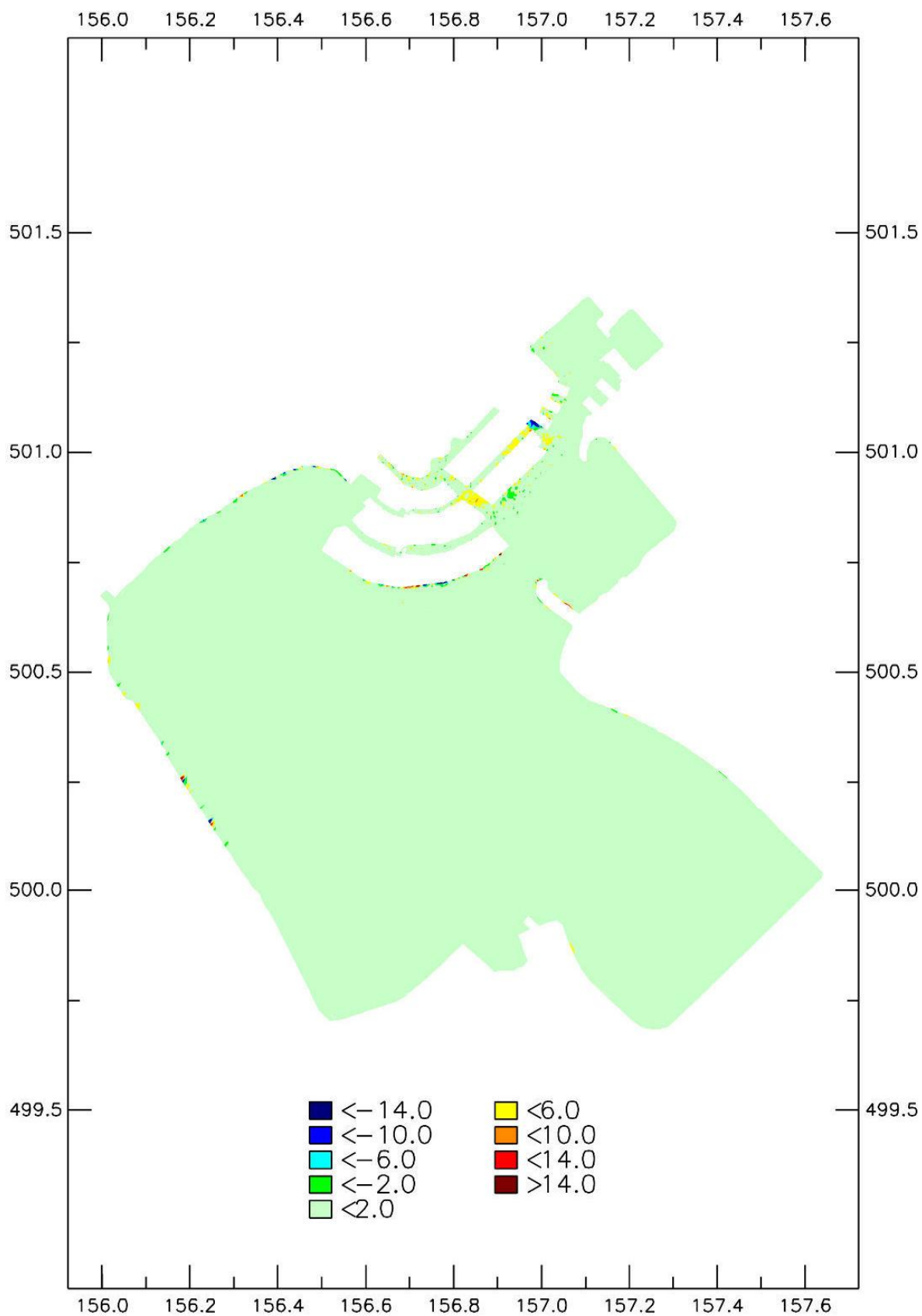
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 15-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

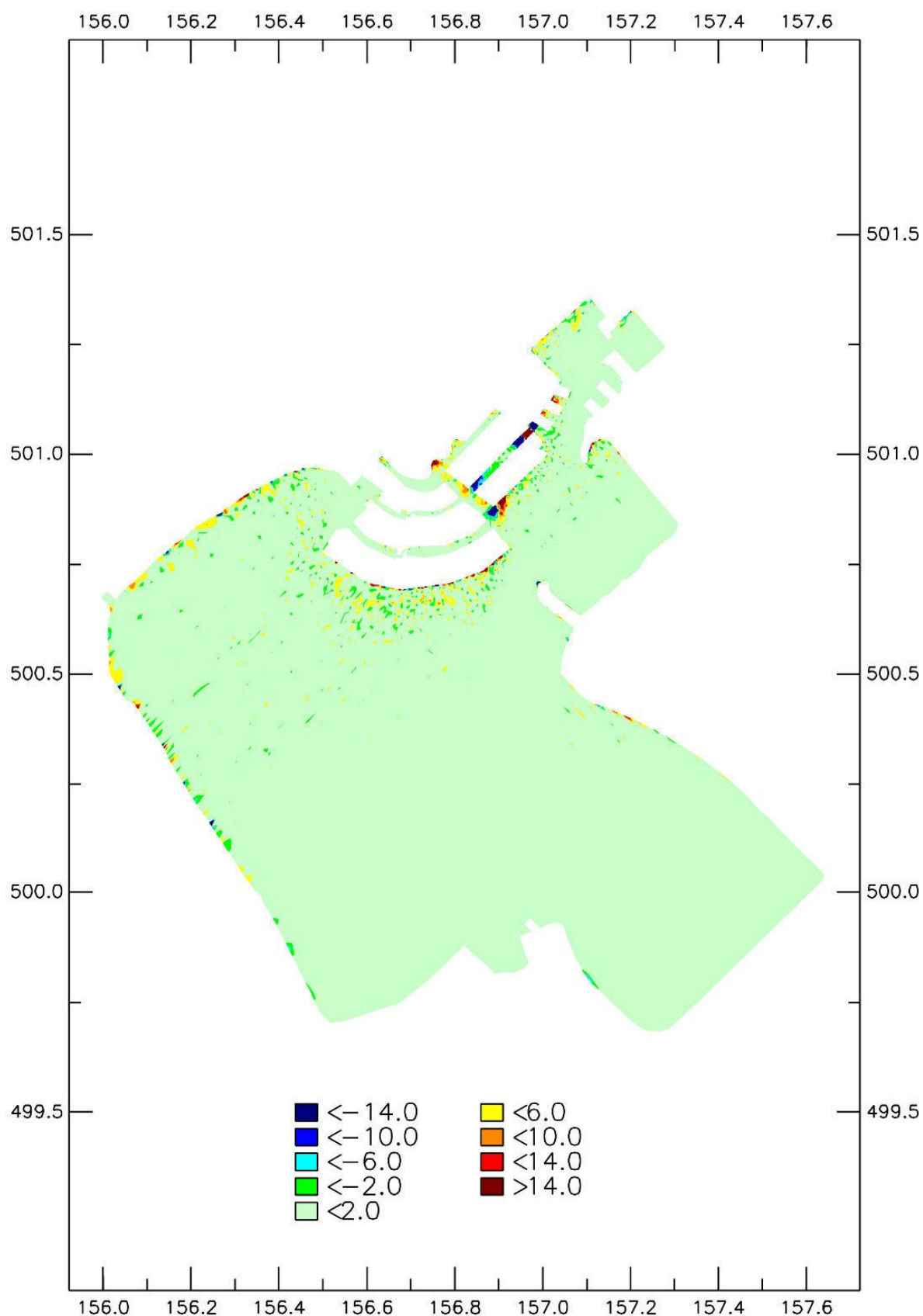
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 16-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

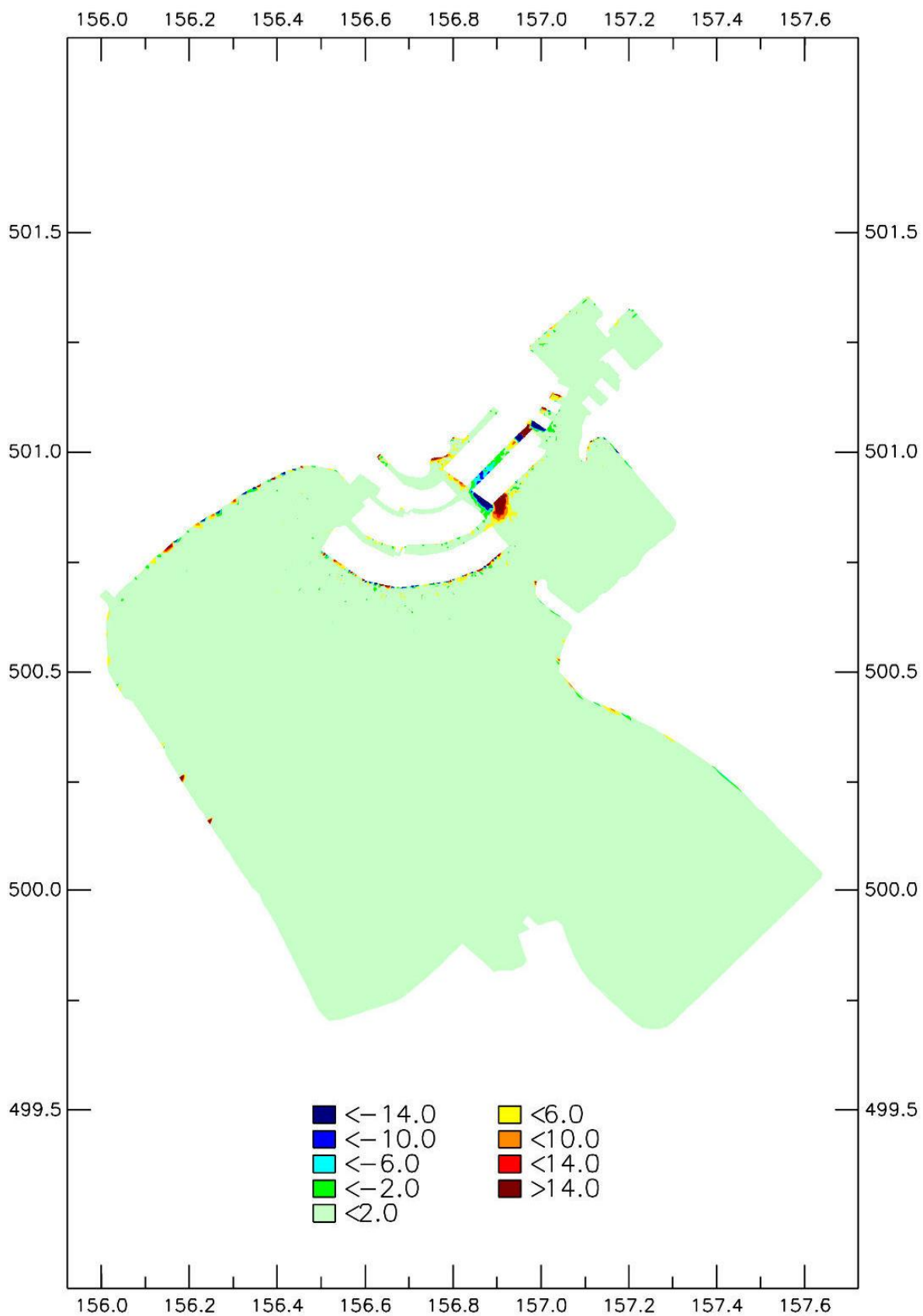
v = 60 m/dag



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 19-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

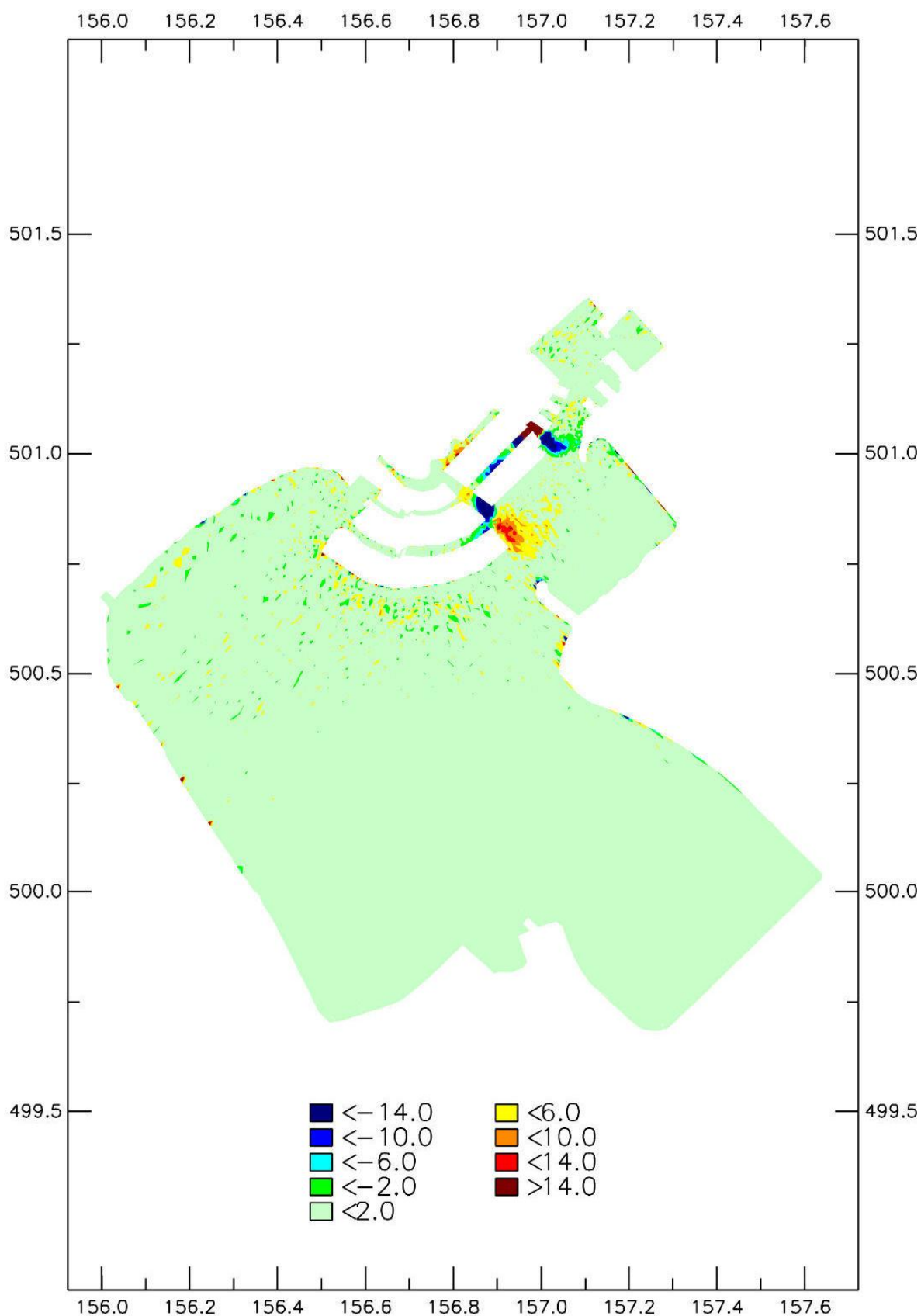
v = 60 m/dag



Verschil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 20-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

v = 60 m/dag

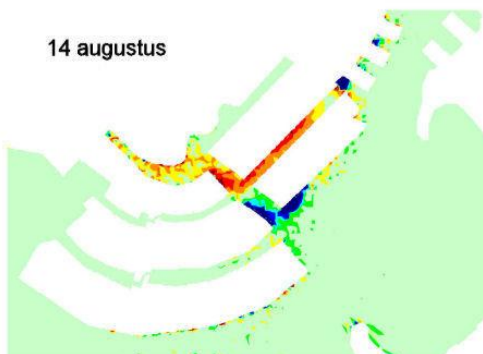


Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
 start deeltjes: 14-aug-2012 00u
 berekenings resultaat: 21-aug-2012 00u

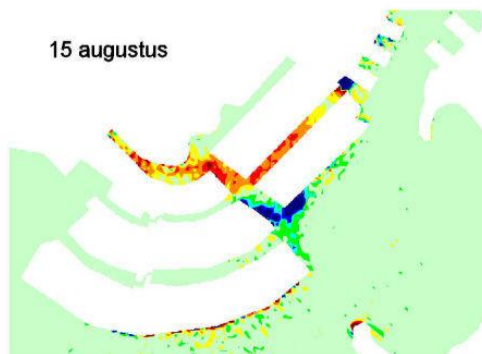
D-hor = 0.001 m²/s

v = 60 m/dag

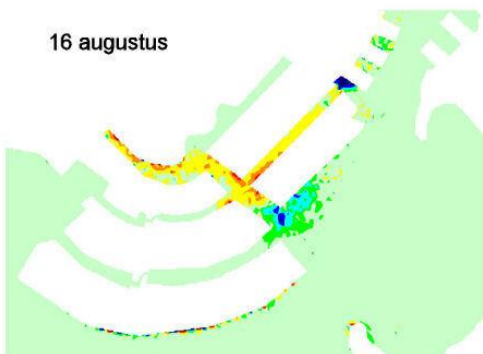
14 augustus



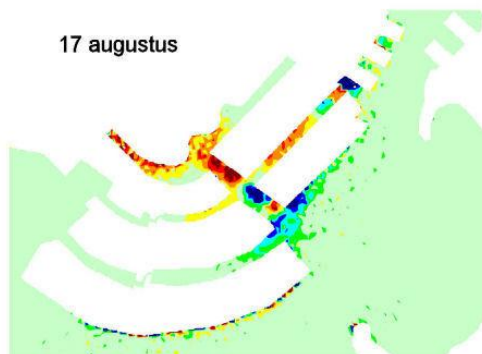
15 augustus



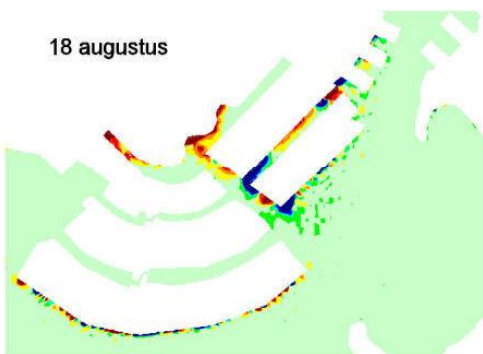
16 augustus



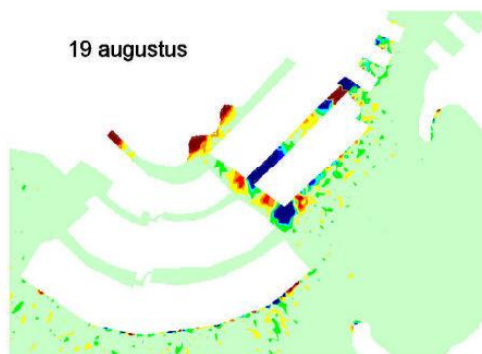
17 augustus



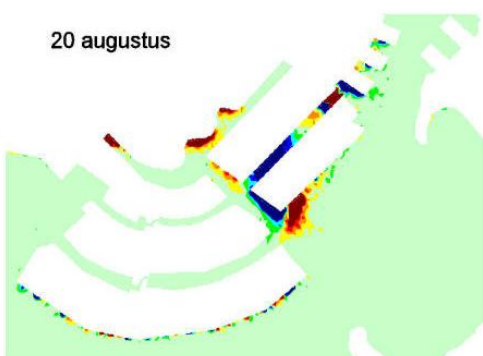
18 augustus



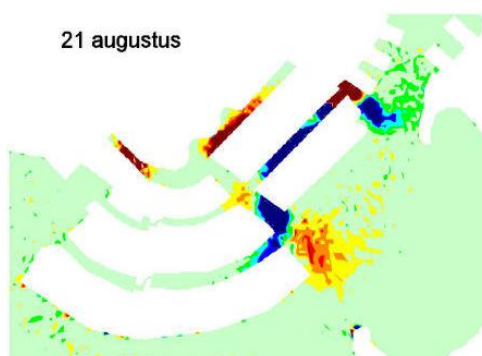
19 augustus



20 augustus



21 augustus



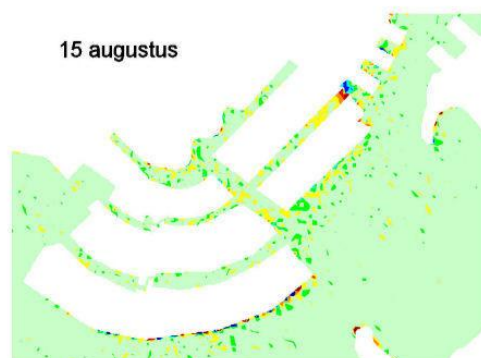
Verschil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
start deeltjes: 8-aug-2012 00u
close-up: 14-aug t/m 21-aug-2012 00u

$D_{\text{hor}} = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$

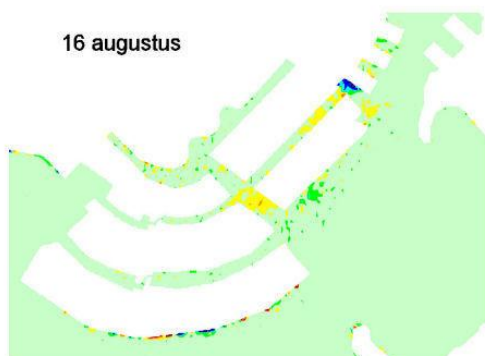
$v = 60 \text{ m/dag}$



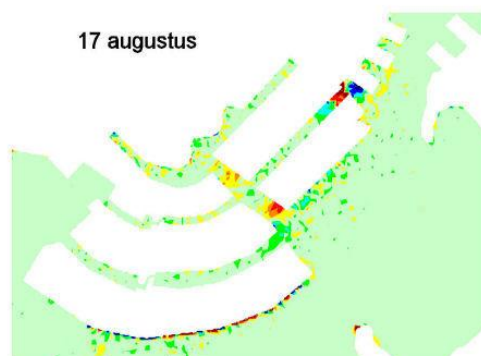
15 augustus



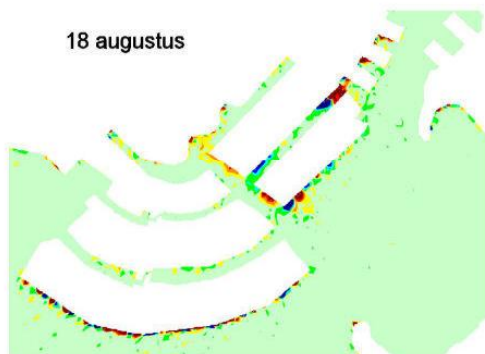
16 augustus



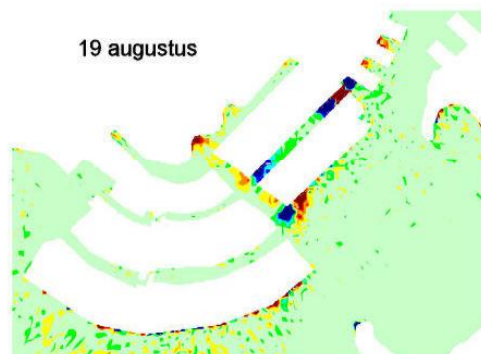
17 augustus



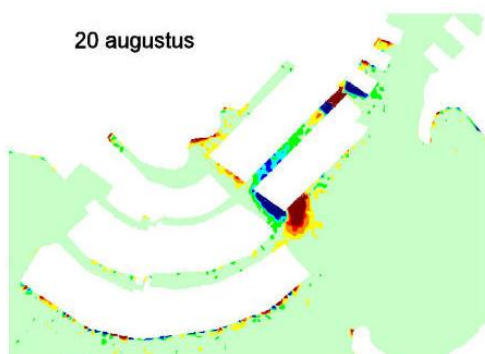
18 augustus



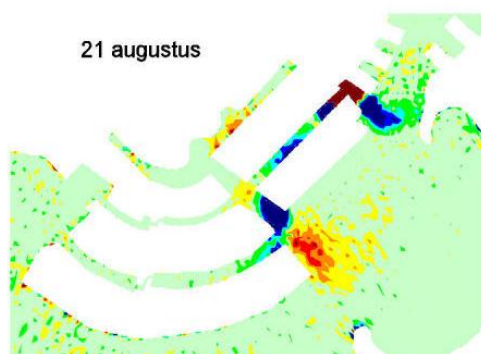
19 augustus



20 augustus



21 augustus



Vershil: situatie met brede duiker minus referentie situatie
start deeltjes: 14-aug-2012 00u
close-up: 15-aug t/m 21-aug-2012 00u

D-hor = 0.001 m²/s

v = 60 m/dag