

## **Notitie Markerzand**

**Aan**  
Van Oord

**Datum**  
31 mei 2013

**Aantal pagina's**  
22

**Van**  
Thijs van Kessel

**Doorkiesnummer**

**E-mail**  
thijs.vankessel@deltares.nl

**Onderwerp**  
memo Markerzand

---

### **1 Introductie**

Markerzand v.o.f. is voornemens zand te winnen in het zuidwesten van het Markermeer (zie Figuur 1). Hierbij wordt een slibvang van enkele tientallen meters diep gecreëerd, en het is de verwachting dat hierin slib uit het Markermeer neerslaat. Mogelijk leidt dit tot een afname van de sedimentconcentratie in het Markermeer.

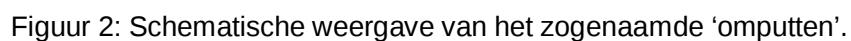
De verdieping zal bestaan uit een geul van 350 m breed en 12 km lang. De lokale waterdiepte is 4 m. De bovenste circa 10 meter van de bodem bestaat uit klei en veen, wat verwijderd wordt. Vervolgens wordt het onderliggende zand tot een diepte van -50 m gewonnen. De toplaag van klei en veen wordt teruggestort, wat door een toename in volume de put opvult tot een diepte van -30 m. Afgraven van de geul gebeurt in secties van 1500 m (met een lengte van 12 km overeenkomend met 8 deelsecties), welke stapsgewijs worden afgegraven. Vanaf de tweede put wordt de bovenlaag in de vorige put teruggestort. De looptijd van het project is 20 jaar: elke 2.5 jaar wordt daarom een deelsectie gewonnen (zie Figuur 2). Het gaat in totaal om 60 miljoen m<sup>3</sup> zand, te winnen in de periode 2014 – 2045.

Markerzand v.o.f. heeft aan Deltares gevraagd een eerste inschatting te geven van:

- (1) de aanslibbingssnelheid in het zandwinningsgebied, en
- (2) het effect van lokale slibonttrekking op de interne sedimentbalans van het Markermeer

Deltares geeft de inschatting van deze effecten door middel van een beknopte bureau- en modelstudie. De resultaten van deze studie zijn in deze notitie verwoord, die achtereenvolgens de volgende aspecten beschrijft:

1. beknopt literatuuroverzicht over en beschrijving van de slibdynamiek in het Markermeer
2. beknopte beschrijving van het slibmodel
3. kwantificering van effect op slibconcentratie op basis van modelberekeningen
4. kwantificering van aanslibbingssnelheid op basis van modelberekeningen
5. conclusies en aanbevelingen



## 2 Beknopt literatuuroverzicht en beschrijving slibdynamiek

Het Markermeer is een ondiep meer (gemiddelde diepte 4 m) met een afmeting van circa 30 × 30 km. Het meer is ontstaan in 1975 na de aanleg van de Houtribdijk tussen Enkhuizen en Lelystad. De uitwisseling van water met de omgeving is beperkt, waardoor de gemiddelde verblijftijd van water in het meer lang is (circa 1.5 jaar). Het peil van het Markermeer wordt actief beheerd. Het streefpeil in de zomer is –0.2 m NAP en in de winter –0.4 m NAP. De waterbeweging in het Markermeer wordt hoofdzakelijk bepaald door de wind. Zowel windgolven als windgedreven stroming zijn van belang voor het opwoelen en verplaatsen van slib. In perioden met weinig wind zakt het slib geleidelijk naar de bodem en neemt de troebelheid af. In periode met veel wind wervelt het slib weer op en neemt de troebelheid toe. De jaargemiddelde slibconcentratie in het midden van het meer is circa 50 mg/l, tijdens harde wind vaak meer dan 100 mg/l en tijdens kalm weer soms minder dan 10 mg/l.

In de jaren '80 en begin jaren '90 is er veel onderzoek gedaan aan het Markermeer. Wat betreft de fysische processen (waterbeweging, slibdynamica) en de basis van de ecologische effectketen (lichtklimaat, primaire productie) wordt een goed overzicht gegeven door Van Duin (1992). Tussen medio jaren '90 en medio jaren '00 is er minder aandacht voor het Markermeer met een navenant effect op de onderzoeksagenda. Sindsdien staat het Markermeer opnieuw in de belangstelling, resulterend in een niet aflatende stroom rapporten. Aan het begin van deze nieuwe reeks staan o.a. de quickscan uitgevoerd door Witteveen & Bos (2004) en de hierop volgende verdiepingsslag door Royal Haskoning en WL Delft Hydraulics (Van Ledden et al., 2006) in opdracht van het toenmalige RIZA.

De aanleiding voor deze hernieuwde belangstelling is de constatering dat gestelde natuurdoelen in het Markermeer niet worden gehaald, hetgeen onder andere wordt toegeschreven aan de hoge troebelheid van het meer. De oplossing van de problemen wordt daarom met name gezocht in de beïnvloeding van de slibdynamiek.

Om maatregelen voor de beïnvloeding van de slibdynamiek kwantitatief te kunnen onderbouwen, is door Deltares in opdracht van de inmiddels opgerichte Waterdienst een slibmodel ontwikkeld gebaseerd op 3D-hydrodynamica (Van Kessel et al, 2009). Dit model berekent de verspreiding van slib in de waterkolom en in de bodem (bestaande uit een flufflaag en een meer geconsolideerde laag) onder invloed van stroming en golven. Het model is inmiddels een aantal keer ingezet om het effect van diverse maatregelen door te rekenen, waaronder de invloed van peilbeheer, luwtestructuren, putten en geulen (o.a. Boderie et al., 2010; Boderie en Genseberger, 2010).

Het ontwikkelde model is goed in staat om de waargenomen ruimtelijke en temporele variaties van de slibconcentratie te reproduceren. Modelvalidatie van de temporele component heeft plaatsgevonden op basis van hoogfrequente metingen van de slibconcentratie in de periode 2007-2008. Validatie van de ruimtelijke component heeft plaatsgevonden op basis van remote sensing beelden (Van Kessel et al., 2009).

Een kennisleemte is het langetermijngedrag van slib in het Markermeer. In het model is aangenomen dat de totale slibvoorraad constant is (N.B. de verspreiding van deze voorraad

over de ruimte – bestaande uit waterkolom, flufflaag en bodemlaag varieert wel afhankelijk van de windcondities) en dat de slibeigenschappen ook constant zijn (b.v. valsnelheid, kritische schuifspanning voor erosie). Op de korte termijn is dit een redelijke aanname, maar op de lange termijn is deze aanname mogelijk niet correct.

Er loopt een onderzoekstraject aan de TU Delft naar deze langetermijneffecten (De Lucas Pardo, 2013). Hierin worden vragen beantwoord als 1) 'Hoe ontwikkelt de slibvoorraad in het Markermeer zich in de tijd?' en 2) 'Hoe ontwikkelen slibeigenschappen (valsnelheid, erosiebestendigheid) zich in de tijd?'. De bevindingen uit dit traject zullen op termijn in het slibmodel worden verwerkt, maar op dit moment zijn resultaten nog niet beschikbaar. Dit is vooral een beperking indien het model gebruikt wordt voor de berekening van de autonome ontwikkeling op de lange termijn. Het huidige model voorspelt een stabiel beeld van de slibdynamiek, mits het windklimaat niet wijzigt. Deze beperking is op het doorrekenen van ingrepen veel minder van toepassing, omdat de berekening met ingreep wordt vergeleken met de berekening zonder ingreep. Omdat de autonome ontwikkeling in beide berekeningen op gelijke wijze is verdisconteerd, valt deze grotendeels weg in het effect van de ingreep.

Voor de huidige studie relevante ingrepen uit het verleden zijn het graven van proefputten in de jaren '80 (zie Figuur 3) en de onderhoudsbehoefte van de vaargeul Amsterdam – Lelystad in het afgelopen decennium.

De proefputten A en B in de jaren '80 in het Markermeer zijn cirkelvormig aangelegd met een talud van 1:10 (Put A) en 1:3 (Put B). De putten hadden een gezamenlijke oppervlakte van circa  $0.5 \times 10^6 \text{ m}^2$  en een aanlegdiepte van respectievelijk  $-21.5 \text{ m NAP}$  en  $-20 \text{ m NAP}$ . De waargenomen aanslibingssnelheid bedroeg circa  $1.5 - 2 \text{ m}$  per jaar totdat de diepte was afgenomen tot minder dan  $-8 \text{ m NAP}$  (zie Figuur 4). Daarna nam de aanslibingssnelheid af door een combinatie van resuspensie vanuit de put en inklinking van het afgezette slibpakket. Helaas is de dichtheid waarmee het materiaal is afgezet onbekend, maar vermoedelijk is deze dichtheid laag en heeft de afzetting een hoog watergehalte. Pas bij een veronderstelde lage drogestofconcentratie van  $100 \text{ kg/m}^3$  (ongeveer bulkdichtheid  $1060 \text{ kg/m}^3$ ) is er een redelijke overeenstemming tussen waarnemingen uit sedimentvallen ( $0.4 \text{ kg/dag}$  volgens Van Duin, 1992) en de aanslibingssnelheid in putten. Meer veldmetingen naar deze dichtheid worden aanbevolen.

Het vermoeden is daarom dat naast sedimentatie vanuit suspensie ook dichtheidstromingen een rol spelen bij het vollopen van de putten en geulen. Hierdoor neemt de zogenaamde 'trapping efficiency' van de put of geul toe, m.a.w. een groter deel van het passerende slib wordt ingevangen. Het is aannemelijk dat de depositieflux tijdens windrijke perioden zo meer dan kan verdubbelen. Dichtheidsgedreven stroming wordt echter niet gemodelleerd in het slibmodel, waardoor depositie wordt onderschat. Een tweede oorzaak hiervoor is dat de wat grovere sedimentfractie die uitsluitend tijdens harde wind dichtbij de bodem in suspensie is, waarschijnlijk in het model is ondervertegenwoordigd. Het model is immers gekalibreerd aan de hand van OBS (Optical Back Scatter) data en deze meettechniek is minder gevoelig voor grovere fracties. Concentratie metingen dichtbij de bodem van het Markermeer zijn slechts voor korte periodes beschikbaar (Vijverberg, 2008).

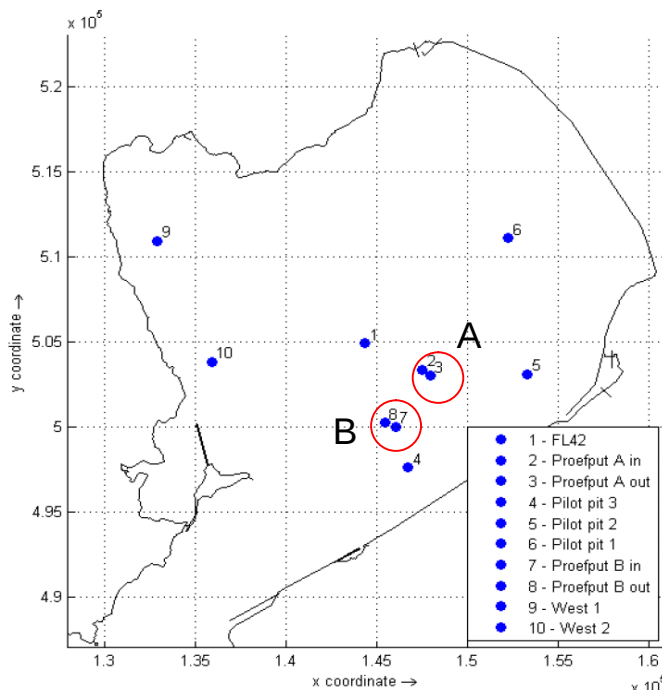
Hiernaast is er ook informatie over de aanslibingssnelheid van de vaargeul Amsterdam – Lelystad (Figuur 5). Voor een diepte groter dan  $-10 \text{ m NAP}$  bedraagt de aanslibingssnelheid circa  $1 - 1.5 \text{ m}$  per jaar, bij geringere diepte neemt deze af door resuspensie. Doordat een geul meer stroming trekt dan een put, is het logisch dat de diepte waarbij resuspensie niet langer

verwaarloosbaar is voor een geul groter is dan voor een put. Bovendien kan in een (vaar)geul ook resuspensie optreden door scheepvaart. De geringere maximale aanslibingssnelheid voor een diepte  $> -10$  m NAP wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat het slibaanbod langs de vaargeul Amsterdam – Lelystad kleiner is dan ter hoogte van de proefputten (volgens zowel metingen als het slibmodel is de jaargemiddelde slibconcentratie hier wat lager).

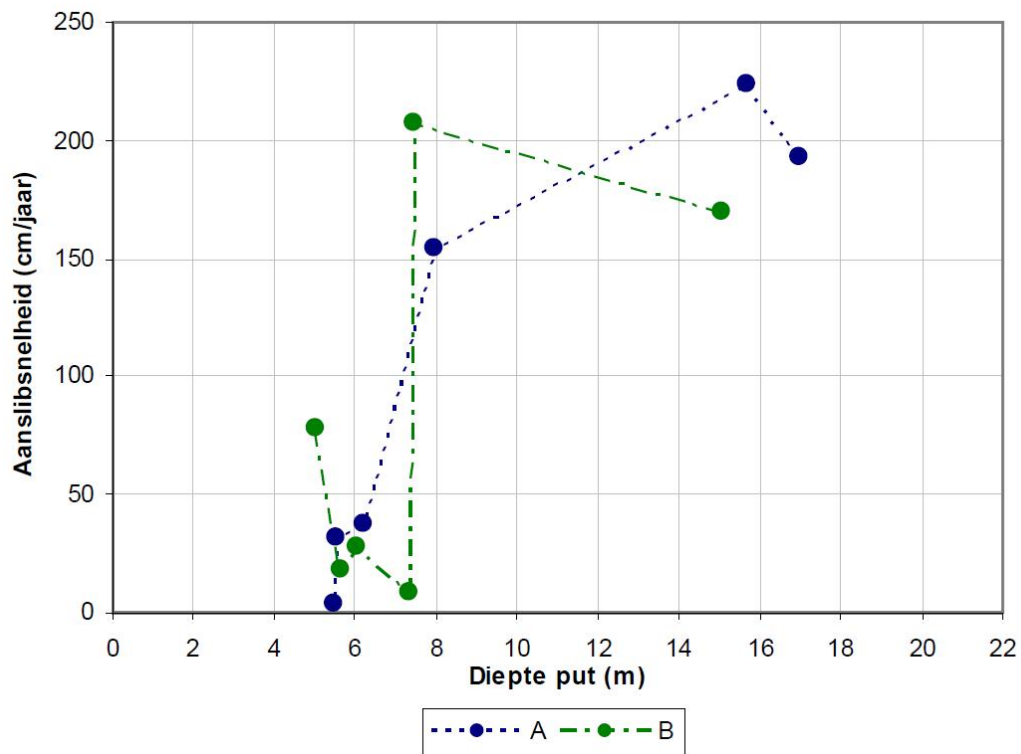
Uit een analyse van langjarige metingen naar de slibconcentratie in het Markermeer blijkt dat deze geen significante trend vertoont, m.a.w. op dit moment wijkt de gemiddelde slibconcentratie niet wezenlijk af van die van 10 of 20 jaar geleden. Niettemin is er wel sprake van een aanmerkelijke variatie tussen de jaren, afhankelijk van het opgetreden windklimaat of andere factoren. Hoewel de slibconcentratie min of meer constant is, neemt het doorzicht geleidelijk wel af (al zet deze trend de afgelopen paar jaar niet door). Vermoedelijk zijn de eigenschappen van het slib dus niet constant, er wordt een toename van het organische gehalte waargenomen. Dezelfde hoeveelheid slib kan in geval van een kleinere vloggrootte voor meer vertroebeling zorgen.

Gezien de grote ontwerpdiepte van de nieuwe geul (tot  $-50$  m NAP) kan mogelijk stratificatie (gelaagdheid) in de put optreden, waarbij nauwelijks meer uitwisseling van water plaatsvindt tussen de onder- en bovenzijde van de put. Een beschouwing van deze effecten is echter geen onderdeel van deze studie. Stratificatie vermindert het slibinvangende vermogen van een geul niet en is daarom minder relevant voor dit onderdeel.

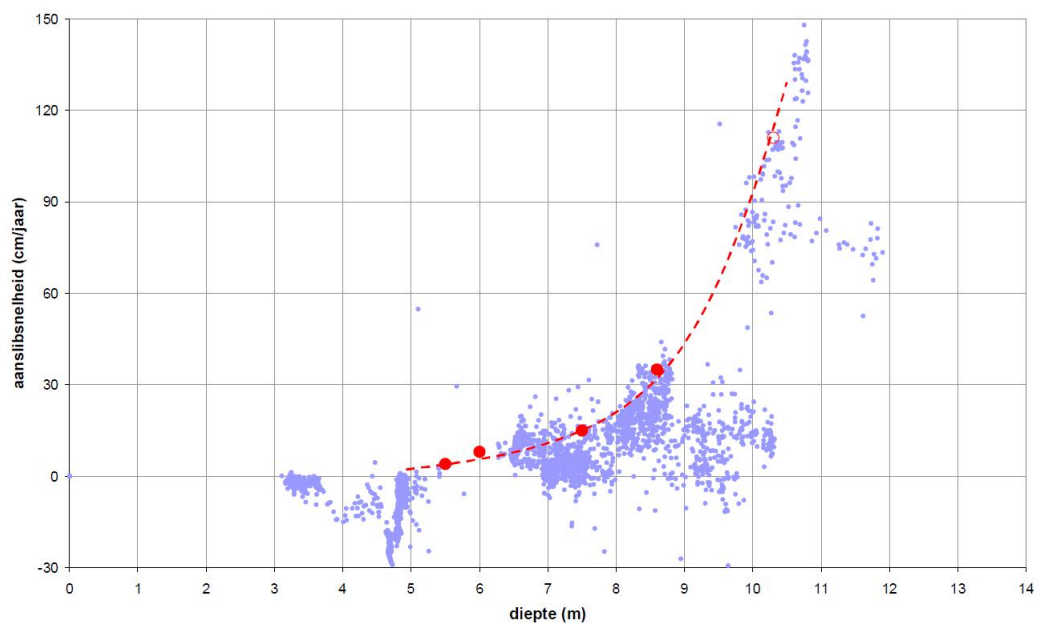
Een ander aspect dat hier verder niet wordt beschouwd is de invloed van de zandwinning op de grondwaterstroming. De ontwerpdiepte is zodanig dat het watervoerende pakket kan worden aangesneden. Hierdoor moet rekening worden gehouden met tijdelijke extra infiltratie, totdat door de afzetting van slib de doorlatendheid voldoende is afgenomen (Oude Essink et al., 2010).



Figuur 3: Locatie van proefputten A en B in het Markermeer. Naar Vijverberg (2008). N.B. de grootte van de rode cirkels is niet op schaal.



Figuur 4: Waargenomen aanslibbingssnelheid in proefputten A en B als functie van de diepte (t.o.v. NAP). Voor de locatie van putten A en B zie Figuur 3. Data



Figuur 5: Waargenomen (blauwe puntenwolk) aanslibbingssnelheid in de vaargeul Amsterdam-Lelystad als functie van de diepte (t.o.v. NAP) (Boderie et al., 2010).

### 3 Beknopte beschrijving van het slibmodel

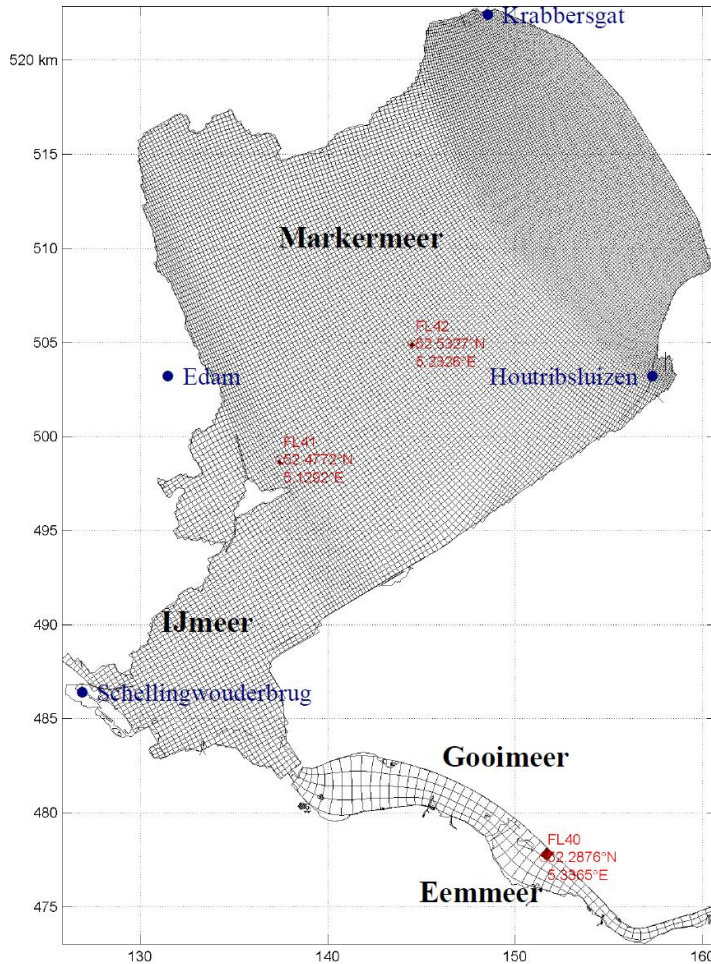
Het slibmodel is gebaseerd op een 3D-hydrodynamisch model van het Markermeer. Figuur 6 toont het gebruikte modelrooster. De verticale component is vertegenwoordigd door 7 lagen die ieder circa 15% van de waterdiepte vertegenwoordigen. De waterbeweging wordt aangedreven door de wind. Voor de huidige berekeningen zijn de uurgemiddelde waarden gebruikt voor het volledige jaar 2006. Hierdoor zijn de resultaten beschikbaar voor allerlei condities, zodat het model recht doet aan de in werkelijkheid optredende dynamiek van de wind en stroming.

Golven worden gemodelleerd met een zogenaamde 'strijklengtebenadering', waarbij gegeven de lokale waterdiepte, de windsnelheid en de strijklengte vanaf de bovenwindse oever (dus afhankelijk van de windrichting) de evenwichtsgolfhoogte en –periode wordt berekend. Hieruit wordt de golfgedreven bodemschuifspanning berekend die in combinatie met de stromingsgedreven bodemschuifspanning zorgt voor resuspensie mits de kritische schuifspanning voor resuspensie van het slib op de bodem wordt overschreden.

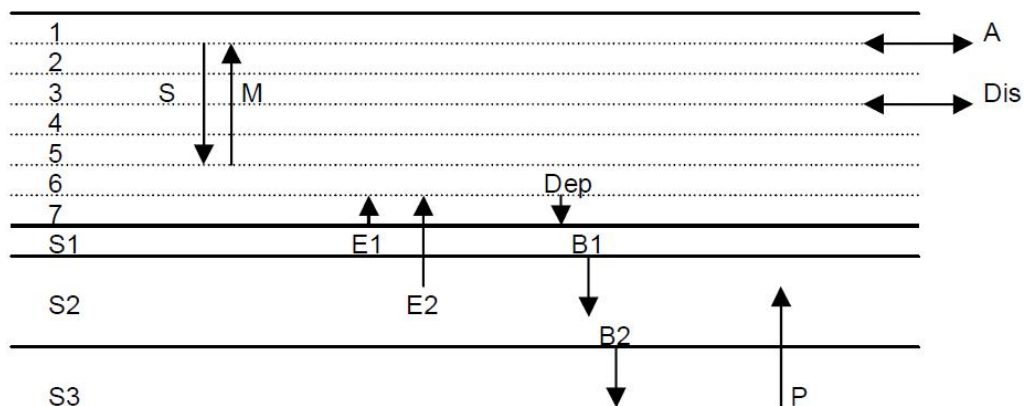
Het slib kan zich onder invloed van de waterbeweging (stroming en golven) vrijelijk bewegen door het model in horizontale en verticale richting (Figuur 7). In de vertikaal kan het slib zich bevinden in de waterkolom (lagen 1 t/m 7) of in de bodem (lagen S1 t/m S3). Laag S1 representeert de zogenaamde flufflaag, een dunne, zachte sliblaag op de bodem die zeer makkelijk resuspendeert. Laag S2 representeert de hardere bodem daaronder waarvandaan resuspensie minder snel optreedt (maar bij harde wind nog wel mogelijk is). Omdat in het huidige model de termen P (productie vanuit laag S3) en B2 (begroting vanuit laag S2 naar laag S3) aan elkaar zijn gelijk gesteld, speelt laag S3 effectief geen rol. De termen P en B2 zijn nog onderwerp van studie door De Lucas Pardo (2013) aan de TU Delft.

De bodemruwheid van het slibmodel is niet uniform, maar ruimtelijk variabel op basis van de waargenomen bedekkingsgraad van de bodem door schelpen (Figuur 8). Voor deze aanpak is gekozen omdat de kwaliteit van de modelkalibratie voor een uniforme verdeling van de ruwheid minder goed is. Het slibmodel is gekalibreerd aan de hand van hoogfrequente meetgegevens van twee meetpalen van RWS. Ook zijn remote-sensing gegevens gebruikt. De kalibratieresultaten worden getoond in Figuur 9 m.b.t. variaties in de tijd en in Figuur 10 m.b.t. de ruimtelijke verdeling. Over het algemeen is het slibmodel redelijk goed in staat om de waargenomen slibconcentratie te reproduceren. Voor meer details zie Van Kessel et al. (2009). Wel onderschat het model de aanslibbingssnelheid, o.a. door het ontbreken van dichtheidsstromingen. Hiervoor wordt een correctiefactor 2 toegepast afgeleid uit de waargenomen aanslibbingssnelheid van bestaande geulen en putten.

Voor de huidige studie is gebruik gemaakt van het bestaande gekalibreerde slibmodel van het Markermeer. Het effect van de lokale verdieping t.g.v. zandwinning wordt hierin gesimuleerd door de resuspensie in het model lokaal (in de vaargeul) uit te schakelen. Dit is een realistische aanname, daar uit de analyse van de proefputten en de vaargeul Amsterdam-Lelystad blijkt dat resuspensie vanuit een geul dieper dan circa 10 meter verwaarloosbaar is.



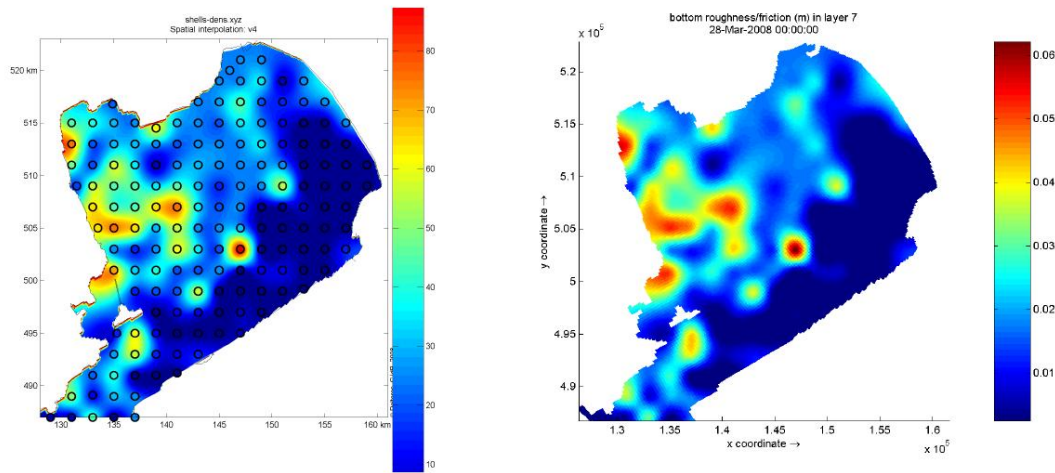
Figuur 6: Modelrooster van het Markermeer. De rode punten FL40, FL41 en FL42 geven de locaties aan van meetpalen met de gegevens waarvan het model is gekalibreerd.



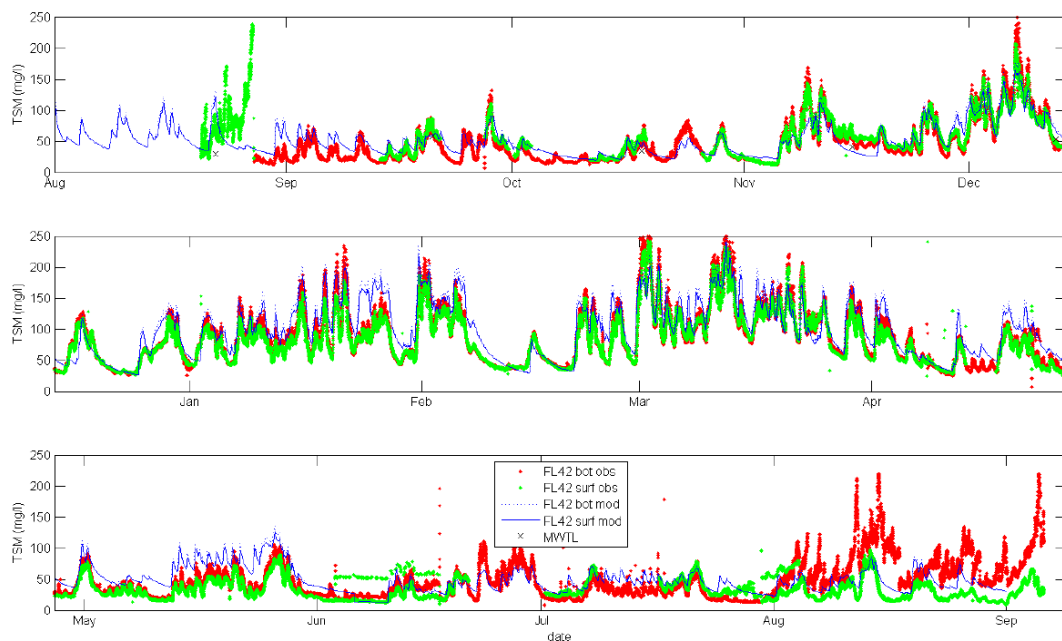
Figuur 7: Geschematiseerde weergave van sedimentfluxen in het model. Lag 1 t/m 7 vertegenwoordigen de waterkolom, lagen S1 t/m S3 de bodem. Processen omvatten sedimentatie (S), verticale mixing (M), horizontale advection (A) en dispersie (Dis), depositie (Dep), erosie vanuit de bodemlagen S1 (E1) en S2 (E2), begraving van S1 naar S2 (B1) en van S2 naar S3 (B2) en tenslotte productie vanuit S3 (P).

Datum  
31 mei 2013

Pagina  
9/22



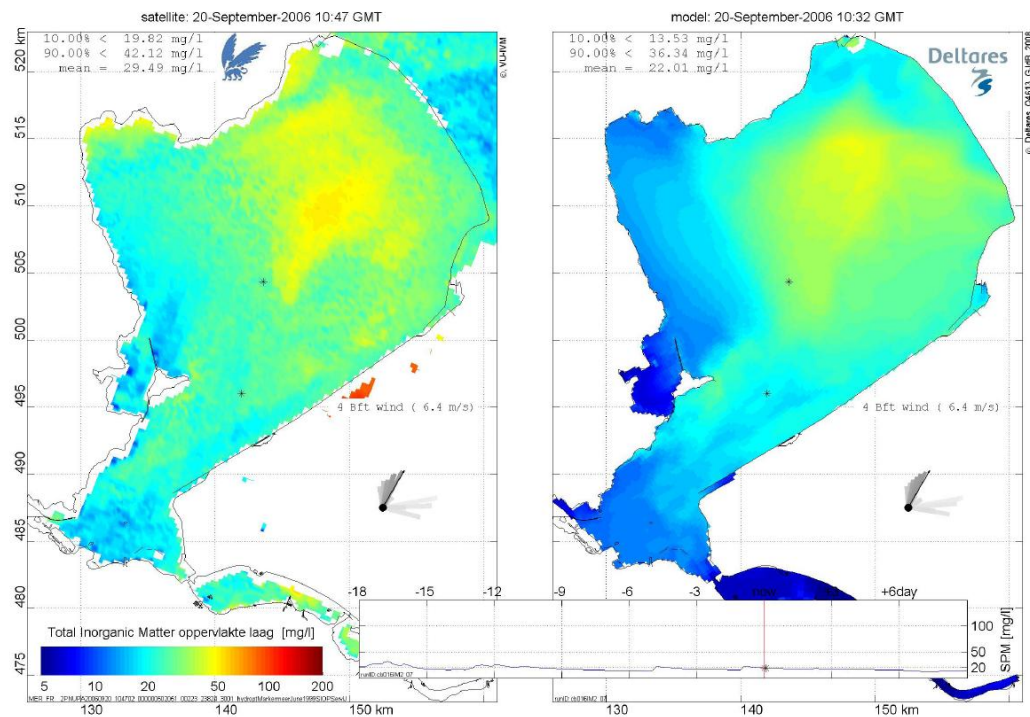
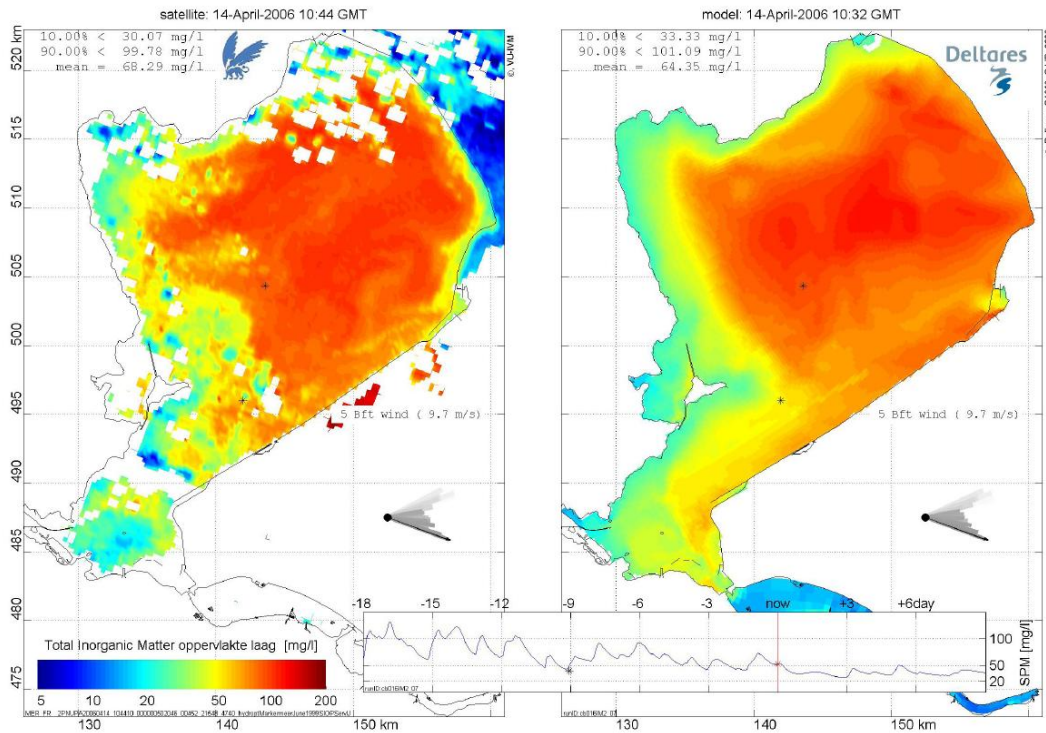
Figuur 8: Links: waargenomen bedekkingsgraad door schelpen (%). Rechts: hieruit afgeleide Nikuradse bodem ruwheidshoogte (m).

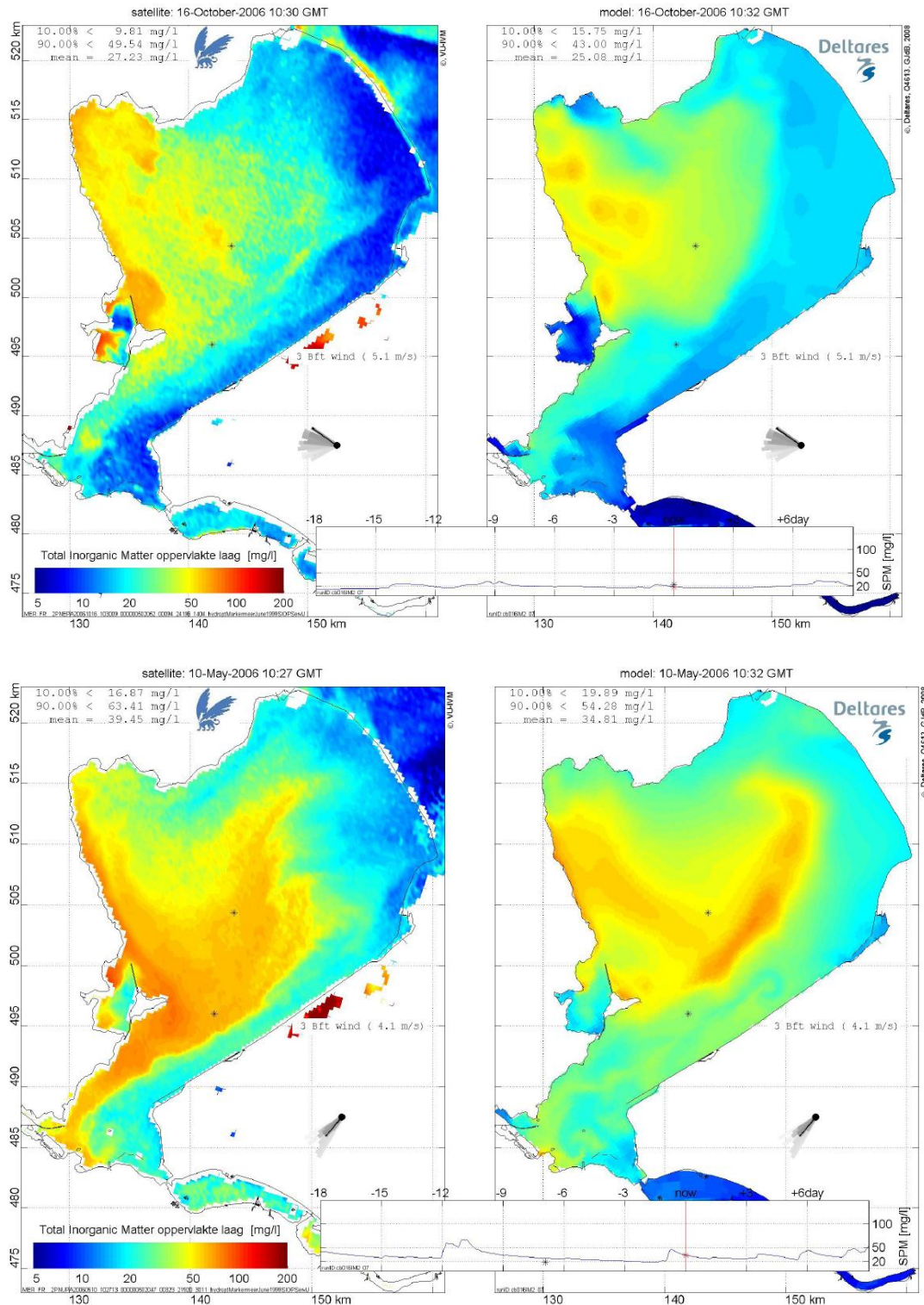


Figuur 9: Berekende (blauw) en gemeten (groen en rood) slibconcentratie (in mg/l) in de periode september 2007 tot september 2008. Locatie FL42 (zie Fig. 6).

Datum  
31 mei 2013

Pagina  
10/22



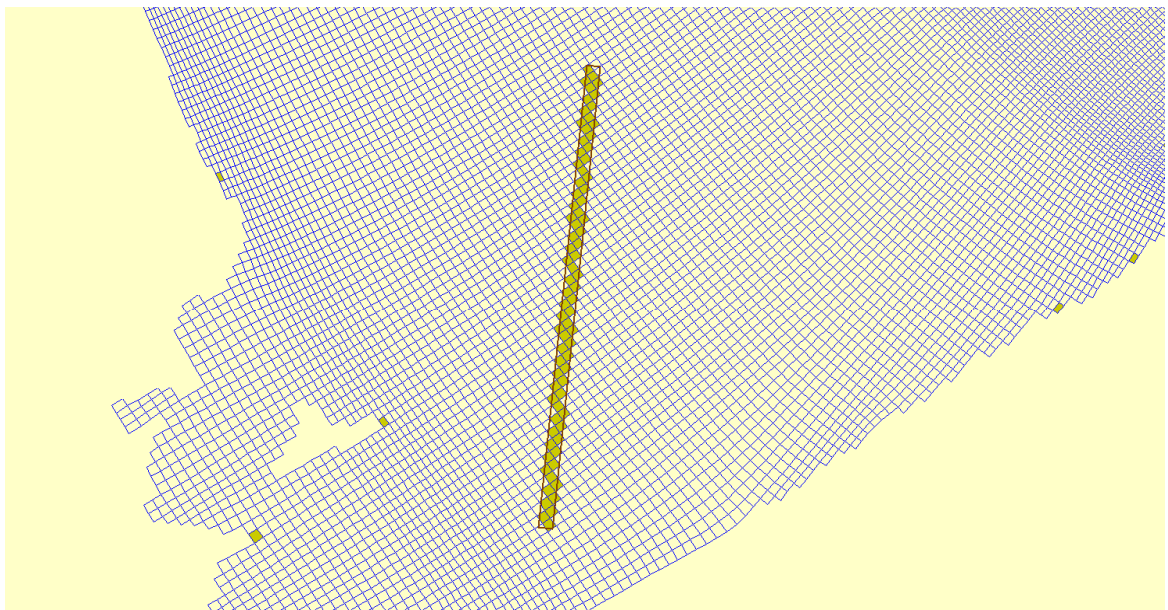


Figuur 10: Met remote-sensing waargenomen (links) en berekende (rechts) slibconcentratie bovenin de waterkolom voor verschillende windsnelheden en -richtingen.

De bruine lijn in Figuur 11 toont het geplande zandwinningsgebied en het modelrooster eromheen. Het zandwinningsgebied is 12 km lang en 350 m breed. De totale oppervlakte is 420 ha. De groene cellen tonen aan hoe het geplande gebied in het model geschematiseerd is. Samen dekken deze cellen een gebied van 419 ha (een cel is in dit gebied ongeveer 5 ha).

Aan de hand van dit model is een volledig jaar (2006) doorgerekend met en zonder uitschakeling van de resuspensie in het geplande zandwinningsgebied. Het westelijke alternatief is hierbij als uitgangspunt genomen (zie ook Figuur 1). Het oostelijke alternatief is niet apart doorgerekend, maar naar verwachting zullen de effecten van beide alternatieven m.b.t. aanslibbing en invloed op vertroebeling weinig van elkaar afwijken zolang het zandwinvolume een vergelijkbare omvang heeft. De berekende scenario's worden verder 'Geul' en 'Referentie' genoemd. Het scenario 'Geul' is representatief voor de eindsituatie (rond 2035), wanneer de volledige zandwinning heeft plaatsgevonden. Impliciet wordt verondersteld dat de geul dan nog niet zo ver is dichtgeslibd dat er weer resuspensie vanuit de geul kan optreden. De berekende effecten vertegenwoordigen daarom een bovengrens; de berekende effecten zijn ongeveer evenredig met het reeds ontgonnen geuloppervlak. Het scenario 'Referentie' is representatief voor de huidige situatie zonder geul.

De aldus berekende resultaten geven een eerste indruk van de te verwachten effecten m.b.t. de slibconcentratie in het water en de aanslibbing op de bodem. De effecten op de waterbeweging worden niet berekend in deze verkennende fase. Hiertoe zou het model lokaal verder moeten worden verfijnd en zou het aantal lagen in de vertikaal lokaal moeten worden uitgebreid (overstap van ' $\sigma$ -lagen' op 'z-lagen') om numerieke diffusie in de put te beperken. Dit zou een majeure ingreep in het model betekenen die niet past binnen de gestelde randvoorwaarden van het project. Bovendien zijn meetdata waarmee het lokaal gedetailleerde hydrodynamische model zou dienen te worden gevalideerd niet beschikbaar.



Figuur 11: Modelschematisatie rondom het geplande zandwinningsgebied (westelijk alternatief).

## 4 Kwantificering van effect op slibconcentratie op basis van modelberekeningen

Doordat een geul slib invangt, neemt door aanleg van de geul de gemiddelde slibconcentratie in het Markermeer af. De vraag is hoe groot deze afname is ten opzichte van de huidige situatie en tot welke afstand van de geul dit effect zich uitstrekt.

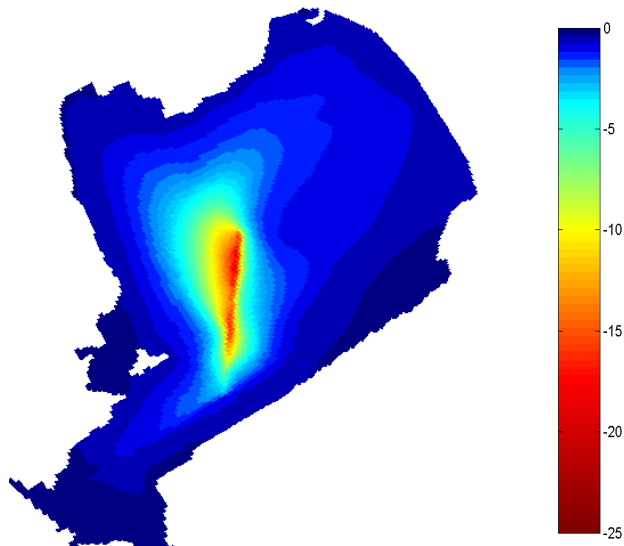
Figuur 12 toont het verschil in de jaargemiddelde slibconcentratie in het Markermeer tussen het scenario met geul en de huidige situatie (zonder geul). Hieruit blijkt dat de slibconcentratie direct boven de geul afneemt met ongeveer 15 mg/l, hetgeen significant is ten opzichte van het huidige jaargemiddelde van circa 50 mg/l. De isolijn van 5 mg/l afname bevindt zich op enkele kilometers vanaf de geul. Ver weg van de geul is de invloed beperkt, de afname in het grootste deel van het Markermeer bedraagt minder dan 2 mg/l.

Figuur 13 toont dezelfde informatie als Figuur 12, maar op maandgemiddelde in plaats van jaargemiddelde basis. Hieruit blijkt dat het effect niet constant is, maar varieert afhankelijk van de windsnelheid en –richting. De effectgrootte blijkt goed te correleren met de grootte van de netto sedimentatieflux, zie §5. In maanden met een sterke wind is de absolute afname groter dan in maanden met weinig wind. Het relatieve effect (d.w.z. de procentuele afname) varieert echter minder sterk in de tijd (niet getoond in figuur).

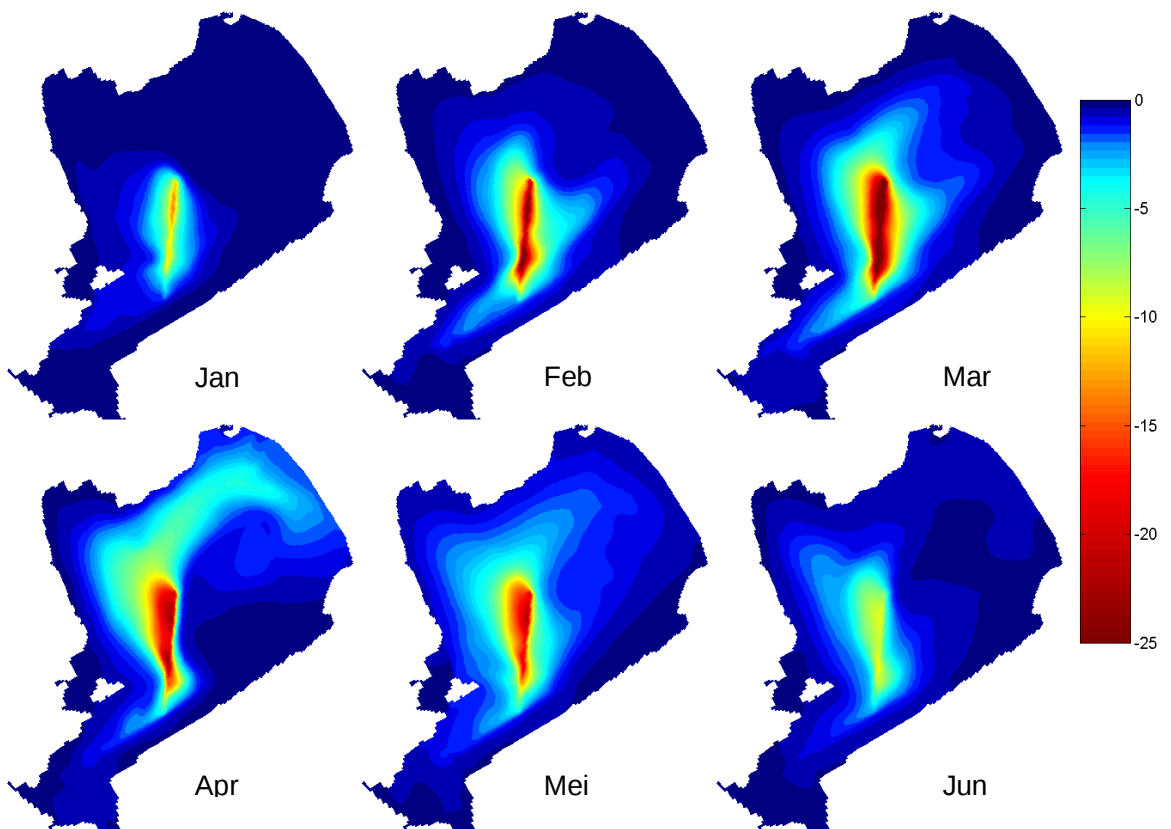
Tegenover het concentratieverlagende effect van de geul staat een potentieel concentratieverhogend effect van de zandwinning zelf. Dit is sterk afhankelijk van de werkwijze en het percentage slib aanwezig in het te winnen zand. Indien wordt aangenomen dat een percentage van 0.5% slib tijdens zandwinning wordt verspreid tot voorbij de geulranden, komt over een periode van 20 jaar  $0.005 \times 60 \times 10^6 \times 1600 = 480$  miljoen kg extra slib vrij in het Markermeer, ofwel 24 miljoen kg per jaar. Deze hoeveelheid is ongeveer een factor 10 kleiner ten opzicht van de hoeveelheid die bezinkt in de volledige geul (tenminste 70 kg/m<sup>2</sup>/jaar over een areaal van  $350 \times 12.000 \text{ m}^2 = 294$  miljoen kg/jaar, zie §5). Met uitzondering van het eerste jaar van winning (wanneer de geul slechts een beperkte omvang heeft en er nog relatief weinig slib wordt ingevangen) domineert het concentratieverlagende effect op het concentratieverhogende effect en is het netto effect een concentratieverlaging. Niettemin moet de verspreiding van slib voorbij de geulranden zoveel mogelijk worden voorkomen. Het is echter aannemelijk dat het merendeel van het tijdens zandwinning vrijgekomen slib direct in de geul bezinkt.

Datum  
31 mei 2013

Pagina  
14/22



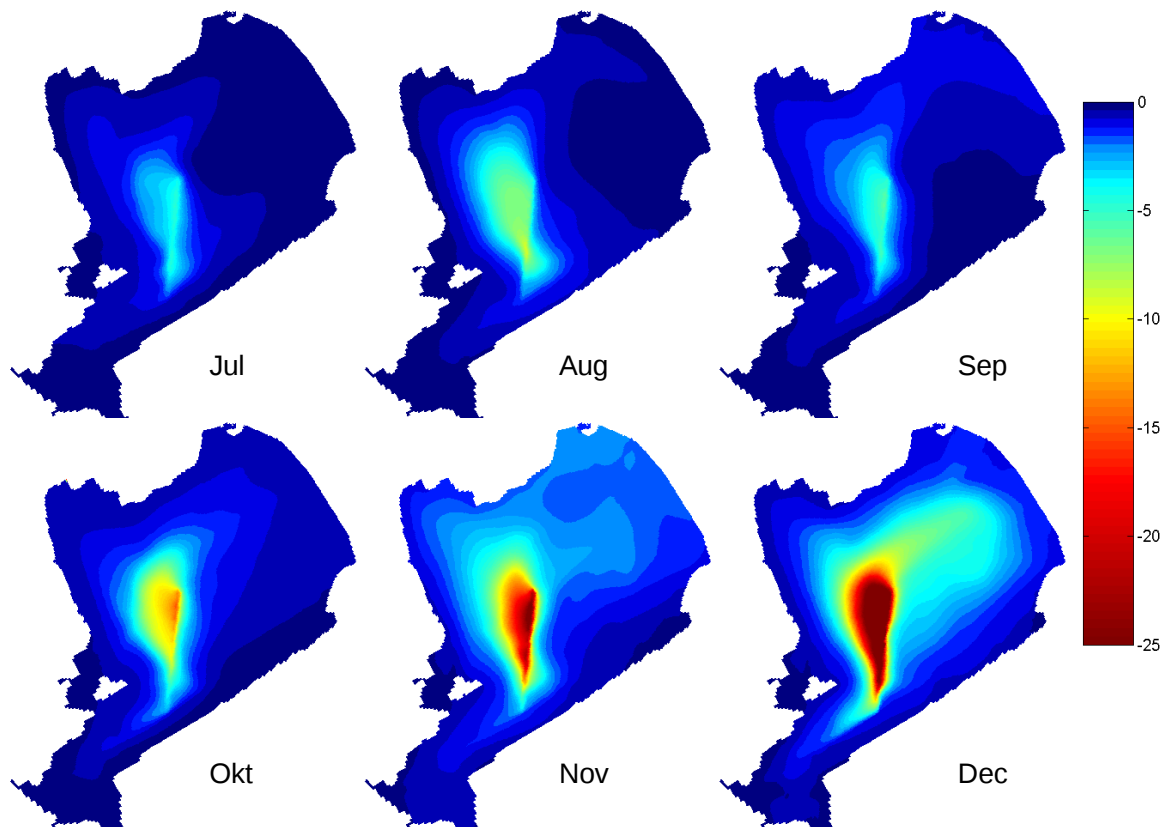
Figuur 12: Absoluut verschil (G-R) van jaargemiddelde slibconcentratie aan de oppervlakte (in mg/l) tussen Geul en Referentie scenario. Jaar = 2006. N.B. de rode kleur duidt op concentratieverlaging voor het scenario Geul.



Figuur 13: Verschil (G-R) in maandgemiddelde slibconcentraties (in mg/l) tussen Geul en Referentie scenario. Jaar = 2006.

Datum  
31 mei 2013

Pagina  
15/22



Figuur 13 (vervolg): Verschil (G-R) in maandgemiddelde slibconcentraties (in mg/l) tussen Geul en Referentie scenario. Jaar = 2006.

## 5 Kwantificering van aanslibbingssnelheid op basis van modelberekeningen

Naast de invloed van de geul op de slibconcentratie in de waterkolom is ook de aanslibbingssnelheid in de geul relevant. Deze bepaalt de levensduur van de geul, m.a.w. de tijd die duurt voordat de geul volledig is volgelopen met slib.

De met het model berekende aanslibbingssnelheid is een ondergrens voor de werkelijk optredende aanslibbing omdat a) de bijdrage van de grovere slibfractie in het model mogelijk is ondervertegenwoordigd en b) het effect van dichtheidsstroming niet is meegenomen, waardoor de 'trapping efficiency' wordt onderschat (zie voor verdere details hierover §2). Hierdoor kan de aanslibbingssnelheid in werkelijkheid wel een factor 2 groter zijn. Vanwege deze modelbeperkingen worden ook veldwaarnemingen naar aanslibbing in de vaargeul Amsterdam-Lelystad en in een tweetal proefputten bij de analyse betrokken.

Figuur 14 toont het verschil in aanslibbing tussen de scenario's Geul en Referentie na een periode van één jaar. De aanslibbing in de geul bedraagt zo'n 70 kg/m<sup>2</sup>/jaar. Naar het zuiden toe neemt de aanslibbing wat af; dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de jaargemiddelde slibconcentratie hier wat lager is en daarmee het aanbod van slib kleiner. De beperktere toename van de aanslibbing halverwege de geul (gemarkeerd met een witte pijl in Figuur 14) wordt niet veroorzaakt door een kleinere aanslibbing dan elders in het Geulscenario, maar door een lokaal grotere aanslibbing in het Referentiescenario. Hierdoor is het verschil tussen het Geul- en Referentiescenario halverwege de geul kleiner. Hier is de bodem nu al slibrijk en bevat weinig schelpen die de bodemruwheid verhogen (zie §2), waardoor er ook zonder geul al aanslibbing optreedt.

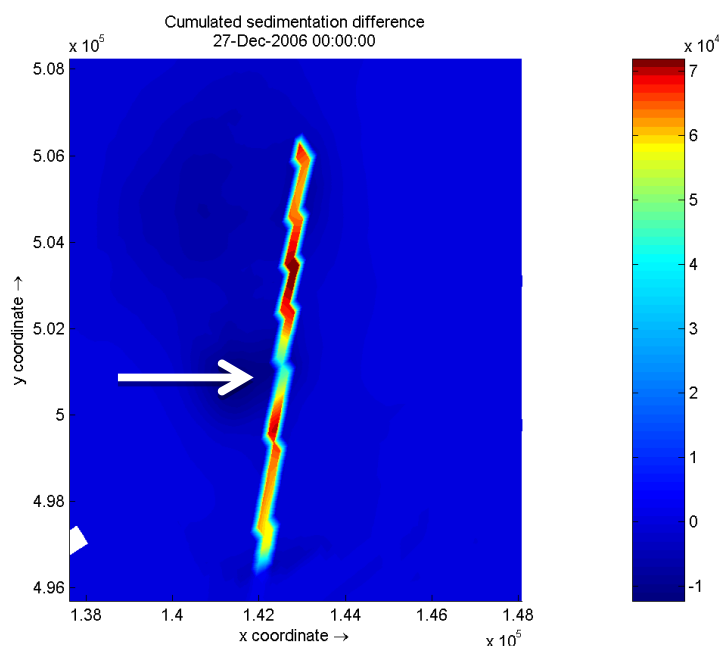
De plaatselijk donkerblauwe kleur rondom de geul (aangegeven met een pijl) duidt erop dat er rondom de geul enige erosie van de slibbodem optreedt. Dit wordt veroorzaakt door de lagere slibconcentratie rondom de geul, waardoor de depositieflux lokaal afneemt. Echter, initieel is de erosieflux rondom de geul (gestuurd door de bodemschuifspanning) van het Geulscenario gelijk aan het Referentiescenario, waardoor het lokale evenwicht tussen erosie en depositie tijdelijk is verstoord totdat de hoeveelheid slib op de bodem zodanig is afgenomen dat een nieuw evenwicht wordt bereikt. In de praktijk vertaalt de erosie rondom de geul zich nauwelijks in een bodemdaling, maar veeleer in het minder slibrijk (d.w.z. zandiger) worden van de bodem.

Figuur 15 toont van boven naar beneden achtereenvolgens a) de netto sedimentatieflux (kg/m<sup>2</sup>/dag) in het zandwinningsgebied voor beide scenario's (negatieve waarde is resuspensie); b) de cumulatieve sedimentatie per m<sup>2</sup> voor beide scenario's en c) de uurgemiddelde snelheid en richting van de opgelegde wind (gemeten bij station Berkhout in 2006). In het Referentiescenario (zonder geul) functioneert het zandwinningsgebied als een beperkte slibbron. Over een jaar resuspendeert er netto ~5 kg/m<sup>2</sup>. In het Geulscenario functioneert het zandwinningsgebied als slibput. Over een jaar sedimenteert er ~70 kg/m<sup>2</sup>. De slibafzetting is niet evenredig verdeeld over het jaar: het grootste deel sedimenteert in de winter en in de lente. Deze sedimentatiepieken komen overeen met perioden met harde wind. Het zomerkwartaal is duidelijk rustiger dan de rest van het jaar en sedimenteert er weinig slib.

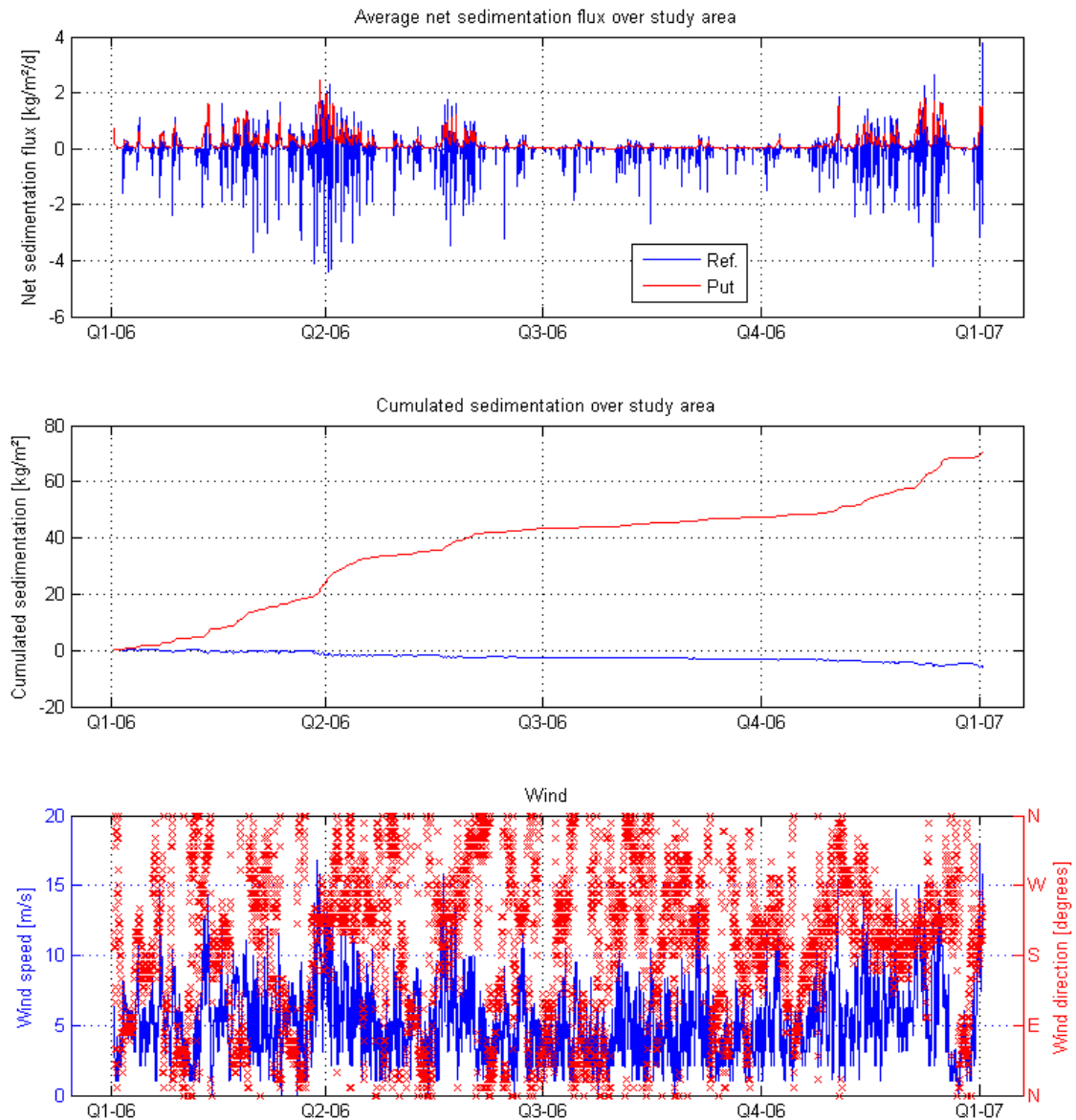
In het model wordt rekening gehouden met de invloed van wind en golven met een zogenoemde 'strijklengtebenadering', zie pagina 7. De afhankelijkheid tussen sedimentatieflux en windsnelheid is zichtbaar gemaakt in Figuur 16. Een lage windsnelheid resulteert altijd in een lage sedimentatieflux, terwijl een hoge windsnelheid soms (maar niet altijd) leidt tot een hoge sedimentatieflux. Hierin speelt de windrichting, de windhistorie en de hoeveelheid slib makkelijk beschikbaar voor resuspensie (d.w.z. dikte van flufflaag S1) ook een rol.

De afhankelijkheid tussen de sedimentatieflux en de windrichting wordt getoond in Figuur 17. Hieruit blijkt dat bij wind uit de richting ZW vaak een hoge sedimentatieflux optreedt, terwijl bij wind uit de richting ZO dit nauwelijks het geval is. Deze sterke richtingsafhankelijkheid wordt mede veroorzaakt door de correlatie tussen windsnelheid en windrichting (zie Figuur 18), maar deze verklaart de afhankelijkheid tussen sedimentatieflux en windsnelheid waarschijnlijk niet volledig. Bij ZO wind wordt de 'slibwolk' weggeduwd van de dijk tussen Almere en Lelystad en is er weinig aanbod ter hoogte van het zuidelijke deel van de geul (zie Figuur 10, conditie 16 oktober).

Een aanslibbingssnelheid van  $70 \text{ kg/m}^2/\text{jaar}$  is bij een initiële (ongeconsolideerde) dichtheid van  $100 \text{ kg/m}^3$  equivalent met  $0.7 \text{ m/jaar}$ . Dit is laag ten opzichte van waarnemingen van de aanslibbingssnelheid in de vaargeul tussen Amsterdam en Lelystad (tot  $1.5 \text{ m}$  per jaar in de diepste delen) en proefputten (tot  $2 \text{ m}$  per jaar). Het is niet aannemelijk dat in de zandwingeel eenzelfde aanslibbingssnelheid als in de proefputten wordt gehaald omdat a) een geul meer stroming trekt dan een put en b) door het grootschaliger karakter van de geul de omgevingsconcentratie sterker wordt verlaagd dan voor een lokale put met een langzamere aanslibbing tot gevolg. Een soortgelijke aanslibbingssnelheid als waargenomen in diepe delen van de vaargeul Amsterdam – Lelystad is wel aannemelijk, d.w.z.  $1$  tot  $1.5 \text{ m}$  per jaar. Rekening houdend met een correctiefactor 2 ter compensatie van het ontbreken van dichtheidsstromingen in de geul, zijn de resultaten van het slibmodel m.b.t. aanslibbing aannemelijk.

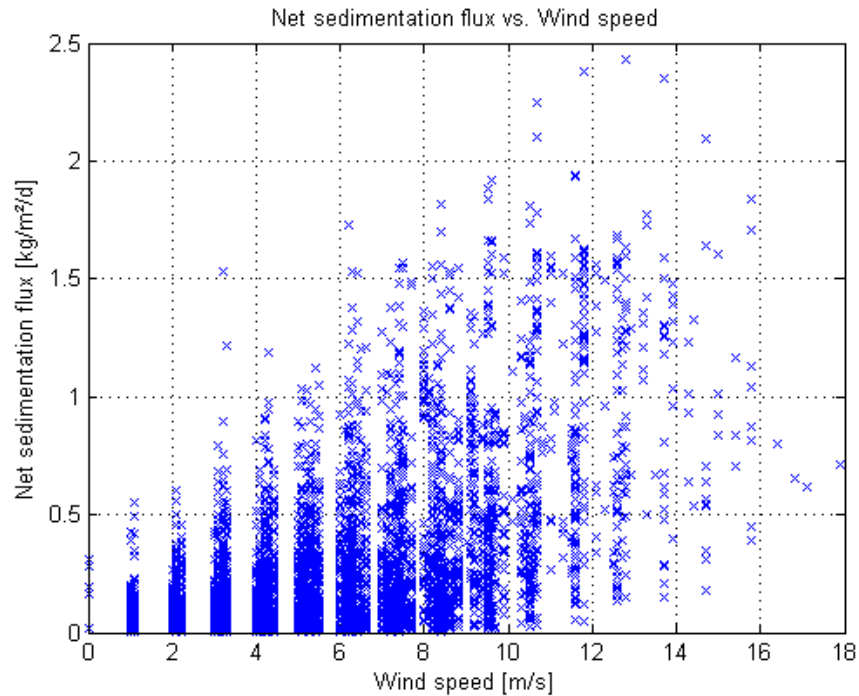


Figuur 14: Verschil in sedimentatie (in  $\text{g/m}^2$ ) na één jaar.

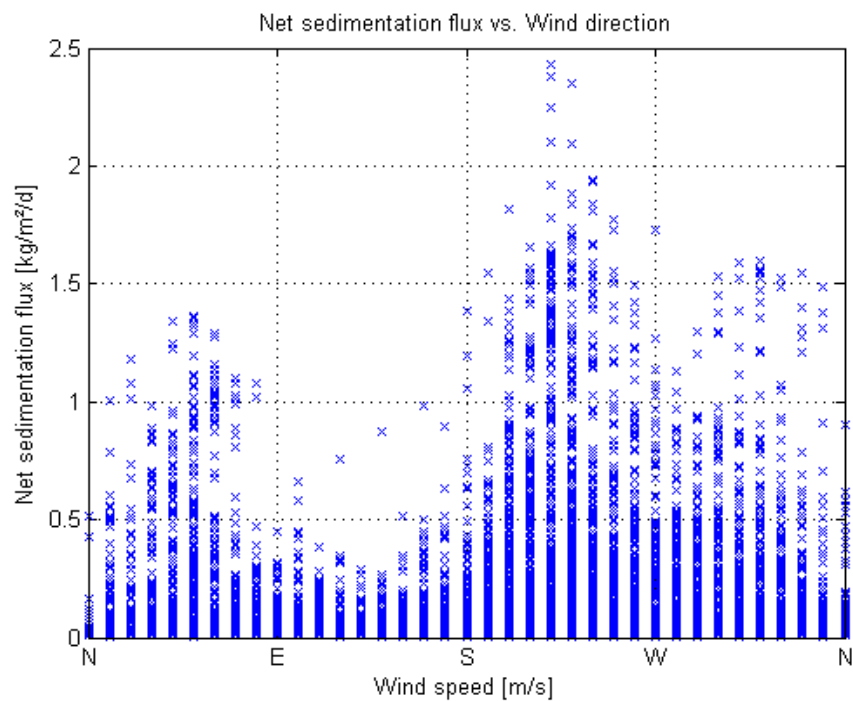


Figuur 15: Netto fluxen, gecumuleerde sedimentatie en gemeten wind gegevens

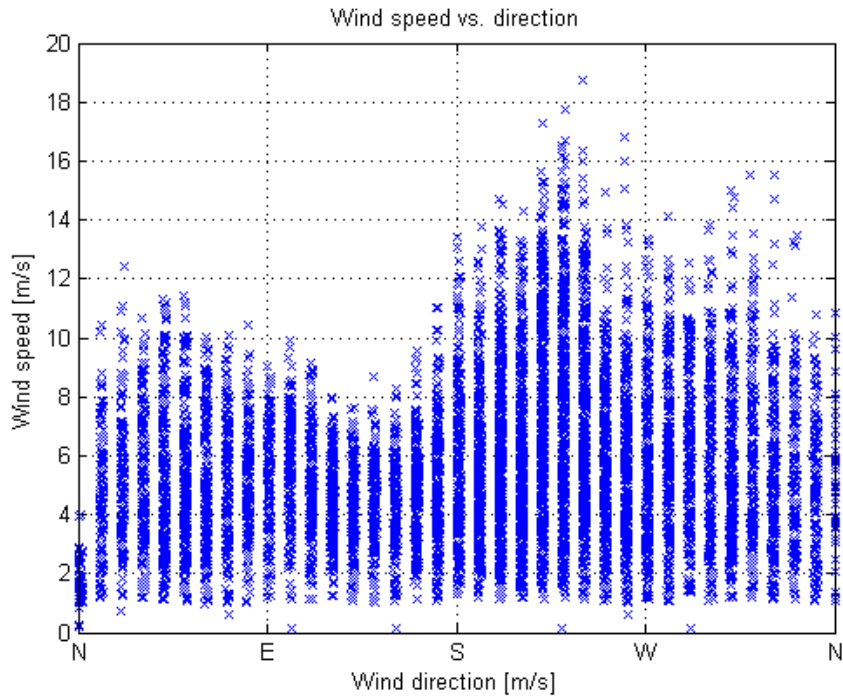
Bij een initiële overdiepte van circa 45 m ten opzichte van de Markermeerbodem duurt het naar verwachting 30 jaar voordat de zandwingeel weer is dichtgeslibd (aannemende dat er geen sediment wordt bijgestort). Dit betekent dat tegen het einde van de looptijd van de zandwinning het concentratieverlagende effect maximaal is. Over de volle lengte van de geul vindt dan nog sedimentatie plaats. Indien in de geul kort nadat de maximale diepte is bereikt klei en veen wordt teruggestort tot een diepte van -30 m NAP, is de levensduur van de geul minimaal zo'n 17 jaar. In dit geval is het begin van de geul al (bijna) volledig dichtgeslibd aan het eind van de zandwinactiviteiten (rond 2035).



Figuur 16: Netto sedimentatieflux tegen windsnelheid, Geulscenario.



Figuur 17: Netto sedimentatieflux tegen windrichting, Geulscenario.



Figuur 18: Windsnelheid tegen windrichting. Data station Berkhout, 2006.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

Door de aanwezigheid van een slibvang in het Markermeer die zal ontstaan ten gevolge van zandwinning, neemt de slibconcentratie rondom de slibvang af. Dit komt doordat in de geul veel slib wordt ingevangen dat hierdoor niet langer beschikbaar is voor resuspensie bij harde wind. Pas zodra de geul is dichtgeslibd tot een diepte van circa –10 m NAP kan weer resuspensie vanuit de geul optreden. De snelheid van aanslibbing bedraagt initieel naar verwachting circa 1 tot 1.5 m per jaar. Bij een aanlegdiepte van –50 m NAP duurt het dus tenminste circa 30 jaar voordat de geul door natuurlijke aanslibbing volledig is dichtgeslibd tot het bodemniveau van de omgeving (–4 m NAP). Als sediment in de geul wordt teruggestort, is deze tijd vanzelfsprekend korter. Deze waarden zijn gebaseerd op waarnemingen van de aanslibbingssnelheid in een tweetal proefputten en in de vaargeul tussen Amsterdam en Lelystad. Met het slibmodel wordt een tweemaal lagere aanslibbingssnelheid berekend, maar hierin is het effect van dichtheidsstromingen niet meegenomen en is de bijdrage van grover sediment aan de aanslibbing waarschijnlijk onderschat.

De concentratieverlaging boven en in de directe nabijheid van de put bedraagt gemiddeld circa 15 mg/l, wat substantieel is ten opzichte van de jaargemiddelde slibconcentratie van 50 mg/l. Op een afstand van enkele km vanaf de geul bedraagt de concentratie-afname nog zo'n 5 mg/l. Op de schaal van het volledige Markermeer is de afname beperkt tot 1 tot 2 mg/l. De berekende effecten zijn niet constant in de tijd, maar variëren met de windsnelheid en windrichting. Tijdens en kort na perioden met harde wind (met name uit ZW-richting) vindt de meeste aanslibbing en is de absolute concentratieverlaging in de waterkolom t.g.v. deze aanslibbing het grootst.

Tegenover de concentratieverlaging door de aanwezigheid van de geul staat potentieel een concentratieverhoging door de zandwinactiviteiten zelf. Deze is afhankelijk van de werkwijze en de slibfractie in het winbare zand. Dit effect is hierin verder niet beschouwd, maar indien wordt aangenomen dat 0.5% van het gewonnen sediment uitspoelt als slib tot voorbij de geulrand, is deze bronterm meer dan een factor 10 kleiner dan de putterm t.g.v. natuurlijke aanslibbing in de zandwinggeul. Mogelijk met uitzondering van het eerste jaar van winning (wanneer er nog weinig natuurlijke aanslibbing in de geul van nog beperkte omvang plaatsvindt) is het netto effect van zandwinning dus een verlaging van de slibconcentratie in het Markermeer.

De huidige studie omvat uitsluitend het effect van de zandwinning op de slibconcentratie en aanslibbing. Andere mogelijke effecten van een diepe geul zijn buiten beschouwing gebleven.

Er wordt aanbevolen om tenminste tijdens de eerste jaren van de zandwinning de aanslibbingssnelheid en de dichtheid van de slibafzetting geregeld te monitoren. De betrouwbaarheid van de voorspelling van de effecten in latere jaren van winning en van de verwachte levensduur van de geul is hierbij gebaat.

## 7 Literatuur

Boderie, P.M.A., M. Genseberger (2010). Modelstudie geleidestructuren : bepaling locatie en omvang. Deltares rapport 1201198.

Boderie, P.M.A., T. van Kessel, M. Genseberger (2010). Aanslibgedrag vaargeul Amsterdam-Lelystad. Deltares rapport 1202714.

De Lucas Pardo, M. (2013). Fine sediment Dynamics in Markermeer. PhD-thesis Delft University of Technology. Delft, the Netherlands (*in prep.*).

Duin, E.H.S. van (1992). Sediment transport, light and algal growth in the Markermeer. A two-dimensional water quality model for a shallow lake. Dissertatie Landbouwniversiteit Wageningen.

Kessel, T. van, G. de Boer, P. Boderie (2009). Calibration suspended sediment model Markermeer. Deltares report 1200148.

Ledden, M. van, G.W.R. Gerrits, T. van Kessel en E. Mosselman (2006). Verdiepingsslag en maatregelen slibproblematiek Markermeer. Analyse kennisleemten en inventarisatie maatregelen. Royal Haskoning en WL Delft Hydraulics rapport 9R3456.A0.

Oude Essink G., J. Delsman, W. Borren, R. Stuurman, J. Verkaik (2010). Veranderingen in het grondwatersysteem van het Markermeergebied. Deltares rapport 1202830. Rapportage DC project Wetlands in het IJsselmeergebied.

Vijverberg, T. (2008). Mud dynamics in the Markermeer. Silt traps as a mitigation measure for turbidity. Afstudeerscriptie TU Delft.

Witteveen & Bos, 2004. Quick-scan slibproblematiek Markermeer en Eem- en Gooimeer. Deel 1: samenvattende rapportage (RW1390-1/beem5/001) & Deel 2: Achtergronddocument (RW1390-1/beem5/002).