




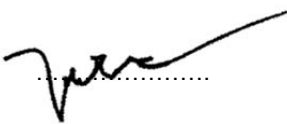
Rapportage Maatregel Afdekken

Natuurlijker Markermeer IJmeer

Rijkswaterstaat WVL

25 februari 2015
Definitief rapport
9V6742.A02

Documenttitel Rapportage Maatregel Afdekken
Natuurlijker Markermeer IJmeer
Verkorte documenttitel Rapportage Maatregel Afdekken
Status Definitief rapport
Datum 25 februari 2015
Projectnaam Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer (NMIJ)
Projectnummer 9V6742.A02
Opdrachtgever Rijkswaterstaat WVL
Referentie 9V6742.A02/R0208/903718/BW/Nijm

Auteur(s) Thomas Vijverberg, Pascal Boderie en
Ruurd Noordhuis
Collegiale toets Petra Dankers
Datum/paraaf 25 februari 2015 
Vrijgegeven door Roelof Moll
Datum/paraaf 25 februari 2015 

INHOUDSOPGAVE

| | Blz. | |
|-------|--|----|
| 1 | INLEIDING | 1 |
| 1.1 | Aanleiding | 1 |
| 1.2 | Doel van deze rapportage | 1 |
| 1.3 | Opbouw van het rapport | 2 |
| 2 | SLIB GERELATEERDE ASPECTEN | 3 |
| 2.1 | Locaties | 3 |
| 2.2 | Effect op mobiele sliblaag en fluffy laag | 9 |
| 2.3 | Stabiliteit van afdeklaag | 13 |
| 3 | ECOLOGISCHE ASPECTEN | 18 |
| 4 | AANLEGSTRATEGIE EN KOSTEN | 22 |
| 4.1 | Aanlegmethoden afdekken | 22 |
| 4.1.1 | Sproeien | 22 |
| 4.1.2 | Onderzuigen | 23 |
| 4.1.3 | Vergelijking Sproeien en Onderzuigen | 24 |
| 4.1.4 | Voor- en nadelen Sproeien/Nevelen | 25 |
| 4.1.5 | Voor- en nadelen Onderzuigen | 25 |
| 4.1.6 | Conclusie | 25 |
| 4.2 | Kosten | 26 |
| 5 | CONCLUSIES EN BEANTWOORDING ONDERZOEKSVRAGEN | 29 |
| 5.1 | Algemene conclusies | 29 |
| 5.2 | Beantwoording onderzoeksvragen | 30 |
| | REFERENTIES | 35 |

BIJLAGE(N)

A. Gemeten zeefkrommes

1 INLEIDING

1.1 Aanleiding

Het voorliggende rapport is onderdeel van het onderzoeksprogramma Natuurlijk(er) Markermeer IJmeer (NMIJ).

Het programma kent drie hoofdthema's:

- vermindering van het slibgehalte;
- vergroting van de habitatdiversiteit en dynamiek;
- verbetering van ecologische verbindingen.

Voor elk hoofdthema worden een aantal maatregelen beschouwd, die voorafgaand aan het NMIJ programma zijn gedefinieerd. Voor het thema verminderen slibgehalte zijn dit de maatregelen:

- luwtestructuren;
- verdiepingen;
- afdekken.

Van de maatregelen luwtestructuren en verdiepingen zijn in de afgelopen jaren diverse NMIJ rapportages opgesteld over de werking en haalbaarheid van de maatregelen. Van de maatregel afdekken was dat tot nu toe niet gebeurd.

De voorliggende rapportage gaat daarom geheel in op de maatregel afdekken.

Informatie voor deze rapportage is overgenomen uit andere studies (bureaustudie) of is output vanuit het verder te noemen "Markermeer slibmodel" (numeriek simulatiemodel slib in water en bodem van het Markermeer, Boderie e.a., 2011). Er zijn geen specifieke modelberekeningen of pilots uitgevoerd voor deze maatregel.

1.2 Doel van deze rapportage

Het doel van deze rapportage is het beschrijven van de maatregel afdekken op diverse aspecten. Deze rapportage geeft antwoord op de algemene vraag of afdekken van de mobiele sliblaag op de bodem van het Markermeer een haalbare maatregel is om de ecologische waarde te vergroten. Specifiek wordt in deze rapportage ingegaan op de volgende (van te voren gedefinieerde) onderzoeksvragen:

S29 Op welke locaties in het Markermeer-IJmeer draagt het afdekken van slib het meeste bij aan slibreductie?

S30 Welke technieken (zoals onderzuigen, sproeien en nevelen) bestaan er om slib af te dekken en welke is het meest effectief?

S31 Draagt deze techniek duurzaam bij aan de beperking van de mobiele sliblaag?

S31bRH Is de schroefstraal belasting door schepen van belang?

S31cRH Wat is de stabiliteit van de afdeklaag?

S32 Hoe reageert de fluffy bodemlaag (fijn slib) op een afdeklaag?

S33 Wat zijn de ecologische effecten van afdekken?

S34 Wat zijn de realisatiekosten van de meest effectieve techniek voor het afdekken van slib?

S35 Wat zijn de beheer- en onderhoudskosten van de meest effectieve techniek om slib af te dekken?

1.3 Opbouw van het rapport

De bovenstaande onderzoeksvragen zijn onder te verdelen in drie hoofdaspecten:

- slib;
- ecologie;
- aanlegstrategie en kosten.

Elk aspect wordt in dit rapport behandeld in een apart hoofdstuk: Slib (H2), Ecologie (H3), Aanlegstrategie en kosten (H4).

Dit rapport sluit af met een integrale conclusie en specifieke beantwoording van de onderzoeksvragen in hoofdstuk 5.

2 SLIB GERELATEERDE ASPECTEN

In een eerdere studie (Van Ledden, 2006) is kort gekeken naar de mogelijkheden van afdekken. In het voorliggend rapport wordt de definitie van destijds gehanteerd:

Afdekken is een permanente brongerichte maatregel waarbij opwerveling (resuspensie) van slib gereduceerd wordt door een toplaag aan te brengen van minder mobiel materiaal of materiaal dat sneller bezinkt waardoor er minder langdurig slib in de waterkolom aanwezig is.

2.1 Locaties

Deze paragraaf gaat vooral in op de locaties in het Markermeer waar afdekken van slib toegepast zou kunnen worden. De belangrijkste onderzoeksvraag die in deze paragraaf wordt beantwoord is:

S29 Op welke locaties in het Markermeer-IJmeer draagt het afdekken van slib het meeste bij aan slibreductie?

In Van Ledden (2006) wordt afdekken als combinatiemaatregel haalbaar geacht. Combinatiemaatregelen zijn maatregelen die weliswaar een significant effect veroorzaken, maar individueel niet in staat worden geacht om een significant deel van de geformuleerde doelen te kunnen benaderen. Deze maatregelen kunnen op lokaal niveau wel een hoofdrol vervullen en zijn daarmee mogelijk geschikt om in combinatie met andere (hoofd)maatregelen te worden uitgevoerd.

Op basis van opgedane kennis uit verschillende NMIJ studies kan nu globaal aangeven worden waar afdekken vanuit het perspectief van slibreductie mogelijk zou zijn. Daarnaast zullen er verschillende locaties zijn waar afdekken juist niet toegepast kan worden, omdat daar bijvoorbeeld ecologische waarde aanwezig is die door afdekken verloren gaat.

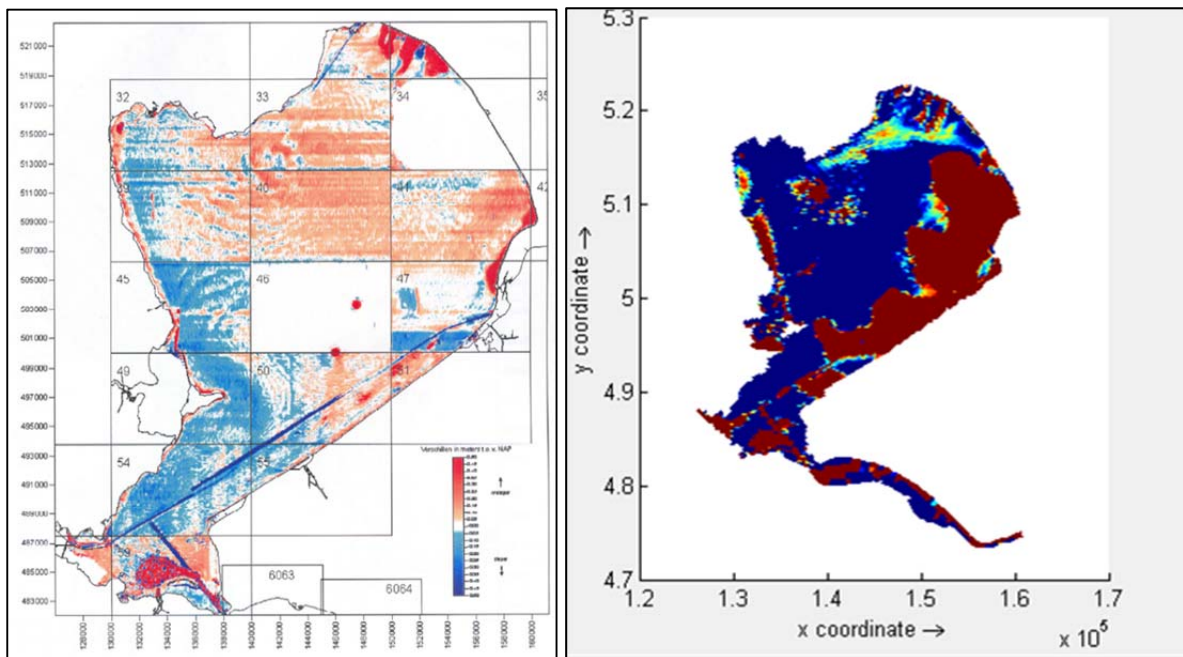
Hieronder worden de verschillende gebieden aangegeven.

Gebieden waar afdekken mogelijk bijdraagt aan slibreductie

In essentie is afdekken van slib een maatregel om te voorkomen dat slib in suspensie komt en daardoor de troebelheid van het water verhoogt. Omdat depositie en resuspensie in het Markermeer overal wel eens voorkomt, afhankelijk van de windsterkte en –richting, zou geconcludeerd kunnen worden dat afdekken over het gehele meer potentieel zinvol is. Dit is echter niet het geval. In het Markermeer zijn gebieden aan te wijzen die netto eroderen en gebieden die netto sedimenteren. Afdekken in netto sedimentatie gebieden heeft weinig meerwaarde, omdat na loop van tijd een sliblaag zich heeft afgezet op de afdeklaag en de afdeklaag daardoor z'n functie verliest. Opnieuw afdekken zou dan nodig zijn. In dat geval moet naast eenmalige kosten ook rekening worden gehouden met beheerskosten voor continue afdekken. Om die reden is het waarschijnlijk efficiënter om alleen sliblagen af te dekken waar netto erosie plaatsvindt en waar erosie dus een continue bron van slib is. Door (een deel van) de eroderende laag af te dekken zal deze bron verminderen waardoor de totale hoeveelheid slib in het Markermeer kan afnemen (als we aannemen dat onttrekking van slib door invang in diepere delen, putten en achter luwtestructuren doorgaat).

Om vast te stellen waar netto erosie plaatsvindt, is gebruik gemaakt van gemeten veranderingen in de bathymetrie over enkele jaren zoals geanalyseerd door Witteveen en Bosch (2005) en van de resultaten van het Markermeer slibmodel. Uit Figuur 2.1 (links) blijkt dat globaal de westzijde van het Markermeer fungeert als erosiegebied (blauw) en de oostzijde (rood) als sedimentatie gebied. De gebruikte verschilkaart is niet gebiedsdekkend en de nauwkeurigheid is beperkt (omdat het een verschilbepaling betreft van een meettechniek met een relatief grote onnauwkeurigheid).

Volgens de analyse van Witteveen en Bosch (2005) komt volumeverandering in 11 jaar door erosie (blauwe gebied -0.05 tot -0.35 m) nagenoeg overeen met de volumeverandering door sedimentatie (rode gebied +0.1 tot +0.4m). Zowel de toe- als afname van het slibvolume is geschat op ruim 11 miljoen m³, overeenkomend met orde 3 cm (totaal oppervlakte van het Markermeer is 600 miljoen m²).



Figuur 2.1. Links: Gemeten bodemverandering van het Markermeer in 11 jaar (tussen 1990 en 2001, rood = verondieping, blauw=verdieping) uit Witteveen & Bos (2005). De kaart suggereert een verplaatsing van het slib van west naar oost. Rechts berekende jaarlijkse aanslibbing uit het Markermeer slibmodel, gebieden waar nauwelijks sedimentatie plaatsvindt zijn blauw (<math><0.3</math>).

Als aangenomen wordt dat de geerodeerde (geconsolideerde) klei een grotere dichtheid heeft dan het gesedimenteerde slib zijn de hoeveelheden in massa (ton vaste stof) echter niet gelijk en is er meer erosie¹.

Het Markermeer slibmodel berekent ook erosie en sedimentatie. De verandering over een typisch jaar bedraagt ook orde 2 cm per jaar. Netto sedimentatie vindt plaats in het diepere zuidoostelijke deel van het Markermeer (zie Figuur 2.1) in delen van de rest van het meer vindt erosie plaats.

Op basis van deze analyse wordt geconcludeerd dat als afdekken (ecologisch) zinvol en betaalbaar is, afdekken dan bij voorkeur alleen in gebieden van het meer waar netto geen sedimentatie plaatsvindt. We kiezen er voor het niet-sedimentatiegebied af te leiden uit het modelresultaat, dit gebied komt dan overeen met het blauwe gebied uit het rechter plaatje in Figuur 2.1 (modelresultaat). Dit gebied bevat nagenoeg alle gebieden waarin erosie op basis van bodemverandering is gemeten (blauwe gebied in linker plaatje van Figuur 2.1). Het bevat ook die gebieden waar model en metingen niet met elkaar in overeenstemming zijn het potentieel voor afdekken geschikte gebied is daarmee zo groot mogelijk. Zie ook Figuur 2.5.

Gebieden waar afdekken niet zinvol is

Ook in het noordwestelijk deel van het meer- waar afdekken in principe bij kan dragen aan beperking van erosie - zijn deelgebieden aan te wijzen die ongeschikt zijn om afdekken toe te passen. Achtereenvolgens worden de volgende deelgebieden besproken:

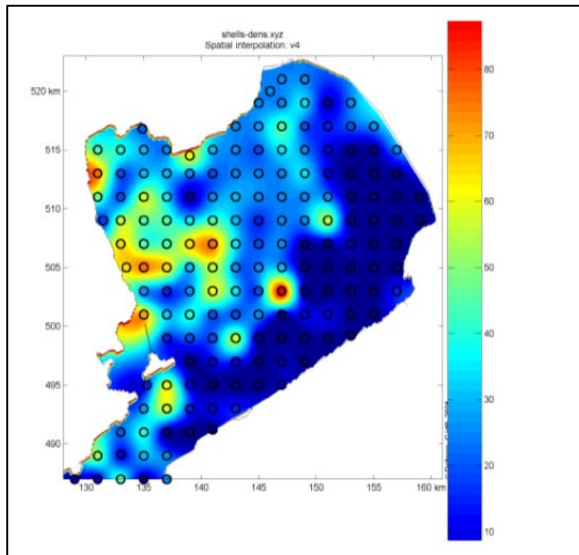
- gebieden met natuurlijke afdekking (schelpen);
- gebieden met ecologische waarde (bijvoorbeeld mosselen en waterplanten);
- gebieden met veel scheepvaart (zowel recreatievaart en beroepsvaart).

Aanwezigheid van schelpen

Het afdekken van gebieden waar veel (Zuiderzee)schelpen voorkomen heeft weinig meerwaarde, omdat de schelpenlaag al zorgt voor een zekere mate van afdekking waardoor het al dan niet aanwezige klei al afgedekt is en geen bron van slib vormt. In figuur 2.2 is het percentage schelpen in de bodem aangegeven. Voornamelijk aan de westzijde van het Markermeer is dit percentage hoog. Merk op dat het patroon van de schelpenkaarten (figuur 2.2) grote overeenkomst vertoont met de kaart van de aanslibbing in figuur 2.1 (rechts). Dat komt omdat de ruwheid van de bodem in het slibmodel is afgeleid uit de schelpenkaart en de ruwheid vervolgens in belangrijke mate (samen met windcondities en waterdiepte) de aanslibbing bepaalt in de modelberekeningen. Uit Figuur 2.2 is geconcludeerd dat grote delen van westzijde van het meer door afdekking met schelpen geen bron van slib zijn en dus niet in het zoekgebied voor afdekken vallen.

¹ Afhankelijk van de aanname die gemaakt wordt over dichtheden van het eroderende en het sedimenterende klei/slib is er een netto hoeveelheid erosie van slib in de orde van 8 miljoen ton vaste stof (over 11 jaar). Dat komt overeen met orde 1kg/m^2 (over het hele meer) en met 1 cm zeer waterig sediment (1100 kg/m^3). Deze hoeveelheid is veel groter dan de hoeveelheid die geborgen kan worden in de twee proefputten die in deze periode in het Markermeer nog niet volledig gevuld aanwezig waren (2 putten met elk een diameter van ongeveer 600m die in de periode 1990-2000 ongeveer 3 tot 5 meter opvulden). De nauwkeurigheid van de methode is zeer waarschijnlijk ontoereikend voor dit soort analyses.

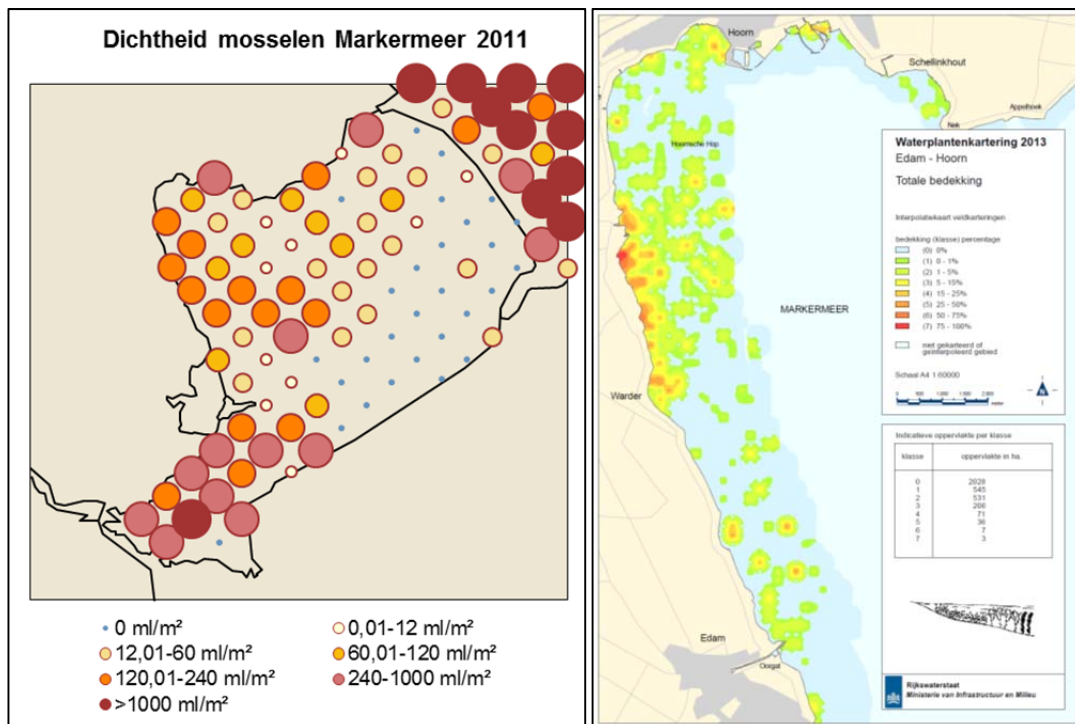
Gebieden ten (noord)oosten van Marken, in het Hoornse Hop en langs de Westfriese zuidkust zijn echter minder bedekt met schelpen, dit zijn dus deelgebieden waar afdekken overwogen kan worden



Figuur 2.2: Percentage schelpen in de bodem, op basis van veldobservaties.

Ecologische waarde

De waarde van mosselbanken als vogelvoedsel is niet meer zo groot als vroeger door verslechterde conditie van de mosselen (lagere vleesinhoud). Vermindering van de slibconcentraties door maatregelen heeft naar verwachting een gunstige invloed op het voedselaanbod en dus de conditie van de mosselen. Mosselbanken zijn nog wel waardevol als habitat voor andere ongewervelden en dus voor diversiteit (ook bij een relatief lage dichtheid van de mosselen). Ten plaatse van mosselbanken dient dus niet afgedekt te worden. Naast mosselbanken hebben gebieden met waterplanten hoge ecologische waarde. Deze gebieden dienen dus ook bij afdekking ontzien te worden (figuur 2.3 rechts). Bovendien zijn gebieden met veel waterplanten een mindere bron van het slib, omdat waterplanten het slib vasthouden. Ook daarom is afdekken niet nodig in deze gebieden.



Figuur 2.3: (Links) De dichtheid (biomassa in ml/m²) van driehoeks- en quaggamosselen (kartering 2011) in het Markermeer en gedeelte van en het IJsselmeer (kartering in 2012). Bron Waterfauna rapport nr.: 2011-03 (december 2011). (Rechts) Waterplant kartering aan de westkust van het Markermeer (situatie 2013).

Scheepvaart

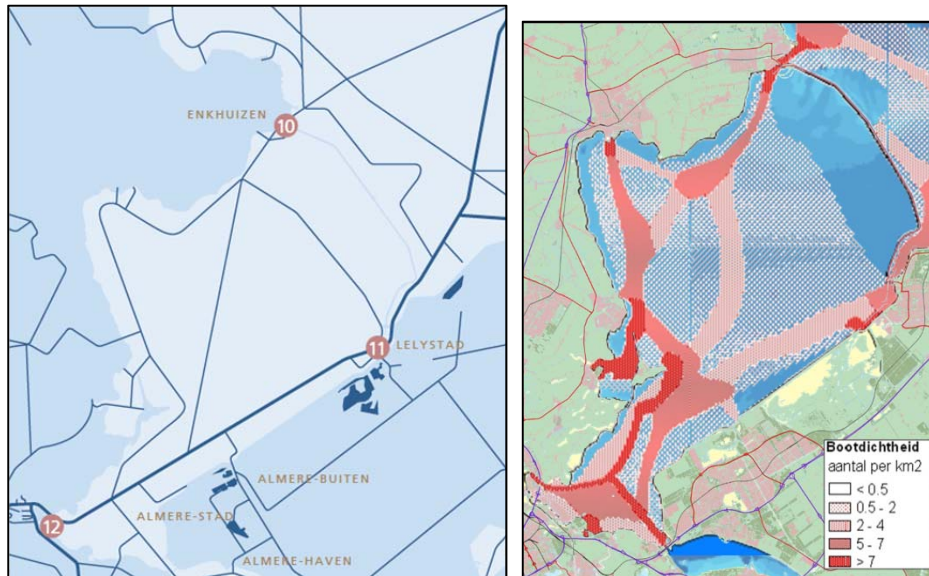
De afdeklaag kan alleen goed functioneren als deze stabiel blijft liggen. Als de afdeklaag in een korte tijd erodeert is de bescherming van de sliblaag tenietgedaan en dient de afdeklaag weer opnieuw aangebracht te worden. Paragraaf 2.3 gaat verder in op de stabiliteit van de afdeklaag.

Los van de natuurlijke belasting door golven en stroming kunnen ook schepen een sterke belasting veroorzaken op de laag door stroming en turbulentie als gevolg van de schroefbeweging.

Om het risico uit te sluiten dat de afdeklaag snel erodeert door scheepsbelasting is het verstandig om afdekken niet toe te passen in drukke scheepvaart routes.

Hierbij kan onderscheid worden gemaakt tussen beroepsvaart en pleziervaart. Vooral de schepen van de beroepsvaart hebben een diepgang die voor een grote belasting op de bodem kunnen zorgen. De belangrijkste scheepvaartverbinding voor de beroepsvaart is de hoofdvaarweg Amsterdam - Lemmer via Lelystad. Belangrijke nevenvaarroutes zijn de doorgaande verbindingen van Amsterdam rechtstreeks naar Enkhuizen (door naar Lemmer en naar Kornwerderzand) en de route voor de Noord Hollandse kust naar Hoorn.

Figuur 2.4 laat beroepsvaart routes zien (bron Knooppunten IJsselmeergebied, Randmeren en Flevoland, 5b, zie <http://www.varendoejesamen.nl>).



Figuur 2.4: Beroeps (links) en recreatievaartroutes (rechts) in het Markermeer

Voor de recreatievaart vormt het hele gebied ideaal vaarwater, zie Figuur 2.4 (rechts). Er wordt intensief gevaren langs de kust van Noord Holland en van en naar Hoorn.

De af te dekken gebieden zullen daarom vooral buiten de scheepvaart routes moeten worden gepositioneerd.

Op basis van bovenstaande kaarten is uiteindelijk bepaald welk gebied overblijft als potentieel geschikt gebied om de maatregel afdekken toe te passen. Figuur 2.5 geeft dit gebied aan (binnen de witte contour). Hierbij dient rekening gehouden te worden dat afdekken buiten de vaargeul plaatsvindt i.v.m. stabiliteit (vaargeul is buiten het plaatje gehouden omdat dit zou wegvallen in de schaal). Hierbij moet wel worden opgemerkt dat te plaatse van het Enkhuizerzand al zand aanwezig is, dus afdekken is hier minder zinvol.

Daarnaast betekent het ook niet dat het hele gebied binnen de contour afgedekt zou moeten worden. Ecologische en kosten aspecten kunnen hierbij een rol spelen. Dit wordt in de volgende hoofdstukken behandeld.



Figuur 2.5: Potentieel geschikt gebied voor het toepassen van de maatregel afdekken

2.2 Effect op mobiele sliblaag en fluffy laag

Deze paragraaf gaat vooral in op het effect van de afdeklaag (zand) die op de fluffy sliblaag wordt aangebracht. Onderzoeksvragen die hierbij horen zijn:

S31 Draagt deze techniek duurzaam bij aan de beperking van de mobiele sliblaag?

S32 Hoe reageert de fluffy bodemlaag (fijn slib) op een afdeklaag?

Afdekken is potentieel bruikbaar om resuspensie van slib vanaf de bodem te beperken. In principe blokkeert afdekken de bron van erosie² en resulteert daarmee in een heldere waterfase.

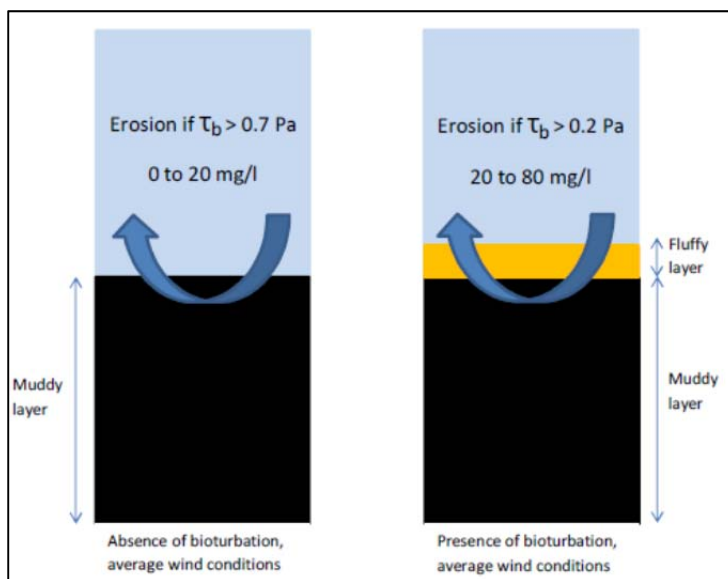
Er zijn echter nog andere omstandigheden die in ogenschouw moeten worden genomen. In het Markermeer is het mechanisme achter de verhoogde turbiditeit de grote erodeerbaarheid van de kleilagen als gevolg van bioturbatie door bodemorganismen (bioturbaters) die de vaste kleilaag omzetten in een mobiele sedimentlaag.

²Wanneer individuele deeltjes of aggregaten uit het bovenste laagje van het sediment worden meegenomen, spreekt men van oppervlakte-erosie. Wanneer het materiaal op een dieper gelegen vlak bezwijkt en grote delen ineens worden meegesleurd, heeft men te maken met massa-erosie. Wanneer vloeibaar slib (met een lage dichtheid, zonder inwendige structuur) in beweging komt door de instabiliteit van het scheidingsoppervlak slib-water, spreekt men van resuspensie van vloeibaar slib.

De mobiele sedimentlaag bestaat uit door bodemorganismen losgewoeld sediment (gebioturbeerd) en vers gedeponeerde slibvlokken. Losgewoeld sediment bestaat grotendeels uit hoopjes uitwerpselen (fecale pellets) van conveyor belt soorten. Dit zijn bodemorganismen die zich voeden met materiaal uit diepere sedimentlagen en dit vervolgens naar het oppervlak transporteren in de vorm van pellets.

Deze pellets accumuleren en vormen na verloop van tijd een nieuwe sedimentlaag, de mobiele sliblaag. De pellets uitwerpselen die de mobiele sliblaag vormen zijn losgewoelde deeltjes die minder cohesief zijn en daarom een kleinere weerstand tegen erosie hebben. De mobiele sliblaag erodeert al bij een bodemschuifspanning van 0.2 Pa terwijl de originele, niet gebioturberde kleilaag pas bij 0.7 Pa of hoger erodeert.

Zonder het effect van bioturbatie zou het water van het Markermeer een concentratie zwevend stof hebben in de orde van 0 tot 20 mg/l (De Lucas Pardo, M. (2014) terwijl het nu in praktijk varieert tussen 20 en 80 mg/l bij gemiddelde windcondities. Het schema in Figuur 2.6 illustreert de consequenties van bioturbatie in de gelaagdheid van het sediment en de troebelheid van het water.



Figuur 2.6. Illustratie van het belang van bioturbatie in het Markermeer. Links de ongestoorde kleilaag (muddylayer) met een grotere weerstand tegen erosie, rechts de mobiele sliblaag (fluffy layer) met een lagere weerstand tegen erosie boven op de originele kleilaag.

Het gevolg van bioturbatie in het Markermeer (Figuur 2.6) is dat afdekken van het sediment, om effectief te zijn, aan twee voorwaarden moet voldoen, te weten:

1. Het fysisch blokkeren van erosie.
2. Het stoppen van bioturbatie.

Ter illustratie van deze voorwaarden is aangenomen dat de Markermeer waterbodem met een laag zand afgedekt wordt. Zand zal zeker de erosie van de kleibodem en de fluffy bodem blokkeren.

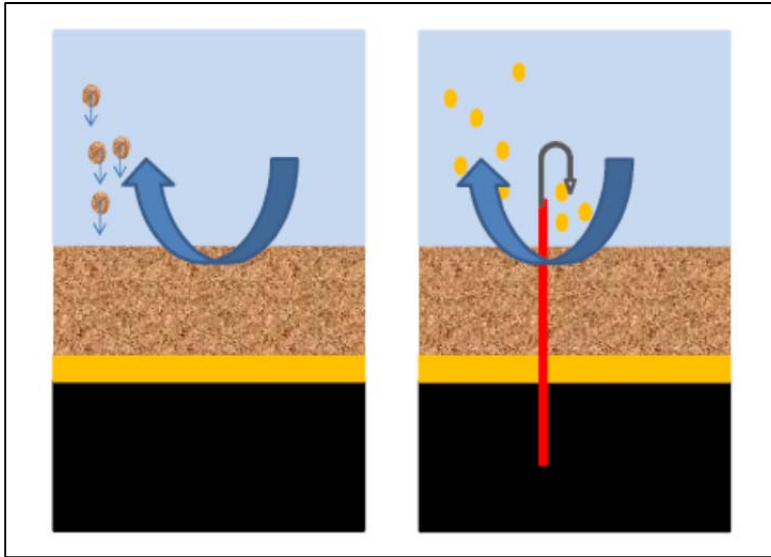
Het afdekzand zelf kan als gevolg van golfwerking bij harde wind ook eroderen maar het zal snel terugvallen naar de bodem omdat de sedimentatiesnelheid van zand groot is in vergelijking met die van de fijnere deeltjes. Hoe grover het zand hoe minder frequent erosie ervan zal optreden. De zandlaag dient daarnaast voldoende dik te zijn om te voorkomen dat bij geringe erosie ervan het onderliggende slib kan ontsnappen (sedimentatie van fijn materiaal is immers langzamer dan die van het beschermende zand waardoor menging van zand en slib een risico is). Op basis van erosiesnelheid en duur van wind gebeurtenissen in het Markermeer is geschat dat een laag met een homogene dikte van orde maximaal 10 cm voldoende is (pers. comm. M. de Lucas).

Afdekken met te weinig zand is minder effectief dan op basis van bovenstaande geconcludeerd zou kunnen worden. Als de afdeklaag bijvoorbeeld niet compact genoeg of te dun is aangebracht zullen wormen en andere bodemorganismen er in slagen om door de zandlaag heen het onderliggende voedselrijkere slib te bereiken om vervolgens fecale pellets aan het oppervlak (waar zuurstof beschikbaar is) te deponeren. Het niet stoppen van bioturbatie leidt dan uiteindelijk dan weer tot een gemiddelde toplaag en een troebele waterfase. Wormen zijn niet in staat een te dikke (meer dan 3 cm) zandlaag of een te compacte laag (geen getalsmatig criterium beschikbaar) te koloniseren. Een en ander is weergegeven in Figuur 2.7. Een laagdikte van 10cm die nodig is om erosie ervan te voorkomen is dus ook ruim voldoende dik om kolonisatie ervan te voorkomen.

Het type zand dat voor het afdekken wordt gebruikt mag geen geschikte habitat voor wormen en bodemorganismen vormen. Dat kan gebeuren als het zand een te grote fractie fijne deeltjes (slib of fijn zand) heeft. In sedimenten van het Markermeer is ook in fijnzandige sedimenten al activiteit van bodemfauna waargenomen welke kan leiden tot de vorming van een nieuwe fluffy laag. Het toepassen van een zandafdekking kan hierdoor binnen een aantal weken al inefficiënt worden.

Een ideale afdeklaag voor wat betreft het voorkomen van resuspensie is dus ondoordringbaar voor bodemorganismen en ongeschikt als habitat voor bodemfauna; een laag van grof zand of gravel (0,5 tot 2 mm) is bijvoorbeeld geschikt omdat van gravel bekend is dat wormen er niet in voorkomen.

Het aanbrengen van grof zand of gravel zal op een goede manier moeten gebeuren. Naarmate het afdek materiaal grover wordt neemt de kans toe dat het materiaal in de mobiele (fluffy) sedimentlaag wegzakt. Dit kan vooral voorkomen in delen waar de dichtheid van de fluffy laag is.



Figuur 2.7. Links: Afdeklaag die erosie van de (mobiele)kleilaag blokkeert. Tijdelijke erosie van zand beschermt de onderliggende klei als de afdekkende laag dik genoeg is. Rechts: Als wormen (rood) door de afdeklaag heen de kleilaag bereiken kunnen ze een nieuwe mobiele kleilaag boven op de afdek laag vormen. Resuspensie van deze nieuwe mobiele laag zal tot een troebele waterfase leiden.

Zelfs indien de bestaande fluffy laag efficiënt met een geschikte laag wordt afgedekt -die zowel erosie als bioturbatie blokkeert- is er nog een derde potentieel risico, namelijk dat fijn slib langzaam vanuit de waterkolom of vanaf de onderkant van het pakket indringt in de aangebrachte zandlaag. Dit zal uiteindelijk leiden tot kolonisatie van het afdekkend met bodemorganismen. Met name bij grof zand, dat geschikt is om bioturbatie (op korte termijn) te blokkeren, is het risico van infiltratie van fijn slib in de zandige toplaag aanwezig. Afdekken met erg poreus materiaal, zoals grof en los gepakt zand, is op lange termijn hierdoor mogelijk inefficiënt.

Tot slot bestaat zelfs met optimaal afdek materiaal -dat erosie en bioturbatie blokkeert en waarvan de matrix moeilijk doordringbaar is voor fijn slib (compact met lage porositeit)- het risico dat de efficiëntie van afdekken op lange termijn afneemt omdat slib van elders uit het Markermeer blijvend op de afdeklaag wordt afgezet. Ook dat leidt uiteindelijk tot kolonisatie van de nieuw afgezette laag en tot vorming van een fluffy laag. Afdekken van gebieden in het meer waar accumulatie van slib op de lange termijn het dominante proces is, is dus niet efficiënt (om die reden zijn in paragraaf 2.1 netto sedimentatiegebieden als niet geschikt voor afdekken beoordeeld).

Afdekken met een potentieel geschikt materiaal van die delen van het Markermeer waar erosie het dominante proces is, zal leiden tot het stoppen van bioturbatie en het stoppen van de productie van fluffy slib op deze locaties.

Samenvattend kan gesteld worden dat het voorkomen van bioturbatie essentieel is voor het effectief afdekken van de fluffy bodemlaag. Afdekken kan hiertoe gebruikt worden maar er kan geconcludeerd worden dat het effect van afdekken op bioturbatie niet recht-toe-rechtaan is.

Het resultaat zal afhangen van de karakteristieken van de afdeklaag (het slibgehalte, de dikte en de compactheid van de laag) en daarnaast ook van de mate waarin de afdeklaag op de lange termijn door fijn slib van elders beïnvloed wordt (afzetting op en indringen in de afdeklaag). De hier gepresenteerde analyse is geldig voor zand en gravel of vergelijkbaar granulair materiaal. Afdekken is –zonder beschouwing van de kosten– natuurlijk ook mogelijk met andersoortige materialen zoals geo-textiel, schelpmateriaal of beton. De verwachting is dat dit soort materialen de kans op bioturbatie verkleinen dan wel uitsluiten. Re-kolonisatie van op deze manier afgedekte delen van het meer is dan alleen mogelijk in het afgezette fijne materiaal boven op de afdekking. Bij het aanbrengen van dit soort materiaal is het daarom extra van belang om voorzichtig te werk te gaan zodat erosie in de omgeving van de afdekking zoveel mogelijk wordt beperkt en de afdekking niet een nieuwe fijne sedimentlaag op zich krijgt. Bij het aanbrengen van geo-textiel spelen nog meer technische aspecten een rol dan bij het aanbrengen van een granulaire afdeklaag, denk aan penetreerbaarheid van scheepsankers en risico's van het oplichten van een mat aan de randen.

Tot slot nog een opmerking over onvoorziene effecten. Het gevolg van effectief afdekken van een deel van de bodem van het Markermeer is dat het bodemleven onder de afdeklaag waarschijnlijk zal verdwijnen (door de aangebrachte laag zal de aanvoer van zuurstof sterk of geheel beperkt worden). Het negatief beïnvloeden van de ecologie van, tenminste een deel, van het meer heeft mogelijk onvoorziene effecten gezien de feedback mechanismen tussen biota en sediment dynamica. Dit moet goed worden doordacht voordat een maatregel als afdekken wordt toegepast.

De vraag of het tegengaan van bioturbatie bij afdekken vanuit ecologisch perspectief wenselijk is wordt in hoofdstuk 3 behandeld.

2.3 Stabiliteit van afdeklaag

De stabiliteit van de afdeklaag kan in het geding komen door belasting van golven en stroming op de (zandige) afdeklaag. Deze belasting kan worden veroorzaakt door natuurlijke omstandigheden, maar ook door scheepsbelasting. Deze paragraaf behandelt beide typen belasting en geeft conclusies over de zinvolle locaties van afdekken en over het te gebruiken type zand.

Allereerst wordt de volgende onderzoeksvraag behandeld.

S31bRH Is de schroefstraal belasting door schepen van belang?

Door Deltares is in 2012 een analyse van het effect van de schroef op erosie in de vaargeul Amsterdam-Lemmer gemaakt. De resultaten uit die studie zijn ook bruikbaar in deze rapportage. De belangrijkste zaken worden hieronder samengevat.

Scheepstypen

De vaarweg langs de Noord-Hollandse kust heeft bevaarbaarheidsklasse Va. De bevaarbaarheidsklasse bepaalt de maximum afmetingen van toegestane schepen. De vaarweg Amsterdam-Lemmer (VAL) behoort tot het hoofdvaarwegennet en is in bevaarbaarheidsklasse Va en Vb ingedeeld. De VAL wordt voor de maatregel afdekken hier buiten beschouwing gelaten omdat de vaargeul als sedimentatiegebied op voorhand niet geschikt voor afdekken.

Bij het inschatten van het effect van scheepsbelasting op de erosie van de afdeklaag van bodemmateriaal wordt hier uitgegaan van vaarwegklasse Va. Dit betekent dat de schepen die de vaarweg gebruiken een maximale breedte hebben van 11,4 m en een maximale diepgang van 3,5 – 4,0 m. Het verschil tussen het maximum toegestane schip uit klasse Va en Vb vaarwegen zit in de lengte (klasse Vb tot 190m) en het laadvermogen en het daarmee gerelateerde schroefvermogen.

In GoogleMaps wordt op 10 januari 2013 voor de Noord Hollandse kust (52°31'26" N , 5°09'04") een schip met lengte van 100 m lengte waargenomen, dit laat zien dat rekening moet worden gehouden met grote (klasse Va) schepen buiten de VAL, dus ook in gebieden waar afdekken zou kunnen worden toegepast. We nemen hierbij aan dat schepen die buiten de VAL varen niet dieper dan 3.5 m steken. Aan de westzijde van het Markermeer is dat al behoorlijk diep, omdat daar in bepaalde delen de waterdiepte niet groter is dan 3,5 m.

Uit een (literatuur-)onderzoek naar de havens in het IJsselmeergebied (dat tot doel heeft na te gaan hoe de havens functioneren ten aanzien van de visserij, beroepsscheepvaart en recreatie, en de economische betekenis van de functies en relaties) blijkt het volgende: in totaal zijn er 63 havens in het IJsselmeergebied (Markermeer en IJsselmeer) waarvan er ca. 20 een functie hebben voor de beroepsvisserij, ca. 61 havens hebben een functie voor de recreatie en ca. 10 havens hebben een functie voor de beroepsvaart. Monnickendam is de grootste haven aan het Markermeer. Voor de beroepsvisserij zijn in het Markermeer de havenplaatsen Enkhuizen en Volendam de belangrijkste. Voor de beroepsvaart zijn in het Markermeer twee havens van belang, Edam en Hoorn. Voor de recreatie zijn in feite alle havens van belang. Zie ook figuur 2.4.

Ontwerpdiepte van de vaargeul

In de richtlijnen voor vaarwegen (Rijkswaterstaat, 2005) wordt voor een normaal vaarwegdwarsprofiel een diepte van 1,4 maal de diepgang van het stilliggende maatgevende schip ten opzicht van Maatgevend Laag Water (MLW) voorgeschreven. Uitgaande van een maatgevend schip met een diepgang van 3,5 m zal de diepte van een vaarweg tenminste 4,7 m behoren te zijn. Zelfs bij de hoogste waterstand (op het Markermeer is de MLW het winterpeil, -0,4 m NAP) wordt de benodigde waterdiepte voor zo'n schip niet gehaald buitend de VAL. In het Markermeer is buiten de vaargeul de waterdiepte nergens groot genoeg om beroepsvaart zonder erosie te laten varen.

Op basis van bovenstaande redenering kan het volgende worden geconcludeerd over het effect van schepen op de stabiliteit van de afdeklaag:

- Gemotoriseerde schepen met een te kleine kielspeling (<1m) eroderen de waterbodem (onderscheid naar korrelgrootte verdeling is niet nodig, ook grof zand zal eroderen).
- Beladen beroepsvaart (diepte 3.5m) heeft in het Markermeer onafhankelijk van de waterstand buiten de vaargeul nooit de benodigde kielspeling om erosie van bodemmateriaal te voorkomen. Erosie zal dus waarschijnlijk altijd optreden.
- Er zijn diversie plaatjes in Google Maps die slib pluimen achter schepen laten zien. Scheepvaart in het Markermeer gaat grotendeels door de Vaargeul Amsterdam-Lemmer (VAL) maar ook andere havens zijn geschikt voor beroepsvaart.

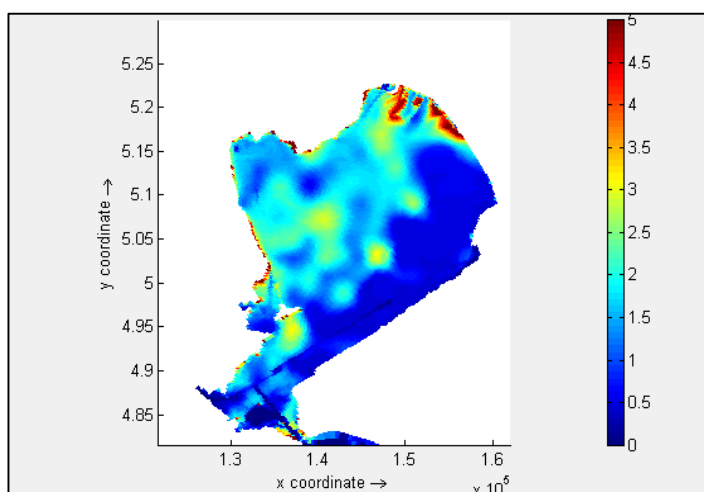
Zo heeft o.a. Hoorn een haven die deels tot 4.0m diep is (RWS rapport havens in het IJsselmeergebied) Volgens dat rapport hebben ook Enkhuizen en Volendam havens voor beroepsvaart.

- Op Google Maps zijn plaatjes van scheepvaart voor de kust van Noord Holland te die aantonen dat grote schepen deze route varen. Op 10 januari 2013) vaart een schip met een lengte van 100m (dus klasse Va) op positie 52°31'26" en 5°09'04".
- Onbekend is hoe intensief de scheepvaart buiten de VAL is. Voor de kust van Noord-Holland waar potentieel gebieden geschikt zijn om af te dekken zou dit interessant zijn om te weten.
- De kans op erosie van de afdeklaag door scheepvaart is groot.
- Afdekken zal vooral buiten de belangrijke vaarroutes moeten plaatsvinden, om de kans op verstoring te verminderen.

S31cRH Wat is de stabiliteit van de afdeklaag?

Een afdeklaag moet in voorkomende gevallen bestand zijn tegen erosie door stroming en golven. Een maat voor de eroderende kracht hiervan is de bodemschuifspanning. De bodemschuifspanning op de Markermeerbodem is met het Markermeer slibmodel berekend, in Figuur 2.8 is de 99-percentiel van de bodemschuifspanning geschat. De weergegeven hoogste waarden worden dus in slechts 1% van de tijd overschreden (maximale bodemschuifspanning kan tot 5 Pa oplopen). Door een afdeklaag te kiezen die bestand is tegen een erosiekracht (bodemschuifspanning) van 3 Pa (gele kleur) is het overgrote deel van het Markermeer het grootste deel van het jaar beschermd tegen erosie.

In standaard grafieken (voorbeeld in Figuur 2.9) de erosie weerstand (y-as) van niet-cohesie sediment als functie van de korrelgrootte van dat materiaal (x-as) af te lezen. In de grafiek is de waarde van de 1% bodemschuifspanning (3Pa) aangegeven. Te zien is dat afdekkand met een korreldiameter grover dan 500 μm onder die condities in het Markermeer nog wel zal bewegen (rollen en stuiten) maar niet meer zwevend door de waterkolom getransporteerd wordt. Om de afdeklaag helemaal niet meer te laten bewegen is een factor tien (!) grover zand nodig (korreldiameter 5mm).



Figuur 2.8: Berekende 99-percentiel (gemiddelde + 3 x standaard afwijking) van de bodemschuifspanning in het Markermeer in 2006

Er zal dus grof zand met een minimum korreldiameter van 500 μm moeten worden gebruikt om te voorkomen dat de afdeklaag erodeert. Zoals aangegeven in paragraaf 2.2 is zand van 500 μm ook geschikt bioturbatie te beperken. Vanuit stabiliteit is grover zand weliswaar wenselijk (tot 5mm) maar daarin zal door de grote porositeit ook makkelijker slib doordringen waardoor afdekken niet meer effectief is (geen vast criterium voor een bovenwaarde beschikbaar). Het is waarschijnlijk beter om in plaats van veel grover (>500 μm) zand een dikkere laag aan te leggen of de laag aan te vullen als deze onverhoopt door erosie dunner wordt.

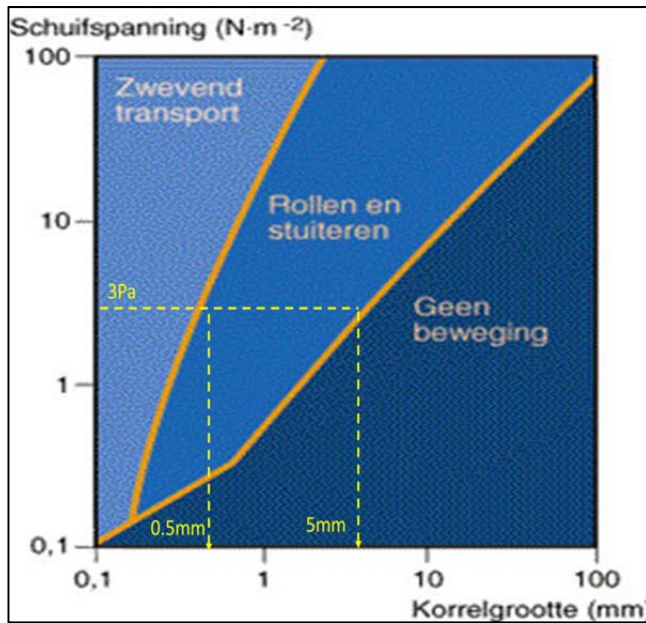
In het kader van het project MarkerWadden is door Fugro (2013) bodemonderzoek uitgevoerd. Hierbij zijn ook korrelgrootte verdelingen bepaald, deze zijn opgenomen in bijlage A. Hieruit blijkt dat er grof zand aanwezig is. Het grofste zand ($D_{50} > 500 \mu\text{m}$) lijkt in de diepste lagen van de ondergrond van het Markermeer te zitten (tot soms -38m).

Hoewel bekend is dat zand met een geringe bijmenging klei³ beter bestand is tegen erosie (Torfs, 1998) wordt het gebruik van cohesief zand afgeraden in verband met het risico op bioturbatie.

Praktische toepassingen van zand voor afdekken in het Markermeer zijn niet aanwezig. De keuze voor het de korrelgrootte en samenstelling van het gewenste zand is dus enkel theoretisch onderbouwd. Het verdient aanbeveling een experiment met afdekken met verschillende soorten zand uit te voeren.

De pilot met zandsuppletie in het IJsselmeer (bij Workum) levert ook geen direct bruikbare of kwantitatieve resultaten op die ook voor het Markermeer toepasbaar zijn. Hier ligt nog wel een mogelijkheid tot verdere verdieping/vergelijking met Markermeer situatie: De verplaatsing van zandsuppletie in IJsselmeer (kust bij Workum, 1,25m diep, pakket zand van 50 cm dik tot kruin -0,7m, 125-180 μm korrel) is in een jaar tamelijk gering, orde 1m verplaatsing richting de kust en het overgrote deel van het zandpakket ligt er nog. De omstandigheden ter plaatse zijn ruw (lange strijklengte vanuit Zuidwestelijke richting en deels vergelijkbaar met Enkhuizerzand. Golven zijn er misschien minder hoog omdat water er ondieper is.

³ De kritische bodemschuifspanning van homogeen zand (230 μm) neemt min of meer lineair toe van 0.4 Pa (bij 0.4% slib <63 μm) tot bijvoorbeeld 3.0 Pa voor cohesief zand (met 15% slib).



Figuur 2.9: Voorbeelden van de erosie weerstand (y-as) van niet-cohesief sediment (links) als functie van de korrelgrootte van dat materiaal (x-as)

3 ECOLOGISCHE ASPECTEN

Dit hoofdstuk behandelt de ecologische aspecten van afdekken en gaat vooral in op de volgende vraag:

S33 Wat zijn de ecologische effecten van afdekken?

Ecologische effecten

Zandkorrels zijn aanmerkelijk zwaarder dan slib- en kleideeltjes en zullen sneller sedimenteren en minder gemakkelijk worden opgewerveld. Zand heeft hierdoor een minder grote verblijftijd/aanwezigheid in de waterkolom. Onder andere als gevolg hiervan heeft een meer met een zandige bodem bij gelijke algenconcentraties een minder troebele waterfase en daardoor een beter lichtklimaat dan een meer met een slibbodem.

Uit onderzoek naar de relatie tussen erosie- en sedimentatieprocessen enerzijds, en biota anderzijds (Miguel de Lucas Pardo, 2014) blijkt dat in het Markermeer bioturbatie door bodemfauna de belangrijkste oorzaak is van erosie van het oude Zuiderzee sediment (klei bodem), en dat door hersedimentatie een mobiele toplaag is ontstaan waardoor het meer in het algemeen troebel is (zie hst 2). Hoewel de troebelheid (d.w.z. gebrek aan licht) door afgenomen nutriëntengehaltes tegenwoordig niet meer de belangrijkste limiterende factor voor de (primaire) productie is, is deze productie echter nog steeds lager dan op basis van de voedselrijkdom mag worden verwacht. Waarschijnlijk komt dat door vlokvorming van gesuspendeerde slibdeeltjes met planktonische algen. Opgesloten in die vlokken zien de algen minder licht en is bovendien een deel van de algenproductie niet beschikbaar voor de rest van het voedselweb. Door de resuspensie van slib te beperken, bijvoorbeeld door lokale afdekking, kan de vlokvorming mogelijk worden geremd, waardoor de productie en beschikbaarheid van algen toeneemt.

Dit verhaal betreft echter vooral de filteraars, zoals watervlooien en mosselen, die niet met die grote vlokken overweg kunnen. Bodemorganismen zoals wormen en muggenlarven, die verantwoordelijk zijn voor bioturbatie, kunnen wel met het materiaal overweg. Een (toegenomen) deel van de totale productie verloopt dus via deze weg, en ook dat is waardevol. Voor een divers en productief systeem is echter meer balans in het voedselweb wenselijk. Dit betekent meer productie in de waterkolom (fytoplankton buiten vlokken in de keten via watervlooien naar kleine vis zoals Spiering) en in ondiepe gebieden met (meer kansen voor) waterplanten.

Mosselen zijn minder voedsaam geworden voor eenden, omdat ze magerder zijn geworden als gevolg van de vlokvorming. Een groot deel van de vlokken wordt namelijk te groot om te filteren. De rol van mosselbanken voor de diversiteit is nog wel groot, omdat tussen de mosselen veel andere ongewervelden kunnen voorkomen. Bij afdekking is het dus enerzijds zaak om mosselbanken (en gebieden met waterplanten) te ontzien, terwijl anderzijds de conditie, het vleesgewicht en de voedingswaarde van mosselen voor vogels kan toenemen door beperking van vlokvorming. Dat laatste kan door de opwerveling van slibdeeltjes buiten de mosselgebieden te beperken, bijvoorbeeld door afdekken. Bij het toepassen van afdekking als maatregel is het dus zaak locaties te kiezen die buiten de mossel- en plantengebieden liggen.

Het aanbrengen van een afdeklaag van zand op de bodem van het Markermeer verandert de ecologische omstandigheden ter plaatse van de ingreep, maar heeft waarschijnlijk ook invloed daar buiten.

Een zandlaag met een dikte van 25-30 cm is toegepast in studies van de Bergse Plassen en de Kralingse Plas (De Bodem Bedekt, Deltares, 2011), de enige referenties voor deze ingreep.

Doordat het zand bovenop het slib ligt, is er nu interactie tussen het zand en het water in plaats van tussen het organische sediment en het water ([Van der Wijngaart, 2008](#)). Het zand bevat geen nutriënten, in tegenstelling tot het onderliggende sediment. Hierdoor neemt de interne eutrofiëring af. Randvoorwaarde was aanvankelijk (in de Bergse en Kralingse Plas) dat het gebruikte zand ontzilt is en vrij van nutriënten. Dit is echter geen belangrijke factor in het Markermeer, omdat de interne nutriënten belasting in het Markermeer waarschijnlijk gering is, aangezien sinds 2005 nauwelijks meer opgeloste nutriënten in het water aanwezig zijn. Aanwijzingen uit onderzoek (proeftuin NMIJ; Van den Berg et al. 2014) wijzen bovendien op sterke binding van nutriënten (fosfaat) aan Calcium in de bodem (extra interne belasting wordt ook weer vastgelegd in het sediment red.).

Afhankelijk van de methode van aanbrengen zullen eventueel aanwezige, niet-mobiele organismen begraven worden. Sommige organismen zullen blijvend verdwijnen, maar voor andere soorten komt er geschikt habitat voor in de plaats.

Het is daarmee in eerste instantie aannemelijk dat het afdekken van slibrijke gebieden buiten de gebieden met mosselen of waterplanten met zandig materiaal een netto positief effect op de verschillende habitats in het Markermeer heeft. Deze maatregel is echter slechts één keer uitgevoerd en verder heeft er nog geen onderzoek plaatsgevonden naar de effecten van het aanbrengen van zand op een nutriëntenrijke sedimentlaag. Deze maatregel kan dus alleen worden geëvalueerd aan de hand van de case study Bergse Plassen.

Waterplanten

De aanwezigheid en vestiging van ondergedoken waterplanten wordt in beginsel beïnvloed door het afdekken. In het zand dat wordt gebruikt om mee af te dekken zitten waarschijnlijk vrijwel geen zaden of delen van planten, dus indien planten zich willen vestigen, moeten zaden of propagulen van buiten worden aangevoerd. Uitvoering van een dergelijke maatregel in de Bergse Plassen, waarbij waterbodem materiaal uit het Veluwemeer is ingebracht, is overigens weinig effectief gebleken (De Bodem Bedekt, Deltares, 2011). Daarnaast zijn grote delen van het Markermeer diep, waardoor daar (vrijwel) geen waterplanten aanwezig zijn, behoudens ondiepe zones in de randzones, bijvoorbeeld bij de Gouwzee.

Voor lokale toepassing lijkt de maatregel afdekken weinig nadelige ecologische effecten te hebben. Doordat zand een andere structuur heeft dan veen of slib, kan de vestiging van planten anders verlopen. Zand is steviger dan slib en hier kunnen ondergedoken waterplanten waarschijnlijk beter in wortelen (Van der Wijngaart, 2008). Tevens verandert de typering van het sediment, en daarmee de bijbehorende ecologische karakteristieken.

Als het af te dekken gebied al vegetatie bevat, kan deze zich wellicht herstellen vanuit zaden of plantendelen in de afgedekte ondergrond, mits de dikte van de afdeklaag niet te groot is.

Mosselen

Vooraf voor mosselen is vast of stevig substraat, zoals zand en steen, een goede vestigingsplaats (Bij de Vaate, 1991) Kolonisatie van driehoeksmosselen treedt in eerste instantie deels op door aanhechting aan zachtere substraatdelen (waterplanten), later gevolgd door migratie naar hardere substraatdelen (steen, schelpen). Op zandigere bodems worden meer driehoeksmosselen aangetroffen dan op slibrijke bodems (Bij de Vaate, 1991).

De laatste jaren is er een (forse) toename van mosseldichtheden door invasie van een nieuwe, nauw aan de Driehoeksmossel verwante exoot ("Quagga-mossel") waargenomen in het Markermeer, maar ook in andere grote Nederlandse watersystemen.

De ANT studie heeft laten zien dat er nog geen toename van mossel-etende vogels in respons op deze opmars is gevolgd. Uit maagonderzoek is wel gebleken dat de Quagga-mosselen gegeten worden, maar de vogels lijken ook te verschuiven van gebieden waar de mosseldichtheden het hoogst zijn naar gebieden met waterplanten en daarbij behorende ongewervelden. Dit stelt de behoefte aan substraat voor mosselen in een iets ander daglicht (Noordhuis et al, 2014). Tegelijkertijd heeft deze invasie ook voor een autonome, natuurlijke toename van "afdek materiaal" (in de vorm van mosselschelpen) gezorgd die wellicht al enig remmend effect op de erosie heeft gehad, maar de bestendigheid van deze ontwikkeling is anno 2015 (in afwachting van een nieuwe kartering) nog niet duidelijk. Het afdekken van sliblagen kan hoe dan ook aanvullende positieve effecten hebben naast ontwikkeling en groei van mosselbanken. De eerder genoemde verslechtering van conditie (vleesinhoud) van de mosselen gaat ook op voor de Quaggamossel. In combinatie met de toename van planten en alternatieve ongewervelden als voedsel voor vogels (slakken, vlokreeftjes) verklaart dit waarschijnlijk het uitblijven van een reactie van de vogels op de Quagga-invasie. Als afdekken en andere maatregelen leiden tot minder vlokvorming en een betere conditie van de mosselen, neemt in principe de draagkracht voor vogels weer (verder) toe.

Vissen

Voor bepaalde vissoorten is een zandige bodem een geschikter habitat als paaipplaats dan een slibrijke bodem. Omgekeerd is er doorgaans minder voedsel in de vorm van zoöbenthos (macrofauna) in zandbodems beschikbaar dan in slibrijke bodems, maar dit hangt ook af van de aard van het slib.

Effecten op waterkwaliteit

Er zijn weinig concrete situaties bekend waar afdekken als maatregel is gebruikt en de effecten ook daadwerkelijk met monitoring gevolgd zijn.

In de Bergse Plassen is de waterkwaliteit na afdekken sterk verbeterd. Echter, in de case studie Bergse plassen zijn meerdere maatregelen tegelijkertijd uitgevoerd en met een ander doel dan in het Markermeer.

Samen met het specifieke karakter van het gedrag van slib in relatie tot plankton in de waterkolom (vlokvorming) maakt dit een goede vergelijking van de resultaten met de situatie in het Markermeer lastig. Naast het bezanden is namelijk ook actief biologisch beheer gepleegd (wegvangen van een groot deel van het visbestand), een chemische toeslagstof was toegevoegd aan het bezandingsmateriaal om fosfaatnalevering uit de bodem te stoppen en externe nutriëntenvrachten werden gereduceerd.

De bodem in de Bergse plassen bestaat deels uit veen en deels uit slib, in beide situaties bleef het zand goed op deze lagen liggen. Veenlagen kunnen in theorie nog methaan produceren en op die manier de zandlaag doorbreken, maar dit is niet geobserveerd in de Bergse Plassen (Van der Wijngaart, 2008).

Omdat in de Bergse plassen gebruik is gemaakt van ontzilt zeezand, was er geen zaadbank aanwezig op de nieuwe waterbodem. Een aanvullende proef in de Bergse Plassen, bestaande uit transplantatie van een stuk zand met zaadbank uit het Veluwemeer (kranswieren-dominante vegetatie), leverde geen directe verbetering op. Het duurde enkele jaren voordat vegetatie zich begon te ontwikkelen (pers. comm. J. Hemelraad, Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard).

4 AANLEGSTRATEGIE EN KOSTEN

Dit hoofdstuk behandelt de aanlegstrategie en kosten van de maatregel afdekken.

4.1 Aanlegmethoden afdekken

Belangrijkste onderzoeksvraag waarop antwoord wordt gegeven in deze paragraaf is:

S30 Welke technieken (zoals onderzuigen, sproeien en nevelen) bestaan er om slib af te dekken en welke is het meest effectief?

De volgende afdektechnieken worden behandeld.

1. Sproeien (=nevelen).
2. Onderzuigen.

Beide methodes gaan uit van het afdekken van de sliblaag met een zandlaag van enkele decimeters (2 tot 4 dm).

De dikte van de afdeklaag wordt vooral bepaald door de zwaarte van het in te zetten materieel. Bij groot materieel zal de minimale deklaag wat dikker zijn dan bij lichter materieel vanwege nauwkeurigheidbeperkingen bij zwaarder materiaal. Omdat op dit moment niet precies duidelijk is wat aannemers zullen gebruiken in het Markermeer is uitgegaan van een bredere range.

4.1.1 Sproeien

Bij de techniek sproeien wordt het materiaal via een pijp onder water gebracht, deze pijp met sproeikop hangt aan een schip (ponton, zuiger of hopper) en wordt afgehangen tot ongeveer 1 meter boven de bodem. Bij schoon zand kan de kop ook nog wel eens boven water gehouden worden om een nog fijnere afdeklaag te creëren.

Het zand kan in de pijp gebracht worden via een kraan met trechter, maar overwegend zal dit gebeuren via een perspomp (bv van een snijkopzuiger of sleepopperzuiger). De zandig materiaal wordt via een drijvende leiding naar een sproeiponton verpompt. Meestal is het sproeiponton voorzien van een sproeikop die ervoor zorgt dat het hydraulisch zand-watermengsel goed wordt verdeeld en als het ware vernevelt op de slappe slib. Hierdoor worden grote vervormingen en formatie van moddergolven grotendeels voorkomen.

Bij het sproeisysteem is het peilwerk van groot belang. Het proces moet gecontroleerd worden met peilingen. Indien de sliblaag zeer slap is wordt de zandlaag vaak in twee lagen aangebracht, de eerste laag (de "wapening" voor de tweede laag) wordt ingeregend om een soort van stabiliserende deken te verkrijgen.

Zie Figuur 4.1 voor enkele typisch voorbeelden van een sproeiponton, gekoppeld aan een drijvende leiding.



Figuur 4.1: Typische voorbeelden van sproeipontons (bron: DEME / Van Oord / Boskalis)

4.1.2 Onderzuigen

Bij de techniek onderzuigen om het realiseren van een bodemverlaging door bruikbaar materiaal (meestal zand) weg te zuigen van onder een laag onbruikbaar materiaal. Het karakter en de samenstelling van de bovenlaag wordt hierbij grotendeels bewaard. Vrijkomend zand kan gebruikt worden voor het afdekken van vervuild slib waardoor de waterkwaliteit verbetert. Door onder de bovenlaag zand te baggeren en dit op de bodem te plaatsen wordt de bestaande bodem geïmmobiliseerd. Na enige tijd zal door het gewicht van de zandlaag bovendien de oorspronkelijke bodem inklinken. Hierdoor treedt een verlaging op van het bodemniveau.

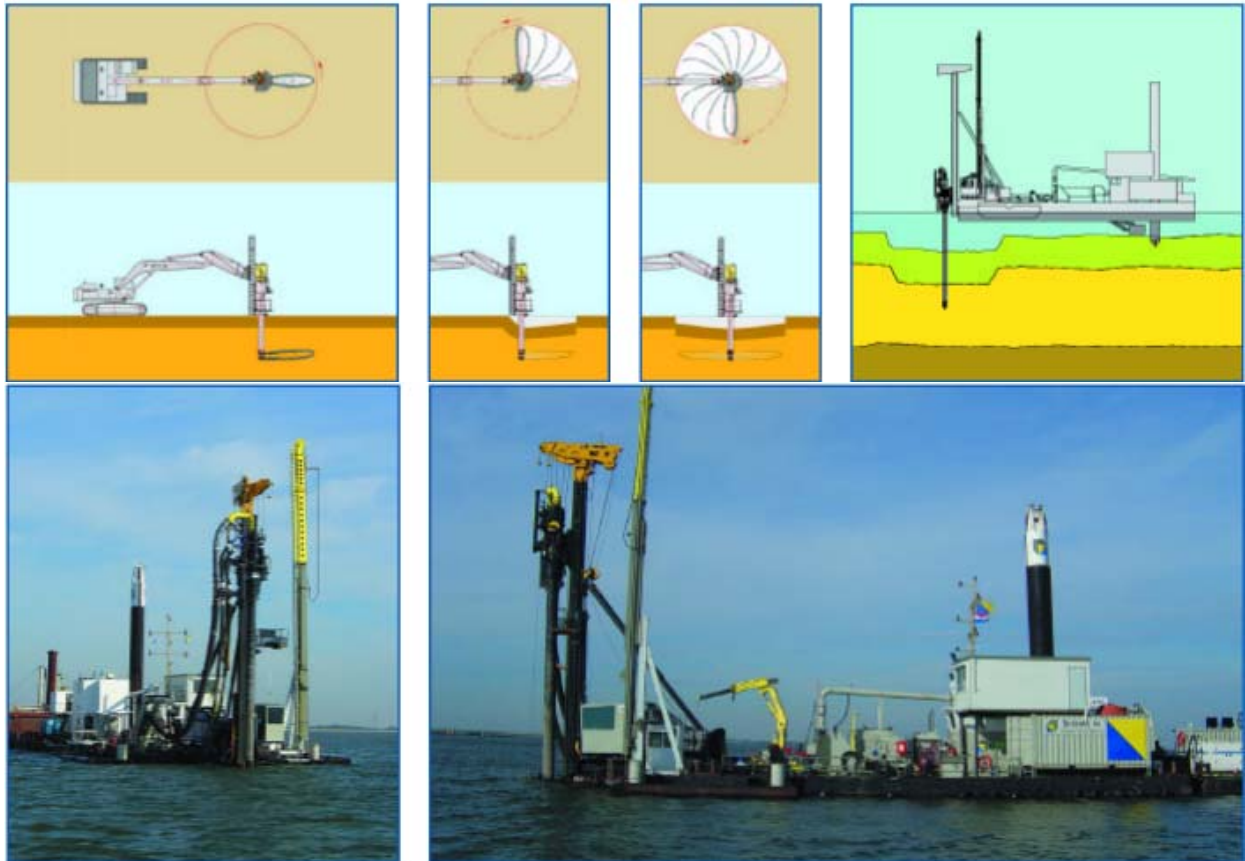
Onderzuigen kan zowel op land als op water worden toegepast.

Het werktuig voor de onderzuigtechniek bestaat uit een meerledig samenstel van buizen, bevestigd aan een ponton of kraan. Het samenstel kan verticaal bewegen en om de langsas roteren. Onderin het roteerbare deel wordt met een horizontaal gerichte waterstraal onder hoge druk het zand losgespoten. Het zand-watermengsel wordt door de binnenbuis opgezogen. Tijdens het proces wordt het volume van het injectiewater en het afgevoerde mengsel exact op elkaar afgestemd, waardoor geen ongewenste stromingen ontstaan.

Zie Figuur 4.2 voor een voorbeeld en werkingsprincipe van onderzuigmaterieel.

Vergelijkbaar met de sproei-techniek wordt bij de onderzuigtechniek ook gebruik gemaakt van een sproeiponton en een drijvende leiding. Het werkponton met de "onderzuig-kraan" zuigt zand onder de sliבלאג vandaan en via een grondpers wordt dit hydraulische zandmengsel via een drijvende leiding naar een sproeiponton verpompt. Het sproeiponton brengt vervolgens een afdeklaag zand aan over het slib.

Het onderzuigen is een relatief nieuwe techniek waarmee een aantal pilotprojecten mee zijn uitgevoerd tussen 2002-2008. Momenteel worden de eerste projecten uitgevoerd met deze techniek (bv. Project Waterfront Harderwijk door Boskalis).



Figuur4.2: Voorbeelden van onderzuigmaterieel (bron: Boskalis)

4.1.3 Vergelijking Sproeien en Onderzuigen

Beide afdektechnieken zijn in principe effectief en bieden feitelijk dezelfde immobilisatie van de sliblaag. Immers bij het onderzuigen wordt er ook een afdeklaag over het slib gespreid. Echter het afdek materiaal wordt heel lokaal gewonnen.

Zowel sproeien als onderzuigen hebben beide hun voor- en nadelen. En voor beide geldt ook dat de lokale omstandigheden aan moeten sluiten bij de vereisten van de verschillende technieken. Is er bijvoorbeeld geen geschikt materiaal aanwezig in de onderlagen om opgezogen te worden dan valt het onderzuigen als mogelijke afdektechniek af.

Te denken valt ook aan een combinatie van beide technieken. Mocht vanwege vaardiepte beperkingen het sproeien van een halve meter zand niet mogelijk zijn, dan kan in de vaargeul wellicht het onderzuigen worden toegepast en voor de overige gebieden het snellere en waarschijnlijk goedkopere sproeien met een externe zandbron.

Hieronder worden enkele algemene voor- en nadelen beschreven voor sproeien en onderzuigen. Waar mogelijk is dit specifiek gemaakt voor de situatie in het Markermeer.

4.1.4 Voor- en nadelen Sproeien/Nevelen

Voordelen sproeien

1. Gekende techniek (vaker toegepast).
2. Grote producties haalbaar en continuïteit.
3. Zandwinning voor sproeien mogelijk te combineren met baggeren van slibputten. Omdat in het Markermeer verschillende projecten in uitvoering gaan de komende jaren, is dit een reëel voordeel.
4. Goedkopere methode dan onderzuigen.
5. Te combineren met andere werken waar een zand/slib overschot is.
6. Meerdere mogelijkheden voor zandlevering (hopperzuiger, steekkopzuiger, bakken).

Nadelen sproeien:

1. Afhankelijk van aanwezigheid van geschikt afdek materiaal.
2. Grotere CO2 ladder aangezien er meer/groter materieel nodig is.

4.1.5 Voor- en nadelen Onderzuigen

Voordelen onderzuigen

1. "Werk met werk maken", dus duurzame methode.
2. Netto bodemdaling dus gunstig in gebieden met scheep/pleziervaart.
3. Innovatief en stimuleert marktontwikkeling.
4. Zand wordt lokaal gewonnen en dus minder afhankelijk van supply-chain.

Nadelen onderzuigen

1. Relatief onbekende techniek waarin nog niet veel ervaring is opgedaan.
2. Een of twee spelers op de markt die deze techniek hebben (minder marktwerking en concurrentie).
3. Relatief lage producties en veel onderbrekingen in proces (pontoon elke keer verplaatsen).
4. Duurdere methode dan sproeien.
5. Onbekend wat de lange termijn effecten zijn in de onderbodem (verstoring).
6. Afhankelijk van aanwezigheid van geschikt zand en voldoende volume in de onderlagen. In het Markermeer zit het zand aan de westzijde op een diepte van 15 m. Aan de oostzijde is dat orde 5 m. Daarom lijkt deze techniek moeilijk toepasbaar aan de westzijde van het meer. De techniek is voornamelijk geschikt tot een diepte van 5 m.
7. Veel grondonderzoek nodig om precieze laagdiktes te bepalen.

4.1.6 Conclusie

In het algemeen zijn zowel sproeien en onderzuigen beide geschikte en effectieve technieken om slib af te dekken. Ieder met eigen specifieke voor- en nadelen. In deze fase, waarin essentiële project informatie (waterstanden, grondonderzoeken, locatie, volumes, etc.) ontbreekt, kan niet bepaald worden welke techniek het best kan worden toegepast.

Deze paragraaf heeft dus vooral een informatief karakter en kan meehelpen aan het betere begrijpen van de voor- en nadelen en uiteindelijk voor het kiezen van een bepaalde techniek.

Wel kan worden gesteld dat sproeien naar alle waarschijnlijkheid de beste methode voor het Markermeer zal zijn, in ieder geval aan de westzijde. Onderzuigenis daar moeilijk toepasbaar, omdat daar de zandlaag op een te grote diepte aanwezig is. Aangezien aan de oostzijde de maatregel afdekken niet zal worden toegepast (zie ook hoofdstuk 2), blijft dus eigenlijk alleen de methode sproeien over. Het afdekzand zal dan van verder moeten worden aangevoerd.

4.2 Kosten

Deze paragraaf gaat in op de kosten van afdekken, naar aanleiding van deze vraag:

S34 Wat zijn de realisatiekosten van de meest effectieve techniek voor het afdekken van slib?

Voor het bepalen van de realisatiekosten voor het afdekken van slib is naar 2 scenario's gekeken met daarbij onderscheid is gemaakt naar omvang van het af te dekken oppervlak.

Scenario 1: het voor het afdekken benodigde zand wordt geleverd uit een zand-concessie en naar de verwerkingslocatie getransporteerd en daar gespreid op de waterbodem.

In het tarief van het te kopen zand zijn de kosten van de concessiehouder gerekend met daarbij ook de kosten van de domeinvergoeding (tarieven van Rijksvastgoedbedrijf). De transportafstand is aangehouden op 30 km, gebaseerd op een concessiehouder in het IJsselmeergebied.

Scenario 2: het benodigde zand wordt gewonnen nabij de verwerkingslocatie. In de kostenraming is uitgegaan van het verplaatsen van de aanwezige deklaag en afzet van een deel hiervan op een dieper gelegen gebied, waarna zand gewonnen wordt. De rest van de deklaag kan worden omgeput. Er is gerekend met een winlocatie op gemiddeld 3 km van de verwerkingslocatie. Het kostenkengetal voor dit scenario is ontleend aan de kostenramingen welke voor project Markerwadden zijn gemaakt door Royal HaskoningDHV. Hoewel in de voorgaande paragraaf de wintechiek met onderzuiger is toegelicht, zal deze qua kosten waarschijnlijk in de range van het gehanteerde kengetal uitkomen voor dit scenario. Opgemerkt moet worden dat in dit scenario niet gerekend is met het afdragen van de domeinvergoeding voor het winnen van zand, er vanuit gaande dat vergunningen voor winning op locatie verleend zullen worden en dat het een rijksoverheidswerk is.

Het verschil in scenario's is vooral bedoeld om de bandbreedte in kosten tussen beide inzichtelijk te maken voor een drietal verschillende projectgroottes:

- gebied afdekken van 200 m x 200 m;
- gebied afdekken van 1 km x 1 km;
- gebied afdekken van 5 km x 5 km.

Voor de laagdikte is gerekend met gemiddeld 0,30 m. Afhankelijk van de grootte van het in te zetten materieel ligt de aanlegnauwkeurigheid tussen 0,20 m en 0,50 m.

Bij kleinere werken worden de aanlegkosten vooral gedomineerd door de mobilisatie / demobilisatie kosten van het in te zetten materieel. Bij de grotere werken valt dat effect weg in de totale kosten. Er is verder onderscheid gemaakt in omvang van het materieel. Met name in het type bakkenzuiger die de beunbakken leegt en het zand vervolgens naar het sproeioponten verpompt. In de kosten van het materieel is rekening gehouden met de monitoring van het aanlegprofiel (laagdikte controle).

De kosten liggen tussen de waarden zoals hieronder is weergegeven.

| | Laagste | Uiterste |
|--|--------------|--------------|
| Klein gebied (200 meter bij 200 meter) | € 106.000 | € 320.000 |
| Middelgroot gebied (1 km bij 1km) | € 1.500.000 | € 5.190.000 |
| Groot gebied (5 km bij 5 km) | € 36.270.000 | € 97.030.000 |

De prijzen per m2 zijn als volgt, gebaseerd op het gemiddelde tussen de Laagste en Uiterste waarden:

Scenario 1

Klein gebied (200 meter bij 200 meter)
Middelgroot gebied (1 km bij 1km)
Groot gebied (5 km bij 5 km)

prijs per m2

€ 5,32
€ 3,46
€ 2,59

Scenario 2

Klein gebied (200 meter bij 200 meter)
Middelgroot gebied (1 km bij 1km)
Groot gebied (5 km bij 5 km)

prijs per m2

€ 3,13
€ 1,77
€ 1,71

Deze m2 prijzen gelden voor een gemiddelde laagdikte van 0,30 m.

S35 Wat zijn de beheer- en onderhoudskosten van de meest effectieve techniek om slib af te dekken?

De beheer en onderhoudskosten van een afdeklaag zijn in principe beperkt als de afdeklaag zo wordt aangelegd dat deze stabiel blijft.

Een afdeklaag moet van nature zo stabiel mogelijk worden aangelegd, anders werkt deze maatregel niet. Een afdeklaag die niet stabiel is, dus zo nu en dan wordt opgewoeld (danwel door golven/stroming, danwel door scheepsbelasting), zal in de tijd steeds dunner worden. In dat geval is frequente monitoring en bijsproeien van zand nodig. Daarom is ervan uit gegaan dat een afdeklaag zo stabiel mogelijk moet zijn (dus een zo grof mogelijke afdek materiaal) maar nog wel efficiënt moet zijn vanuit afdekken van slib en vanuit ecologie (daardoor is er een maximum aan de grofheid van het afdek materiaal).

Het optimale afdek materiaal is dus een compromis tussen verschillende aspecten en niet daardoor onvoorwaardelijk stabiel. Het is dus niet gegarandeerd dat een afdeklaag nooit erodeert. Indien bijvoorbeeld een extreme storm optreedt, kan het toch voorkomen dat een deel erodeert.

Monitoring na dergelijke events zal dan nodig zijn om te bepalen of onderhoud nodig is. De kosten van monitoring zijn echter veel minder dan de realisatiekosten van een afdeklaag. Indien dan blijkt dat extra afdekken nodig is, gelden dezelfde kosten als bij vraag S34 uitgewerkte aanlegprijzen.

Hoe stabiel een afdeklaag in werkelijkheid is hangt erg af van de belasting (golven, schepen). Pas als een locatiekeuze gemaakt is, is de te verwachten belasting bekend. Door afdekken toe te passen op locaties waar extreme belasting ontbreekt (niet in scheepsroutes, niet bij Enkhuizerzand of in combinatie met luwtmaatregelen) kan het verwachte onderhoud tot sterk worden verminderd of zelfs tot een minimum (monitoring) worden beperkt.

5 CONCLUSIES EN BEANTWOORDING ONDERZOEKSVRAGEN

5.1 Algemene conclusies

- Technisch is afdekken mogelijk in het Markermeer om erosie van sliblagen tegen te gaan.
- De afdeklaag moet dan echter wel aan de volgende voorwaarden voldoen:
 - Het zand dient zo weinig mogelijk klei of slib te bevatten (richtlijn is minder dan 5% deeltjes kleiner dan 63 μm).
 - Het zand dient grof genoeg te zijn om bioturbatie tegen te gaan en de minimaal vereiste weerstand tegen erosie te bieden (korrelgrootte >500 μm).
 - Er is geen eenduidige waarde voor de maximale korrelgrootte. Grover sediment stabiel maar laat eerder indringing van slib toe door de grote porositeit. Een arbitraire bovenwaarde is 2mm.
 - De minimale dikte om bioturbatie of erosie tegen te gaan is 10 cm.
 - Zand met een korrelgrootte tussen 500 μm en 2mm wordt in de loop der jaren mogelijk dunner waardoor inspectie nodig is en mogelijk ook suppleties nodig zijn om de minimale laagdikte te onderhouden.
 - Overwogen kan worden initieel een dikkere laag aan te brengen zodat deze langer meegaat.
- Er zijn weinig geschikte locaties voor afdekken. In eerste instantie is afdekken alleen zinvol in erosiegebieden (noordwestzijde). Echter, op locaties waar al zuiderzeeschelpen, mosselen en waterplanten voorkomen draagt afdekken niet bij. Daarnaast is afdekken ook niet gewenst in scheepvaartroutes van beroepsvaart, omdat dan de stabiliteit van de laag in gevaar komt. Hierdoor blijft grofstoffelijk het gebied in het onderstaande kaartje over. Hierbij moet wel worden opgemerkt dat te plaatse van het Enkhuizerzand al zand aanwezig is, dus afdekken is hier minder zinvol.



- Dit gebied is ongeveer 4 gebieden van 5 x 5 km groot. Uit kostenraming blijkt dat afdekken van een gebied van 5 x 5 km orde 60 - 100 M euro kost. Dit betekent dat het totaal afdekken van deze geschikte gebieden rond de 300 – 400 miljoen euro kost. Dit is erg kostbaar en lijkt niet realistisch.

- Voor deze raming is uitgegaan dat alleen de aanlegtechniek spoeien een haalbare techniek is. Bij onderzuigen dient het zand ter plaatse van de afdekking op een beperkte diepte (minder dan 5 m diep) te liggen. In het Markermeer is dit niet het geval, waardoor onderzuigen niet realistisch is.
- Afdekken lijkt daarom dus alleen zinvol en realistisch op een wat kleinere schaal en in combinatie met andere maatregelen (bv daar waar als gevolg van maatregelen extra erosie te verwachten is, rondom luwtestructuren en nabij putten). Vooral het realiseren van substraat voor vestiging van mossels is dan een meerwaarde.

Conclusies ecologische effecten van afdekken

- Afdekken kan de waterkwaliteit verbeteren. Door minder opwerveling van slib, neemt het doorzicht toe en verbetert de samenstelling van het overgebleven zwevend stof als voedsel voor filteraars zoals watervlooien en mosselen.
- Afdekken kan alleen lokaal worden toegepast omdat bodemfauna in het algemeen onmisbaar is voor het diverse en productieve Markermeer, waartoe het afdekken als instrument is bedoeld.
- Afdekken voegt niets toe op plaatsen met mosselbanken of plekken waar schelpen zich hebben geconcentreerd, omdat hier al weinig opwerveling plaatsvindt.
- Aanbrengen van een zandlaag heeft netto positieve effecten op vissen en waterplanten.
- Studies met bezanden zoals in de Bergse Plassen laten ook in praktijk een verbetering van de waterkwaliteit zien maar die verbetering is het gevolg van een combinatie van maatregelen.

5.2 Beantwoording onderzoeksvragen

Onderzoeksvraag: S29

Op welke locaties in het Markermeer-IJmeer draagt het afdekken van slib het meeste bij aan slibreductie?

Antwoord:

Op basis van opgedane kennis uit verschillende NMIJ studies is aan te geven waar afdekken het meest bijdraagt aan de reductie van slib.

Afdekken draagt het meest bij aan slibreductie op locaties in het Markermeer waar slib regelmatig wordt opgewerveld in de waterkolom. Hoewel depositie en resuspensie in het Markermeer –afhankelijk van de windsterkte en windrichting– overall wel eens voorkomt, zijn gebieden aan te wijzen die netto eroderen en gebieden die netto sedimenteren. Grofweg is het (noord)westzijde een erosie gebied en de oostzijde een sedimentatiegebied.

Afdekken in netto sedimentatie gebieden heeft weinig meerwaarde, omdat na verloop van tijd er een sliblaag zal ontstaan op de afdeklaag. Hierdoor verliest de afdeklaag zijn functie. Opnieuw afdekken zou dan nodig zijn. Het is kostbaar om dit continue uit te voeren.

Daarnaast zijn verschillende gebieden aan te geven waar afdekken juist niet toegepast kan worden, omdat daar bijvoorbeeld ecologische waarde aanwezig is die door afdekken verloren gaat.

Onderstaand plaatje geeft aan waar afdekken bij kan dragen aan slibreductie zonder te interfereren met gebieden waar mosselen en waterplanten voorkomen.

Binnen het zoekgebied (witte contour in onderstaand plaatje) kan afdekken, mits lokaal en buiten de vaargeul toegepast, bijdragen aan slibreductie die resulteert in een netto positief ecologisch effect. Hierbij moet nog wel rekening gehouden worden dat afdekken op het Enkhuizerzand niet nodig is, omdat daar al zand aanwezig is.



Onderzoeksvraag: S30

Welke technieken (zoals onderzuigen, sproeien en nevelen) bestaan er om slib af te dekken en welke is het meest effectief?

Antwoord:

Er bestaan twee gangbare methoden om een sliblaag in het Markermeer af te dekken met zand:

1. Sproeien.
2. Onderzuigen.

In het algemeen zijn beide methoden geschikt en effectief om slib af te dekken, elk met eigen specifieke voor- en nadelen. Zo is sproeien een gekende techniek en onderzuigen innovatiever, minder vaak toegepast en daardoor waarschijnlijk duurder. Het voordeel van onderzuigen is dat zeer lokaal zand kan worden gewonnen (werk met werk maken), maar hiervoor zijn wel gedetailleerde bodemgegevens nodig. Daarnaast is deze methode niet toepasbaar als het zand in lager dieper dan 5 m aanwezig is.

Dit laatste is een belangrijke beperking van onderzuigen, De zandlaag in het Markermeer is op een grotere diepte aanwezig. Hierdoor kan gesteld worden dat sproeien de beste methode voor het Markermeer zal zijn.

Onderzoeksvraag: S31

Draagt deze techniek duurzaam bij aan de beperking van de mobiele sliblaag?

Antwoord:

De oorzaak van de verhoogde turbiditeit in het Markermeer is opwerveling van de mobiele sliblaag. De onderliggende oorzaak van de aanwezige mobiele sliblaag is bioturbatie van compacte kleilagen door bodemorganismen. Deze organismen zijn in staat de vaste kleilaag om te zetten in een mobiele sedimentlaag die vervolgens makkelijk erodeert.

Als de Markermeer waterbodem met een laag zand afgedekt wordt zal het zand zeker de erosie van de kleibodem en de fluffy bodem blokkeren. Het afdekzand zelf kan als gevolg van golfwerking bij harde wind ook eroderen maar het zal snel terugvallen naar de bodem omdat de sedimentatiesnelheid van zand groot is in vergelijking met die van de fijne deeltjes. Als de zandlaag voldoende dik is wordt menging met onderliggend slib voorkomen omdat het onderliggende slib niet kan ontsnappen. Op basis van erosiesnelheid en duur van wind gebeurtenissen in het Markermeer is geschat dat een afdeklaag met een homogene dikte van orde 10 cm voldoende is. Afdekken met grof zand of gravel kan technisch bij het aanbrengen mogelijk voor uitdagingen zorgen omdat het risico toeneemt dat het grove materiaal in de mobiele (fluffy) sedimentlaag waarop het wordt aangebracht wegzakt.

Omdat het effect dat afdekken op bioturbatie heeft niet recht-toe-rechtaan is, hangt het lange termijn resultaat van afdekken af van karakteristieken van de afdeklaag (het slibgehalte, de dikte en de compactheid van de laag) en daarnaast ook van de mate waarin de afdeklaag op de lange termijn door fijn slib van elders beïnvloed wordt (afzetting op en indringen in de afdeklaag). De matrix van de afdeklaag moet moeilijk doordringbaar zijn voor fijn slib (compact met lage porositeit).

Als de afdeklaag niet compact genoeg of te dun is aangebracht zullen wormen en andere bodemorganismen er in slagen om door de zandlaag heen het onderliggende voedselrijkere slib te bereiken om vervolgens fecale pellets, bestaande uit slib, aan het oppervlak te deponeren. Het niet stoppen van bioturbatie leidt dan uiteindelijk weer tot een troebele waterfase.

Op lange termijn kan de efficiëntie van afdekken afnemen omdat slib van elders uit het Markermeer blijvend op de afdeklaag wordt afgezet. Ook dat leidt uiteindelijk tot kolonisatie van de nieuw afgezette laag en tot vorming van een fluffy laag die een heldere waterfase tegengaat. Afdekken van gebieden in het meer waar accumulatie van slib op de lange termijn het dominante proces is, is dus niet efficiënt (zie ook vraag S29).

Onderzoek in het veld (pilot) om de relatie tussen karakteristieken van de afdeklaag en bioturbatie te leggen en waar mogelijk te kwantificeren is nodig alvorens afdekken op grote(re) schaal toegepast kan worden.

Onderzoeksvraag: S32

Hoe reageert de fluffy bodemlaag (fijn slib) op een afdeklaag?

Antwoord:

Zie voor het antwoord bij S31.

Het antwoord op deze vraag houdt sterk verband met het antwoord op vraag S31, omdat de reactie van de bodem op afdekken bepaalt hoe duurzaam de maatregel is. Daarom zijn beide vragen bij onderzoeksvraag S31 beantwoord.

Onderzoeksvraag: S33

Wat zijn de ecologische effecten van afdekken?

Antwoord:

Afdekken kan de waterkwaliteit verbeteren. Door minder opwerveling van slib, neemt het doorzicht toe en verbetert de samenstelling van het overgebleven zwevend stof als voedsel voor filteraars zoals watervlooien en mosselen.

Afhankelijk van de methode van aanbrengen zullen eventueel aanwezige, niet-mobiele organismen begraven worden. Sommige organismen zullen blijvend verdwijnen, maar voor andere soorten komt er geschikt habitat voor in de plaats. Afdekken kan daarom alleen lokaal worden toegepast omdat bodemfauna in het algemeen onmisbaar is voor het diverse en productieve Markermeer, waartoe het afdekken als instrument is bedoeld.

Aanbrengen van een zandlaag heeft netto positieve effecten op vissen en waterplanten. Voor bepaalde vissoorten is een zandige bodem een geschikter habitat als paaiplaats dan een slibrijke bodem. Zand is steviger dan slib en hier kunnen ondergedoken waterplanten waarschijnlijk beter in wortelen.

Aangebracht zand hoeft vanuit de ecologie gezien niet vrij van nutriënten te zijn omdat er een gebrek aan nutriënten in het meer is als gevolg van een geringe interne windbelasting in het Markermeer. Bovendien is er waarschijnlijk voldoende capaciteit in de bodem beschikbaar om fosfaat vast te leggen.

Het is dus aannemelijk dat het lokaal afdekken van slibrijke gebieden buiten de gebieden met mosselen of waterplanten met zandig materiaal een netto positief effect op de verschillende habitats in het Markermeer heeft. Deze maatregel is echter slechts één keer in praktijk uitgevoerd. Hoewel deze praktijkstudie (Bergse Plassen) een verbetering van de waterkwaliteit laat zien, is die verbetering het gevolg van een combinatie van maatregelen.

Onderzoeksvraag: S34

Wat zijn de realisatiekosten van de meest effectieve techniek voor het afdekken van slib?

Antwoord:

De realisatiekosten (per eenheid van oppervlakte, m²) zijn onder andere afhankelijk van het totale oppervlakte af te dekken gebied en de aanlegmethode. Bij vraag S30 is al gebleken dat de methode sproeien de meest effectieve manier is om een afdeklaag in het Markermeer aan te brengen.

Voor deze methode is een kostenberekening gemaakt voor een drietal verschillende projectgroottes:

- gebied afdekken van 200 m x 200 m;
- gebied afdekken van 1 km x 1 km;
- gebied afdekken van 5 km x 5 km.

De kosten per m2 afdekken zijn voor deze drie typische oppervlakten als volgt:

| | prijs per m2 | |
|--|--------------|------|
| Klein gebied (200 meter bij 200 meter) | € | 5,32 |
| Middelgroot gebied (1 km bij 1 km) | € | 3,46 |
| Groot gebied (5 km bij 5 km) | € | 2,59 |

In deze berekening is uitgegaan van een transport afstand van 30 km, gebaseerd op een concessiehouder in het IJsselmeergebied.

De laagdikte van de afdeklaag is 30 cm.

Onderzoeksvraag: S35

Wat zijn de beheer- en onderhoudskosten van de meest effectieve techniek om slib af te dekken?

Antwoord:

De beheer en onderhoudskosten van een afdeklaag zijn in principe beperkt als de afdeklaag zo wordt aangelegd dat deze stabiel blijft.

Een afdeklaag moet van nature zo stabiel mogelijk worden aangelegd, anders werkt deze maatregel niet. Een afdeklaag die niet stabiel is, dus zo nu en dan wordt opgewoeld (danwel door golven/stroming, danwel door scheepsbelasting), zal in de tijd steeds dunner worden. In dat geval is frequente monitoring en bijsproeien van zand nodig. Daarom is ervan uit gegaan dat een afdeklaag zo stabiel mogelijk moet zijn (dus een zo grof mogelijke afdek materiaal) maar nog wel efficiënt moet zijn vanuit afdekken van slib en vanuit ecologie (daardoor is er een maximum aan de grofheid van het afdek materiaal).

Het optimale afdek materiaal is dus een compromis tussen verschillende aspecten en niet daardoor onvoorwaardelijk stabiel. Het is dus niet gegarandeerd dat een afdeklaag nooit erodeert. Indien bijvoorbeeld een extreme storm optreedt, kan het toch voorkomen dat een deel erodeert. Monitoring na dergelijke events zal dan nodig zijn om te bepalen of onderhoud nodig is. De kosten van monitoring zijn echter veel minder dan de realisatiekosten van een afdeklaag. Indien dan blijkt dat extra afdekken nodig is, gelden dezelfde kosten als bij vraag S34 uitgewerkte aanlegprijzen.

Hoe stabiel een afdeklaag in werkelijkheid is hangt erg af van de belasting (golven, schepen). Pas als een locatiekeuze gemaakt is, is de te verwachten belasting bekend. Door afdekken toe te passen op locaties waar extreme belasting ontbreekt (niet in scheepsroutes, niet bij Enkhuizerzand of in combinatie met luwtmaatregelen) kan het verwachte onderhoud tot sterk worden verminderd of zelfs tot een minimum (monitoring) worden beperkt.

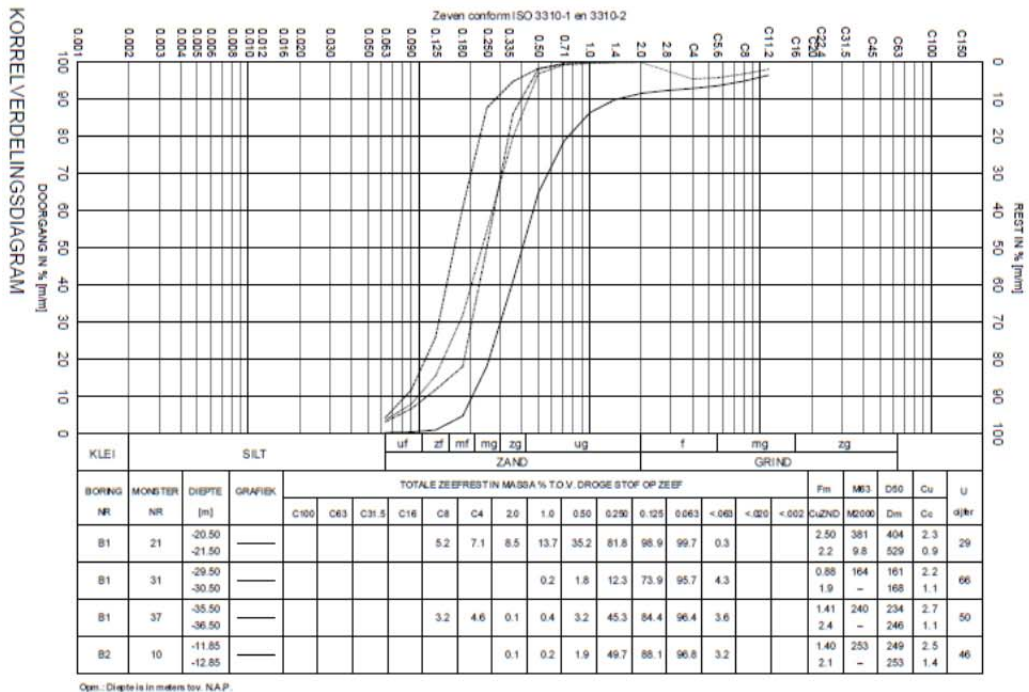
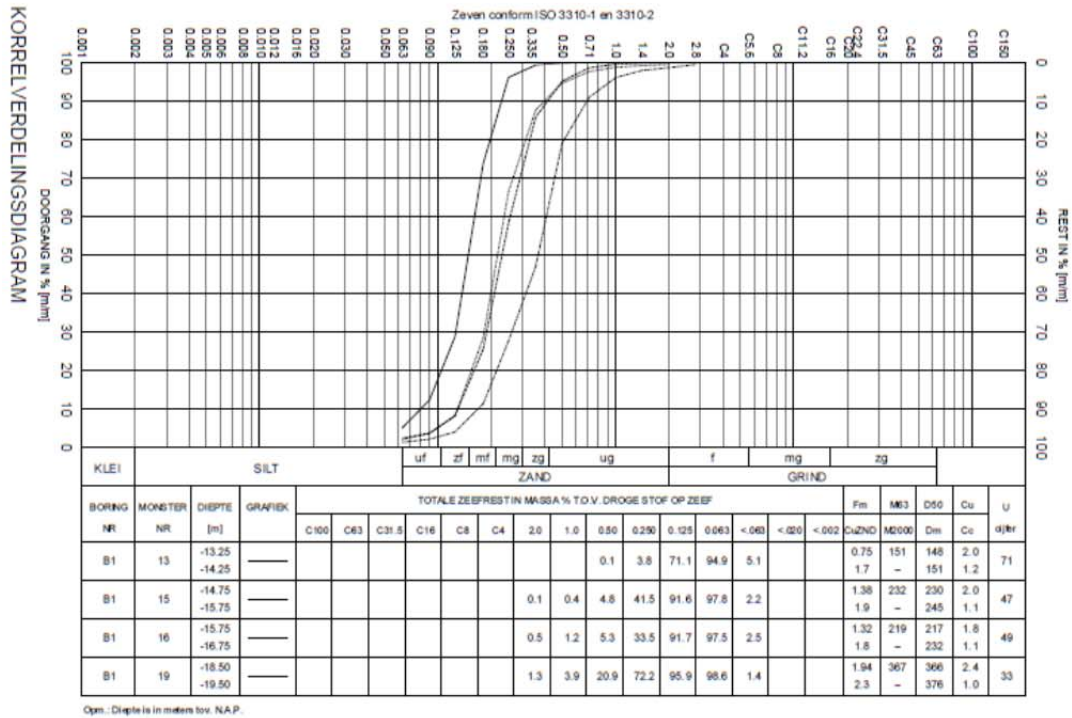
REFERENTIES

- Bakker D, L. Osté, G.Roskam, J. de Weert, J. Hemelraad et. al (2011) De Bodem Bedekt; het onderzoeken en aanbrengen van een fosfaatbindende afdeklaag in de Bergse Plassen. Deltares-rapport 1201913, 19 december 2011
- Bij de Vaate, A. (1991). Distribution and aspects of population dynamics of the zebra mussel, *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), in the Lake IJsselmeer area (The Netherlands)
- Boderie P., Smale A.J., Thiange C. (2012) Validation suspended sediment model Markermeer & Application to silt screen. Deltares. 1201198.
- De Lucas Pardo, M. (2014) Effect of biota on fine sediment transport processes. A study of Lake Markermeer. PhD TU Delft. September, 2014.
- Fugro (2013). Rapportage geotechnisch veldwerk betreffende onderzoek Markerwadden, opdrachtnummer: 1013-0294-000
- It FryskeGea. (2010). Building with Nature – pilot Workumerwaard MIJ 3.2 – Ecodynamic design deliverable.
- Noordhuis, R, S. Groot, M. Dionisio Pires, M. Maarse (2014) Wetenschappelijk Eindadvies ANT/IJsselmeergebied. Vijf jaar studie naar kansen voor het ecosysteem van het IJsselmeer, Markermeer en IJmeer met het oog op de Natura/2000 doelen.
- Smolders, AJP, LPM Lamers, E Lucassen, G Van der Velde, JGM Roelofs (2006), Internal eutrophication: how it works and what to do about it—a review, *Chemistry and Ecology* 22 (2), 93-111
- Torfs, H. (1998). Erosie van Slib/Zandmengsels, Laboratorium voor Hydraulica Departement Burgerlijke Bouwkunde Katholieke Universiteit Leuven
- Van der Wijngaart, T. (2008) Ecologische processen in ondiepe meren en het effect van beheersmaatregelen, STOWA-rapport 2008-W-03.
- Witteveen+Bos (2005). Quick scan slibproblematiek Markermeer en Gooi- en Eemmeer. IJG-werkdocument 2006-15. Januari 2005.

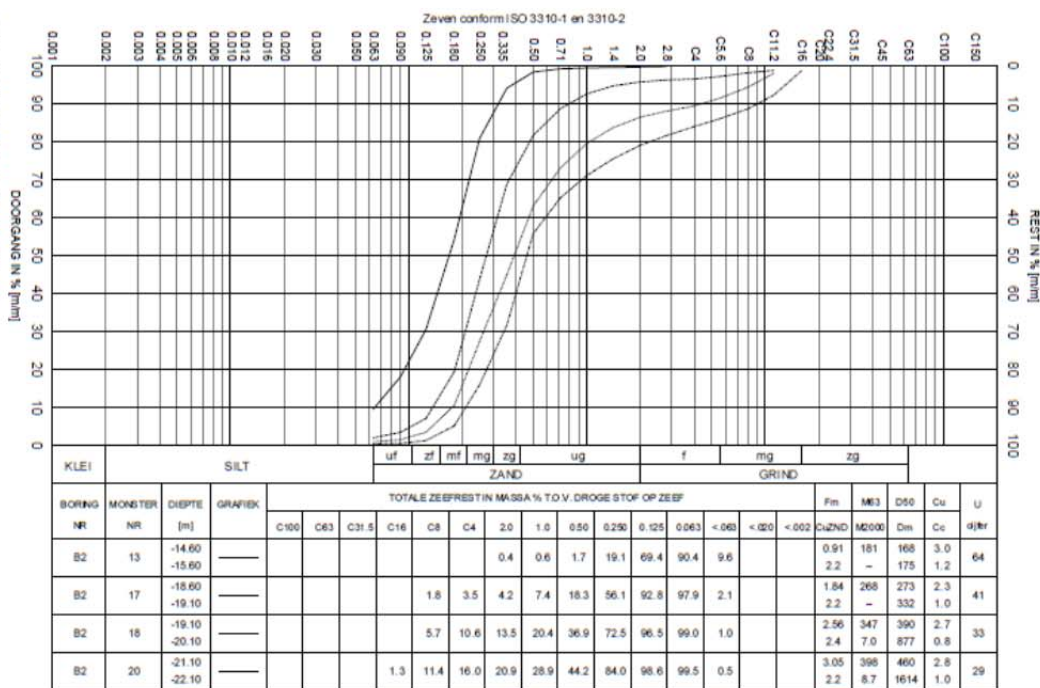
Bijlage A

Gemeten zeefkrommes

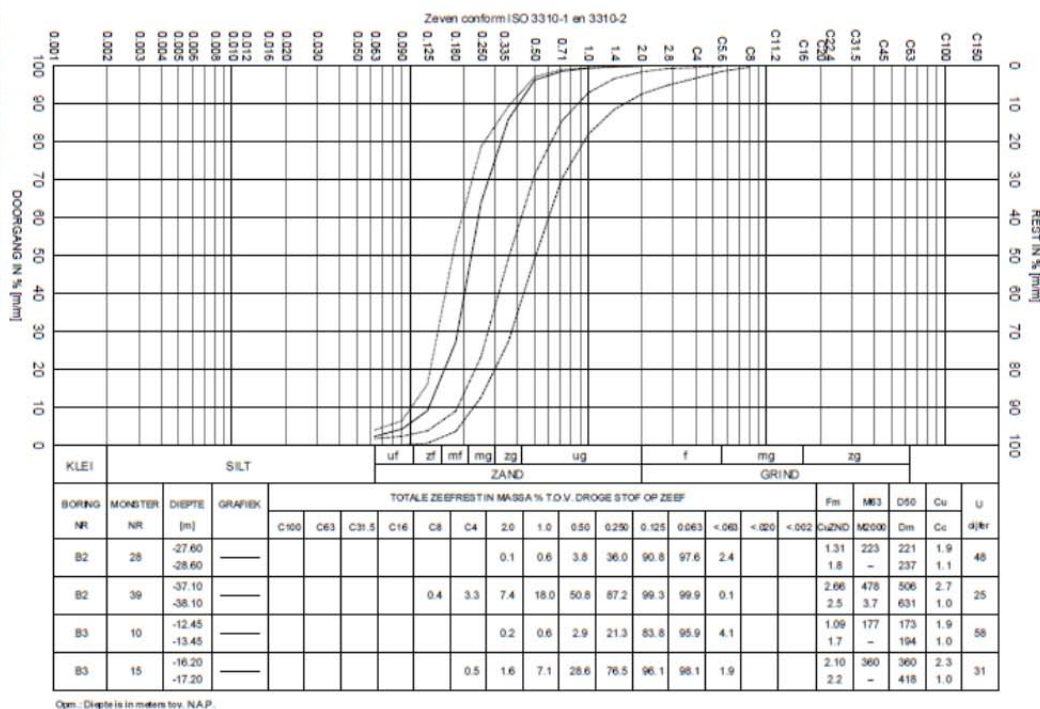
LAPOR: Perek dan Debu 1.1.130 - 02011207 JK - 0121410 00012

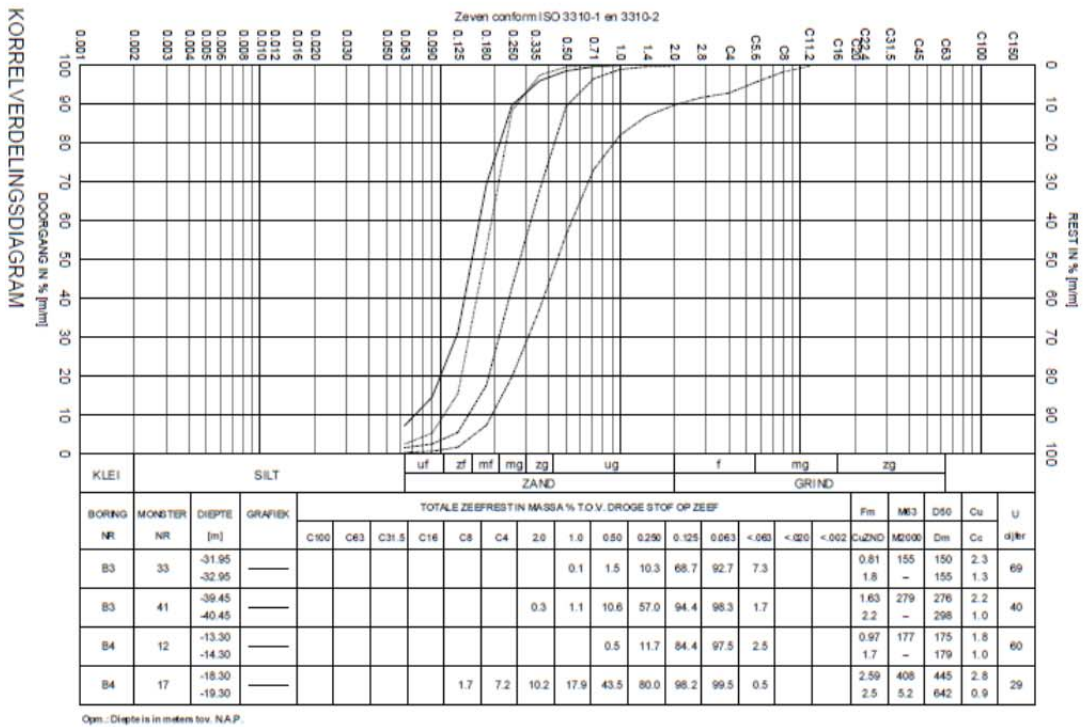
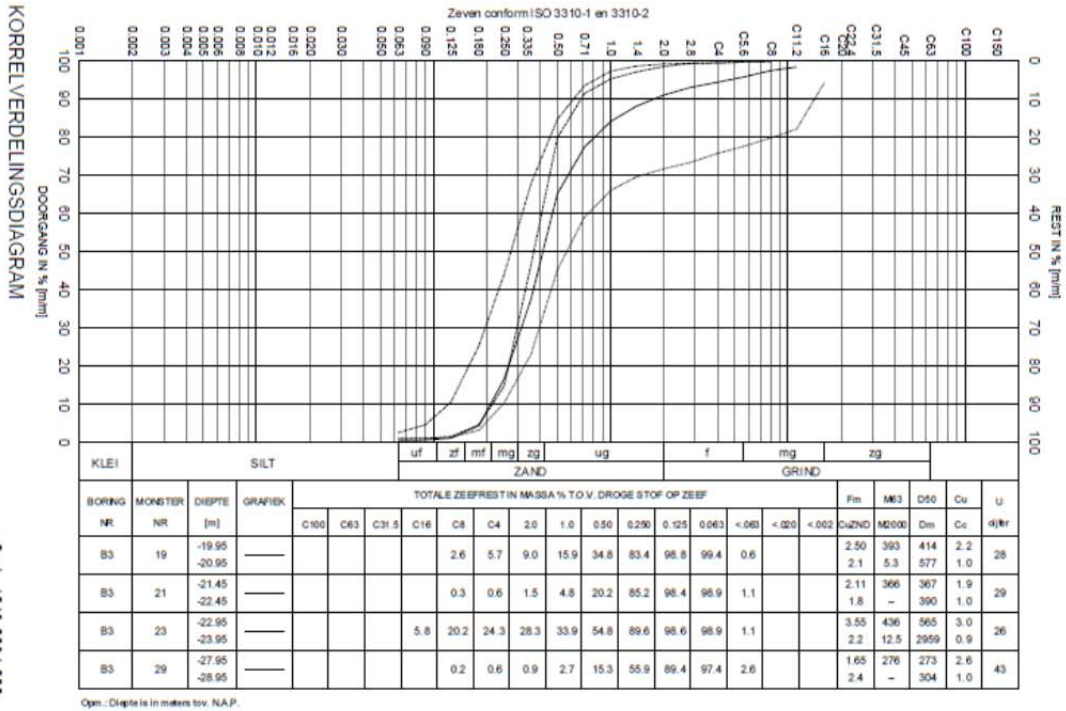


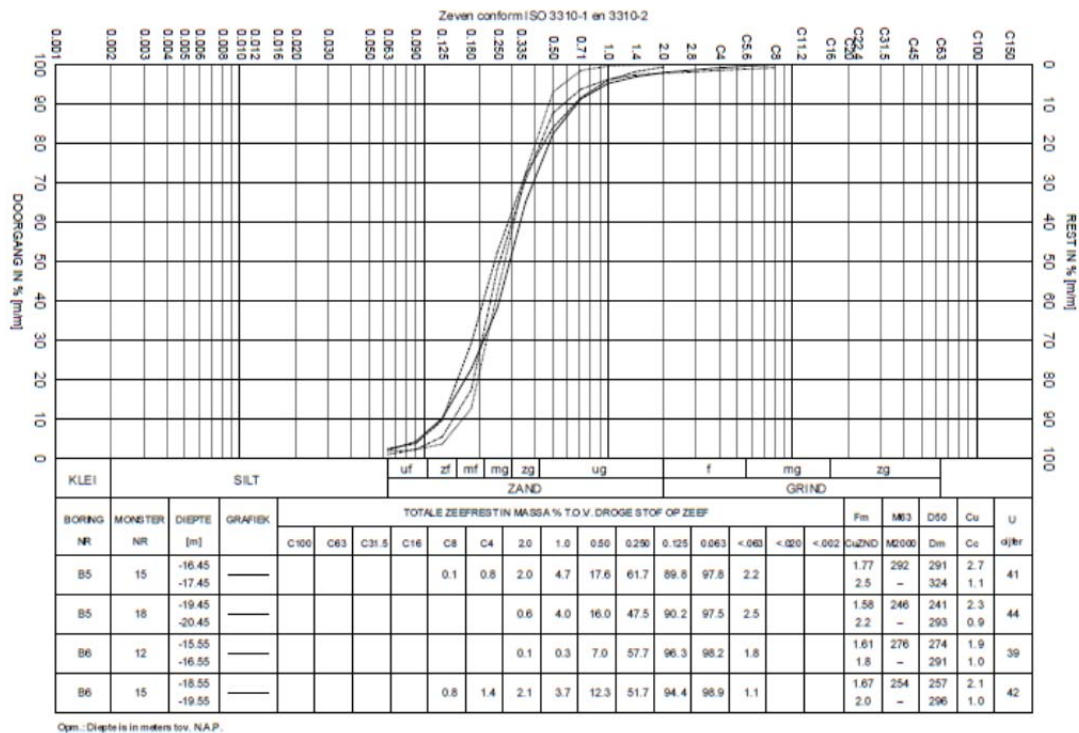
KORRELVERDELINGSDIAGRAM



KORRELVERDELINGSDIAGRAM







Figuur A1: Gemeten zeefkrommes (FUGRO) op zes meetpunten (B1-B2) op verschillende dieptes (-12 tot -40m) in de bodem van het Markermeer ter plaatse van de beoogde aanleglocatie van de Markerwadden