

## **Maatregelen in de Bodemdiagnose BaggerNut**

**Advies voor het reduceren van de bijdrage van de  
waterbodem**





# **Maatregelen in de Bodemdiagnose BaggerNut**

**Advies voor het reduceren van de bijdrage van de  
waterbodem**

Leonard Osté (Deltares)  
Rikje van de Weerd (Arcadis)

1201327-000



**Titel**  
Maatregelen in de Bodemdiagnose BaggerNut

|                                       |                               |  |                       |
|---------------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------|
| <b>Opdrachtgever</b><br>Agentschap NL | <b>Project</b><br>1201327-000 | <b>Kenmerk</b><br>1201327-000-ZWS-0016 | <b>Pagina's</b><br>27 |
|---------------------------------------|-------------------------------|--|-----------------------|

**Trefwoorden**  
KRW, maatregelen, BaggerNut, waterbodem, sediment






**Samenvatting**

In het project BaggerNut is gewerkt aan een instrument dat de bijdrage van de bodem aan eutrofiëringsproblemen kwantificeert en het effect van maatregelen voorspelt: de bodemdiagnose. Het effect van een maatregel kan worden berekend door de relevante invoer (of instellingen) in de Bodemdiagnose te wijzigen. Op welke manier die invoer moet worden gewijzigd, is niet geautomatiseerd in de tool. In dit rapport worden handvatten en regels gegeven om de nieuwe invoerparameters te bepalen.

Er zijn 4 (typen) maatregelen opgenomen in dit rapport: opwerveling reducerende maatregelen, baggeren, afdekken en het toevoegen van P-bindende stoffen. Voor elk van deze maatregelen wordt een korte beschrijving van de maatregel gegeven en ervaringen tot nu toe. Vervolgens wordt aangegeven in welke situaties/systemen de maatregel kan worden toegepast. Daarna wordt de maatregel gekwantificeerd, waarbij handvatten worden gegeven voor het wijzigen van de invoer. Tevens zijn rekenvoorbeelden gegeven.

**Referenties**

Osté, L.A. en H. van de Weerd, 2012. Maatregelen in de Bodemdiagnose BaggerNut: Advies voor het reduceren van de bijdrage van de waterbodem . Deltares-rapport 1201327-0014-2.

| Versie | Datum     | Auteur             | Paraaf  | Review          | Paraaf   | Goedkeuring | Paraaf  |
|--------|-----------|--------------------|---|-----------------|--|-------------|---|
|        | juli 2012 | Leonard Osté       |  | Arjan Wijdeveld |  | Gerard Blom |  |
|        |           | Rikje van de Weerd |  | Hans Aalderink  |  |             |   |

**Status**  
definitief



## Inhoud

|   |           |
|---|-----------|
| Voorwoord   | ii        |
| <b>1 Inleiding</b>  | <b>1</b>  |
| <b>2 Opwerveling reducerende maatregelen (visbeheer, vermindering boten/recreatie/windwerking, stabilisatie van de bodem)</b> | <b>5</b>  |
| 2.1 Beschrijving van de maatregel en ervaring   | 5         |
| 2.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?                                | 6         |
| 2.3 Kwantificeren van de maatregel in de bodemdiagnose: handvatten voor wijzigen invoer                                       | 6         |
| 2.3.1 Visbeheer   | 7         |
| 2.3.2 Waterbeweging door wind   | 8         |
| 2.3.3 Scheepvaart   | 10        |
| <b>3 Bron weghalen (baggeren)</b>   | <b>11</b> |
| 3.1 Beschrijving maatregel en ervaringen tot nu toe   | 11        |
| 3.1.1 Ervaringen tot nu toe   | 12        |
| 3.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?                                | 13        |
| 3.3 Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer   | 13        |
| 3.3.1 P-nalevering  | 13        |
| 3.3.2 Zwevende stof   | 14        |
| <b>4 Contact waterbodem en oppervlaktewater afsnijden: afdekken</b>   | <b>15</b> |
| 4.1 Beschrijving maatregel en ervaringen tot nu toe   | 15        |
| 4.1.1 Ervaringen tot nu toe   | 16        |
| 4.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?                                | 16        |
| 4.3 Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer   | 17        |
| 4.3.1 P-flux  | 17        |
| 4.3.2 Zwevende stof   | 18        |
| <b>5 Vergroten P-bindingscapaciteit: toepassen van P-bindende stoffen</b>   | <b>21</b> |
| 5.1 Beschrijving maatregel en ervaringen tot nu toe   | 21        |
| 5.1.1 Toepassingsopties 1 en 2 (suppletie)  | 22        |
| 5.1.2 Toepassingsoptie 3 (P-bindende stof onder afdeklaag)  | 22        |
| 5.1.3 Ervaringen tot nu toe   | 23        |
| 5.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?                                | 24        |
| 5.3 Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer   | 24        |
| <b>6 Referenties</b>  | <b>27</b> |

## Voorwoord

Dit rapport maakt onderdeel uit van het KRW Innovatieproject BaggerNut. Samen met het maatregelenrapport en de Excel-tool vormt dit rapport de Bodemdiagnose, waarmee waterbeheerders inzicht kunnen krijgen in de bijdrage van de waterbodem aan eutrofiëringsproblemen. Graag willen we de kerngroep en de projectgroep van het project BaggerNut bedanken voor hun constructieve commentaar en het vertrouwen in het resultaat.

We hopen dat het eindproduct voldoet aan de verwachtingen en vooral: dat het eindproduct, tool en rapporten, bruikbaar zijn voor de waterbeheerders en hun zullen ondersteunen bij het nemen van waterkwaliteitsmaatregelen.

Leonard Osté (Deltares)  
Rikje van de Weerd (ARCADIS)



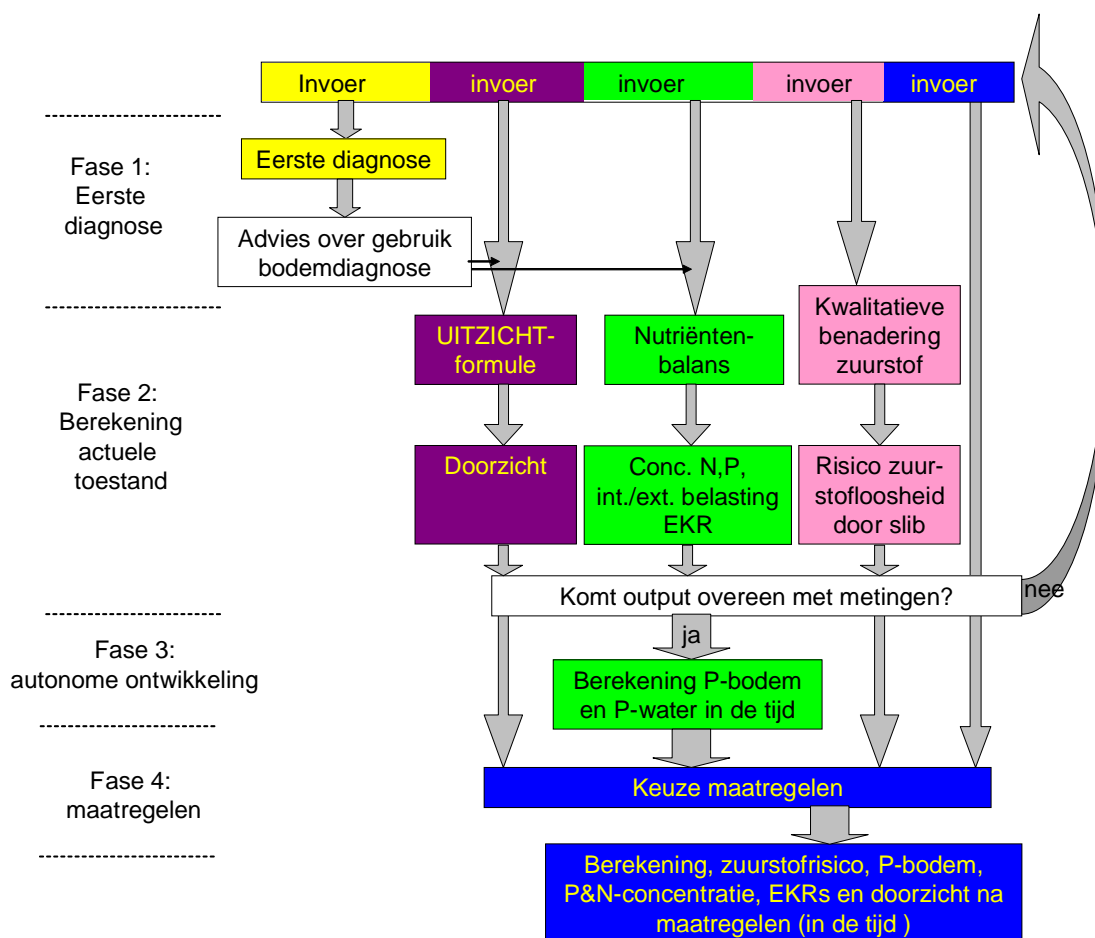
## 1 Inleiding

In het project BaggerNut is door de RUN, Arcadis, Witteveen+Bos, Deltares en 12 waterschappen gewerkt aan een instrument dat de bijdrage van de bodem aan eutrofiëringsproblemen kwantificeert en het effect van maatregelen voorspelt. Er zijn twee producten opgeleverd, die door de beheerders kunnen worden gebruikt voor de analyse van het effect van de waterbodem op de ecologische kwaliteit.

1. Een Quick scan bodem, waarin op basis van een groot aantal veldmetingen en laboratorium experimenten een relatie wordt gelegd tussen eenvoudig te bepalen eigenschappen van de bodem en de naleveringsflux van fosfaat.
2. De Bodemdiagnosetool, waarin de bijdrage van de bodem wordt beschreven als onderdeel van het hele functioneren van het watersysteem en waarmee het effect van waterbodemgerichte maatregelen kan worden ingeschat.

Een uitgebreide beschrijving van de Bodemdiagnose met betrekking tot het berekenen van de actuele toestand en de autonome ontwikkeling van een locatie (fase 1 t/m3 in Figuur 1.1) is beschreven in het rapport kennisregels (Osté en De Weerd, 2012). Dit rapport beschrijft fase 4 (zie Figuur 1.1): maatregelen. In de Bodemdiagnose (fase 4) krijgt de gebruiker een advies van welke maatregelen mogelijk zijn. Dit gebeurt op basis van algemene kenmerken. Het effect van een maatregel kan worden berekend door de relevante invoer (of instellingen) in de Bodemdiagnose te wijzigen en de bodemdiagnose dan opnieuw te draaien. De manier waarop die invoer moet worden gewijzigd, is niet geautomatiseerd. De gebruiker moet zelf een schatting maken van de nieuwe invoer. Er worden in dit rapport wel handvatten en regels gegeven om de nieuwe invoerparameters te bepalen.

Met de tool kan een eerste indruk van de gevoeligheid van het systeem voor de te nemen maatregelen worden bepaald. Indien relevant advies aanvullend onderzoek met daartoe geëigende modellen.



Figuur 1.1 Schematische weergave van de Bodemdiagnose

Er zijn 4 (typen) maatregelen opgenomen in dit rapport, die in de onderstaande hoofdstuknummers zijn beschreven:

- 1 Opwerveling reducerende maatregelen: visbeheer, vermindering boten/recreatie, reductie windwerking door bijv. strijklengtebeperking (eilanden) of verdieping, stabilisatie van de bodem, licht bezanden)
- 2 Bron weghalen: baggeren
- 3 Contact nutriënten waterbodem en oppervlaktewater afsnijden: afdekken,
- 4 Vergroten P-bindingscapaciteit: toepassen van P-bindende stoffen.

Er zijn meer maatregelen mogelijk die een effect hebben op de interne processen, maar hierover is onvoldoende kennis. Niet opgenomen is bijvoorbeeld: droogval (ander IP-KRW-project). Ook uitvoeringsaspecten zoals de baggerfrequentie en de stabiliteit van de onderlaag zijn in dit rapport niet beschreven, maar ze kunnen wel aangepast worden in de bodemdiagnose.

Voor deze maatregelen worden de onderstaande aspecten beschreven:

1. Korte beschrijving van de maatregel en ervaring
2. Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?
3. Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer

In een eerdere fase was gepland dat ook de kosten zouden worden meegenomen. Dit is uiteindelijk niet gedaan, omdat voor maatregelen die zeer incidenteel zijn uitgevoerd een presentatie van de kosten de markt zou kunnen 'sturen'. Verder zijn de kosten in veel gevallen heel erg afhankelijk van de logistiek (beschikbaarheid van materiaal, stoffen, rijafstanden, etc.). Het advies is om in dit rapport na te zoeken welke beheerders ervaring hebben met de maatregelen en bij collega-beheerders na te gaan wat de kosten zijn.



## 2 Opwerveling reducerende maatregelen (visbeheer, vermindering boten/recreatie/windwerking, stabilisatie van de bodem)

Als uit de Bodemdiagnose (werkblad 2, 3-Zwev stof en doorzicht) blijkt dat opwerveling van zwevende stof in de actuele situatie een belangrijke limiterende factor is voor een goed lichtklimaat, kan een oplossing worden gezocht in opwerveling reducerende maatregelen.

### 2.1 Beschrijving van de maatregel en ervaring

De titel geeft al aan dat het hier om meerdere maatregelen kan gaan, maar allemaal gericht op het tegengaan van opwerveling van de waterbodem. De maatregelen zullen in dit document vooral worden uitgewerkt met het oog op hun effect op de zwevende stofconcentratie.

#### *Visbeheer*

Met visbeheer is de meeste ervaring als maatregel tegen opwerveling. Toch is de relatie tussen de hoeveelheid vis en zwevende stof in Nederland maar enkele keren goed onderzocht en dan gaat het om relatief oude bronnen. De meest recente referentie is Breukelaar et al. (1994).

#### *(Gedeeltelijk) verdiepen (verder: verdiepen)*

Een andere mogelijkheid om opwerveling te reduceren is (gedeeltelijk) verdiepen. Met de maatregel op zich is niet zo veel ervaring, maar wel er is wel onderzoek gedaan aan systemen met diepe putten (bijv. Markermeer). De ervaring leert dat het water boven de put duidelijk helderder is, maar dat buiten de directe omgeving van de put het directe effect gering is. Dat betekent dat een aanzienlijk deel van het areaal moet worden verdiept om effect op de waterkwaliteit te geven. Verdiepingen kunnen wel fungeren 'definitieve' sink van nutriënten door langzaam transport, maar het lange termijn effect van lokale dieptes op het hele systeem is eigenlijk niet bekend. Daarbij hoort ook het effect van zomerstratificatie die tot een P-flux in het najaar kan leiden. Verdiepen kan op een aantal locaties (economisch) aantrekkelijk zijn omdat warmte/koude opslag mogelijk is of omdat winbaar zand aanwezig is.

#### *Bodemstabilisatie*

Er wordt momenteel geëxperimenteerd met het verstevigen van slappe ondergrond (veen). Hierbij wordt onderzocht of technieken uit de baggersector (vacuüm drainage, micro drainage) ook in situ mogelijk zijn. Mogelijk kan in de toekomst ook de toplaag van de waterbodem wat verstevigd worden (zonder er een betonbak van te maken). Aangezien deze maatregel nog niet operationeel is wordt hij niet verder uitgewerkt. Bodemstabilisatie kan ook gerealiseerd worden door een slappe bodem af te dekken met steviger materiaal (grond/zand). Afdekken komt in hoofdstuk 2 aan de orde.

#### *Strijkengtereducerende maatregelen of (plaatselijke) verdieping*

Om de invloed van wind tegen te gaan kan de strijklengte verkort worden door eilanden, legakkers, dammen of andere 'obstakels' aan te leggen. Ook het (tijdelijk) afsluiten van een bepaald gedeelte kan bijvoorbeeld voor vegetatie ontwikkeling effectief zijn.

Vaak wordt gesteld dat wind voor zwevende stof zorgt. Berekeningen en metingen wijzen uit dat bij hardere wind (ongeveer vanaf windkracht 5) inderdaad een punt komt waarop de kritische schuifspanning aan de bodem wordt overschreden. Op dat moment wordt een sterke verhoging van de opwerveling zichtbaar in zwevende stofmetingen in meren. Dit zou betekenen dat het water maar af en toe troebel wordt. Voor de bodemdiagnose gaat het niet zo zeer om de piekbelastingen, maar om de permanente relatief constante zwevende stofconcentratie als gevolg van waterbeweging onder normale weersomstandigheden. Dit is een combinatie van wind en (retour)stroming.

## 2.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?

In de bodemdiagnose wordt deze groep maatregelen geadviseerd afhankelijk van 5 vragen:

1. Is het doorzicht beperkt?
2. Zit er meer dan 100 kg benthivore vis / ha in het systeem
3. Is er veel scheepvaart in het systeem? (ja/nee)
4. Is de gemiddelde jaarlijkse verblijftijd > 50 dagen?
5. Is de strijklengte/diepte verhouding <1000 m/m?

Vraag 1 is een voorwaarde, want als het doorzicht goed is, zijn opwerveling beperkende maatregelen niet aan orde. Bij onvoldoende doorzicht en het antwoord 'ja' op een of meerdere vragen 2 t/m 5, kunnen opwerveling reducerende maatregelen zinvol zijn. Afhankelijk van de specifieke beantwoording van de vragen 2 t/m 5 zijn verschillende maatregelen mogelijk. Daarbij moet wel bedacht worden dat opwerveling remmende maatregelen vooral zinvol zijn indien er weinig algen zijn of evt. in combinatie met nutriëntenreducerende maatregelen.

Visbeheer kan alleen worden uitgevoerd in systemen met veel benthivore vis. Verdiepen kan zinvol zijn in meren. In stromende wateren kan een slibvang worden aangelegd. In de bodemdiagnose zal alleen de eerste optie (meren) verder worden uitgewerkt. Strijklengtereductie kan worden toegepast in gebieden waar wind een rol speelt.

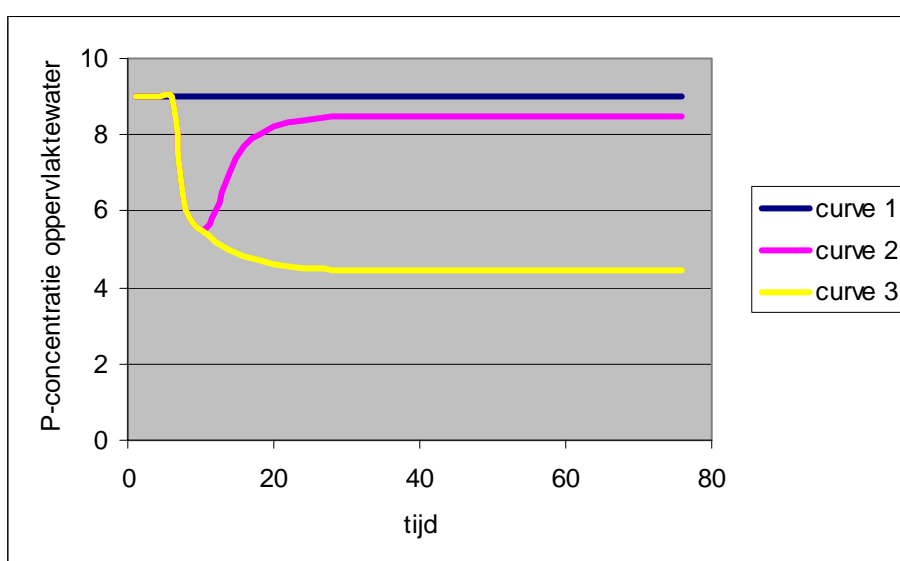
## 2.3 Kwantificeren van de maatregel in de bodemdiagnose: handvatten voor wijzigen invoer

Het reduceren van opwerveling is primair gericht op het verbeteren van het doorzicht. Bij een hoger doorzicht krijgen planten meer kans, die vervolgens nog extra zwevende stof wegvangen. Tevens zorgt minder opwerveling voor een lagere P-totaalconcentratie in het oppervlaktewater.

Het tegengaan van opwerveling heeft primair effect op de concentratie zwevende stof in het oppervlaktewater. De gewijzigde concentratie zwevende stof moet door de gebruiker in het invoerblad worden gewijzigd. In de paragrafen 2.3.1, 2.3.2 en 2.3.3 wordt gespecificeerd tot welke daling van zwevende stof de verschillende maatregelen kunnen leiden. Deze wijziging heeft in de bodemdiagnose op twee manieren gevolgen:

- 1 in werkblad 2,3-Zwev stof en doorzicht: Er een lagere zwevende stof concentratie resulteert in een hoger doorzicht
- 2 in werkblad 4-Balans resulteert de lagere concentratie zwevende stof in een lagere bezinkingsflux en minder opwerveling. Dat leidt weer tot lagere een concentratie P in het oppervlaktewater.

Het lange termijn rendement is afhankelijk van duurzaamheid van de maatregel. Het verkorten van de strijklengte, bijv. door legakkers of eilanden zal een permanent effect hebben, waardoor het aan zwevende stof gebonden P niet meer op het oude niveau zal terugkeren. Een dergelijke maatregel kan extra effect geven als de maatregel leidt tot vegetatieontwikkeling. De vegetatie zal verantwoordelijk zijn voor het onttrekken van P uit de waterfase en voor het wegvangen van zwevende stof. Figuur 2.1 geeft de verschillende scenario's weer, die opwerveling reducerende maatregelen kunnen hebben. Curve 1 geeft de situatie weer zonder maatregelen. In curve 2 is het effect kortstondig. Dit kan gebeuren bij (eenmalig) visbeheer. Als er voldoende voeding is, herstelt de visstand zich snel. Een permanente verlaging van de opwerveling (bijvoorbeeld eilanden) zal resulteren in curve 3.



Figuur 2.1 Schematische weergave van het rendement van de maatregel reductie opwerveling op het zwevende stof gebonden P in de vorm van 3 curves (de eenheden op de assen zijn dimensieloos).

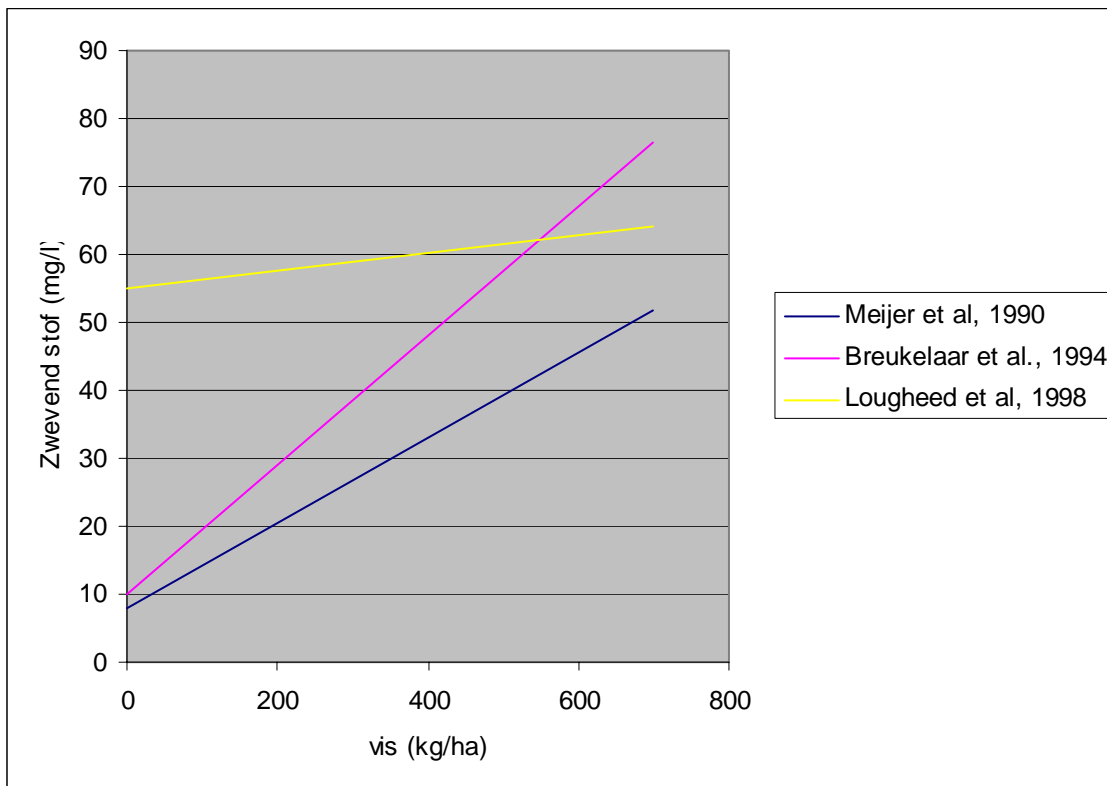
In de volgende paragrafen wordt uitgewerkt hoe de nieuwe concentratie zwevende stof kan worden ingeschat ten gevolge van de maatregelen visbeheer, strijklengtereductie en scheepvaart.

### 2.3.1 Visbeheer

Er zijn verschillende artikelen die gaan over opwerveling door benthivore vis, zoals karper en brasem. Deze vergelijkingen zijn opgesteld voor ondiepe meren (maximaal 2 meter) en impliciet zit hierin ook de bijdrage van de waterbeweging (Figuur 2.2). Daarom wordt voor de bodemdiagnose alleen de toename veroorzaakt door vis (de helling van de lijn) opgenomen. Daarbij is gekozen voor de middelste helling; dat is de vergelijking zoals gepubliceerd door Meijer et al. (1990):

ZS veroorzaakt door vis =  $0,062 \times$  benthivore vis (kg/ha).

Het verminderen van de visstand met bijv. 100 kg/ha geeft dan een afname van 6 mg ZS/l. Hiermee kan de ZS concentratie in het invoerblad worden verlaagd.



Figuur 2.2 Het effect van benthivore vis op de concentratie zwevende stof (deze relatie geldt voor meren ondieper dan 2 meter).

### 2.3.2 Waterbeweging door wind

Voor de KRW-Verkenner 2008 (Deltares, 2008) zijn relaties afgeleid tussen het zwevende stofgehalte en de volgende vier stuurvariabelen:

1. waterdiepte.
2. strijklengte.
3. kritische schuifspanning voor resuspensie.
4. het deel van het meer dat is verdiept om als slibvang te functioneren.

Voor een groot aantal (1750) combinaties van de vier stuurvariabelen zijn berekeningen gemaakt met een zwevende stof model. De berekeningen zijn gemaakt voor een langere periode, zodat de ingevoerde windreeks representatief is voor de geldende windcondities in Nederland. Als uitvoer van elke berekening is de gesimuleerde zomer- en wintergemiddelde zwevende stofconcentratie opgeslagen in een database.

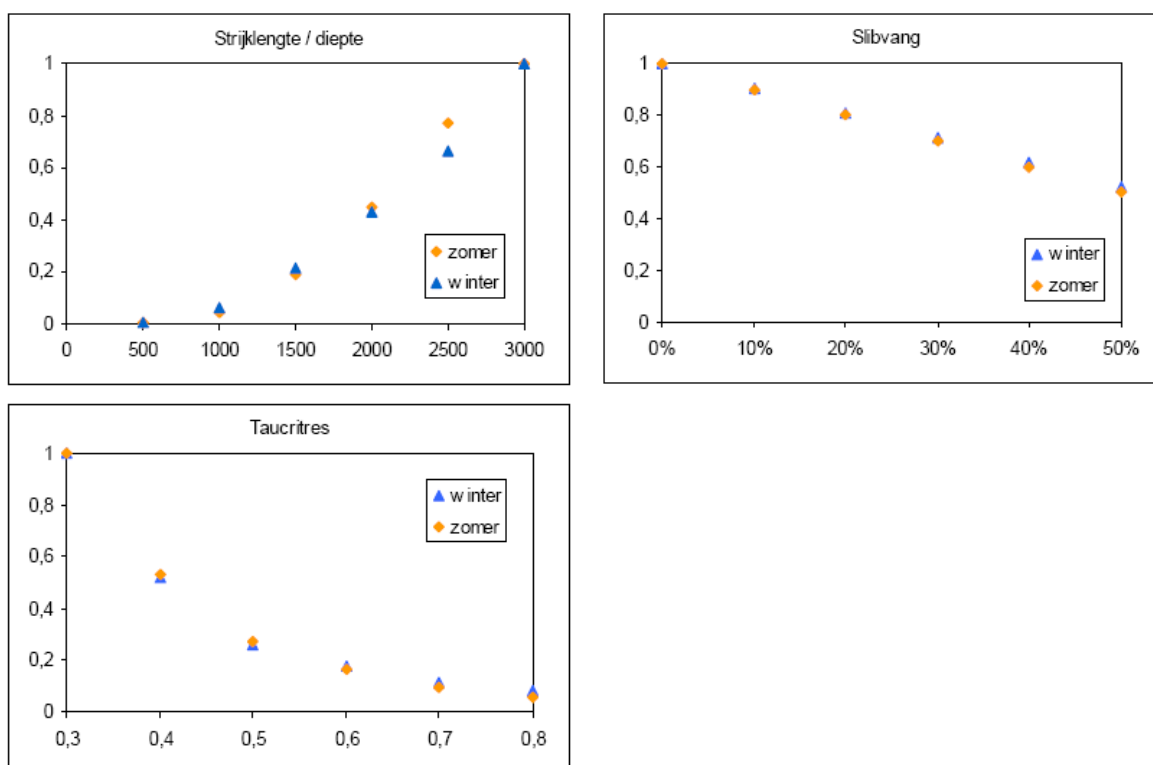
Dat leidde tot de volgende vergelijking:

$$ZS_{\text{mediaan}} = f(\text{strijklengte} / \text{diepte}) \times f(\text{slibvang}) \times f(\tau_{\text{krit}}) \times ZS_{\text{max}} \quad [2.1]$$

waarin drie verschillende factoren  $f$ , met de waarde tussen 0 en 1 voorkomen en de  $ZS_{\text{max}}$ .

De modelresultaten gaven de volgende relaties tussen de grootte van de factor (y-as) en de locatiecondities (op de x-as).





Figuur 2.3 *Individuele relaties tussen de vier stuurvariabelen en de zomer- en wintergemiddelde concentratie zwevende stof, geschaald naar de maximaal optredende zwevende stofconcentratie (bron: Deltares, Handleiding KRW-verkenner, maart 2008).*

Op basis van de bovenstaande grafieken zijn de factoren in vergelijking 2.1 te berekenen:

- $f$  (striklengte / diepte)

De striklengte is eenvoudig te bepalen voor een rond meer. Dan betreft het de doorsnede. In alle andere gevallen moet rekening gehouden worden met de heersende windrichting. In de meeste gevallen geeft de doorsnede over de lijn zuidwest → noordoost de beste schatting. Voor de diepte wordt de gemiddelde diepte gekozen, exclusief eventuele diepe putten; die worden namelijk in de fractie slibvang meegenomen. Vervolgens wordt  $f$  (striklengte/diepte) afgeleid van Figuur 2.3 (links boven). Dat levert vergelijking 2.2 op:

$$f(\text{striklengte / diepte}) = 0,129 \times (\text{striklengte/diepte})^2 - 0,0458 \times (\text{striklengte/diepte}) \quad [2.2]$$

- $f$  (slibvang)

Slibvang is het aandeel van het meer dat minimaal 4 tot 5 meter diep is en aanzienlijk dieper dan gemiddeld. Het percentage van het oppervlak dat verdiept is wordt ingevoerd in vergelijking 2.3, die is afgeleid van Figuur 2.3 (rechts boven):

$$f(\text{slibvang}) = 1 - (0,98 \times \text{fractie slibvang}) \quad [2.3]$$

- $f(\tau_{\text{krit}})$

De kritische schuifspanning is de kracht die langs de bodem moet schuiven om sediment in beweging te krijgen. Als de kritische schuifspanning wordt overschreden, treedt er opwerveling op. De bijdrage van de kritische schuifspanning wordt weergegeven door vergelijking 2.3, die is afgeleid van Figuur 2.3 (onder):

$$f(\tau_{\text{krit}}) = 4,29 \times e^{-4,87 \times \tau_{\text{krit}}} \quad [2.4]$$

met  $f(\tau_{\text{krit}}) \leq 1$ . Als  $f(\tau_{\text{krit}}) < 0,3$  wordt de maximale waarde van 1 bereikt. In de praktijk geldt voor een ongeconsolideerde slibbodem dat  $\tau_{\text{krit}} \approx 0,3 \text{ N/m}^2$  (Min. IenM, 2011). Penning et al. 2012 meten voor meren zoals de Reeuwijkse, Loosdrechtse en Nieuwkoopse Plassen een kritische orbitaalsnelheid van ca 0,05 m/s. Dit komt grofweg overeen met  $\tau_{\text{krit}} \approx 0,03 \text{ N/m}^2$ .

#### Bepaling van de $ZS_{\text{max}}$ in de huidige situatie

Als de 3 factoren in vergelijking 2.1 bepaald kunnen worden met vergelijkingen 2.2, 2.3 en 2.4, kan  $ZS_{\text{max}}$  bepaald voor de huidige situatie worden bepaald door:

$$ZS_{\text{max}} = ZS_{\text{mediaan}} / (f(\text{strijklengte} / \text{diepte}) \times f(\text{slibvang}) \times f(\tau_{\text{krit}})) \quad [2.5]$$

Voor de berekening van het effect van de maatregel kan vergelijking 2.1 weer worden gebruikt. Nu wordt de nieuwe  $ZS_{\text{mediaan}}$  berekend op basis van de in 2.5 berekende  $ZS_{\text{max}}$ . Vanwege een wijziging van:

- de strijklengte/diepte verhouding
- het areaal diep water
- wijzigingen van de stevigheid van de bodem (bijv. door afdekken met zand; dan geldt dat  $\tau_{\text{krit}} \approx 0,8 \text{ N/m}^2$ ) (Min. IenM, 2011). De 0,8 is een schatting, beter is het om met het afdekmateriaal enkele metingen te uit te voeren, waarbij de  $\tau_{\text{krit}}$  gemeten kan worden.

#### Rekenvoorbeeld strijklengte beperken

In de Schutslooterwijdte is de concentratie zwevende stof (mediaan) ca. 12 mg/l. volgens vergelijking 2.1 geldt dus:

$$f(\text{strijklengte} / \text{diepte}) \times f(\text{slibvang}) \times f(\tau_{\text{krit}}) \times ZS_{\text{max}} = 12$$

Op basis van de formules 2.2, 2.3 en 2.4 kunnen de factoren worden bepaald:

$$f(\text{strijklengte} / \text{diepte}) = 0,3$$

$$f(\text{slibvang}) = 1$$

$$f(\tau_{\text{krit}}) = 1$$

Dat betekent dat  $ZS_{\text{max}} = 12 / 0,3 = 40 \text{ mg/l}$

De maximaal gemeten concentratie is 50 mg/l (op basis van metingen in 2004 en 2011)

Stel dat de strijklengte kan worden gehalveerd met eilanden in het midden.  $f(\text{strijklengte} / \text{diepte})$  wordt dan 0,05 hetgeen de mediane zwevende stofconcentratie reduceert tot  $0,05 \times 40 = 2 \text{ mg/l}$ . Het lijkt er op dat deze functie onnauwkeurig wordt voor hele kleine wateren, omdat 2 mg/l wel erg laag is.

### 2.3.3 Scheepvaart

De Nederlandse wateren zijn meestal zo ondiep dat alle beroepsvaart en veel recreatievaart opwerveling veroorzaakt. Het hangt vooral af van de oppervlakte die beïnvloed wordt door schepen en het aantal schepen. Deze twee parameters worden als invoer in de bodemdiagnose gebruikt. Ze resulteren in de volgende concentraties zwevende stof:

$$ZS\text{-beroepsvaart} = 1,5322 \times \text{aantal schepen/dag} \times \text{fractie v/h water beïnvloed} \quad [2.6]$$

$$ZS\text{-recreatievaart} = 0,146 \times \text{aantal schepen/dag} \times \text{fractie v/h water beïnvloed} \quad [2.7]$$

### 3 Bron weghalen (baggeren)

#### 3.1 Beschrijving maatregel en ervaringen tot nu toe

Baggeren betreft het weggraven van de toplaag van de waterbodembodem. In de meeste gevallen wordt gebaggerd om de waterdiepte te vergroten vanwege de scheepvaart- of afvoerfunctie. In enkele gevallen is (met extra diepte, ook wel overdiepte genoemd) gebaggerd voor natuurverbetering. Dat laatste aspect wordt wel vaak genoemd, maar er zijn weinig studies die hard bewijs leveren voor een directe relatie tussen baggeren en natuur.

De essentie van baggeren is dat de toplaag, die kwalitatief of kwantitatief ongewenst is, wordt verwijderd en dat een dieper gelegen laag de nieuwe toplaag wordt. Het effect van baggeren is tweeledig:

- (tijdelijke) effecten van de baggeractiviteiten zelf tijdens de uitvoering?
- effecten van de nieuwe bodem op de waterkwaliteit en ecologie

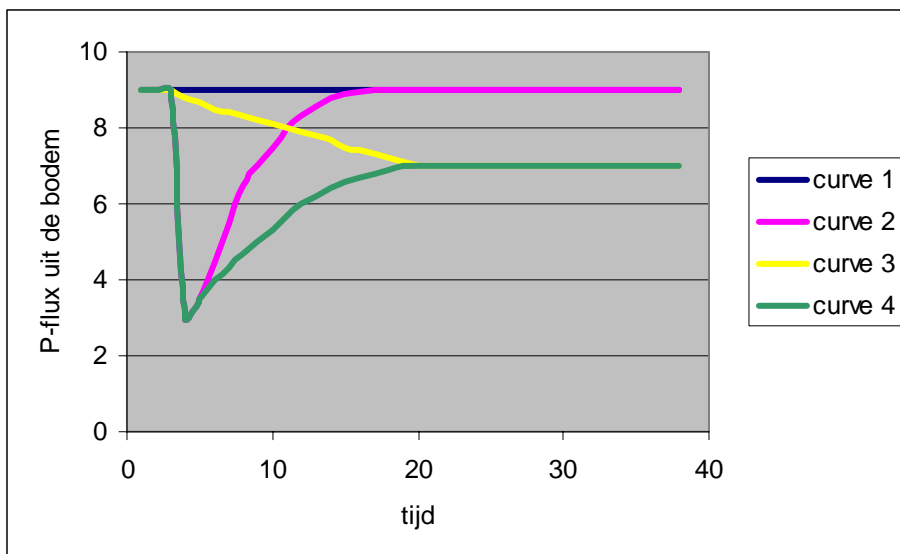
In de Bodemdiagnose worden alleen de effecten van de nieuwe bodem beschreven en niet de effecten van het baggeren zelf.

De effecten van de nieuwe bodem hangen af van onderstaande factoren:

- Structuur: korrelgrootteverdeling, organisch stofgehalte, slibgehalte, porositeit, stabiliteit, sortering, etc.
- Het vrijkomen van nutriënten en contaminanten uit de nieuwe toplaag of juist binding aan die laag. Hierbij spelen sorptieprocessen een belangrijke rol, maar ook processen in de nieuwe toplaag zoals de afbraak van organisch materiaal, waarbij nutriënten vrijkomen.
- Leeftijd (baggerfrequentie; hoelang krijgt de nieuwe bodem de tijd om een habitat te vormen?)
- Aanpassing profiel van het waterlichaam (wijziging erosie/sedimentatiesnelheden, andere waterdiepte).

De bodemdiagnose beoordeelt de eerste twee aspecten: de structuur kan invloed hebben op het zwevende stof en het organische stofgehalte daarin. Verder heeft de nieuwe bodem een andere naleveringsflux. Binnen BaggerNut is wel onderzoek gedaan naar de baggerfrequentie (Van den Berg et al., in voorbereiding), maar de resultaten zijn onvoldoende duidelijk om op te nemen in de bodemdiagnose. Ook voor het effect van waterdiepte en stroomsnelheid op de nutriëntenconcentraties in het water zijn geen eenvoudige relaties af te leiden, behalve als de verblijftijd verandert. Het effect van een gewijzigde verblijftijd kan worden ingeschat door de bodemdiagnose te 'draaien' met gewijzigde afmetingen.

Het lange termijn rendement is afhankelijk van de reductie van de externe belasting. In de onderstaande figuur is dat schematisch weergegeven. Indien niets wordt gedaan geldt curve 1, indien alleen wordt gebaggerd mag een tijdelijk effect worden verwacht afhankelijk van de kwaliteitsverbetering van de waterbodembodem (curve 2). Indien de externe belasting wordt teruggebracht (of recent is teruggebracht), zal de flux uit de waterbodembodem na verloop van tijd weer in evenwicht komen met de belasting, maar wel op een lager niveau (curve 3). Dit proces kan versneld worden door baggeren. Op termijn zal de bijdrage van de waterbodembodem gelijk worden aan curve 3, maar dit niveau wordt direct na baggeren bereikt (curve 4).



Figuur 3.1 Schematische weergave van het rendement van de maatregel baggeren. De getallen op de assen zijn dimensieloos

De grote vraag is nu hoeveel jaren winst gehaald kan worden met baggeren en of baggeren een vergelijkbaar (shock)effect kan hebben als bijvoorbeeld Actief biologisch beheer, waardoor het systeem omslaat van troebel naar helder.

### 3.1.1 Ervaringen tot nu toe

Er is veel ervaring met baggeren en de effecten zijn wisselend. Vooral vanwege de ervaringen met de Geerplas (Michielsen et al, 2007) is er bezorgdheid over het effect van baggeren in veenbodems. De nieuwe toplaag bevat vers veen, dat mogelijk gevoeliger is voor afbraak. In de Geerplas werden de eerste 5 jaar na baggeren lage concentraties P gemeten, maar daarna liepen concentraties P in de plas op tot hogere waarden dan voor baggeren. Opvallend was dat de vrij abrupte stijging begon na inlaat van gedefosfateerd (maar bicarbonaatrijk) water.

Het Platform Ecologisch herstel meren heeft alle ingrepen, waaronder baggeren op een rijtje gezet (Website Helpdesk water, ± 2008). Nog niet op alle locaties zijn resultaten vermeld, maar dat overzicht vermeldt dat baggeren geen effect had op de P-concentraties in de Binnenschelde (1988), Vlaamse Kreek (2000), Bruintjeskreek (1998), Zwaakse Weel (1994), De Deelen (1993), De Haak (±1989). Baggeren was (enigszins) succesvol in de Boschkreek (1994), Molenkreek (1999) Canisvlietse Kreek (1999), Hollands Ankeveense Plassen (??), Nannewijd (±1994), Rottige Meente (1994), al is lang niet in alle gevallen duidelijk of het baggeren zelf de hoofdoorzaak van de verbetering was. Vaak was een mix aan maatregelen uitgevoerd. Eigenlijk moet het omgekeerde worden gesteld: baggeren heeft vrijwel nooit een blijvend effect als de overige belastingsbronnen niet worden aangepakt. Baggeren moet gezien worden als maatregel om sneller effect te hebben van het terugbrengen van de externe belasting.

### 3.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?

In de bodemdiagnose wordt deze groep maatregelen geadviseerd afhankelijk van 5 vragen:

1. Is de nalevering groter dan 20% van de externe belasting?
2. Is de huidige waterdiepte kleiner dan de leggerdiepte (of is verdieping wenselijk)?
3. Is P/Fe-ratio in de nieuwe waterbodem lager dan de huidige toplaag
4. Is de nieuwe bodem na baggeren stevig (geen veen)?

Vraag 1 is een voorwaarde, want als de nalevering te klein is, heeft baggeren omwille van nutriënten geen zin. In het geval met baggeren een steviger bodem wordt gecreëerd, zou het ook bij lage nalevering nog wel optie zijn. Dan kan het advies in de Bodemdiagnose genegeerd worden. Vraag 2 is juist een automatisme: als er sowieso gebaggerd gaat worden kan met de Bodemdiagnose worden ingeschat of daar een effect van mag worden verwacht. Het effect wordt vooral gebaseerd op de vragen 3 en 4, namelijk of de kwaliteit van de onderlaag (de nieuwe toplaag) beter is en of een stevig substraat verwacht mag worden.

### 3.3 Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer

#### 3.3.1 P-nalevering

Het effect van baggeren hangt af van de nieuwe waterbodem. In theorie is er na baggeren sprake van een geheel nieuwe waterbodem. In de praktijk is volledige verwijdering meestal niet haalbaar om de volgende redenen:

- mors die achterblijft na baggeren (1 tot enkele cm);
- onvolledig verwijderen van de eutrofe laag, vanwege heterogeniteit (de laag is nooit overal even dik en kan alleen volledig verwijderd worden als er met overdiepte wordt gebaggerd, waardoor veel 'schone' bagger wordt mee gebaggerd).
- de aanwezigheid van infrastructuur die een fysieke belemmering vormt voor de bereikbaarheid van baggerwerktuigen. Ook om redenen van veiligheid wordt vaak direct langs infrastructurele werken (dijken, kades) niet gebaggerd.

Men moet dus bij baggeren niet te makkelijk aannemen dat na baggeren een 100% nieuwe (nutriëntenarme) waterbodem. Echter, het achterblijvende materiaal zal zich mengen met de nieuwe waterbodem, waardoor de nieuwe waterbodem in elk geval voor een deel bepalend zal zijn voor de waterkwaliteit. Een realistische aanname is dat de resultante nieuwe toplaag bestaat uit 20% oude toplaag en 80% onderlaag. Onafhankelijk van de methode waarmee de flux wordt geschat kan deze opnieuw berekend worden. Voor de Fe/P-ratio is dit eenvoudig mits metingen in de dieper lagen beschikbaar zijn.

**Rekenvoorbeeld baggeren**

In Klein Vogelenzang is de toplaag en de onderlaag bemonsterd. In de tabel zijn de Fe en P-gehalten weergegeven in de toplaag, in de onderlaag en in de nieuwe toplaag met de 80/20-regel die hierboven is beschreven

|                | P (g/kg) | Fe (g/kg) | P/Fe (g/g) |
|----------------|----------|-----------|------------|
| toplaag        | 3,1      | 77        | 0,04026    |
| diepe laag     | 0,5      | 18        | 0,027778   |
| nieuwe toplaag | 1,02     | 29,8      | 0,034228   |

De vooruitgang is de P/Fe-ratio is beperkt en wordt extra geremd door de oude verontreinigde toplaag. Een hoog baggerrendement is essentieel voor een hoog rendement.

De nieuwe toplaag kan worden ingevoerd in de Bodemdiagnose, waardoor de interne flux lager wordt. Afhankelijk van de bijdrage van de interne flux zal deze ingreep effect hebben op de concentratie in het oppervlaktewater.

Voor poriewaterconcentraties is het onzeker hoe betrouwbaar poriewaterconcentraties in de diepere lagen zijn als indicator voor de nieuwe toplaag. In het BaggerNut-project is in Klein Vogelenzang (Reeuwijkse Plassen) wel poriewater bemonsterd in diepere lagen, maar het is nog niet bekend hoe goed deze concentraties zijn als indicator.

Met de nieuwe waterbodemplux kan de gebruiker weer een berekening in de tijd uitgevoerd (net zoals de autonome ontwikkeling).

### 3.3.2 Zwevende stof

Afhankelijk van de structuur van de onderliggende laag wordt ZS aangepast. Vooralsnog is het onmogelijk om daarvoor vuistregels te geven. De gebruiker van de Bodemdiagnose kan wel variëren en beoordelen wat voor effect een reductie van zwevende stof kan hebben op het doorzicht. Meer informatie over zwevende stof is te vinden in hoofdstuk 0.

## 4 Contact waterbodem en oppervlaktewater afsnijden: afdekken

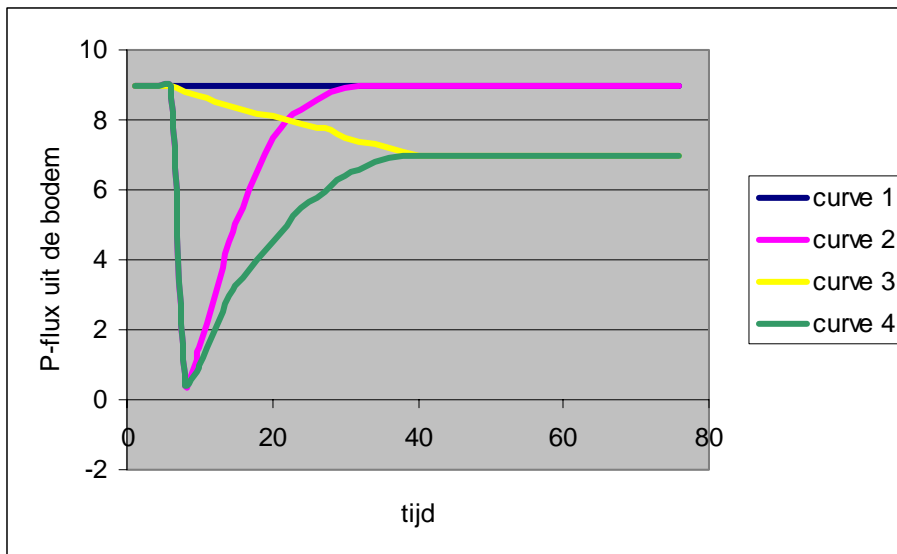
### 4.1 Beschrijving maatregel en ervaringen tot nu toe

Omdat baggeren niet altijd leidde tot verbetering van het aquatisch systeem en omdat het een dure maatregel is, is in de afgelopen jaren vaker geëxperimenteerd met afdekken. Hierbij wordt een laag van 20-50 cm nieuw materiaal aangebracht bovenop het sediment. Afdekken heeft twee effecten: de belangrijkste reden is in de meeste gevallen het terugdringen van de P-flux uit de waterbodem naar het oppervlaktewater. Daarnaast kan afdekken ook effect hebben op de structuur van de bodem. Een stevigere bodem geeft minder opwerveling (vis, wind, boten) en betere mogelijkheden voor vegetatieontwikkeling.

Omdat een afdeklaag geheel nieuw (een geen oud sediment meer aan het oppervlak ligt) is, zal de P-flux afhankelijk zijn van de eigenschappen van het afdek materiaal. Behalve de P-nalevering zijn ook de fysische eigenschappen van het afdek materiaal van belang. De volgende effecten moeten worden meegenomen voor de beoordeling van de nieuwe waterbodem:

- 1 Geen direct contact meer tussen de eutrofe bodem en het oppervlaktewater. De flux wordt bepaald door de flux uit de nieuwe bodem en vooral als deze klein is (afdekken met zand) kan de flux sterk beïnvloed worden door diffusie van P uit de oude bodem via het zand naar het oppervlaktewater.
- 2 Verminderde afbraak van de organische stof in de oude waterbodem, omdat oxidatoren (zuurstof, nitraat, sulfaat) uit de waterlaag niet zo snel het onderliggende sediment kunnen bereiken (ook alleen nog moleculaire diffusie).
- 3 Specifiek voor een afdeklaag van zand: in de Bergse Achterplas lijkt het erop dat de condities in het zand zodanig is dat er relatief veel opgelost ijzer aanwezig is (wel reductie van ijzeroxiden en ijzersulfide vorming). Als het ijzer samen met fosfaat diffundeert, kan het in oppervlaktewater als ijzeroxide nieuwe oppervlak vormen om fosfaat te binden. Het is onduidelijk of dit een structureel effect is.

Figuur 4.1 geeft schematisch het effect weer van afdekken. Het lange termijn rendement is afhankelijk van de reductie van de externe belasting. In de onderstaande figuur is dat schematisch weergegeven. Indien niets wordt gedaan geldt curve 1, indien alleen wordt afgedekt zal de flux het eerstvolgende jaar bepaald worden door de nieuwe afdeklaag (curve 2). Indien de externe belasting wordt teruggebracht (of recent is teruggebracht), zal de flux uit de waterbodem na verloop van tijd weer in evenwicht komen met de belasting, maar wel op een lager niveau (curve 3). Zonder het terugbrengen van de externe belasting zal curve 2 worden gevolgd en een combinatie van afdekken en reductie van belasting resulteert in curve 4. Hoewel de tijdsduur op de x-as relatief is, kan afdekken beter werken dan wegbaggeren, omdat de nieuwe bodem geen resten meer van de oude eutrofe laag bevat en omdat afhankelijk van het afdek materiaal een nieuwe bodem gecreëerd kan worden die minder nalevert dan de natuurlijk aanwezige bodem.



Figuur 4.1 Schematische weergave van het rendement van de maatregel afdekken. De assen zijn dimensieloos.

#### 4.1.1 Ervaringen tot nu toe

Als waterbodemsaneringstechniek is afdekken toegepast in het Hollands diep, her en der in het Haringvliet en de Dordtse Biesbosch en in de Bergse Achterplas. In de Bergse Achterplas bleek afdekken met zand een succesvolle maatregel om eutrofiering tegen te gaan. Dat heeft geleid tot initiatieven om ook de Kralingse Plas en de Bergse Voorplas af te zanden. In alle gevallen is afgedekt met gespoeld zeezand, of zand dat vrijkwam bij graafwerkzaamheden zoals bij depot Hollands Diep. In het buitenland zijn nauwelijks voorbeelden bekend waarin met zand is afgedekt om eutrofiering tegen te gaan.

De ervaring in het gebied van hoogheemraadschap Schieland en Krimpenerwaard zijn positief. Afzanden is echter wel gepaard gegaan met een flinke reductie van de externe belasting. In de Bergse Achterplas is nu op veel plaatsen weer een nieuwe sliblaag op het zand ontstaan. Vooral op slappe slibbodems moet het zand met enige zorg wordt aangebracht om te voorkomen dat er het door de bagger heen valt. Inmiddels zijn hiervoor technieken ontwikkeld waarmee het zand prima verdeeld wordt.

Er is nauwelijks ervaring met klei of bagger als afdek materiaal. Afdekken met droge grond kan vanwege de overgang van droog naar nat leiden tot verhoogde mobiliteit van metalen en nutriënten (m.n. P) en is daarom niet aan te raden. Het gedrag van droge grond onder water wordt nader bestudeerd in het project voor ontwikkeling van een toetsingskader voor herinrichting van diepe plassen (RIVM, Deltares, Alterra).

#### 4.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?

In de bodemdiagnose wordt deze groep maatregelen geadviseerd afhankelijk van 5 vragen:

1. Is de nalevering groter dan 20% van de externe belasting?
2. Is de huidige waterdiepte kleiner dan de leggerdiepte (of is verdieping wenselijk)?
3. Blijft het afdek materiaal liggen onder piekbelasting (maximale stroomsnelheid altijd <0,3 m/s, golven, scheepvaart)?
4. Is P/Fe-ratio in de nieuwe waterbodems lager dan de huidige toplaag?
5. Is de nieuwe bodem na baggeren stevig (geen veen)?



Vraag 1 is een voorwaarde, want als de nalevering te klein is, heeft afdekken omwille van nutriënten geen zin. In het geval met afdekken een steviger bodem wordt gecreëerd zou het ook bij lage nalevering nog wel optie zijn. Dan kan het advies in de Bodemdiagnose genegeerd worden. Vraag 2 gaat over de waterdiepte: afdekken is alleen mogelijk als de diepte van het waterlichaam geen probleem vormt. Op locaties met (frequent) periodiek onderhoud is afdekken dus niet zinvol. Als de huidige diepgang wel limiterend is, maar als de aanwas laag is, kan wel een combinatie van baggeren en afdekken worden overwogen. Combinatie van baggeren en afdekken is wel duur, maar wel mogelijk. Naast de diepte mag ook de stroomsnelheid niet te hoog zijn, anders spoelt het afdek materiaal weg. Aangezien waterbodemmaatregelen die eutrofiëring tegengaan vaak het meeste rendement opleveren in wateren met een lange verblijftijd, is stroomsnelheid meestal geen complicerende factor. Als aan de voorwaarden 1,2 en 3 is voldaan, wordt het effect van afdekken vooral gebaseerd op de vragen 4 en 5, namelijk op basis van de kwaliteit en stevigheid van het afdek materiaal.

Afdekken kan in principe met elk materiaal worden uitgevoerd, maar het toepassen van zand is het meest eenvoudig. Kritiek op het afdekken met zand is de geringe bindingscapaciteit van zand, waardoor de zandlaag slecht een fysische buffer is. Nadeel van klei is dat het veel meer vertroebeling geeft bij, maar ook na toepassen. De afweging of afdekken met een andere type materiaal dan de natuurlijke bodem acceptabel is, moet door de waterbeheerder gemaakt worden. Substraatsamenstelling is een van de hydromorfologische kwaliteitselementen, die de ecologische doelstellingen van de KRW ondersteunen. De beoordeling is vooral gericht op de natuurlijke oorsprong van het substraat. Afdekken staat de beoordeling niet in de weg zolang de nieuwe toplaag maar uit het natuurlijk aanwezige substraat blijft bestaan, maar dit is meestal niet het geval. Met het wijzigingen van de bodemsamenstelling, zoals een zandbodem in een veenplas, verandert de score meteen in matig.

### 4.3 Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer

#### 4.3.1 P-flux

Voor een afdeklaag van puur zand wordt een vertraagde flux berekend op basis van de poriewaterconcentratie in de oude bodem. Vaak wordt in onbehandelde bodems een diffusieafstand van 1 cm genomen. De diffusie wordt nu lager afhankelijk van de laagdikte:

$$F_{na} = F_{voor} \times dz / (dz + dz_{zand}) \quad [4.1]$$

Waarin:

$F_{na}$  = Flux na het afdekken

$F_{voor}$  = Flux voor het afdekken

$dz$  = dikte diffusielaag (1 cm)

$dz_{zand}$  = dikte van de afdeklaag (in cm)

$F_{na}$  is niet direct in te voeren in de bodemdiagnose. De flux wordt namelijk berekend op basis van de Fe/P-ratio. Daarom moet de  $F_{na}$  worden teruggerekend naar een Fe/P-ratio met behulp van vergelijking 4.2:

$$F_{na} = 1,66 \times (P-sed/Fe-sed)_{na}^{1,85} \quad [4.2]$$

De nieuwe P/Fe-ratio is dus:

$$(P-sed/Fe-sed)_{na} = (F_{na} / 1,66)^{0,54} \quad [4.3]$$

Voor poriewater (een 2<sup>e</sup> order vergelijking) is er geen eenvoudige vergelijking waarmee de poriewaterconcentratie na afdekken kan worden berekend. Er wordt geadviseerd om de poriewater terug te brengen tot de naleveringsflux in rij 66 van werkblad 4-balans is gereduceerd met de factor  $dz / (dz + dz_{zand})$  uit vergelijking 4.1.

Met de nieuwe waterbodemplux wordt vervolgens weer een berekening in de tijd uitgevoerd (net zoals de autonome ontwikkeling).

#### Rekenvoorbeeld afdekken met zand

In het Zuidlaardermeer is de nalevering 0,65 g/m<sup>2</sup>/jaar. Indien de bodem zou worden afgedekt met 5 cm zand kan de nalevering berekend worden door:

$$F_{na} = 0,65 \times 1/(1+5) = 0,11 \text{ g/m}^2/\text{jaar}$$

De gewijzigde invoer in de bodemdiagnose wordt dan:

$$P/F_{e_{na}} = (0,11/1,66)^{0,54} = 0,23 \text{ g/m}^2/\text{jaar}$$

De nieuwe toplaag kan worden ingevoerd in de Bodemdiagnose, waardoor de interne flux lager wordt. Afhankelijk van de bijdrage van de interne flux zal deze ingreep effect hebben op de concentratie in het oppervlaktewater.

Voor de benadering via poriewater is de concentratie voor afdekking 2,5 mg P/l. Als de flux moet worden teruggebracht tot 0,11 g/m<sup>2</sup>/jaar resulteert dat in een poriewaterconcentratie van 0,4 mg P/l.

**Voor afdeklagen die een eigen bindingscapaciteit hebben (grond, klei) ligt het meer voor de hand om op basis van de Fe/P-ratio van de grond/klei een nieuwe flux te berekenen.**

#### 4.3.2 Zwevende stof

Afhankelijk van de structuur van de afdeklaag kan de concentratie zwevende stof worden aangepast. Meer informatie over zwevende stof is te vinden in hoofdstuk 0. Het ligt het meest voor de hand om de  $\tau_{krit}$  te wijzigen.

**Rekenvoorbeeld steviger bodem**

In de Schutsloterwijdte is de concentratie zwevende stof (mediaan) ca. 12 mg/l. volgens vergelijking 2.1 geldt dus:

$$f(\text{strijklengte / diepte}) * f(\text{slibvang}) * f(\tau_{\text{krit}}) * ZS_{\text{max}} = 12$$

Op basis van de formules 2.2, 2.3 en 2.4 kunnen de factoren worden bepaald:

$$f(\text{strijklengte / diepte}) = 0,3$$

$$f(\text{slibvang}) = 1$$

$$f(\tau_{\text{krit}}) = 1$$

Dat betekent dat  $ZS_{\text{max}} = 12 / 0,3 = 40$  mg/l

De maximaal gemeten concentratie is 50 mg/l (op basis van metingen in 2004 en 2011)

De Handreiking beoordelen waterbodems (Min. IenM, 2011) geeft aan dat een goed geconsolideerde bodem een  $\tau_{\text{krit}}$  heeft van 0,8 N/m<sup>2</sup>. Dit resulteert in een  $f(\tau_{\text{krit}})$  van 0,09. Als vergelijking 2.1 opnieuw wordt ingevuld, leidt dat tot:

$$ZS_{\text{mediaan}} = 0,3 \times 1 \times 0,09 \times 12 = 0,31 \text{ mg ZS/l}$$

Een geconsolideerde zandbodem geeft dus nog nauwelijks opwerveling. Daarbij moet wel worden opgemerkt dat zwevende stof geproduceerd door algen en zwevende stof die binnenkomt met externe belasting niet in deze berekening is meegenomen.

De gebruiker van de Bodemdiagnose kan wel variëren en beoordelen wat voor effect een reductie van zwevende stof kan hebben op het doorzicht. Vooralsnog is het onmogelijk om daarvoor vuistregels te geven



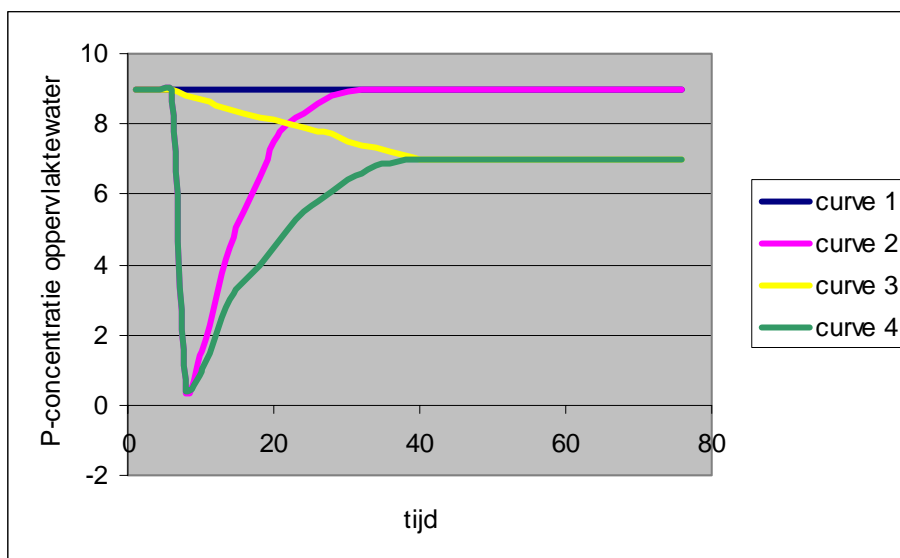
## 5 Vergroten P-bindingscapaciteit: toepassen van P-bindende stoffen

### 5.1 Beschrijving maatregel en ervaringen tot nu toe

Omdat baggeren, zowel vanwege eutrofiering als vanwege toxische stoffen, niet altijd leidde tot verbetering van het aquatisch systeem en omdat het een dure maatregel is, is gezocht naar mogelijkheden om de kwaliteit van de liggende waterbodem te verbeteren. Er worden materialen toegevoegd op of in het sediment die veel P kunnen binden. Dit zou moeten leiden tot een sterk verlaagde P-flux. Er zijn verschillende manieren waarop P-bindende stoffen kunnen worden toegepast:

1. kortdurende suppletie van een dosis P-bindende stof
2. langdurige suppletie van kleine doseringen P-bindende stof
3. eenmalige dosis P-bindende stof onder een laag zand
4. P-bindende stof vermengen met de toplaag (geen ervaring mee; wordt ook niet verder uitgewerkt).

Figuur 5.1 toont de mogelijke resultaten van het wel of niet uitvoeren van maatregelen. In essentie resulteert bovenstaande berekening in curve 2 (bij gelijkblijvende externe belasting) of curve 4 (bij gereduceerde externe belasting), maar het gaat om de mate waarin reductie wordt bereikt en de duur van het effect.

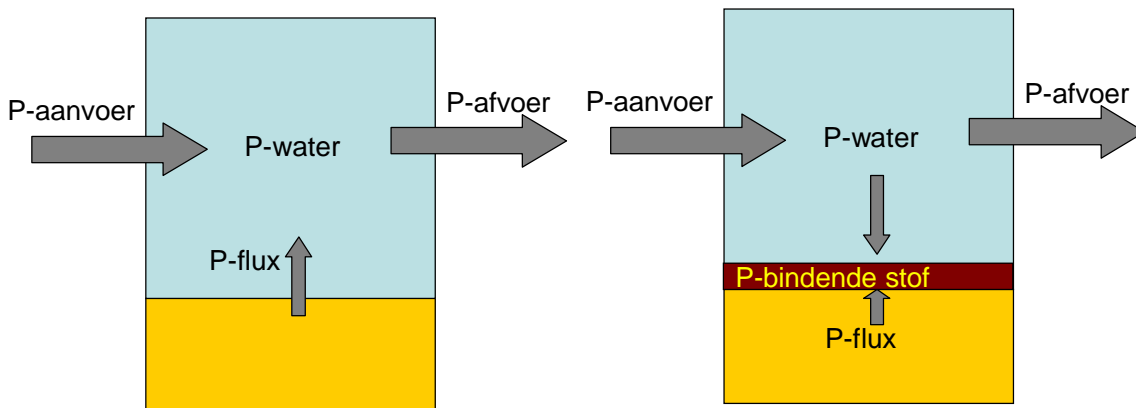


Figuur 5.1 Schematische weergave van het rendement van de maatregel suspenderen P-bindende stof (de assen zijn dimensieloos). Curve 1: niets doen, curve 2: toevoegen P-bindende stof zonder reductie externe belasting, curve 3: alleen reduceren externe belasting, curve 4: toevoegen P-bindende stof plus reductie externe belasting,

Bovenstaande grafiek is vooral gericht op het voorspellen van de P-concentratie in oppervlaktewater, maar een reductie van P in oppervlaktewater leidt niet in alle gevallen tot verbetering van de ecologie. De ervaring met het toepassen van P-bindende stoffen geeft aan dat de behandeling een vergelijkbaar (shock)effect kan hebben als ABB, waardoor het systeem omslaat van troebel naar helder.

### 5.1.1 Toepassingsopties 1 en 2 (suppletie)

Het toevoegen van P-bindende stoffen is gericht op het terugdringen van de P-flux uit de waterbodem naar het oppervlaktewater. Tegelijkertijd is er in de toepassingsopties 1 en 2 ook direct contact tussen de P-bindende stof en het oppervlaktewater. Figuur 5.2 toont de situatie voor en na toediening van P-bindende stof. De P-bindende stof vormt als het ware een nieuwe grenslaag vormt die in ondiepe wateren (zeker tijdens de periode van toediening, door opwerveling ook daarna) in evenwicht zal zijn met de waterfase. Dat houdt in dat in de eerste periode niet alleen de flux vanuit de bodem wordt gereduceerd, maar dat ook P uit de waterfase wordt geabsorbeerd. Dit zal vooral in de beginfase zeer effectief zijn, omdat ook een deel van de externe belasting wordt weggevangen. Door de grotere belasting van de P-bindende stof zal de stof eerder verzadigd zijn dan alleen op basis van de flux vanuit de waterbodem mag worden verwacht.



Figuur 5.2 Effect van het toevoegen van een P-bindende stof in het water. De P-bindende stof vormt een extra laag boven op de waterbodem. Er zal P vanuit de bodem binden aan de afdeklaag, maar ook P vanuit het oppervlaktewater, tot de laag verzadigd is. De rechter figuur geeft de situatie (kort) na toediening weer.

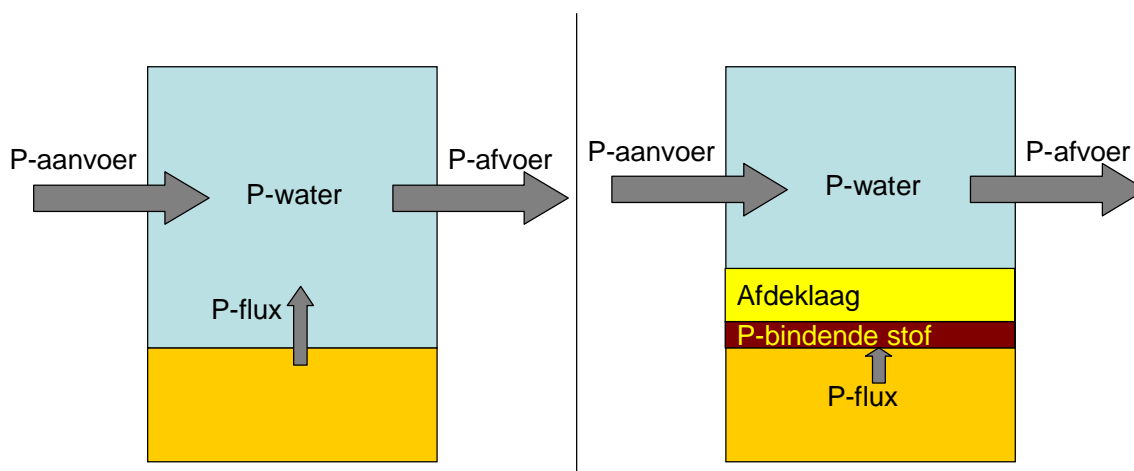
Optie 1 en 2 (een snelle hoge dosis of een langdurige lage dosering) zouden kunnen verschillen omdat:

- er steeds verse P-bindende stof op de bodem komt en in veel gevallen is het verse materiaal het meest effectief in P-bindende (Miller, 2005; De Vicente *et al.*, 2008);
- er na verloop van tijd menging van de P-bindende stof met de bodem plaatsvindt, waardoor het directe contact met het oppervlaktewater minder wordt;
- bij een langdurige dosering menging met het oppervlaktewater en daardoor het wegvangen van P uit de waterfase effectiever is.

In de bodemdiagnose worden deze twee opties vooralsnog samengevoegd, omdat de eindsituatie wordt beoordeeld (na toediening van alle toeslagstof).

### 5.1.2 Toepassingsoptie 3 (P-bindende stof onder afdeklaag)

Figuur 5.3 toont de situatie waarin de P-bindende stof onder een (inerte) afdeklaag wordt toegepast. In deze methode is het directe contact met de P-bindende stof en het oppervlaktewater veel lager en daardoor zal de hoeveelheid P uit het oppervlaktewater die bindt aan de P-bindende stof minimaal zijn.



Figuur 5.3 Effect van het toevoegen van een P-bindende stof onder een afdeklaag. In de figuur is aangenomen dat de afdeklaag relatief inert is (bijv. zand). Er is geen direct contact tussen de P-bindende stof en de waterlaag, waardoor vooral de P-flux vanuit de bodem wordt gereduceerd, zoals te zien is in de rechter figuur.

### 5.1.3 Ervaringen tot nu toe

In Nederland is vooral ervaring met het eenmalig doseren van P-fixerende middelen. Begin jaren '90 enkele locaties behandeld met  $\text{FeCl}_3$ . Het ging toen om Groot Vogelenzang (Reeuwijkse plassen) en het Nanneveld (Fryslan). Dit heeft in beide gevallen een zeer kortstondige verbetering opgeleverd. Voor Groot Vogelenzang werd dit toegeschreven aan de dominante rol van de externe belasting, waardoor de bodem snel weer opgeladen was. Voor het Nanneveld was P-fixatie een van de maatregelen en is het effect van alleen P-fixatie moeilijk vast te stellen.

Verder is op diverse locaties (vooral in Brabant) de zogenaamde Flock en Lock methode gebruikt. Dit betreft een eenmalige dosering met polyaluminiumchloride (PAC) en daarna behandeling met een lanthaanhoudende klei (Phoslock). De PAC dient om P weg te vangen uit de waterlaag, waardoor de bindingscapaciteit van Phoslock volledig gebruikt kan worden voor het binden van P aan de bodem. Daarbij wordt verondersteld dat Phoslock lange tijd reactief blijft. Voorbeeldlocaties van deze methode zijn: Rauwbraken, De Kuil, Stadvijver Stiffelio. In het buitenland zijn ook vooral ervaringen met het eenmalig doseren van deze stoffen. Bakker et al. (2011) geven een overzicht van de diverse stoffen in hoofdstuk 3.

In het KRW-innovatieprogramma wordt P-fixatie volgens de methoden 2 en 3 toegepast. In Terra Nova wordt over een aantal jaren verspreid  $\text{FeCl}_3$  gedoseerd, terwijl in de Bergse Voorplas PAC wordt gedoseerd voordat wordt afgedekt met 25 cm zand. De eerste resultaten van beide proeven zijn positief, maar de tijd is nog te kort om een goed oordeel te vellen.

## 5.2 Advies in de bodemdiagnose: in welke situaties/systemen kan de maatregel worden toegepast?

Het toedienen van toeslagstoffen kan in principe overal plaatsvinden, mits de waterbodem niet gebaggerd hoeft te worden (of gebaggerd is en er een lage aanwas is). In de praktijk komen toch vooral wateren met een lange verblijftijd (plassen, meren, vijvers) in aanmerking.

1. Is de nalevering groter dan 20% van de externe belasting?
2. Is de huidige waterdiepte kleiner dan de leggerdiepte (of is verdieping wenselijk)?
3. Blijft het afdek materiaal liggen onder piekbelasting (maximale stroomsnelheid, golven, scheepvaart)?

Vraag 1 is een voorwaarde, want als de nalevering te klein is, heeft een P-bindende toeslagstof geen zin. Vraag 2 gaat over de waterdiepte: afdekken is alleen mogelijk als de diepte van het waterlichaam geen probleem vormt. Op locaties met (frequent) periodiek onderhoud is afdekken dus niet zinvol. Als de huidige diepgang wel limiterend is, maar als de aanwas laag is, kan wel een combinatie van baggeren en een toeslagstof worden overwogen. Combinatie van baggeren en afdekken is wel duur, maar wel mogelijk. Naast de diepte mag ook de stroomsnelheid niet te hoog zijn (vraag 3), anders spoelt de toeslagstof weg. Aangezien waterbodemmaatregelen die eutrofiëring tegengaan vaak het meeste rendement opleveren in wateren met een lange verblijftijd, is stroomsnelheid meestal geen complicerende factor.

Voor de selectie van de toeslagstof gelden nog aanvullende criteria, nl.:

- De toeslagstof moet effectief zijn in het binden van fosfaat;
- Toepasbaarheid/mengbaarheid;
- de toeslag stof mag geen (onacceptabele) schadelijke nevenwerkingen hebben.

## 5.3 Kwantificeren van de maatregel: handvatten voor wijzigen invoer

Voor het berekenen van de P-concentratie in oppervlaktewater worden in het de bodemdiagnose de volgende stappen uitgevoerd:

- 1 De bindingscapaciteit van de toeslagstof moet bekend zijn. De bindingscapaciteit moet worden bepaald voor realistische concentraties. Voor een beperkt aantal toeslagstoffen is op basis van onderzoek in het KRW-innovatieproject 'De bodem bedekt' de bindingscapaciteit reeds bepaald. De relatie tussen het gehalte gebonden P ( $P_{ads}$ ) en de concentratie P in oplossing is weergegeven in vergelijking 5.1 (de zogenaamde Langmuir-vergelijking):

$$Q_{ads,additief} = Q_{max, additief} \times (K_{additief} \times C_{poriewater}) / (1 + K_{additief} \times C_{poriewater}) \quad [5.1]$$

Waarin:

|           |   |
|-----------|---|
| $Q_{ads}$ | geadsorbeerd gehalte aan het additief (mg/kg) |
| $Q_{max}$ | de maximale adsorptiecapaciteit (mg/kg)       |
| K         | constante (l/mg)                              |
| c         | concentratie in oplossing (mg/l)              |

Tabel 5.1 Parameterwaarden voor enkele toeslagstoffen op basis van onderzoek in de Bodem bedekt (Bakker et al., 2011).

|                   | Al      | Fe      | Phoslock | kalk  |
|-------------------|---------|---------|----------|-------|
| $Q_{max}$ (mg/kg) | 450.000 | 300.000 | 10.000   | 1.000 |
| $K_{additief}$    | 0,5     | 2,5     | 25       | 0,7   |



Met vergelijking 5.1, gebruikmakend van de parameters uit Tabel 5.1 en de gemeten poriewaterconcentratie in de huidige situatie, wordt de bindingscapaciteit van de bodem berekend. De gebruiker moet zich wel realiseren dat deze adsorptiecapaciteit onder labcondities is bepaald en dat het rendement in het veld meestal lager is.

Er wordt aangenomen dat de toeslagstof homogeen verdeeld is over de bovenste vijf centimeter. De binding aan de bodem wordt lineair verondersteld (vergelijking 5.2):

$$Q_{\text{ads}} = K_{\text{bodern}} \times C_{\text{poriewater}} \quad [5.2]$$

Met:

$K_{\text{bodern}}$  = partiticoëfficiënt, te berekenen door  $Q_{\text{ads}}/C_{\text{poriewater}}$  in de huidige situatie.

Dat leidt tot een totale adsorptie in de nieuwe toplaag die wordt weergegeven door vergelijking 5.3:

$$Q_{\text{ads, nieuwe toplaag}} = f_{\text{bodern}} \times K_{\text{bodern}} \times C_{\text{poriewater}} + f_{\text{additief}} \times Q_{\text{max, additief}} \times (K_{\text{additief}} \times C_{\text{poriewater}}) / (1 + K_{\text{additief}} \times C_{\text{poriewater}}) \quad [5.3]$$

Als er geen poriewatergegevens zijn, kan de toevoeging van een additief vertaald worden naar een verhoging van het ijzergehalte. Voor het toevoegen van ijzer is dit eenvoudig. Het toegevoegde ijzer wordt verdeeld over een 5 cm dikke bodemlaag. Indien een ander additief wordt toegevoegd moet dit worden omgerekend naar ijzer. Als de nalevering op basis van poriewater wordt geschat kan op basis van formule 5.3 een nieuwe poriewaterconcentratie worden geschat.

### Rekenvoorbeeld toepassen P-bindende stoffen

In Klein Vogelenzang bevat de bodem 3110 mg P/kg en is de poriewaterconcentratie 1,41 mg/l.  $K_{\text{bodem}} = 2206$  (cf. vergelijking 5.2). Indien er in de toplaag van 5 cm 1% ijzerhydroxide wordt toegevoegd, kan vergelijking 5.3 als volgt worden ingevuld:

$$Q_{\text{ads, nieuwe toplaag}} = 3110 = 0,99 \times 2206 \times c_{\text{poriewater}} + 0,01 \times \frac{300.000 \times 0,5 \times c_{\text{poriewater}}}{(1 + 0,5 \times c_{\text{poriewater}})}$$

Door iteratie kan worden afgeleid dat  $c_{\text{poriewater}} = 0,97$  mg P/l.

De maatregel geeft dus een reductie van de poriewaterconcentratie van ca. 30%. kan meteen ingevoerd worden als poriewaterconcentratie in de Bodemdiagnose. Als er geen poriewaterconcentratie bekend is kan de P/Fe-ratio worden gewijzigd. Voor ijzer kan 1% toevoeging omgerekend worden naar verhoging van het ijzergehalte. Voor andere additieven moet het percentage additief teruggerekend worden naar ijzer:

Dus 1% Phoslock komt overeen met:

$f_{\text{Fe(OH)}_3} = f_{\text{Phoslock}} \times Q_{\text{ads, Phoslock}} / Q_{\text{ads, Fe(OH)}_3} = 0,01 \times 10.000 \times 25 \times 1,41 / (1 + 25 \times 1,41) / (300.000 \times 2,5 \times 1,41 / (1 + 2,5 \times 1,41)) = 0,0042 = 0,04\%$ . Daarbij moet wel vermeld worden dat het percentage Fe & Al puur de bijdrage van de elementen bevat, dus dat de toe te voegen hoeveelheid materiaal (incl. Cl, OH, H<sub>2</sub>O) meer is. Dit geldt niet voor Phoslock.

## 6 Referenties

- Bakker, D.J., L.A. Osté, G.D. Roskam, J. de Weert, J. Hemelraad, 2011. De Bodem Bedekt. Het onderzoeken en aanbrengen van een fosfaatbindende afdeklaag in de Bergse Voorplas. Deltares rapport 1201913-000-BGS-0004.
- Deltares, 2008. Handleiding KRW-verkenner. Hoofdstuk 4: water- en stoffenbalans
- Michielsen, B., L. Lamers & F. Smolders (2007). Interne eutrofiëring van veenplassen belangrijker dan voorheen erkend? H2O 8: 51-54.
- Miller, N. (2005). Locally available adsorbing materials, sediment sealing and flocculants for chemical remediation of lake and stream water. Report prepared for Environment Bay of Plenty by Analytical & Environmental Consultants.
- Ministerie van I en M, 2010. Handreiking beoordelen waterbodems.
- Oste, L.A. en H. de Weerd, 2012. Kennisregels in de Bodemdiagnose BaggerNut. Deltares-rapport 1201327-0014.
- Penning, W.E. et al., 2012. Quantifying measures to limit wind-driven resuspension of sediments for improvement of the ecological quality in some shallow Dutch lakes Hydrobiologia, pp. 1-17.
- Vicente, I. de, P. Hunag, F.Ø. Andersen and H.Jensen (2008). Phosphate Adsorption by Fresh and Aged Aluminum Hydroxide. Consequences for Lake Restoration. Environ Sci. Technol., vol. 42, pp 6650–6655.