



# Onderzoek naar de baggerkwaliteit in watergangen

D. BRUS, ALTERRA

In dit artikel wordt een methode beschreven voor het ontwerpen van efficiënte inventarisatieplannen voor onderzoek naar de kwaliteit van bagger in watergangen. De nauwkeurigheid en de kosten van de uit te voeren inventarisatie wordt met modellen voorspeld. Deze aanpak heeft twee belangrijke voordelen: de ontwerper heeft met het nauwkeurigheds- en kostenmodel de instrumenten in handen om op zoek te gaan naar het plan dat gegeven het beschikbare budget de grootste nauwkeurigheid oplevert én de nauwkeurigheid kan voor meerdere budgetten voorspeld worden, zodat de opdrachtgever de mogelijkheid heeft om van tevoren een budget te kiezen dat naar verwachting een voldoende nauwkeurig resultaat oplevert. De methode wordt geïllustreerd aan de hand van de vaarten en tochten in oostelijk- en zuidelijk Flevoland (de Fleverwaard)

De bagger in de Nederlandse wateren is in meer of mindere mate vervuild. Het verwerken van bagger is daarom aan regels gebonden. Bagger van kwaliteitsklasse 3 of hoger mag niet op de kant worden gezet, maar moet worden opgeslagen in depots. Voordat gebag-

gerd wordt, is het daarom van groot belang om te weten wat de kwaliteit is van de vrijkomende bagger. Hiervoor is een methode ontwikkeld waarmee efficiënte inventarisatieplannen gemaakt kunnen worden voor onderzoek naar de baggerkwaliteit in watergangen.

## Oriënterend onderzoek

Als nog relatief weinig bekend is van de baggerkwaliteit in een gebied, kan het beste eerst een oriënterend onderzoek gedaan worden naar de hoeveelheid en kwaliteit van de bagger. Pas wanneer uit dit onderzoek is gebleken dat de waterbodem plaatselijk dermate vervuild is dat deze gesaneerd moet worden, is een gedetailleerde kaart nodig van deze te saneren watergangen. Het doel van het oriënterend onderzoek kan bijvoorbeeld zijn het schatten van het gemiddelde gehalte van een bepaalde contaminant of het volume probleembagger (bagger met kwaliteitsklasse 2 of groter) in het hele gebied of in een aantal deelgebieden. Ter illustratie is voor de Fleverwaard een inventarisatieplan ontworpen met als doel het schatten van het volume probleembagger in het hele gebied. Dit volume kan geschat worden door de gemiddelde dikte van de laag probleembagger te schatten en deze gemiddelde dikte te vermenigvuldigen met de bekend veronderstelde oppervlakte van de watergangen.

## Inventarisatieplan in grote lijnen

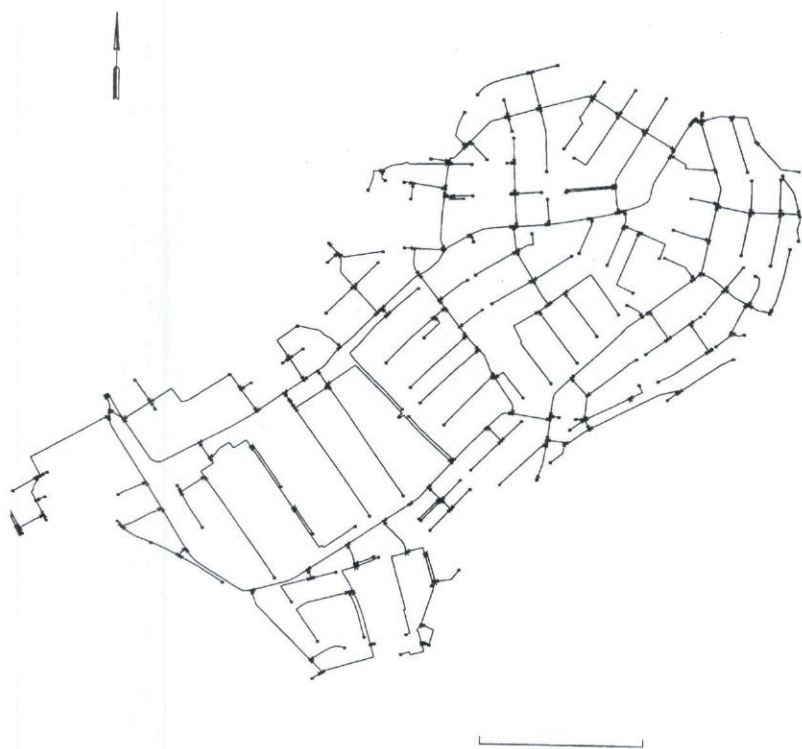
Een belangrijk onderdeel van een inventarisatieplan is de steekproefopzet. Deze specificeert hoe de monsterpunten worden geselecteerd. Er kan onderscheid kan gemaakt worden tussen kanssteekproeven (a-selecte steekproeven) en gerichte steekproeven. Bij kanssteekproeven worden de punten geloot, en wel zodanig dat de kansen van alle mogelijke steekproeven die uit het gebied kunnen worden getrokken bekend zijn. Dit is dus iets anders als een steekproef waarbij de punten (min of meer) willekeurig zijn geselecteerd. Het loten van de steekproefpunten biedt een aantal voordelen, waarvan de belangrijkste zijn objectiviteit en validiteit (geldigheid) van de geschatte steekproefvariantie (Brus en de Gruijter, 1997). In de ontwikkelde methode wordt uitgegaan van kanssteekproeven. Het loten kan op zeer veel manieren. Dit wordt bepaald door het steekproefopzetteype.

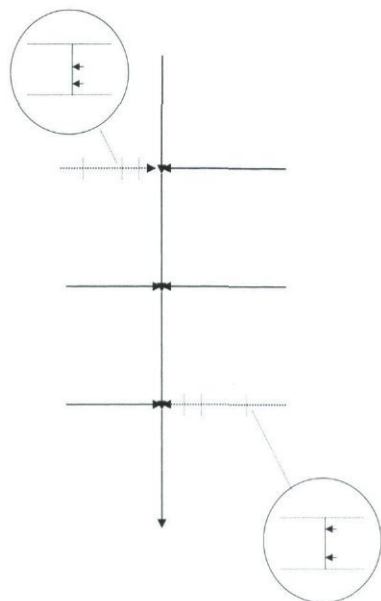
Voor de Fleverwaard is gekozen voor een gestratificeerde drietrapssteekproef (afbeelding 2). Dit betekent dat het gebied eerst wordt onderverdeeld in een aantal deelgebieden en binnen deze deelgebieden de punten in drie trappen geloot worden. In het geval van de Fleverwaard wordt eerst een watergang geloot met kansen evenredig met de oppervlakte van de watergang en met teruglegging, vervolgens binnen de gelote watergang één of meerdere dwarsprofielen, en tot slot binnen de gelote dwarsprofielen één of meer punten. Er zijn twee strata onderscheiden: oostelijk en zuidelijk Flevoland.

## Optimalisatie

Na het ontwerpen van het globale plan worden de optimale aantallen steekproefeen-

Afb. 1: Vaarten en tochten in de Fleverwaard





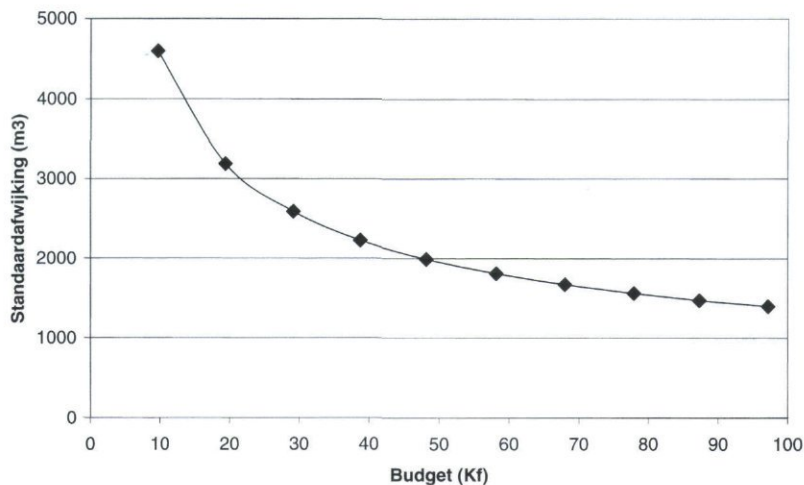
Afb. 2: Schematische weergave van een drietrapssteekproef in een netwerk van watergangen. In de eerste trap zijn twee watergangen geloot (met teruglegging en kansen evenredig met de oppervlakte), in de tweede trap drie dwarsprofielen per gelote watergang, en in de derde trap twee punten per geloot dwarsprofiel.

heden berekend. Voor de gestratificeerde drietrapssteekproef betekent dit dat per stratum het optimale aantal te loten watergangen, het optimale aantal te loten dwarsprofielen per watergang en het optimale aantal te loten punten per dwarsprofiel moet worden berekend. In totaal zijn er dus zes te optimaliseren parameters. Voor het optimaliseren is een model nodig voor de steekproefvariantie, een kostenmodel en een optimalisatie-algoritme.

### Model voor steekproefvariantie

De steekproefvariantie bij een gestratificeerde drietrapssteekproef kan geschat worden met een vergelijking waarin per stratum drie variantiecomponenten voorkomen, namelijk de ruimtelijke variantie van de gemiddelde dikte van de laag probleembagger in een watergang binnen het stratum, de ruimtelijke variantie ervan in een dwarsprofiel binnen een watergang en de ruimtelijke variantie van de dikte op punten binnen een dwarsprofiel.

De verwachtingswaardes van deze variantiecomponenten kunnen worden berekend met een variogram (Domburg *et al.*, 1997; Brus en Jansen, 1998). Het variogram is een model van de ruimtelijke variantie en beschrijft het gekwadraterde verschil van de dikte gemeten



Afb. 3: Voorspelde standaardafwijking van het geschatte volume probleembagger als functie van het budget.

op twee punten als functie van de afstand tussen de twee punten. Met behulp van echopeilingen en bestaande chemische analyses is een indruk verkregen van de semivariantie van de dikte van de laag probleembagger.

### Kostenmodel

In het kostenmodel zijn opgenomen de kosten van veldwerk, de de veldwerkuitrusting en de laboratoriumkosten. De veldwerk- en uitrustingskosten zijn evenredig met de tijd nodig voor veldwerk. Deze tijd is opgesplitst naar reistijd, tijd nodig voor het op- en afladen van de boot en de tijd nodig voor het steken van de monsters. De laboratoriumkosten zijn evenredig met het aantal monsters. In het hier gepresenteerde resultaat is het aantal monsters gelijk aan het aantal geselecteerde watergangen, d.w.z. alle monsters genomen op punten binnen een bepaalde watergang, worden gemengd.

### Optimalisatie-algoritme

De optimale aantallen zijn bepaald met 'simulated annealing'. Dit is een random-zoekmethode, dat wil zeggen nadat voor de aantallen steekproefeenheden een willekeurige startwaarde is gekozen, worden deze waardes onafhankelijk van elkaar gewijzigd in een willekeurige richting. Vervolgens wordt gekeken of deze wijziging een verbetering is of niet. Een verbetering wordt altijd geaccepteerd. In het begin van het optimalisatieproces worden ook kleine verslechtingen geaccepteerd om te voorkomen dat de optimalisatie in een lokaal minimum blijft hangen.

In tabel 1 staan de optimale aantallen steekproefeenheden voor een budget van 10-100Kf. Het blijkt dat het efficiënt is meerdere dwarsprofielen per watergang te bemonsteren, maar niet meerdere punten per dwarsprofiel.

Bemonstering van meerdere punten in eenzelfde dwarsprofiel levert blijkbaar te weinig extra informatie op. Afbeelding 3 geeft de voorspelde standaardafwijking weer van het geschatte volumeprobleem bagger als functie van het budget. Deze afbeelding kan gebruikt worden om een budget te kiezen dat naar verwachting een voldoende nauwkeurig resultaat oplevert.

### Onzekerheidsanalyse

Voor het voorspellen van de steekproefvariantie en de kosten is voorkennis nodig. Voorkennis over de kosten kan ontleend worden aan eerder uitgevoerde, soortgelijke projecten. Voorkennis over de ruimtelijke variatie kan in het ideale geval ontleend worden aan het gebied zelf, maar vaak zullen gegevens uit andere, soortgelijke gebieden moeten worden gebruikt. In alle gevallen is men in meer of mindere mate onzeker over de

Optimale aantallen watergangen ( $n$ ), dwarsprofielen per watergang ( $m$ ) en punten per dwarsprofiel ( $k$ ).

Budget (in gulden)	oostelijk Flevoland			zuidelijk Flevoland		
	$n$	$m$	$k$	$n$	$m$	$k$
10.000	5	8	1	4	6	1
20.000	10	9	1	7	7	1
30.000	16	8	1	10	8	1
40.000	21	8	1	13	9	1
50.000	26	8	1	17	9	1
60.000	30	9	1	21	8	1
70.000	37	8	1	25	8	1
80.000	43	8	1	28	8	1
90.000	48	8	1	32	8	1
100.000	54	8	1	35	8	1



parameterwaarden in de modellen. Daarom is het aan te bevelen na te gaan in hoeverre het optimalisatieresultaat gevoelig is voor wijzigingen in de parameterwaarden. Dit betekent dat de parameterwaarden gewijzigd worden in een mate die de onzekerheid over de parameters weerspiegelt, en vervolgens het optimale plan berekend wordt voor de gewijzigde parameters. Wanneer steeds hetzelfde resultaat wordt gevonden hoeven we ons verder geen zorgen te maken. Wanneer de optimale oplossing sterk verschilt, is het verstandig eerst een vooronderzoek te doen naar de meest cruciale parameters.

In het geval van de Fleverwaard bleek dat de optimale aantallen dwarsprofielen binnen een watergang en optimale aantallen punten binnen een dwarsprofiel ongevoelig waren voor veranderingen in de parameters van het variogram en het kostenmodel.

### Conclusies en discussie

Door voorafgaand aan het veldwerk met modellen de nauwkeurigheid (steekproefvariantie) en de kosten te voorspellen, kan voorkomen worden dat te veel of juist te weinig waterbodemmonsters genomen

worden. Ook biedt deze modelmatige aanpak de mogelijkheid het bemonsteringsplan te optimaliseren. Een goed GIS-bestand van de watergangen is voor deze aanpak nodig.

Het optimalisatieresultaat van de Fleverwaard mag niet zonder meer van toepassing verklaard worden op andere gebieden, omdat deze gebieden bijvoorbeeld een andere ruimtelijke structuur kunnen vertonen. Per geval zal het variogram en het kostenmodel zo goed mogelijk geschat moeten worden om vervolgens met behulp van deze modellen de optimale aantallen steekproefeenheden te berekenen. Het optimalisatieresultaat wordt verder ook bepaald door de geometrie van het stelsel van watergangen, die van geval tot geval verschilt.

Tot slot is het optimalisatieresultaat ook afhankelijk van het al dan niet mengen van de monsters. Voor de Fleverwaard bleek dat, wanneer de puntmonsters niet worden gemengd, maar afzonderlijk worden geanalyseerd, het optimale aantal dwarsprofielen per watergang één is, evenals het aantal punten per dwarsprofiel.

Het aandeel van de veldwerkkosten in de totale kosten is bij niet mengen klein, en dienvolgende levert clusteren van punten in een

beperkt aantal watergangen nauwelijks kostenbesparing op terwijl wel minder informatie wordt verkregen.

De methode is ook geschikt voor situaties waarin het doel is het schatten van het volume in een aantal deelgebieden. Het aantal deelgebieden moet wel in verhouding zijn met het budget en/of het aantal monsters dat met dit budget kan worden genomen. Ruwweg kan gesteld worden dat het aantal deelgebieden niet groter mag zijn dan het totaal aantal steekproefpunten gedeeld door tien. .

---

### LITERATUUR

- Brus D. en J. de Gruijter (1997). Random sampling or geostatistical modelling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with discussion). *Geoderma* 80, pag. 1-59.
- Brus D. en M. Jansen (1998). Gestructureerd ontwerpen van efficiënte plannen voor de inventarisatie van de bodemkwaliteit in watergangen geïllustreerd met de Fleverwaard. Rapport 587. DLO-Staring Centrum.
- Domburg P., J. de Gruijter en P. van Beek (1997). Designing efficient soil survey schemes with a knowledge-based system using dynamic programming. *Geoderma* 75, pag. 183-201