

- **Maak- en Meetnauwkeurigheden** bij de uitvoering van baggerwerken en steenbestortingen

**B I D O C**

(bibliotheek en documentatie)

Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044, 2600 GA DELFT
Tel. 015 - 2518 363/364

Deze publicatie is geschreven in opdracht van:

- Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam
- Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
- Vereniging van waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken (VBKO)

Als basis voor deze publicatie is gebruikt de rapportage 'Toleranties in RAW-bestekken bij grondverzet in den natte en steenbestortingen onder water' (25 maart 1999) van de CROW-werkgroep 'Maak- en meettoleranties in de waterbouw'. Deze werkgroep, ingesteld door en werkend in opdracht van de CROW-stuurgroep Bagger-, Kust- en Oeverwerken was als volgt samengesteld:

- H.J. Koolwaaij, RWS Oost Nederland/ stuurgroep BKO
- ing. J. Vlak, Aann.bedrijf HAM-VOW bv/ stuurgroep BKO
- P. van der Aa, Aann.bedrijf Van Oord-ACZ bv
- mw. ing. M. Hoogvliet, Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam
- A.C. Noordijk, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
- ing. E. Roos, Aann.bedrijf v.d.Herik bv
- ing. D.P. de Wilde, Bouwdienst Rijkswaterstaat

Tekst, tekeningen en wetenschappelijke redactie:

ir. M. Hauer

met begeleiding van:

- ing. H.L. Sijberden, Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam/stuurgroep BKO
- A. Struijk, Voorzitter stuurgroep BKO
- Ir. H.J.M. Bijnsdorp, VBKO

Foto's:

- VBKO
- Project Dokproeven

Vormgeving en druk:

- Europoint Creatie

Distributie: VBKO, Leidschendam,
info@vbko.nl

© 2000, Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam, Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam en Vereniging van waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken VBKO.

- **Maak- en Meetnauwkeurigheden** bij de uitvoering van baggerwerken en steenbestortingen

. 9 JUL 2001



Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau
Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam
Vereniging van waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken

juli 2000

Inhoudsopgave

1.	Onderwerp, doel en opbouw van dit rapport	05
2.	Het maken	07
2.1	Inleiding	07
2.2	Maaknauwkeurigheden bij natte ontgravingen	11
2.3	Maaknauwkeurigheden bij het maken van bestortingen	13
3.	Het meten	16
3.1	Inleiding	16
3.2	Meetnauwkeurigheden bij de controle van natte ontgravingen	20
3.3	Meetnauwkeurigheden bij de controle van bestortingen	24
4.	Mogelijke gevolgen van onnauwkeurigheden bij maken en meten	34
4.1	Functioneel falen van constructies	34
4.2	Contractuele risico's voor aannemers en opdrachtgevers	36
5.	Samenvatting	41
	Begrippen, definities en afkortingen	43
	Literatuuropgave	45
	Selectie-tabel voor meetsystemen Havendienst Gemeente Rotterdam	47

1. Onderwerp, doel en opbouw van dit rapport

In Nederland worden binnen de sector bagger-, kust- en oeverwerken op tal van plaatsen werken uitgevoerd waarbij baggerwerk en steenbestortingswerk een belangrijke plaats inneemt. Aan de nauwkeurigheid waarmee deze werken dienen te worden uitgevoerd worden in uitvoeringsbestekken eisen gesteld, welke veelal voortvloeien uit overwegingen ten aanzien van onder andere de functie die het gerealiseerde werk zal moeten vervullen (bijvoorbeeld het voorkomen van te weinig laagdikte) en de beperkingen die wegens andere belangen aan dit werk moeten worden opgelegd (de hoogste toppen van een bodembescherming mogen bijvoorbeeld geen hinder voor eventueel scheepvaartverkeer opleveren). Daarbij is ook sprake van praktische grenzen aan de maximaal bereikbare nauwkeurigheid. Het is in de praktijk onmogelijk om het oppervlak van een bagger- of bestortingswerk helemaal vlak op te leveren, nog afgezien van de kost-

prijs. Er is op dit gebied dus sprake van een zekere spanning tussen de eisen die uit het ontwerp voortvloeien, de eisen waaraan een uitvoerder zelfs met maximale inspanningen zou kunnen voldoen en de economische aspecten. Daar komt nog bij dat men in de praktijk bij het opmeten van het gerealiseerde werk ook te maken krijgt met al dan niet systematische meetfouten, waarvan de aard en omvang voor alle betrokken partijen aanleiding voor felle discussie kunnen zijn. Een bestekschrijver zal van dit alles goed op de hoogte moeten zijn om vervelende botsingen tussen opdrachtgevers en aannemers van dergelijke werken te kunnen voorkomen. Daarnaast is het van belang dat de opdrachtgevers en aannemers zelf ook het nodige inzicht in deze materie hebben. In het verleden zijn bij de uitvoering van bagger- en bestortingswerken in de contractuele sfeer geregeld problemen ontstaan als gevolg van onrealistische eisen in bestekken. Deze

problemen had men wellicht kunnen voorkomen wanneer alle betrokken partijen destijds meer inzicht in het gehele proces van maken en meten hadden gehad.

Naar aanleiding van deze kwesties is door de stuurgroep Bagger-, Kust- en Oeverwerken van het Centrum voor Regelgeving en Onderhoud in de Grond-, Weg- en Waterbouw een werkgroep opgericht om deze problematiek in kaart te brengen. Deze werkgroep heeft zijn bevindingen vastgelegd in een technisch rapport (lit. [18]). Dit rapport is echter weinig toegankelijk voor opdrachtgevers, aannemers en bestekschrijvers die nog niet zo goed thuis zijn in deze materie. Daarnaast zijn sinds het verschijnen van dit rapport nog nieuwe, aanvullende gegevens boven water gekomen. Daarom is besloten naast het genoemde technisch rapport ook een populair wetenschappelijke versie daarvan te schrijven, waarin ook de nieuwste gegevens zijn verwerkt. De laatstgenoemde versie is weergegeven in dit boekje, dat vooral bedoeld is als informatie voor de opdrachtgevers, aannemers en bestekschrijvers die geregeld met deze kwesties te maken hebben.

In hoofdstuk 2 wordt eerst het begrip maaknauwkeurigheid toegelicht. Dit betreft een zowel kwalitatieve als kwantitatieve beschouwing van deze nauwkeurigheid, in relatie tot onder andere de verschillende bagger- en bestortingsmethoden. Hoofdstuk 3 betreft een gelijksoortige toelichting van het begrip meetnauwkeurigheid, in relatie tot onder meer de verschillende plaats- en waterdieptebepalingssystemen. De getalsmatige informatie in de hoofdstukken 2 en 3 moet worden opgevat als uitsluitend indicatieve informatie. Afwijkingen van de genoemde indicaties zijn in de praktijk zeker niet ondenkbaar.

Na de probleembeschrijvende hoofdstukken 2 en 3 wordt in hoofdstuk 4 nog aandacht besteed aan de mogelijke problemen die de onnauwkeurigheden bij het maken en meten kunnen opleveren voor het functioneren van de gerealiseerde constructies en de afhandeling van contracten tussen opdrachtgevers en aannemers. Voor veel betrokken partijen zal vooral het laatste onderdeel van belang zijn. Het rapport wordt vervolgens afgesloten met een samenvatting, begrippenlijst en literatuuropgave. Als bijlage is een selectie-tabel toegevoegd, die onder andere door het Gemeentelijk Havenbedrijf van de Gemeente Rotterdam wordt gebruikt bij de selectie van meetsystemen naar meetgebied en aard van de meting.

2. Het maken

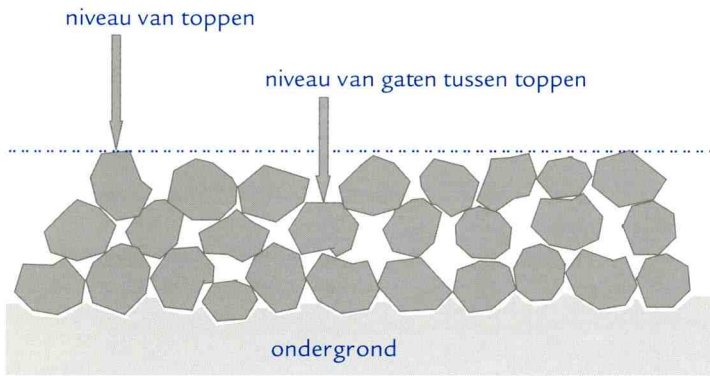
2.1 Inleiding

De maaknauwkeurigheid kan worden gedefinieerd als de mate waarin een gerealiseerd werk overeenstemt met het tijdens de uitvoering voor dit werk nagestreefde ontwerp. Voor het geval van baggeren bestortingswerken komt dit vooral neer op de mate waarin het oppervlak van een gebaggerde bodem of oever of een bestorting de gewenste vlakheid benadert. Veel bestekseisen hebben betrekking op dit onderdeel. Soms worden ook eisen gesteld aan de nauwkeurigheid waarmee andere begrenzingen worden benaderd (bijv. de ligging van de randen van een stortveld). Dit betreft echter een minderheid van alle gevallen, waarbij in de contractuele sfeer in het algemeen ook weinig problemen ontstaan. Veruit de meeste problemen hebben in de praktijk betrekking op de uitvoering en controle van de vlakheid van

baggerwerken en de laagdikte en vlakheid van bestortingen. Daarom wordt in dit rapport alleen aandacht besteed aan deze onderdelen.

Een gebaggerde of bestorte bodem of oever zal nooit volkomen vlak kunnen worden opgeleverd. Als gevolg van diverse factoren en omstandigheden zal een gebaggerd profiel of een bovenzijde van een bestorting na de uitvoering eerder ruw dan vlak zijn, met kleine en grote kuilen en heuvels, uitstekende stenen en wellicht zelfs lokaal gaten in een bodembekleding. Bij de beschouwing van deze ruwheden zijn twee aspecten van belang:

- de "natuurlijke" ruwheid van het bodem- of stortmateriaal
- de "toegevoegde" ruwheid als gevolg van ongelijkmatig wegbaggeren of ongelijkmatig verdelen van bestortingsmateriaal



Figuur 1: Natuurlijke ruwheid bij een relatief vlakke bekleding.

De natuurlijke ruwheid is altijd aanwezig, zelfs bij een volkomen vlakke bodem of oever. Volkomen vlakheid wordt hierbij gedefinieerd als de situatie waarbij de toppen van de bodemdeeltjes allemaal in hetzelfde vlak liggen. Het werkelijk bodemoppervlak bestaat daarbij echter nog altijd uit toppen van bodemdeeltjes die uitsteken boven gaten tussen die deeltjes. Als voorbeeld wordt een vlakke bodem beschouwd (figuur 1).

De horizontale lengteschaal van de natuurlijke ruwheid is qua orde van grootte gelijk aan de diameter van de bodemdeeltjes. Bij zandbodems en andere fijnkorrelige bodems is deze schaal dusdanig klein dat de natuurlijke ruwheid geen rol van betekenis speelt bij het opmeten van dergelijke bodems. Bij het controleren van de kwaliteit van bestortingen kan deze ruwheid de metingen echter wel beïnvloeden. Het gaat daarbij om de verhouding tussen de steendiameter van het materiaal in de bestorting en de diameter van het bij een meting beschouwde bodemoppervlak. Wanneer de steendiameter dezelfde orde van grootte heeft als de diameter van het opgemeten bodemoppervlak, dan kunnen de meetwaarden ook de natuurlijke ruwheid van het stortmateriaal gaan weerspiegelen.

De natuurlijke ruwheid is ook van belang bij de definitie van het niveau van een bodemoppervlak. Dit speelt vooral bij bestortingen. Het gaat daarbij om de vraag welk horizontaal niveau als de werkelijke bovenkant van een bestorting moet worden opgevat. Soms

kiest men hiervoor het niveau van de toppen van de stenen. Het is vanuit praktisch oogpunt echter vaak handiger om uit te gaan van een definitie die is gebaseerd op het omrekenen van de per eenheid van oppervlakte gestorte massa steen in een gemiddeld aanwezige laagdikte. Bij de controle van bestortingen wordt deze benadering veel toegepast. De gemiddeld aanwezige laagdikte wordt daarbij als volgt berekend:

$$d_t = \frac{G_s}{\rho_s * A * (1 - n)}$$

waarin:

d_t = gemiddeld aanwezige laagdikte

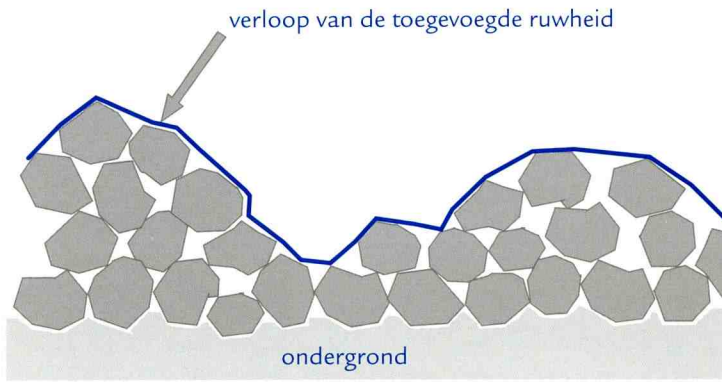
G_s = massa van het in een stortvak gestorte materiaal

A = oppervlakte van het beschouwde stortvak

ρ_s = dichtheid van het gestorte materiaal

n = gemiddelde porositeit van het gestorte materiaal

De gedachtegang achter deze formule is simpel. De massa G_s correspondeert met een volume G_s/ρ_s , welk volume gelijk moet zijn aan het volume $(1-n)*A*d_t$ van de vaste stof in een vak met inhoud $A*d_t$. De porositeit n heeft daarbij betrekking op de gemiddelde porositeit van het op de bodem gestorte materiaal. In de praktijk moet deze porositeit doorgaans worden geschat. De betrouwbaarheid van de met behulp van formule (1) berekende laagdikte kan worden beïnvloed door fouten in deze schatting.



Figuur 2: Toegevoegde ruwheid als gevolg van maakonauwkeurigheden

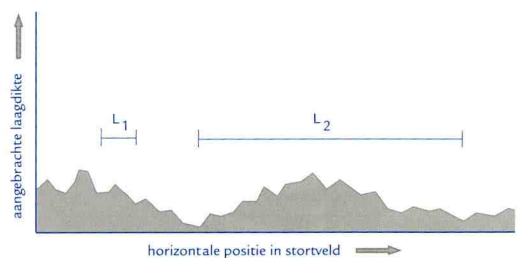
Het niveau van het met formule (1) corresponderende referentievlak voor de ligging van de bovenzijde van een bestorting wordt berekend door de met behulp van formule (1) berekende gemiddelde laagdikte op te tellen bij het (bekende) bodemniveau van de onder de bestorting liggende bodem. Hoewel het moeilijk is om het verschil tussen beide niveau's exact aan te geven, kan wel worden gesteld dat het niveau van het genoemde referentievlak in het algemeen iets onder het niveau van de toppen van de stenen ligt (lit. [19]). Dit verschil in niveau kan resulteren in systematische fouten bij de interpretatie van metingen. In paragraaf 3.1 zal dieper op deze kwestie worden ingegaan.

De *toegevoegde ruwheid* ontstaat als gevolg van onnauwkeurigheden bij de uitvoering van bagger- of stortingswerk (figuur 2). Deze onnauwkeurigheden hangen samen met onder andere het type van het gebruikte stort- of baggermateriaal, de nauwkeurigheid van het voor de scheepsbewegingen gebruikte plaatsbepalingssysteem, de uitvoeringsstrategie (bijvoorbeeld storten in één laag of dakpansgewijs storten in meerdere lagen), de uitvoeringsomstandigheden (bijvoorbeeld stroming, golven bij

baggeren/storten onder water) en de vaardigheid van het bagger- of stortpersoneel. Het is in feite deze ruwheid waar men in bestekken eisen aan wil stellen. Van deze ruwheid is de lengteschaal in het algemeen (veel) groter dan de diameter van de bodemdeeltjes of stenen.

Afhankelijk van het verloop van het bagger- of stortproces kunnen meerdere lengteschalen optreden. Bij storten onder water met een schuifstorter kunnen bijvoorbeeld zowel fluctuaties met een relatief grote lengteschaal als fluctuaties met een relatief kleine lengteschaal voorkomen (lit. [19]). Het mogelijk resultaat van een dergelijk stortproces is schetsmatig aangegeven in onderstaande figuur:

De fluctuaties met de kleine lengteschaal L_1 houden verband met toevallige fluctuaties in horizontale positie tijdens het vallen van de stenen onder water. Onder water valt een steen nooit recht omlaag. Als gevolg van turbulente stromingsverschijnselen rond een steen gaat de baan van een steen onder water ook toevallige uitwijkingen naar opzij vertonen (lit. [28]).



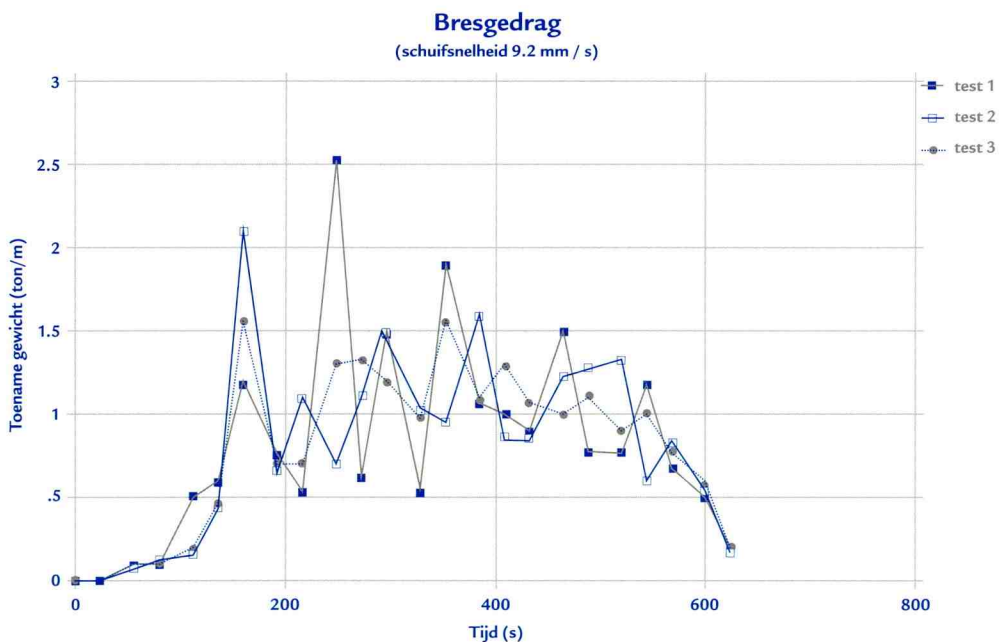
Figuur 3: Voorbeeld van een stortresultaat van een zijstorter

De fluctuaties met de grote lengteschaal L_2 ontstaan als gevolg van het bresgedrag van de schuifstorter. Met bresgedrag wordt daarbij bedoeld op het verloop van de massastroom van het schip tijdens het storten. Dit verloop is meestal niet regelmatig. Een voorbeeld van het bresgedrag van een schuifstorter is weergegeven in figuur 4. Deze figuur is ontleend aan meetresultaten van modelproeven met een schuifstorter (lit. [26]). In deze figuur is weergegeven hoe groot telkens de toename van de totaal gestorte massa per tijdsinterval was. Deze massastroom per tijdsinterval is uitgezet tegen de tijdsduur van het gehele stortproces. Uit de figuur blijkt dat er sprake is van een aanloofase, een min of meer stationaire middenfase en een afloofase. Tijdens de aanloofase moet de gemiddelde massastroom eerst goed op gang komen. Tijdens de afloofase neemt de gemiddelde massastroom weer af tot nul. Gedurende de min of meer stationaire middenfase van het stortproces (150 sec <

tijd < 550 sec in figuur 4) is weliswaar sprake van een constante gemiddelde massastroom, maar daarbij kan ook sprake zijn van grote fluctuaties in de per tijdseenheid gestorte hoeveelheid steen. Afwijkingen van 50 tot 100 procent van de gemiddelde massastroom behoren zeker tot de mogelijkheden. In het meetverslag (lit. [26]) wordt daarbij nog opgemerkt dat deze grote fluctuaties niet alleen verspreid over de tijd maar ook verspreid over de breedte van het gehele laaddek optreden.

De fluctuaties in de massastroom zijn bij een schuifstorter het gevolg van het afschuifgedrag van het materiaal op het laaddek. Dit afschuifgedrag kenmerkt zich door verspreid over de tijd voorkomende momenten met locale afschuivingen van materiaal (waarbij ineens een flinke berg materiaal overboord kan gaan) en tussen deze momenten in gelegen perioden waarin maar weinig materiaal het laaddek verlaat en het materiaal op het laaddek door de beweging van de schuif eerst weer moet worden omhoog gedrukt, net zolang totdat ergens aan het stortfront van de lading de kritische helling van het materiaal weer wordt over-

Figuur 4: Voorbeeld van het bresgedrag van een zijstorter Bron: Waterloopkundig Laboratorium Delft (lit. [26])



schreden en lokaal weer een afschuiving plaatsvindt. Het in figuur 4 geschetste bresgedrag komt tot stand als een optelsom van een groot aantal van dergelijke over de tijd en de breedte van het laaddek verspreid optredende afschuivingen. Andere typen stortschepen kunnen weer andere typen bresgedrag vertonen. De grootschalige fluctuaties in gereali-seerde laagdikte in figuur 3 corresponderen met de fluctuaties in de massastroom. Door een bestorting in meerdere stortgangen aan te brengen kan het effect van het bresgedrag ten dele worden uitgemiddeld (lit. [19] & [27]).

Bij andere inrichtingen van het stort-proces en bij baggerprocessen kunnen verschillende typen maak-onnauwkeurigheden eveneens aanleiding geven tot verschillende lengteschalen binnen de toegevoegde ruwheid. Voor een juiste statistische interpretatie van het bodemverloop is het van belang dat al deze lengteschalen bij het meten met voldoende nauwkeurigheid in kaart worden gebracht. In de meeste praktijk-situaties zal dit geen probleem opleveren.

In de nu volgende paragrafen zal wat dieper worden ingegaan op de verschil-lende typen maak-onnauwkeurigheden, die bij de uitvoering van bagger- en bestortingswer-ken kunnen optreden.

2.2 Maaknauwkeu-righeden bij natte ontgravingen

In Nederland wordt bij natte ontgravin-gen een groot aantal baggermethoden en technieken toegepast. Men kan op uiteen-lopende wijze onderscheid maken tussen de diverse baggersystemen. Zo is er verschil te maken tussen stationaire en al dan niet uit zichzelf varende baggerwerktuigen. Daarnaast kan men onderscheid maken tussen mechani-sche, hydraulische en mechanisch-hydrauli-sche baggersystemen. Veel gebruikte bagger-systemen zijn bijvoorbeeld de sleepzuiger (hopperzuiger/splijthopper), de cutterzuiger, de emmerbaggermolen, het kraanschip met grijper, de backhoe, het waterinjectiebagge-ren en ploegen (al dan niet in combinatie met jets). Daarnaast zijn er de profielzuigers, de snijkopzuigers, de schijfsnijkopzuigers en de wormwielzuigers.

Er zijn diverse aspecten van invloed op de keuze van het baggersysteem en op de daarmee samenhangende nauwkeurig-heid bij het baggeren. De belangrijkste daarvan worden weergegeven in het onderstaande rijtje:

- omgevingsfactoren zoals oevers en/of constructies op locatie en het antwoord op de vragen: "is er scheepvaart of liggen er afgemeerde schepen?"
- horizontale en verticale afmetingen van het werk (lengte, breedte, waterdiepte en laagdikte)
- de grondsoorten (aard, korrelgrootteverdeling, harde lagen, verontreinigingen)
- waterbewegingen zoals golven, deining en stromingen (in één of meerdere rich-tingen)
- afwisseling van zoet en zout water
- bereikbaarheid van de baggerlocatie voor het baggermateriaal

Behalve van de keuze voor het baggersysteem hangt de nauwkeurigheid van het baggeren ook af van de kwaliteit van de survey en navigatie, de ervaring van het personeel en de kwaliteit van de procesbewaking. Men kan de in totaal behaalde nauwkeurigheid opgebouwd denken uit de volgende drie typen nauwkeurigheid:

- referentienauwkeurigheid
- stuur nauwkeurigheid
- ontgravingsmond nauwkeurigheid

De referentienauwkeurigheid heeft betrekking op fouten in de bepaling van de plaats van het schip ten opzichte van een vaste referentie. Met betrekking tot dit type nauwkeurigheid is vooral de keuze van het plaatsbepalingssysteem (GPS, dGPS, of RTK) van belang. Tabel 4 in paragraaf 3.2 bevat hieromtrent de nodige informatie. De stuur nauwkeurigheid heeft betrekking op de

invloed van navigatiefouten tijdens het baggeren. De kundigheid van het varende personeel speelt hierbij een belangrijke rol. De ontgravingsmond-nauwkeurigheid heeft betrekking op het type van het gekozen baggersysteem. Van belang is bijvoorbeeld de vorm en regelbaarheid van de zuigmond. Uit de resultaten van baggerproeven in het Ketelmeer (lit. [9]) kon worden geconcludeerd dat de onnauwkeurigheden groter werden in de volgorde referentie-onnauwkeurigheden → ontgravingsmondonnauwkeurigheden → totale maakonnauwkeurigheden. De stuur nauwkeurigheid speelde bij deze proeven geen grote rol.

Tabel 1: Praktisch haalbare verticale nauwkeurigheden in [m] van divers baggermateriaal bij uiteenlopende bodemsoorten en uitvoeringsomstandigheden. Bron: CROW-werkgroep Maak- en meettoleranties in de waterbouw (lit. [18])

bodem soort	baggermateriael															
	sleepzuiger		snijkopzuiger (cutterzuiger)				milieuzuiger		hydr. kraan (backhoe)		kraanschip/ kraanponton		baggermolen		ploeg (gesteund)	
	bulk	max	bulk	max	bulk	max	bulk	max	bulk	max	bulk	max	bulk	max		
slib	0,4	0,3	0,4	0,25	0,2	0,1	0,4	0,2	0,45	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2		
zand	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0,1	0,5	0,25	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2		
grind	0,5	0,4	0,4	0,3	nvt	nvt	0,5	0,25	0,5	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2		
klei	0,6	0,5	0,4	0,3	nvt	nvt	0,5	0,35	0,6	0,5	0,3	0,2	0,3	0,2		
rots	nvt	nvt	0,5	0,4	nvt	nvt	0,6	0,4	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt	nvt		
bijtelling in verband met specifieke uitvoeringsomstandigheden:																
onbeschut water	0,1	0,1	0,1	0,1	nvt	nvt	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2		
stroming 0,5 - 1,0 m/s	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1		
waterdiepte 10 - 20 m	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05	0,05		

Toelichting en opmerkingen:

- De gegeven waarden zijn 95 % betrouwbaarheidswaarden, waarbij een eenzijdige overschrijdskans van 2,5 % geldt. De toleranties zijn uitgedrukt in meters en gelden zowel positief als negatief (bijv.: 0,10 = +/- 0,10 meter);
- Bovenstaande waarden zijn indicatieve grootheden en zijn ondermeer afhankelijk van uitrusting aan boord;
- De waarden zijn de som van de onnauwkeurigheden bij maken en meten, welke onnauwkeurigheden bij meten een orde kleiner zijn dan bij maken;
- "bulk" staat voor bulkproducties, waarbij een hogere prioriteit wordt toegekend aan productieniveau dan aan nauwkeurigheid;
- "max" staat voor maximale inspanning, waarbij een hogere prioriteit wordt toegekend aan nauwkeurigheid en productie wordt ingeleverd ten behoeve van deze nauwkeurigheid;
- Maximale inspanning is een relatief begrip. Het is altijd mogelijk om met behulp van nog meer inspanning een nog beter resultaat te behalen.

Hieruit kan echter niet worden geconcludeerd dat dit altijd het geval zal zijn. Bij een minder vaardige bemanning kan de stuur nauwkeurigheid ook een rol van betekenis spelen.

Een indruk van haalbare baggernauwkeurigheden wordt gegeven in tabel 1. In deze tabel worden basisnauwkeurigheden aangegeven voor verschillend baggermaterieel bij uiteenlopende bodemsamenstelling. Hierbij dient nog een toeslag te worden opgeteld afhankelijk van specifieke lokatieomstandigheden. Deze toeslagen zijn ook in de tabel vermeld. De diverse waarden zijn gebaseerd op praktijkervaringen tijdens diverse projecten.

Er zij met nadruk vermeld dat deze waarden de combinatie van zowel maak- als meetnauwkeurigheden weerspiegelen. Deze twee typen nauwkeurigheden zijn in de praktijk nauwelijks van elkaar te onderscheiden. Men controleert de maaknauwkeurigheid immers door deze op te meten. De waarden gelden voor een gemiddelde situatie: afhankelijk van onder andere de kwaliteit van het personeel en het in een specifieke situatie beschikbare referentiesysteem zijn afwijkingen van deze waarden zeker niet ondenkbaar. In het algemeen kan gezegd worden dat mechanische schuif- en scheptechnieken (o.a. grijpers) onder water vrij onnauwkeurig werken. Met aanvullende maatregelen valt hier echter nog wel iets aan te verbeteren (o.a. door het gebruik van milieuvriendelijke horizontaal sluitende grijpers, lit. [25]). Vrij nauwkeurig werkt de emmerbaggermolen, waarbij een nadeel kan zijn dat eventueel slib in suspensie kan komen.

2.3 Maaknauwkeurigheden bij het maken van bestortingen

Het aanbrengen van steenbestortingen (onder en boven water) kan op verschillende manieren plaats vinden. Onderscheid kan worden gemaakt in de wijze van uitvoering en de aard van het toe te passen materieel. Er kan gewerkt worden vanaf het land met rijdend materieel en vanaf het water met varend materieel. Bij rijdend materieel kan onder andere worden gedacht aan dumpers, trucks, loaders, mobiele kranen, draglines, shovels en bulldozers. Ten aanzien van het varend materieel kan onder meer worden gedacht aan onderlossers, splijtbakken, mechanisch doserende steenstorters (schuif-, ketting- en trilstorters), kraanschepen, mobiele kranen op pontons en pontons met bulldozers. Steenstorters kunnen, afhankelijk van het type, eenzijdig en/of tweezijdig storten of kunnen zijn uitgerust met een stortpijp.

De maaknauwkeurigheid van een steenbestorting hangt af van onder andere:

- de keuze voor de wijze van aanbrengen (vanaf land of vanaf water aanbrengen, boven of onder water aanbrengen)
- het type van het gebruikte materieel
- afmeting en breedte van de steensortering
- vorm van de stenen
- de omgevingscondities (bijvoorbeeld waterdiepte, golven en stroming bij onder water aanbrengen)
- de ervaring en vaardigheid van het personeel

In CUR-rapport 169 (lit. [12]) wordt nadere informatie gegeven over maaknauwkeurigheden van steenbestortingen. Bij het plaatsen/storten van steen met varend materieel loopt de maaknauwkeurigheid terug vergeleken bij het aanbrengen vanaf het land. De haalbare nauwkeurigheden worden in dit geval vooral bepaald door zaken als:

- manoeuvreerbaarheid van de storter
- beheersbaarheid van het stortproces (bresgedrag storter, regelbaarheid schuif-snelheid, etc.)
- nauwkeurigheid van het plaatsbepalings-systeem (GPS, dGPS of RTK, zie tabel 4 in paragraaf 3.2)
- de mogelijkheden om voor externe omgevingsinvloeden zoals golven, stroomsnelheid en waterdiepte te corrigeren
- het stortplan (grootte van overlap bij

randen van aansluitende stortvelden, aanbrengen in één of meerdere stortgangen, etc.)

- het al dan niet nabehandelen van het stortresultaat (bijvoorbeeld vlakken met vlakbalk)

Bij het gebruik van een steenstorter (schuif-, ketting- of trilstorter) of van een kraan op een ponton, waarbij er sprake is van een beheerst stortproces, kunnen in de praktijk voor bestortingen van filter- en toplagen onder water de in tabel 2

Tabel 2: Praktisch haalbare verticale nauwkeurigheden in [m] van steenbestortingen voor diverse sorteringen en verschillende wijzes van aanbrengen Bron: CROW-werkgroep Maak- en meettoleranties in de waterbouw (lit. [18])

standaard breuksteensorteringen volgens NEN 5180		wijze van aanbrengen van de bestorting:					
		vanaf land (kraan)				vanaf water (steenstorter/kraan)	
		boven water		onder water		onder water	
		individueel	bulk	individueel	bulk	individueel	bulk
fijne sorteringen	30/60 mm						
	40/100 mm	nvt	0,10		0,15		0,20
	50/150 mm			nvt		nvt	
	80/200 mm						
lichte sorteringen	5-40 kg	0,4*D _{n50}	0,6*D _{n50}		0,8*D _{n50}		1,0*D _{n50}
	10-60 kg	0,4*D _{n50}	0,6*D _{n50}		0,8*D _{n50}		1,0*D _{n50}
	40-200 kg	0,4*D _{n50}	0,6*D _{n50}		0,8*D _{n50}		1,0*D _{n50}
	60-300 kg	0,4*D _{n50}	0,6*D _{n50}	0,6*D _{n50}	0,8*D _{n50}	0,8*D _{n50}	1,0*D _{n50}
zware sorteringen	300-1000 kg	0,5*D _{n50}	0,6*D _{n50}	0,6*D _{n50}	0,8*D _{n50}	0,8*D _{n50}	1,0*D _{n50}
	1-3 t	0,5*D _{n50}		0,6*D _{n50}		0,8*D _{n50}	
	3-6 t	0,5*D _{n50}	nvt	0,6*D _{n50}	nvt	0,8*D _{n50}	nvt
	6-10 t	0,5*D _{n50}		0,6*D _{n50}		0,8*D _{n50}	

Toelichting en opmerkingen:

- De gegeven waarden zijn 95 % betrouwbaarheidswaarden, waarbij een eenzijdige overschrijdingskans van 2,5 % geldt. De toleranties zijn uitgedrukt in meters en gelden zowel positief als negatief (bijv.: 0,10 = +/- 0,10 meter);
- Bovenstaande waarden zijn indicatief en ondermeer afhankelijk van de kwaliteit van het materieel en de omstandigheden (bijv.: storten op stroom op steil talud);
- De waarden zijn de som van de onnauwkeurigheden bij maken en meten;
- onder "individueel" wordt verstaan: afwerken voor lichte sorteringen en individueel plaatsen voor zware sorteringen;
- Indien blijkt dat de "...*D_{n50}" waarde kleiner is dan de waarde voor fijne sorteringen dient de waarde voor fijne sorteringen te worden aangehouden;
- De voor fijne sorteringen gegeven waarden gelden ook voor grind, slakken, mijnsteen e.d..

genoemde verticale nauwkeurigheden behaald worden. In deze tabel zijn ook indicaties opgenomen voor de verticale maaknauwkeurigheden bij de situaties waarin bestortingen vanaf land worden aangebracht. Er zij met nadruk vermeld dat al deze waarden de combinatie van zowel maak- als meetnauwkeurigheden weerspiegelen. Met name bij bestortingen van lichte en zware sorteringen kunnen de meetnauwkeurigheden aanzienlijk zijn. De waarden gelden voor een gemiddelde situatie: afhankelijk van de kwaliteit van het stortpersoneel, het stortplan en specifieke uitvoeringsomstandigheden zijn afwijkingen van deze waarden zeker niet ondenkbaar.

In tabel 3 zijn bij wijze van voorbeeld de verticale nauwkeurigheden aangegeven voor breuksteen met een dichtheid van 2650 kg/m³. Tot "breuksteen" behoort steenachtig materiaal met een nominale bovengrens groter dan 32 mm (NEN 5180). Fijner materiaal wordt "steenslag" genoemd, zolang de nominale bovengrens groter dan 2 mm blijft. Nog fijner materiaal wordt als "zand" aangemerkt. In NEN 5180 wordt voor de standaardsorteringen van breuksteen

onderscheid gemaakt in fijne, lichte en zware sorteringen, waarbij de fijne sorteringen, die zeeffaar zijn, worden onderscheiden naar afmeting (mm). De lichte en zware sorteringen worden daarentegen onderscheiden naar massa (kg). In tabel 3 zijn de maaknauwkeurigheden voor de lichte en zware sorteringen ook uitgedrukt in een absolute waarde (m). De nominale steendiameter D_{n50} is daartoe uit de M_{50} en de dichtheid van het gesteente berekend met de volgende formule:

$$D_{n50} = (M_{50} / \rho_{\text{steen}})^{1/3}$$

Binnen deze context is de M_{50} gelijk aan de steenmassa die door 50 procent van de massa van een monster uit de betreffende sortering wordt overschreden. Op voorwaarde dat een sortering niet te breed is representeert de nominale steendiameter de volledige korrel- of massaverdeling. De standaardsorteringen volgens NEN 5180 voldoen aan deze voorwaarde.

Tabel 3: Uitwerking tabel 2 voor breuksteen met een dichtheid $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$

standaard breuksteensorteringen volgens NEN 5180			wijze van aanbrengen van de bestorting:					
			vanaf land (kraan)				vanaf water (steenstortor/kraan)	
sortering	D_{n50} [m]	M_{50} [kg]	boven water		onder water		onder water	
			individueel	bulk	individueel	bulk	individueel	bulk
30/60 mm	0,05							
40/100 mm	0,07		nvt	0,10		0,15		0,20
50/150 mm	0,09							
80/200 mm	0,13				nvt		nvt	
5-40 kg	0,19	19,5	0,10	0,11		0,15		0,20
10-60 kg	0,24	35,8	0,10	0,14		0,19		0,24
40-200 kg	0,35	115	0,14	0,21		0,28		0,35
60-300 kg	0,41	184	0,16	0,25	0,25	0,33	0,33	0,41
300-1000 kg	0,63	677	0,31	0,38	0,38	0,50	0,50	0,63
1-3 t	0,91	1995	0,45		0,55		0,73	
3-6 t	1,19	4500	0,60	nvt	0,71	nvt	0,95	nvt
6-10 t	1,45	8000	0,72		0,87		1,16	

3. Het meten

3.1 Inleiding

De meetnauwkeurigheid kan worden gedefinieerd als de mate waarin een verzameling meetwaarden een opgemeten situatie werkelijk goed weergeeft. Bij de controle van bagger- en bestortingswerken gaat dit vooral om de mate waarin de meetwaarden het verloop van het niveau van de bovenkant van de bodem of bestorting goed weergeven. Bij bestortingen speelt daarnaast ook de nauwkeurigheid van de schatting voor de laagdikte een rol. De gemiddeld gerealiseerde laagdikte wordt bij de controle van bestortingen doorgaans bepaald als het verschil tussen de meting van het gemiddeld bodemniveau ná het aanbrengen van de bestorting en de meting van het gemiddeld bodemniveau vóór het aanbrengen van de bestorting. Beide metingen kunnen fouten bevatten. Er kan in algemene zin onderscheid

worden gemaakt tussen twee typen fouten:

- systematische fouten
- toevallige fouten

Een *systematische meetfout* zal tot gevolg hebben dat de gemiddelde meetwaarde van een niveau of laagdikte over alle metingen gezien afwijkt van de werkelijk op de bodem gerealiseerde gemiddelde waarde. *Toevallige meetfouten* zullen tot gevolg hebben dat de afzonderlijke metingen het werkelijk niveau of de werkelijke laagdikte de ene keer te hoog en de andere keer te laag schatten, waarbij het gemiddeld gemeten niveau of de gemiddelde gemeten laagdikte over alle metingen gezien wel overeenstemt met de werkelijkheid. De systematische en toevallige fouten kunnen bij de controle van bagger- en bestortingswerken beide een rol van betekenis spelen. Systematische meetfouten kunnen ertoe leiden dat wel degelijk gerealiseerde niveau's of laagdiktes onterecht worden afge-

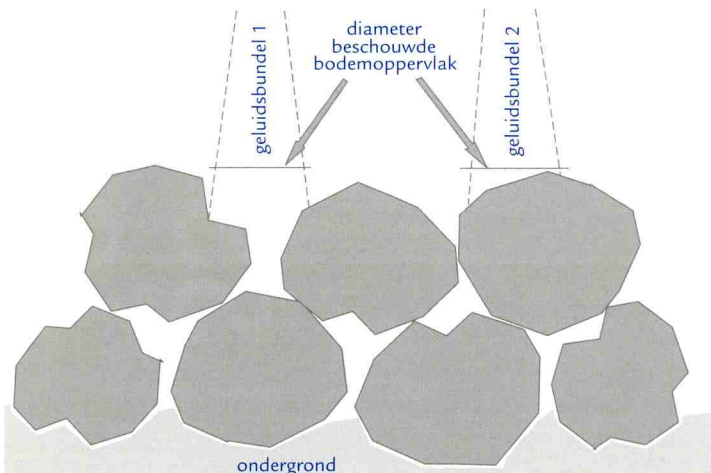
keurd. Grote toevallige meetfouten zullen resulteren in een grote standaardafwijking van de set meetwaarden, hetgeen kan leiden tot onterecht hoge inschattingen voor de maakonnauwkeurigheden. Aan zowel de gemiddelde waarde als de standaard-afwijking worden in bestekken eisen gesteld.

De mogelijke fouten houden vooral verband met de volgende aspecten:

- definitie van het niveau van de bovenzijde van de te meten bodem of bestorting in relatie tot het gemiddelde niveau dat door het meetsysteem wordt opgemeten
- onnauwkeurigheden van het meet-systeem
- invloed van zakking en verdichting van de ondergrond en indringing van stortmateriaal in de ondergrond op de uit metingen bepaalde laagdikte

Over de problematiek met betrekking tot de definitie van het *niveau van de bovenzijde* van een bodem of bestorting is reeds in paragraaf 2.1 het één en ander gezegd. Vooral bij de definitie van het gemiddeld niveau van de bovenzijde van bestortingen kunnen significante problemen

Figuur 5: Indringing signaal singlebeam beneden niveau van de toppen



optreden. Dit niveau wordt vaak gelijkgesteld aan het niveau van het referentievlak dat met behulp van gegevens over de gestorte massa steen hiervoor kan worden berekend (formule (1) in paragraaf 2.1). Het niveau van dit referentievlak ligt theoretisch gesproken iets (ca. 10 tot 15 % van de gemiddelde steendiameter van het stortmateriaal, lit. [19]) onder het niveau van de toppen van de stenen. Wanneer bij het meten gemiddeld gezien het niveau van de toppen van de stenen wordt opgemeten, dan zal dit resulteren in een systematische fout bij de vergelijking van dit niveau met het niveau van het genoemde referentievlak. Een fout in de voor de berekening van het referentievlak benodigde schatting voor de porositeit in het gerealiseerde werk zal leiden tot een soortgelijke systematische fout. Het is echter niet vanzelfsprekend dat bij het meten altijd het niveau van de toppen van de stenen wordt opgemeten. In geval de diameter van het bij een meting beschouwde bodemoppervlak niet veel groter is dan de gemiddelde steendiameter van het bodemmateriaal kan een meting ook een niveau *onder* het vlak door de toppen van de stenen opleveren. Deze "indringing" onder het niveau van de toppen van de stenen hangt ook samen met het type van het gebruikte meet-systeem. In figuur 5 is een voorbeeld geschetst van de mogelijke indringing van het meetsignaal van een singlebeam echolodings-systeem.

De oppervlakte van de geluidsbundel ter plaatse van het niveau van de toppen van de stenen is hierbij zodanig dat een geluidsbundel lokaal ook in gaten tussen de stenen terecht kan komen (geluidsbundel 1 in figuur 5). Het door beide geluidsbundels

gemiddeld gemeten niveau zal hierdoor onder het vlak door de toppen van de stenen komen te liggen. Bij andere meetsystemen kunnen soortgelijke indringingen optreden. In de komende paragrafen zal dieper op dit alles worden ingegaan. Bij de controle van fijnkorrelige bodems zullen deze problemen in het algemeen niet optreden. De indringing van het meetsignaal onder het niveau van de toppen van de bodemdeeltjes is hierbij doorgaans verwaarloosbaar klein.

Naast het per meting beschouwde bodemoppervlak is ook het aantal metingen per eenheid van oppervlak belangrijk. Men kan zodanig meten dat elk stukje bodem wordt opgemeten. Bij het meten met multibeam apparatuur is dit in principe goed mogelijk. Bij puntmetingen met een peilstang, metingen volgens de halve bol methode en single beam metingen is dit echter minder eenvoudig te realiseren. Men verkrijgt hierbij een raster van metingen, waarbij delen van de bodem tussen de rasterpunten niet worden opgemeten. Door de rasterpunten relatief dicht bij elkaar te kiezen kan desondanks ook met behulp van deze meetsystemen een min of meer volledig bodembedekkende meting worden verkregen.

Bij de uitvoering van relatief grote werken worden soms alleen enkele gedeeltes van een veel groter werk gecontroleerd. Het zal duidelijk zijn dat men bij deze aanpak kans loopt om slechte plekken in de overige gedeeltes van het werk over het hoofd te zien. De tijdwinst die deze aanpak oplevert gaat gepaard met risico's, die alleen verantwoord kunnen worden voor werken waaraan niet zulke hoge eisen ten aanzien van de nauwkeurigheid van uitvoering worden gesteld. Voor werken die aan hoge eisen moeten voldoen wordt dit ontraden.

Afgezien van de invloed van het per meting aangepelde bodemoppervlak en het aantal metingen per eenheid van

oppervlakte spelen bij het meten ook altijd onnauwkeurigheden mee die betrekking hebben op de *kwaliteit van het gebruikte meet-systeem*. Deze onnauwkeurigheden hangen samen met onder andere:

- fouten in de plaatsbepaling van meet-schepen
- fouten in de dieptemeting (bijvoorbeeld door een fout in de schatting voor de geluidssnelheid onder water bij de inzet van echolodingsystemen in waterlopen met gelaagd water (bijv. zoet water boven zout water, temperatuursvariëaties)
- slechte of onvolledige calibratie van het meet-systeem
- onnauwkeurigheden inherent aan het meet-systeem zelf, onder meer in relatie tot de aard van de bodem (relatief glad of relatief ruw, horizontaal of hellend)
- de vaardigheid van het meetpersoneel bij de interpretatie van de metingen.

Veel van deze fouten betreffen toevallige fouten, die geen invloed uitoefenen op de gemiddeld gemeten waarde van een niveau of een laagdikte. Deze fouten kunnen echter wel leiden tot een overschatting van de in werkelijkheid aanwezige maakonnauwkeurigheden. Bij de onnauwkeurigheden die inherent zijn aan het meet-systeem zelf kan wel sprake zijn van systematische fouten, bijvoorbeeld bij de reactie van multibeam apparatuur op relatief ruwe en/of hellende bodems. Om over dergelijke fouten ook in kwantitatief opzicht iets meer te kunnen zeggen zijn recentelijk proeven uitgevoerd in een dok, waarbij twee bestortingen met meerdere typen meetsystemen zijn opgemeten en de onderlinge resultaten zijn vergeleken (lit. [20]). In paragraaf 3.3 wordt hier nog op teruggekomen.

Bij de controle van bestortingswerken speelt ook nog een probleem van een geheel andere aard mee. Zoals reeds opgemerkt wordt de gemiddeld gerealiseerde laagdikte bij het meten doorgaans bepaald

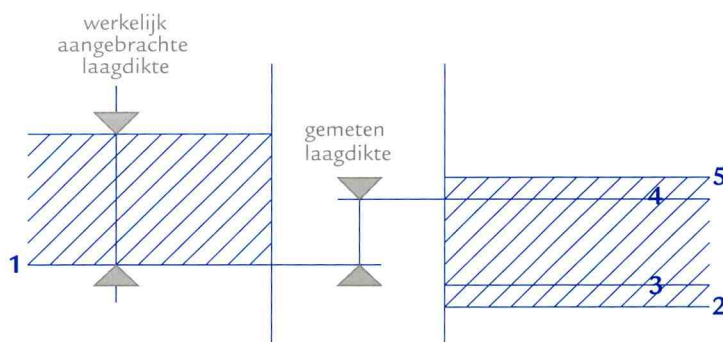
als het verschil tussen de meting van het bodemniveau na het aanbrengen van de bestorting en de meting van het bodemniveau voor het aanbrengen van de bestorting. Hierbij wordt geen rekening gehouden met de mogelijkheid dat het bodemniveau onder de bestorting als gevolg van het aanbrengen van de bestorting een wijziging kan hebben ondergaan. De analyse van een praktijkgeval (controle bestorting in Waalbocht bij St. Andries, lit. [19]) wees uit dat een dergelijke wijziging zeker niet ondenkbaar is en bij het beschouwde praktijkgeval waarschijnlijk zelfs een relatief grote invloed op de betrouwbaarheid van de schatting voor de laagdikte heeft uitgeoefend. De wijziging in het oorspronkelijk bodemniveau kon daarbij worden toegeschreven aan de som van de effecten van *zakking en verdichting van onderliggende lagen bodemmateriaal en indringing van de stenen van de bestorting in de onderliggende laag* (indringingen van 15 tot 25 % van de steendiameter van het bestortingsmateriaal lijken tot de mogelijkheden te behoren). Op dit gebied bestaan echter nog veel onzekerheden. Over veel van de genoemde fenomenen is maar zeer weinig

bekend. Wanneer zij optreden kunnen zij de nauwkeurigheid van de gemeten laagdikte echter wel degelijk significant beïnvloeden. Daarom kan deze bron van extra systematische fouten bij de interpretatie van laagdiktemetingen op voorhand zeker niet verwaarloosd worden.

In figuur 6 is schetsmatig aangegeven hoe een gemeten laagdikte een werkelijk gerealiseerde laagdikte in de praktijk kan onderschatten.

Het verschil tussen niveau 1 en niveau 3 is het gevolg van de zakking en verdichting van de ondergrond. Het verschil tussen niveau 3 en niveau 2 houdt verband met de indringing van de stenen van de bestorting in de ondergrond. Het verschil tussen niveau 5 en niveau 4 is te wijten aan de indringing van het meetsignaal beneden het niveau van de bovenzijde van de bestorting. Deze verschillen kunnen in principe allemaal tegelijkertijd optreden en zullen alle tot gevolg hebben dat de laagdikte te klein wordt gemeten. Aan de in figuur 6 getekende maten voor de mogelijke afwijkingen moet daarbij geen speciale betekenis worden gehecht. Deze dienen enkel ter illustratie.

Figuur 6: Mogelijke fouten bij het meten van laagdiktes



- 1 = niveau ondergrond voor aanbrengen bestorting
- 2 = niveau onderzijde bestorting
- 3 = niveau ondergrond na aanbrengen bestorting
- 4 = gemiddeld gemeten niveau bovenzijde bestorting
- 5 = niveau bovenzijde bestorting

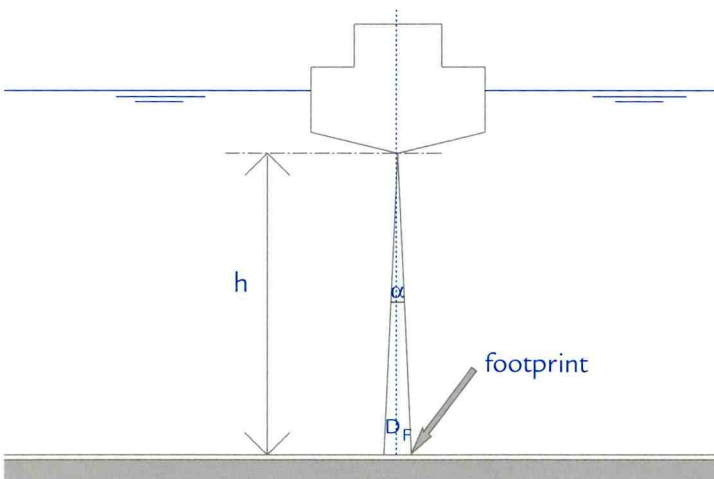
In de volgende twee paragrafen zal voor zowel de situatie bij de controle van baggerwerken als de situatie bij de controle van bestortingswerken nog wat dieper worden ingegaan op de verschillende typen meetonnauwkeurigheden.

3.2 Meetnauwkeu- righeden bij de controle van natte ontgravingen

In Nederland betreffen natte ontgravingen doorgaans fijnkorrelige bodems (slib, zand, grind, klei), waarvan de hoogteligging onder water redelijk nauwkeurig met behulp van echolodingsystemen kan worden opgemeten. Een echolodingsstelsel meet de waterdiepte uit het tijdsverschil tussen het tijdstip van uitzenden van een geluidssignaal en het tijdstip waarop dit signaal na weerkaatsing op de bodem bij de zender terugkeert. Met behulp van een schatting voor de geluidssnelheid onder water wordt uit deze looptijd de waterdiepte ter plaatse berekend. Er kan onderscheid worden gemaakt tussen twee hoofdsystemen:

- singlebeam systemen
- multibeam systemen

Figuur 7: Grootte van footprint bij singlebeam systemen



Bij singlebeam systemen wordt gebruik gemaakt van één geluidsbundel, waarbij alleen een deel van de bodem recht onder het meetschip wordt opgemeten. Het beschouwde bodemdeel (de zogenaamde footprint) bestaat daarbij uit een cirkelvormig oppervlak, waarvan de diameter afhangt van zowel de bundelhoek α van de geluidsbundel als van de waterdiepte h ter plaatse (figuur 7)

De diameter van de footprint kan daarbij als volgt berekend worden:

$$D_F = h * \tan(\alpha)$$

De bundelhoek α kan van systeem tot systeem verschillen. Bij veel gangbare singlebeam systemen bevindt de bundelhoek zich in de range 2,5° tot 3,0°.

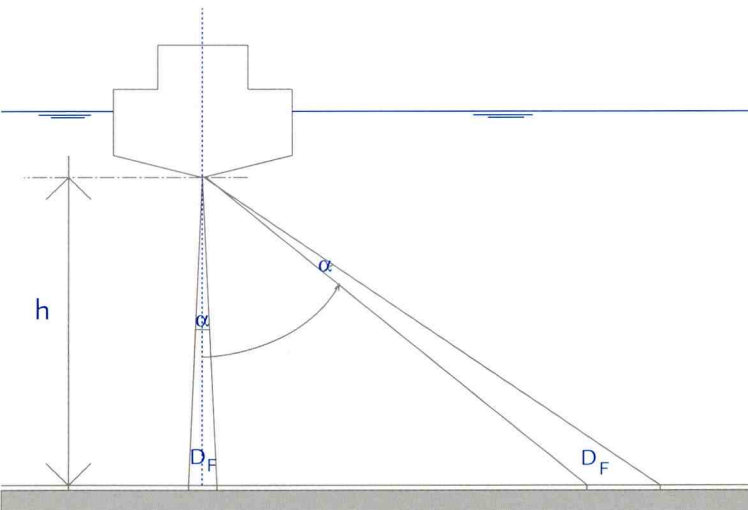
Singlebeam systemen zijn vooral geschikt voor steekproefsgewijze opnames van het verloop van een onderwaterbodem. Wanneer men bodembedekkende informatie met een hoge dichtheid wil verkrijgen, dan zijn multibeam systemen een betere keuze. Bij multibeam systemen wordt gebruik gemaakt van een groot aantal geluidsbundels, waarmee tijdens één meting een hele strook van de bodem wordt opgemeten. Deze strook bevindt zich zowel recht onder het schip als

opzij van het schip (aan beide zijden). Net als bij singlebeam systemen wordt per meting slechts één geluidssignaal uitgezonden. De opdeling in verschillende geluidsbundels wordt verkregen door wiskundige bewerkingen van het meetsignaal, welke geheel automatisch worden verricht door de bij het systeem behorende software (lit. [21] & [23]). Er bestaan verschillende methoden

om deze zogenaamde bundelwerking te verkrijgen, welke in diverse systemen door elkaar heen worden toegepast. De programmatuur is daarbij telkens toegesneden op de situatie bij het opmeten van vlakke bodems. Bij het meten van ruwe bodems (relatief grove bestortingen) of abrupte overgangen (bodem vlak bij kademuur, punt waar horizontale bodem op talud aansluit, grote voorwerpen die op de bodem liggen) ontstaan akoestische verstoringen die de bundelwerking van het systeem in de war kunnen sturen. Dit kan systematische meetfouten tot gevolg hebben. Voor het opmeten van in Nederland gangbare baggerwerken zijn de diverse multibeam systemen echter wel geschikt. In deze meet-situaties is men meestal wel verzekerd van een goede bundelwerking.

Bij multibeam systemen is de footprint recht onder het schip vaak kleiner dan bij singlebeam systemen. Bundelhoeken in de range 0,5° tot 1,5° behoren tot de mogelijkheden. Opzij van het schip wordt de footprint echter groter naarmate men verder opzij "kijkt" (figuur 8):

Figuur 8: Variatie in grootte footprint bij multibeam systemen



De "diameter" van de ovaalvormige footprint opzij van het schip bedraagt daarbij:

$$D_F = h * (\tan(\phi + \alpha) - \tan(\phi))$$

Waarin ϕ de richting van de bundel weergeeft. Bij veel systemen kan ϕ binnen de wiskundige programmatuur voor de bundelwerking worden gevarieerd in de range -75° tot +75°, in stappen van $\alpha = 0,5^\circ$ tot $1,5^\circ$. De grootte van de footprint kan hierbij op de verst van het meetschip weg gelegen delen van de gemeten strook zeker 5 maal zo groot zijn als recht onder het meetschip.

De grootte van de footprint is van belang in verband met de mogelijke indringing van het meetsignaal in de bodem. Bij het meten van bestortingen kan deze indringing een grote invloed op de meetnauwkeurigheid hebben. De indringing speelt echter geen rol van betekenis bij het meten van gebaggerde, fijnkorrelige bodems. Bij het meten van gebaggerde bodems hangt de meetnauwkeurigheid vooral af van de andere aspecten die bij het meten met echolodings-systemen ook altijd meespelen. Genoemd kunnen worden:

- de kwaliteit van de lodingsinstallatie
- de kwaliteit van het menselijk handelen
- de hoedanigheid van het te meten bodemoppervlak
- de diepte en hoedanigheid van het akoestisch medium water
- de basisstructuur van het meetsysteem als geheel

Bij de *kwaliteit van de lodingsinstallatie* kan bijvoorbeeld worden gedacht aan de kwaliteit van software, sensoren, echoloodspecificaties, correcties voor inzinking en deining van het meetschip, koersbepaling, hellingmeting en bootgeometrie. Vooral de correcties voor de diverse bewegingen van de star aan het meetschip bevestigde array met sensoren zijn van belang, aangezien iedere verandering in de positie van deze array zal worden doorvertaald in een verandering van de gemeten waterdieptes.

Bij de *kwaliteit van het menselijk handelen* speelt onder andere mee of de apparatuur voldoende precies en planmatig wordt gecalibreerd. Daarnaast is van belang dat bij het gebruik van de software de juiste versie en instellingen worden bewaakt. Een controleslag met behulp van foto's of kruismetingen kan bijdragen aan de nauwkeurigheid. Het volgen van protocollen en voorschriften (bijvoorbeeld via een kwaliteitshandboek) draagt bij aan de gewenste kwaliteit van de meting. Bij het calibreren en bij de controleslag is het van belang dat de gewenste nauwkeurigheid ook daadwerkelijk wordt aangetoond.

De *hoedanigheid van het te meten bodemoppervlak* kan ook bij de controle van baggerwerken meespelen. Van belang zijn vooral de bodemgeometrie en het type bodemmateriaal. Men zou kunnen zeggen dat de mate waarmee de bodem reflecterend, dan wel akoestisch definieerbaar is, bepalend is voor de nauwkeurigheid van een meting. Is een bodem vlak en glad, zoals bijvoorbeeld een sluisdempel, een zandbodem of een grindbodem, dan is deze bodem relatief nauwkeurig te meten. Bestaat de bodem uit slib en/of veen dan is het reflecterend karakter totaal anders en is het soms moeilijk om een duidelijke overgang van water naar vaste bodem aan te wijzen. In relatie tot de bodemgeometrie daalt de nauwkeurigheid in de volgorde van het rijtje: vlakke bodem →

glooiende bodem → sterk geaccidenteerde bodem. Bij het meten van een akoestisch goed te meten talud is de nauwkeurigheid niet alleen afhankelijk van de verticale (z) nauwkeurigheid maar ook van de horizontale (x,y) nauwkeurigheid van het meetsysteem. Daarbij kan de nauwkeurigheid van het horizontale plaatsbepalingssysteem een belangrijke rol spelen. Bij metingen op een onderwartertalud loopt de nauwkeurigheid terug.

Ten aanzien van de *hoedanigheid van het water* zijn vooral de temperatuur en het zoutgehalte van belang. Deze twee factoren beïnvloeden de waarde van de geluidssnelheid onder water, welke wordt gebruikt bij de omrekening van akoestische looptijden in waterdieptes. Temperatuurvariaties en variaties in zoutgehalte (denk ook aan verticale gelaagdheid in deze hoedanigheden) kunnen de nauwkeurigheid van een meting in negatieve zin beïnvloeden. Ook de waterdiepte beïnvloedt de nauwkeurigheid van de meting. Ruw gezegd gaat de waterdiepte ten opzichte van de andere factoren, welke de nauwkeurigheid bepalen een overheersende rol spelen op diepten groter dan 20 meter. De nauwkeurigheid zal daarna verder afnemen.

Bij de *basisstructuur van het meetsysteem* gaat het vooral om zaken als de keuze voor het horizontale (x,y) plaatsbepalingssysteem, het waterstand (z) systeem en het basisnet (de (x,y,z) grondslag). Voldoende checks, bewaking, overdracht en inspectie van deze systemen dragen bij tot het leggen van een basis voor de meetnauwkeurigheid. Bij de horizontale (x,y) plaatsbepaling wordt tegenwoordig gebruik gemaakt van onder meer satellietnavigatiesystemen, zoals Global Positioning System (GPS), differential Global Positioning System (dGPS) en Real Time Kinematic (RTK). In tabel 4 wordt een indruk gegeven van de nauwkeurigheid van enkele horizontale plaatsbepalingssystemen:

meetsysteem	correctiesignaal	betrouwbaarheid	
		1 σ -waarde	2 σ -waarde
GPS		< 5,0	< 10,0
dGPS	lokaal beschikbaar	< 1,0	< 2,0
dGPS	commercieel beschikbaar	< 1,5	< 2,5
RTK	lokaal beschikbaar	< 0,05	< 0,10
total station		< 0,01	< 0,02

Tabel 4: Betrouwbaarheid bepaling horizontale positie in [m] voor verschillende meetsystemen Bron: CROW-werkgroep Maak- en meettoleranties in de waterbouw (lit. [18])

Tabel 5: Betrouwbaarheid bepaling waterdiepte in [m] voor verschillende meetsystemen (2 σ -waarden) Bron: CROW-werkgroep Maak- en meettoleranties in de waterbouw (lit. [18])

bodem	total station	meetsysteem		
		singlebeam echolood	multibeam echolood centre beam	multibeam echolood outer beam
slib (ongeroid)	nvt	< 0,10	< 0,10	< 0,10
zand/klei	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
filterlaag	< 0,10	< 0,20	< 0,30	< 0,20
toplaag	< 0,30	< 0,40	< 0,40	< 0,40

Ten aanzien van de betrouwbaarheid van de verticale plaatsbepaling kan qua orde van grootte worden gedacht aan de in tabel 5 weergegeven waarden:

In tabel 5 zijn ter volledigheid ook waarden voor het meten van een filterlaag en een armourlaag opgenomen. Deze waarden zijn slechts indicatief. De verticale meetnauwkeurigheden zijn bij het meten van dergelijke lagen sterk afhankelijk van de specifieke meetsituatie (vooral van de verhouding tussen de diameter van de footprint en de steendiameter van het materiaal in de laag). In de volgende paragraaf wordt hier nader op ingegaan. Bij de 2 σ -waarden (95 % betrouwbaarheidswaarden) voor het multibeam systeem zijn de centre beam waarden van

toepassing op de metingen recht onder het schip en de outer beam waarden op de verst opzij van het meetschip gelegen plaatsen in de gemeten bodemstrook. Een multibeam systeem meet bij de controle van bestortingen recht onder het schip soms een grotere standaardafwijking dan opzij van het schip. Dit houdt verband met de kleinere footprint recht onder het schip, die soms dieper tussen de toppen van de stenen kan indringen dan de grotere footprint opzij van het schip.

De invloed van verschillende inrichtingen van het kwaliteitbewakingsproces komt tot uiting in de gegevens in tabel 6. Ook deze gegevens moeten weer worden opgevat als indicatieve waarden.

inrichting meetstelsel

	type I:		type II:		type III:	
	dGPS/waterstand- stelsel zonder beschreven procedures		dGPS/waterstand- stelsel met beschreven procedures en toetsing referenties op x, y en z		RTK stelsel met beschreven procedures en toetsing referenties op x, y en z	
indicatie meet- nauwkeurigheid	x en y	z	x en y	z	x en y	z
	< 3	< 0,4	1 - 2	0,1 - 0,2	≤ 0,5	≤ 0,1

Tabel 6: Meetnauwkeurigheid van singlebeam en multibeam lodingsystemen in [m] bij verschillende inrichtingen van het kwaliteitbewakingsproces (2σ -waarden = 95 % betrouwbaarheidswaarden) Bron: CROW-werkgroep Maak- en meettoleranties in de waterbouw (lit. [18])

Uit deze tabel blijkt dat positiebepaling met behulp van dGPS met beschreven procedures en toetsing van referenties aanzienlijk nauwkeuriger kan zijn dan dGPS zonder beschreven procedures. Vasthouden aan protocollen en voorschriften kan de moeite duidelijk lonen. Een procesinrichting met het RTK systeem inclusief beschreven procedures en toetsing van referenties zal bij de controle van baggerwerken de meest nauwkeurige resultaten opleveren.

3.3 Meetnauwkeu- righeden bij de controle van bestortingen

In deze paragraaf zal alleen worden ingegaan op de extra onnauwkeurighe- den die bij de controle van bestortingen kunnen optreden. Voor de beschrijving van de algemeen optredende meetonnauwkeurighe- den bij meten onder water met behulp van echolodingsystemen wordt verwezen naar de vorige paragraaf. Het verdient aanbeveling om deze paragraaf eerst door te lezen. In deze paragraaf wordt voortgebouwd op zaken die in de vorige paragraaf reeds aan de orde zijn gekomen.

Bij het meten van bestortingen kan allereerst onderscheid worden gemaakt tussen meten in den droge en meten onder water. Controlemetingen in den droge kunnen geschieden met meetband, waterpas- instrument, theodoliet en dergelijke: metho- des, die relatief simpel en betrouwbaar zijn. Het aantonen van de meetnauwkeurigheid bij metingen in den droge is een relatief tastbare en directe zaak. Bij controlemetingen van

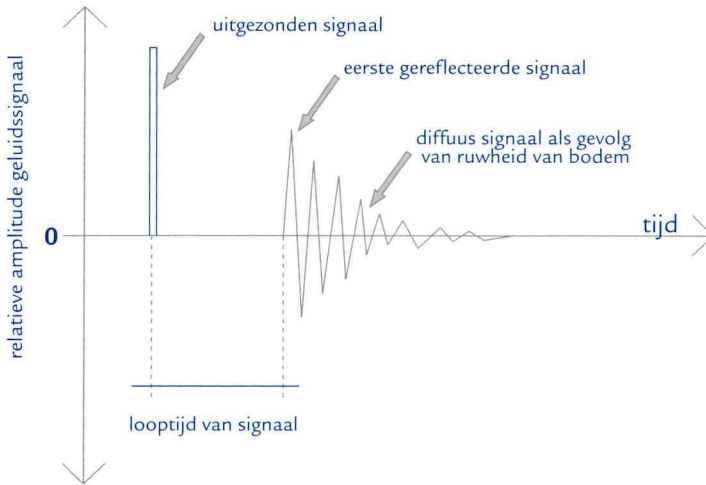
Foto 1: Meetvaartuig "Dintelwerken" van het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam Bron: Uitvoeringsrapport dokproef (lit. [20])



bestortingen onder water is dit veel minder het geval. In het verleden waren nog wel enigszins directe meetmethoden gebruikelijk, bijvoorbeeld de methode met peildraad en peilstang, of de halve bol methode, waarbij een halve bol van voorgeschreven grootte aan het uiteinde van de peilstang is bevestigd. Hoewel de halve bol methode zeker bij de uitvoering van projecten in het buitenland nog niet geheel heeft afgedaan wordt in Nederland bij het opmeten van bestortingen onder water tegenwoordig toch steeds vaker gebruik gemaakt van singlebeam en multibeam echolodingsystemen. Recente ervaringen tijdens de uitvoering van bodembeschermingen in de Europahaven en Amazonehaven in Rotterdam en in de Waalbocht bij St. Andries wijzen erop dat de toepassing van echolodingsystemen bij de controle van bestortingen echter wel de nodige problemen met zich meebrengt. In paragraaf 3.1 is hier reeds het een en ander over gezegd. In deze paragraaf zal vooral dieper worden ingegaan

op de indringing van het akoestisch meetsignaal beneden het niveau van de toppen van de stenen.

Het valt te verwachten dat de grootte van de footprint van een single- of multibeam systeem met het oog op deze indringing van groot belang is. Bij singlebeam systemen wordt de waterdiepte in het algemeen bepaald uit de looptijd tussen het tijdstip van uitzenden van het signaal en het tijdstip waarop het eerste gereflecteerde signaal wordt waargenomen. Bij het meten van een relatief vlakke, gladde bodem, de meetsituatie waar de genoemde echolodingsystemen eigenlijk voor ontworpen zijn, is dat eerste gereflecteerde signaal meestal ook vrijwel de gehele reflectie. Bij het meten van een ruwe bodem zoals een bestorting verandert de reflectie echter van een kortdurende puls in een over een langere tijd uitgesmeerd signaal, waarbij het eerst terugkerende signaal betrekking heeft op de toppen van de bodem en de



Figuur 9: Voorbeeld meetsignaal singlebeam bij meten op ruwe bodem

latere reflecties in het signaal meer de kuilen en gaten tussen die toppen representeren (figuur 9).

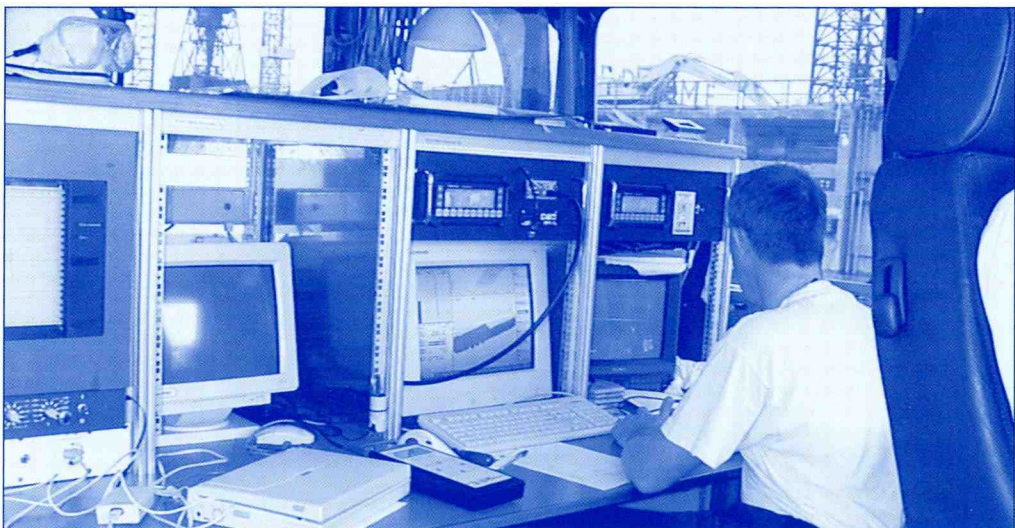
Indien de footprint van een singlebeam systeem zo groot is dat het bij een meting beschouwde stuk bodem altijd één of enkele toppen van de bodem bevat, dan zal men via de in figuur 9 aangegeven looptijd bij benadering het niveau van de toppen van de stenen opmeten. Bij een relatief kleine foot-

print zal de geluidsbundel soms echter ook tussen de toppen van de stenen kunnen doordringen tot dieper in de laag (zie figuur 5). Men zal dan gemiddeld gesproken een niveau beneden het niveau van de toppen van de stenen opmeten.

Voor multibeam systemen ligt deze kwestie minder eenvoudig. Het ligt voor de hand te veronderstellen

dat de grootte van de footprint hier ook weer een grote invloed zal uitoefenen. Dat is bij multibeam systemen echter maar één kant van de zaak. Daarnaast is ook niet goed duidelijk in hoeverre de extra reflecties van een ruwe bodem de bundelwerking van het systeem zullen beïnvloeden. Deze bundelwerking wordt verkregen met behulp van voorgeprogrammeerde wiskundige bewerkingen van

Foto 2: Bediening multibeam systeem Seabat 8101 aan boord van meetvaartuig "Calandwerken" Bron: Uitvoeringsrapport dokproef (lit. [20])





het gereflecteerde signaal (lit. [21]). Het is zeker niet ondenkbaar dat de extra reflecties de bundelwerking van het systeem flink in de war kunnen sturen. Dit zal dan ook gevolgen hebben voor de betrouwbaarheid van de met behulp van deze bundelwerking verkregen dieptemetingen. Over de aard en omvang van de hiermee verband houdende fout valt vanuit theoretisch oogpunt echter maar moeilijk iets zinnigs te zeggen. De bij multi-beam systemen behorende wiskundige programmatuur is zeer complex.

Om hier toch iets meer over te kunnen zeggen zijn recentelijk proeven uitgevoerd in Dok VI van de firma Verolme in de Botlek te Rotterdam (lit. [20]). Bij deze proeven zijn op de bodem van het dok twee verschillende bestortingen aangebracht, waarvan de hoogteliggingen met behulp van verschillende meetmethoden zijn opgemeten. De bestortingen bestonden uit een laag breuksteen 10-60 kg en een laag breuksteen 40-200 kg, twee van de meest gangbare sorteringen voor bodembeschermingen. Beide lagen werden aangebracht met een laagdikte van ca. 2,5 maal de nominale steendiameter van de beschouwde sortering. De lagen werden na het storten telkens met een wielkraan in den droge geprofileerd,

Foto 3: Steenbedden in Dok VI Verolme na profileren Bron: Uitvoeringsrapport dokproef (lit. [20])

zodat relatief vlakke bestortingen werden verkregen.

Bij het meten is gebruik gemaakt van de volgende meetsystemen:

- landmeetkundige puntmeting met peilstang in den droge (dok drooggezet)
- bolmeting in den droge, waarbij de diameter van de halve bol aan het einde van de peilstang telkens gelijk was aan de helft van de nominale steendiameter van de beschouwde sortering (conform voorschrift in CUR 154). De halve "bol" is hierbij uitgevoerd in de vorm van een schijvenconstructie (foto 4). Voor deze constructie is gekozen om afschuiven tijdens het plaatsen op de breuksteen te voorkomen.
- singlebeam metingen onder water (dok gevuld met ca. 10 meter water boven de bestortingen), met twee verschillende singlebeam systemen (bundelhoeken 2,5 resp. 2,7 graden, diameter footprint bij beide systemen ongeveer gelijk aan 1,25 maal de nominale steendiameter voor de

40-200 kg sortering en 1,9 maal de nominale steendiameter voor de 10-60 kg sortering)

- multibeam metingen onder water, met vier verschillende multibeam systemen (bundelhoek telkens 1,5 graden, diameter footprint ongeveer gelijk aan 0,7 maal de nominale steendiameter voor de 40-200 kg sortering en 1,1 maal de nominale steendiameter voor de 10-60 kg sortering)

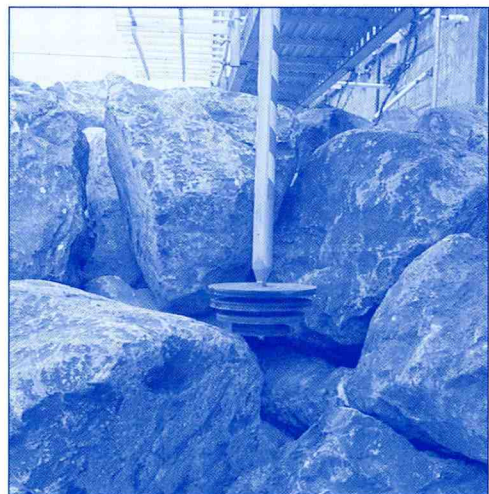
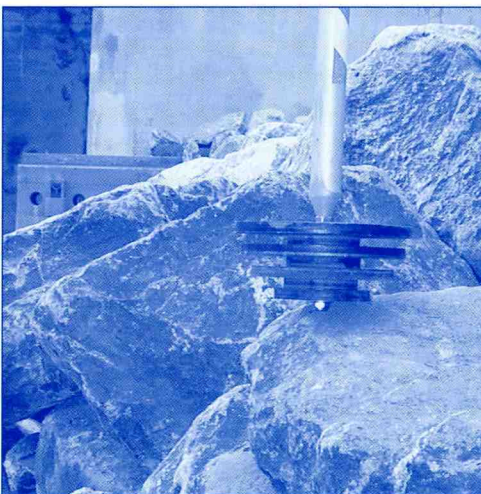
Hoewel ook enkele niet goed verklaarbare uitkomsten werden gevonden (onder andere enkele grote onderlinge verschillen in de uitkomsten van de twee bijna identieke singlebeam systemen), konden binnen het kader van de bij deze dokproef gevonden resultaten toch enkele schijnbaar algemene wetmatigheden worden opgemerkt. De belangrijkste daarvan zijn:

- De metingen met de halve bol leverden telkens de grootste gemiddelde laagdikte op. Het met dit meetsysteem gemeten gemiddeld bodemniveau lag daarbij al

enigzins beneden het (niet opgemeten) vlak door de toppen van de stenen (zie foto 4).

- De uitkomsten van de *singlebeam metingen* weken gemiddeld gesproken maar weinig af van de uitkomsten van de bolmetingen (slechts 1 % verschil in gemiddelde laagdikte bij de 10-60 kg sortering, ongeveer 5 % verschil in gemiddelde laagdikte bij de 40-200 kg sortering). Ondanks het feit dat de diameter van de footprint telkens groter was dan de nominale steendiameter was bij de singlebeam metingen dus toch wel sprake van een zekere mate van indringing beneden het niveau van de toppen van de stenen. De diameter van de footprint moet blijkbaar veel groter (bijvoorbeeld minimaal drie tot vijf maal de nominale steendiameter) zijn om het niveau van de toppen aan te kunnen peilen.
- De metingen met de *multibeam systemen* leverden gemiddeld de kleinste laagdiktes op. Hoewel het onderlinge verschil met de *landmeetkundige puntmetingen* niet erg groot was (gemiddeld 3 % bij de 40-200 kg sortering en 6 % bij de 10-60 kg sortering) bleken de multibeam metingen gemiddeld toch nog dieper in de stortlagen door te dringen dan zelfs de metingen met de peilstang. Dit is een opmer-

Foto 4a & 4b: Halvebol meting op sortering 10-60 kg Bron: Uitvoeringsrapport dokproef (lit. [20])



kelijk resultaat. De footprint was bij de multibeam metingen weliswaar duidelijk kleiner dan bij de single beam metingen, maar dat gegeven kan nooit verklaren waarom de indringing bij de multibeam metingen zelfs groter was dan de indringing bij de landmeetkundige metingen met de peilstang. Deze uitkomst kan alleen worden verklaard door te wijzen op de mogelijke verstoring van de bundelwerking in de multibeam programmatuur bij het meten op ruwe bodems.

- De met behulp van *multibeam systemen* opgemeten *gemiddelde laagdikte* was gemiddeld 11 % (bij de 40-200 kg sortering) tot 21 % (bij de 10-60 kg sortering) kleiner dan de gemiddelde laagdikte die uit de bolmetingen kon worden afgeleid. Uitgedrukt in termen van de nominale steendiameter bedroeg het verschil in laagdikte $0,32 * D_{n50}$ bij de 40-200 kg sortering en $0,61 * D_{n50}$ bij de 10-60 kg sortering. Het bij de bolmeting aangepeilde niveau lag daarbij al enigzins beneden het niveau van de toppen van de stenen (een gemiddelde waarde van $0,15 * D_{n50}$ tot $0,25 * D_{n50}$ is een redelijke schatting voor dit verschil in niveau (lit. [19])), zodat kan worden gesteld dat het bij de multibeam metingen gemiddeld aangepeilde niveau tijdens de dokproef zeker $0,5 * D_{n50}$ tot $0,8 * D_{n50}$ onder het niveau van de toppen van de stenen kan hebben gelegen. In het licht van de in tabel 2 (paragraaf 2.3) genoemde gangbare waarden voor de maak-onnauwkeu-

righeden bij het maken van bestortingen is deze systematische meetfout zeer groot te noemen. Een overzicht van de diverse uitkomsten voor de meting van de gemiddelde laagdikte is weergegeven in tabel 7.

- De multibeam metingen leverden ook de grootste standaardafwijking. De standaardafwijking van de met multibeam apparatuur opgemeten laagdikte bleek een lineair verband te vertonen met de D_{n50} van de aangepeilde breuksteen. Het was mogelijk om hiervoor de onderstaande formule op te stellen:

$$\sigma \text{ (laagdikte multibeam)} = c_1 + c_2 * D_{n50}$$

De constante c_1 heeft binnen deze context betrekking op de basis-onnauwkeurigheid van het multibeam systeem. Deze trad op bij de calibratie metingen op de vlakke, gladde betonvloer van het dok. Bij de verschillende onderzochte multibeam systemen varieerde deze constante tussen 2,5 cm en 4,6 cm. Deze waarden stemmen redelijk overeen met de eerder in tabel 5 (paragraaf 3.2) beschreven indicaties voor de 2σ -waarden bij het meten van vlakke zand of kleibodems. De constante c_2 geeft de invloed van de bodemruwheid weer. Deze constante varieerde bij de onderzochte multibeam systemen tussen 0,26 en 0,32. Deze waarden voor c_2 zijn relatief groot wanneer zij worden gezien in het licht van de gangbare waarden voor de standaardafwijking van de maakonnauwkeurigheden (zie tabel 2 in paragraaf 2.3, de genoemde 95 % betrouwbaarheids-waarden zijn gelijk aan twee maal de standaardafwijking). Bij het meten met multibeam systemen kan dus niet alleen de systematische meetfout maar ook de toevallige meetfout een rol van grote betekenis spelen.

Tabel 7: Onderlinge verschillen in de meting voor de gemiddelde laagdikte bij de dokproef
Bron: Onderzoeksrapport dokproef (lit.[20])

Meetsysteem	singlebeam systeem	meting met peilstang	multibeam systeem
Afwijking laagdikte t.o.v. bolmeting	- 3 % (10-60 kg), - 5 % (40-200 kg).	- 14 % (10-60 kg), - 8 % (40-200 kg).	- 21 % (10-60 kg), - 11 % (40-200 kg).

Uit de resultaten van de proef in Dok VI van Verolme kan worden opgemaakt dat het gebruik van echolodingsystemen bij het opmeten van bestortingen onder water gepaard gaat met relatief grote systematische en toevallige meetfouten. Dit geldt vooral voor het meten met multibeam systemen, maar de singlebeam systemen zijn hier niet van uitgezonderd. De fouten kunnen zo groot zijn dat de feitelijk op te meten maakonnauwkeurigheden met deze meetsystemen eigenlijk niet goed in kaart kunnen worden gebracht. Voor meer details van de resultaten van de dokproef wordt verwezen naar het onderzoeksrapport zelf (lit. [20]).

Dit betrof dan alleen nog een eerste, verkennend onderzoek. Er resten nog een flink aantal vragen. Deze hebben vooral betrekking op:

- de invloed van de grootte van de footprint op de indringing
- de invloed van maakonnauwkeurigheden op de reactie van echolodingsystemen
- de relatie tussen het niveau van de toppen van een bestorting en de ligging van het uit gegevens over de gestorte massa berekende referentievlak voor de bovenzijde daarvan
- de grootte van de mogelijke indringing

tijdens het stortproces van de onderstenen van een bestorting in de ondergrond

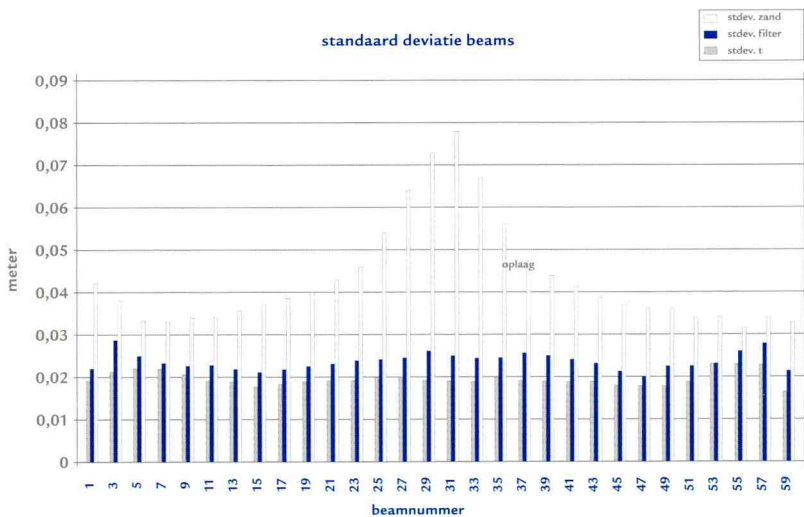
- de grootte van de mogelijke zakking en verdichting van de ondergrond als gevolg van het aanbrengen van een bestorting daarop

De *grootte van de footprint* is bij de dokproef nauwelijks gevarieerd.

Door de proef uit te voeren met verschillende sorteringen en verschillende meetsystemen is de verhouding tussen de grootte van de footprint en de nominale steendiameter weliswaar wel enigszins gevarieerd, maar deze variaties waren slechts klein. Men zal grotere variaties in deze verhouding moeten aanbrengen (bijvoorbeeld door te meten bij verschillende waterdieptes) om op dit punt duidelijke conclusies te kunnen trekken.

Overigens trad bij de dokproef wel variatie in de grootte van de footprint op bij de tests met multibeam systemen. Bij deze systemen is de footprint voor de

Figuur 10: Standaardafwijkingen van de verschillende beams te St. Andries Bron: Rijkswaterstaat Directie Oost-Nederland (lit. [29])



"center beams" recht onder het meetschip immers veel kleiner dan bij de "outer beams" schuin opzij van het schip (zie formule (4) in paragraaf 3.1). Als gevolg hiervan zal de indringing bij de outer beams in het algemeen kleiner zijn dan bij de center beams. Op de verst van het schip weg gelegen meetpunten kan de indringing zelfs tot nul teruglopen. Tijdens een analyse van andere ervaringen met multibeam apparatuur (meten van een bestorting in de Waalbocht te St. Andries, lit. [19]) werd het in figuur 10 weergegeven beeld gevonden

In deze figuur zijn voor diverse lokaties onder het schip de standaardafwijkingen in de metingen van bodemniveau's tegen de plaats van de lokatie ten opzichte van het schip uitgezet. De standaardafwijkingen zijn daarbij per lokatie berekend uit de meting op deze lokatie en de metingen op de direct hieraanast gelegen lokaties. De op de horizontale as uitgezette beamnummers verwijzen naar de plaats van de lokatie onder het schip: beamnummer 1 correspondeert met de lokatie uiterst links van het schip, beamnummer 31 met de lokatie recht onder het schip en beamnummer 59 met de lokatie uiterst rechts van het schip. Er zijn resultaten weergegeven voor metingen van de niveau's van de rivierbodembodem (zand, na vlakken met een ploeg), de op deze rivierbodembodem aangebrachte filterlaag en de op deze filterlaag aangebrachte top laag. De diameter van de footprint was hierbij veel groter dan de nominale korreldiameters van het zand en het filtermateriaal. Bij de meting van de top laag was de verhouding tussen de diameter van de footprint en de nominale steendiameter recht onder het schip echter relatief klein ($D_F/D_{n50} \approx 0,35$). In de resultaten komt dit duidelijk tot uiting. Bij het zand en de filterlaag zijn de standaardafwijkingen afgezien van enkele kleine fluctuaties overal even groot. Deze standaardafwijkingen zijn alleen het gevolg van de systeemgebonden toevallige fouten van het meetsysteem. De indringing van het meetsig-

naal in de bodem is hierbij overal gelijk aan nul. Bij de metingen van het niveau van de top laag wordt een heel ander patroon gevonden. Recht onder het schip zijn de standaardafwijkingen ca. 2 maal zo groot als op grote afstand van het schip. Dit is het gevolg van de indringing van het meetsignaal in de bodem, welke indringing bij de kleinste footprint recht onder het schip het grootst is. De waarde van de standaardafwijking kan hierbij worden opgevat als een maat voor de grootte van de indringing van het meetsignaal ter plaatse. Naarmate een meetlokatie verder opzij van het schip ligt wordt deze indringing steeds kleiner, totdat bij de beamnummers 11 en 53 de standaardafwijking een min of meer constante waarde krijgt. Deze constante waarde bedraagt ca. 3,5 cm, hetgeen goed overeenstemt met de waarden die bij de dokproef zijn gevonden voor de constante c_1 in formule (5). Deze constante heeft in deze formule betrekking op uitsluitend de basisonnauwkeurigheid (indringing nul) van een multibeam meetsysteem. Hieruit kan worden geconcludeerd dat de indringing van het meetsignaal in de top laag op de meest opzij gelegen meetlokaties tot nul moet zijn teruggelopen. Ten aanzien van de weer oplopende waarden van de standaardafwijkingen voor de beamnummers 1 en 3 kan worden opgemerkt dat deze verband houden met een overgang van vlakke bodem naar talud op deze lokaties. Deze afwijkingen zijn binnen deze context als zodanig niet relevant.

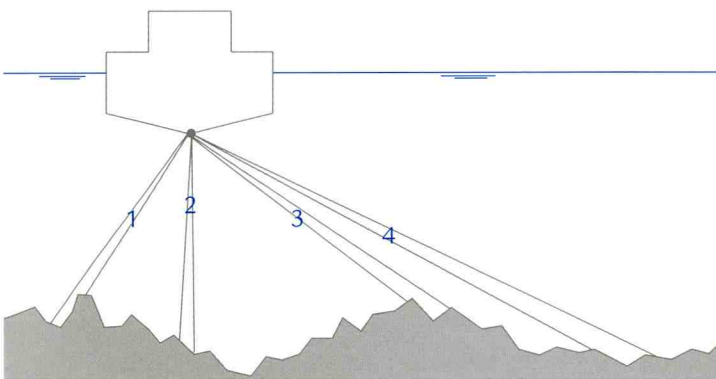
Vanwege de mogelijke verschillen in de mate van indringing bij de center beams en de outer beams wordt bij het meten met multibeam systemen in de praktijk gekozen voor speciale vaarroutes, waarbij elke lokatie meer dan eens en door zowel center beams als outer beams wordt opgemeten. Bij de dokproef is men op soortgelijke wijze te werk gegaan. De in tabel 7 aangegeven waarden voor de multibeam metingen zijn dus gebaseerd op een mix van zowel center beam metingen als outer beam metingen.

Doordat de metingen maar bij één waterdiepte zijn uitgevoerd was daarbij de voor deze mix representatieve footprint telkens min of meer gelijk. De invloed van variaties in de grootte van deze representatieve footprint is met de multibeam metingen in het dok dus nog niet goed in kaart gebracht.

Een andere onzekerheid vloeit voort uit het feit dat de bij de dokproef onderzochte bestortingen in den droge zijn geprofileerd tot relatief vlakke bestortingen. Het effect van maakonnauwkeurigheden op het functioneren van de diverse meetsystemen is dus niet onderzocht. Zeker voor de nauwkeurigheid van multibeam systemen kunnen de maakonnauwkeurigheden echter ook een rol van betekenis spelen. Bij de zijwaarts van het schip gerichte bundels kan afscherming van kuilen optreden. Dit is schetsmatig weergegeven in figuur 11, waar deze afscherming vooral optreedt bij de bundels 1 en 3, die als het ware op een voor een kuil gelegen hoog punt blijven steken:

Naast afscherming van kuilen zal bij de aanwezigheid van extra maakonnauwkeurigheden ook extra verstoring van de bundelwerking optreden, met alle onzekerheden vandien. Hierbij kan nog worden opge-

Figuur 11: Invloed maakonnauwkeurigheden op nauwkeurigheid multibeam metingen



merkt dat de zijwaartse effecten bij multibeam metingen in de praktijk wel enigszins zullen worden uitgemiddeld door het hantieren van speciale vaarpatronen, waarbij elke lokatie door zowel center beams als outer beams wordt opgemeten. Dit zal echter niet kunnen verhinderen dat de zijwaartse effecten bij de outer beams toch tot uiting komen in de uit alle metingen berekende gemiddelde waarden. Het effect van de extra maakonnauwkeurigheden kan daarbij niet op voorhand worden verwaarloosd. Ook op dit punt bestaat er nog een tekort in kennis over het functioneren van multibeam meetsystemen.

Al met al kan worden gesteld dat er op het moment van schrijven van dit rapport nog een flink aantal onbeantwoorde vragen bestaan met betrekking tot het functioneren van de diverse meetsystemen bij het opmeten van het niveau van de bovenkant van bestortingen onder water. Daarnaast spelen nog een aantal moeilijke kwesties van een andere aard een rol.

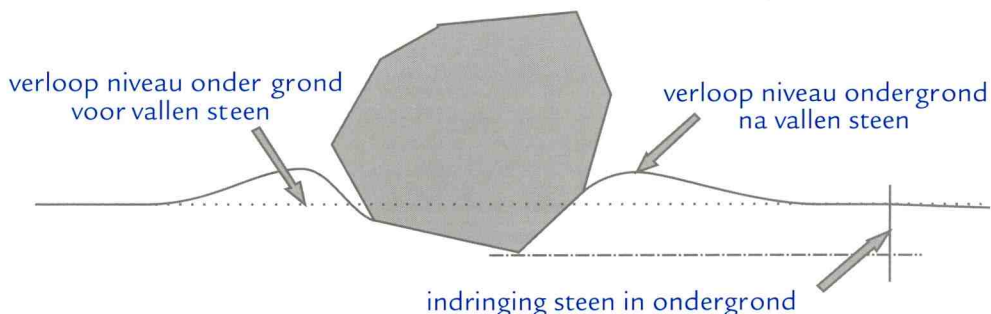
Het is allereerst nog steeds niet geheel duidelijk welke relatie er in de praktijk bestaat tussen het *niveau van de toppen van een bestorting en de ligging van het referentievlak*, zoals dat in de praktijk vaak met behulp van formule (1) wordt berekend (omrekening gestorte massa in gemiddelde laagdikte). Deze relatie is vooral van belang voor een aannemer, aangezien deze met

behulp van de inverse van formule (1) de totaal benodigde hoeveelheid steen voor een werk inschat. In het licht van de in deze paragraaf beschouwde resultaten is het zeker niet ondenkbaar dat hij daarbij deze hoeveelheid significant te laag inschat. In paragraaf 4.2 wordt hierop teruggekomen.

De mogelijke *indringing van de onderkant van de bestorting in de ondergrond* kan daarnaast ook nog een belangrijke rol spelen. In paragraaf 3.1 is hier reeds het één en ander over gezegd. De meting van de laagdikte wordt ook beïnvloed door tussentijds optredende zakkings van de ondergrond en/of indringing van de stenen van de bestorting in de ondergrond. Het begrip tussentijds heeft daarbij betrekking op het tijdsinterval tussen de meting van het bodemniveau *voor* het aanbrengen en de meting van het bodemniveau *na* het aanbrengen van de bestorting. Met name de indringing van de bestorting in de ondergrond zou nog een belangrijke rol kunnen spelen bij de controle van laagdiktes. Uit de resultaten van enkele verkennende schaalproeven naar het effect van het onder water laten vallen van stenen op een ondergrond van zand of grind kwam naar voren dat indringingen van 15 tot 25 % van de nominale steendiameter zeker tot de mogelijkheden behoren, vooral wanneer ook wordt gelet op het "doorhamereffect" van later vallende stenen op de indringing van reeds op de bodem liggende stenen. Er is echter nog meer onderzoek nodig om dergelijke uitspraken hard te kunnen maken. In figuur 12 is een voorbeeld van een dergelijke indringing geschetst voor een individuele steen.

Met betrekking tot de mogelijke *zakking en verdichting van de ondergrond* als gevolg van het aanbrengen van een bestorting kan worden opgemerkt dat dit vooral van belang kan zijn in situaties waarin deze ondergrond bestaat uit kunstmatig aangebracht, relatief losgepakt zand. Losgepakt zand kan tot grote diepte naverdichten door mechanische belastingen op dit zand. Het is echter moeilijk om dergelijke effecten in de praktijk te kwantificeren. Ook op dit gebied is nog maar weinig bekend (lit. [19]).

Figuur 12: Schets van de indringing van een steen in de ondergrond



4. Mogelijke gevolgen van onnauwkeurigheden bij maken en meten

4.1 Functioneel falen van constructies

Bij het meten van gerealiseerde ontgravingsdieptes van gebaggerde bodems treden in het algemeen maar weinig systematische meetfouten op. Voor de meeste systematische meetfouten kan met behulp van calibratie procedures worden gecorrigeerd. De gemiddeld gerealiseerde ontgravingsdiepte wordt daarbij meestal wel voldoende nauwkeurig opgemeten. Bij een goede keuze voor het meetsysteem (bijvoorbeeld multibeam apparatuur in combinatie met RTK plaatsbepaling) kunnen de toevallige meetfouten ook relatief klein blijven. In dat geval zal ook de gemeten standaardafwijking van de ontgravingsdiepte redelijk overeenstemmen met de werkelijkheid op de bodem. Functioneel falen van baggerwerken

(bijvoorbeeld het vastlopen van een schip in een geul waarvan het bodemniveau na baggeren foutief te laag was ingeschat) is daarom een nauwelijks voorkomend fenomeen.

Voor bestortingen ziet het plaatje er anders uit. Vooral bij het opmeten van bestortingen onder water kunnen zowel grote systematische als grote toevallige meetfouten optreden, zeker wanneer het meten met multibeam echolodingsystemen gebeurt (zie paragraaf 3.3). Bij het gebruik van multibeam systemen kan het gemiddeld gerealiseerde niveau van de toppen van de stenen makkelijk worden onderschat. Deze systemen kunnen in veel voorkomende situaties zelfs bij een relatief vlakke bestorting al een niveau aanpeilen dat een halve nominale steendiameter onder het niveau van de toppen van de stenen ligt. Bij een bestorting met ook nog eens relatief grote maakonnauwkeurigheden zal dit verschil vermoedelijk nog groter

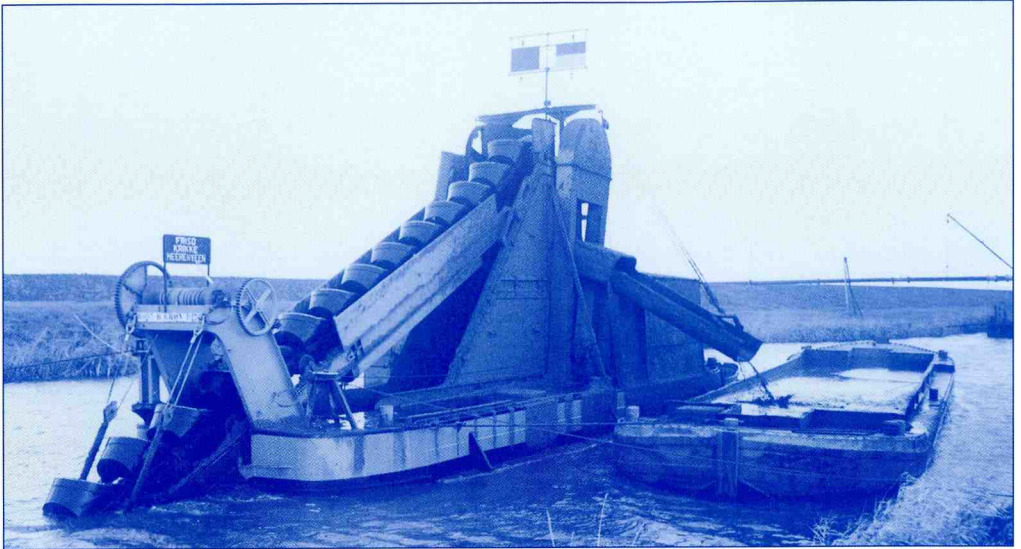


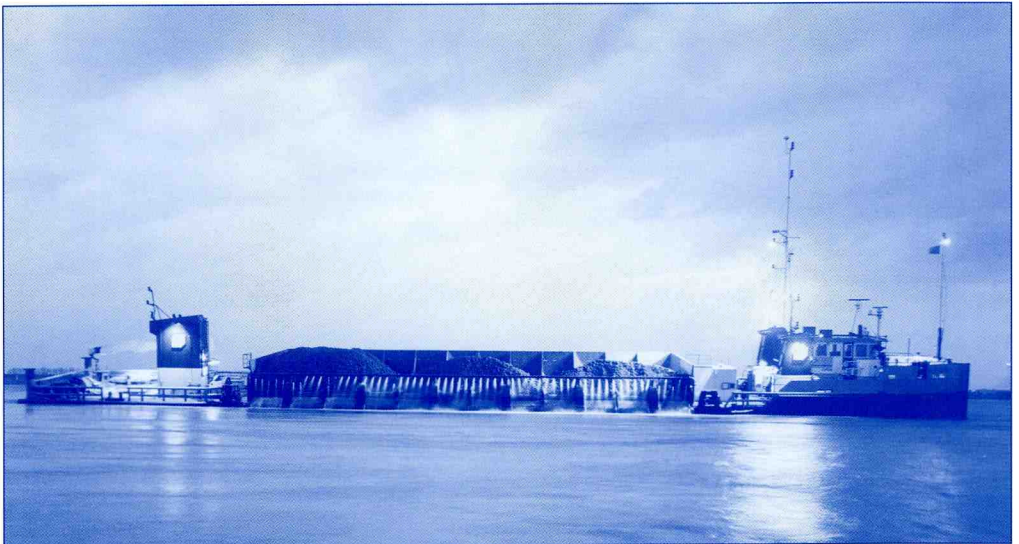
Foto 5: Baggerschip in bedrijf

kunnen worden. De toppen van de stenen kunnen dan nog een flink stuk boven het met multibeam apparatuur opgemeten gemiddelde niveau uitsteken. Wanneer er wordt gevaren met een relatief kleine kielspeling, dan zouden deze uitstekende toppen bij afstemming op het met multibeam apparatuur gemeten gemiddeld bodemniveau hinder kunnen opleveren voor de scheepvaart boven

deze bestorting. In de praktijk zal de kielspeling echter vaak wel zo groot zijn dat dit probleem niet optreedt. Men zij echter gewaarschuwd bij transporten met extreem grote diepgang.

Een bestorting kan uiteraard ook falen wanneer de laagdikte van de bestorting al dan niet lokaal tekort schiet. Dit kan

Foto 6: Stortschip in bedrijf



leiden tot het falen van de bodembeschermende werking van de bestorting. In dit verband is het van belang om even stil te staan bij het karakter van al de mogelijke systematische meetfouten die bij het opmeten van gerealiseerde laagdiktes kunnen voorkomen (zie de paragrafen 3.1 en 3.3). Al deze fouten zullen leiden tot een onderschatting van de gemiddelde waarde van de werkelijk gerealiseerde laagdikte. Hier zit dus geen onveiligheid maar juist een veiligheid ingebouwd. Dit is ook het geval bij de meting voor de standaardafwijking. Als gevolg van diverse toevallige meetfouten zal de gemeten standaardafwijking de werkelijke standaardafwijking van het bodemniveau overschatten. Wanneer men op basis van de gemeten gemiddelde waarde en de gemeten standaardafwijking van de laagdikte voorspellingen doet over de extreme waarden van de laagdikte zullen de voorspelde minima altijd kleiner zijn dan de werkelijke minima. De diverse meetfouten zullen voor de inschatting van de bodembeschermende werking van een bestorting dus geen direkt gevaar opleveren, terwijl deze fouten wel gevaar kunnen opleveren bij de schatting voor de maximaal beschikbare vaardiepte boven die bestorting.

Deze situatie kan veranderen wanneer men de meetwaarden voor de diverse systematische meetfouten (bijvoorbeeld indringing multibeam, zakking ondergrond, indringing stenen in ondergrond) gaat corrigeren. Voordat men in de praktijk dergelijke correcties op verantwoorde wijze kan uitvoeren zal echter eerst nog het nodige onderzoek moeten worden verricht (paragraaf 3.3).

4.2 Contractuele risico's voor aannemers en opdrachtgevers

De contractuele risico's bij de uitvoering en controle van baggerwerken zijn in het algemeen goed beheersbaar. Omdat bij de controle van baggerwerken in het algemeen slechts weinig en daarbij slechts relatief kleine systematische en toevallige meetfouten zullen optreden is het goed mogelijk om duidelijke afspraken te maken over de bij deze controle te hanteren eisen en de gevolgen voor de opdrachtgever en de aannemer bij het niet voldoen aan deze eisen. De in tabel 1 in paragraaf 2.2 genoemde richtwaarden voor haalbare nauwkeurigheden van baggerwerken kunnen hierbij in principe als uitgangspunt worden genomen, waarbij eventueel nog correcties kunnen worden aangebracht voor projecten met uitzonderlijke omstandigheden - dit alles in goed overleg tussen opdrachtgever en aannemer.

Bij de oplevering en controle van bestortingen kunnen echter dusdanig grote meetfouten optreden dat het moeilijk wordt om hier duidelijke afspraken over te maken. Wanneer zowel de opdrachtgevers als de aannemers van bestortingswerken goed op de hoogte zijn van al hetgeen in dit rapport beschreven staat, dan zullen zij beseffen dat men op dit gebied makkelijk kan belanden in een situatie waarin onenigheid ontstaat over het al dan niet goed hebben opgeleverd van een werk. Als gevolg van grote systematische meetfouten kan een wel degelijk aangebrachte gemiddelde laagdikte al snel onterecht worden afgekeurd. Grote toevallige meetfouten kunnen daarnaast aanleiding geven tot onterecht afkeuren wegens te groot geschatte maakonnauwkeurigheden. De risi-



Foto 6: Steenstorter in bedrijf

co's zijn hier te groot om bij het schrijven van bestekken eenvoudig te kunnen uitgaan van de gemiddelde richtwaarden die in tabel 2 in paragraaf 2.3 zijn genoemd. In het recente verleden zijn in dit verband bij diverse projecten onenigheden ontstaan over de uitvoering van contracten. Bij het schrijven van bestekken voor bestortingswerken moet ook worden geanticipeerd op de mogelijke meetfouten die men kan verwachten.

Met betrekking tot deze kwestie is het van belang om goed stil te staan bij de wijze waarop een aannemer een bestortingswerk incaluleert. Een aannemer zal op basis van de ontwerptekeningen voor een bestorting het totaal benodigde volume

steen voor deze bestorting berekenen, dit volume met de inverse van formule (1) in een totaal te storten massa steen omrekenen, en op basis van deze hoeveelheid zijn prijskaartje aan het te vervaardigen werk hangen. Wanneer tijdens de controle na de uitvoering van het werk blijkt dat hij bepaalde voorgeschreven niveau's niet heeft gerealiseerd zal hij moeten bijstorten, welk extra werk hij in veel contractsituaties uit zijn eigen zak zal moeten bijbetalen.

Gelet op al hetgeen in paragraaf 3.3 is opgemerkt met betrekking tot de mogelijke meetfouten bij de controle van bestortingen bestaat er een gereede kans dat deze situatie in de praktijk zal optreden. Als gevolg van onder

andere indringing van de bestorting in de ondergrond en indringing van het meetsignaal van echolodingsystemen onder het niveau van de toppen van een bestorting zal de werkelijk gerealiseerde laagdikte van een bestorting snel worden onderschat. De gemeten laagdikte kan de gerealiseerde laagdikte daarbij ook fors onderschatten, met fouten in de range van $0,25 \cdot D_{n50}$ tot $0,75 \cdot D_{n50}$, waarin D_{n50} betrekking heeft op de nominale steendiameter van de bestorting in kwestie. Over een heel bestortingswerk bezien kan dit voor de aannemer een flinke onkostenpost met zich meebrengen - en dat terwijl hij meestal te goeder trouw wel degelijk de vereiste massa zal hebben aangebracht.

De bestekschrijver zal op al deze onzekerheden moeten anticiperen. Hij zal zeer duidelijk moeten zijn met betrekking tot de volgende zaken:

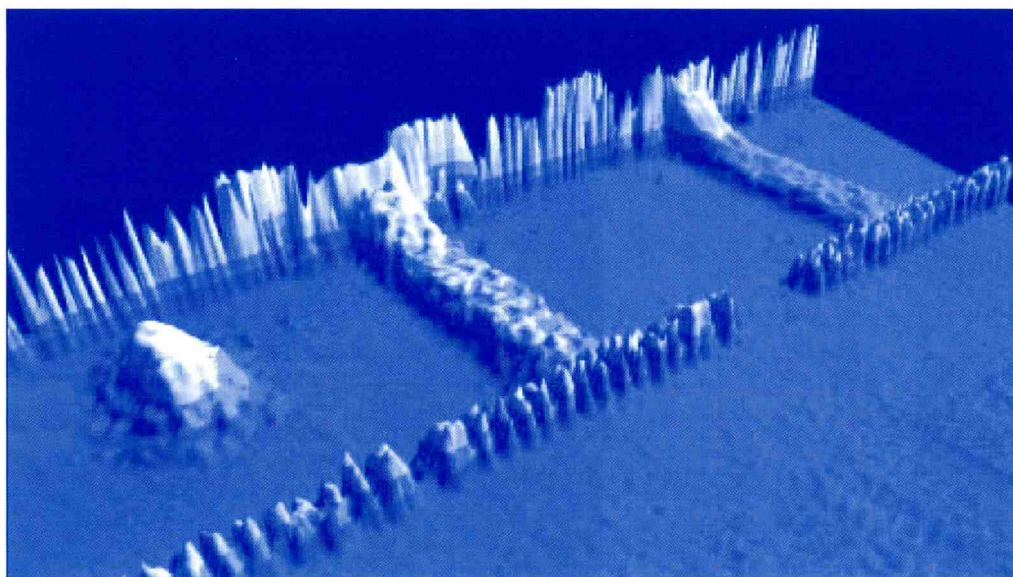
- het meetsysteem waarmee de controle wordt uitgevoerd
- de wijze waarop de controle wordt uitgevoerd
- de eisen die aan de uitkomsten van metingen worden gesteld
- de gevolgen voor zowel opdrachtgever als aannemer bij het niet voldoen aan de eisen
- de definitie van de in het bestek gebruikte begrippen

Bij de keuze voor het meetsysteem kan ook worden gedacht aan een combinatie van systemen. In dit verband verdient het de aanbeveling om tijdens de uitvoering per stortvak ook de totaal in dit vak gestorte massa steen op te meten. De meting van deze massa dient daarbij te geschieden door een instantie die voor zowel de opdrachtgever als

Foto 8: Kleurenscaan van een multibeam dieptemeting tijdens de proef in het Verolme Dok
Bron: Uitvoeringsrapport dokproef (lit. [20])

de aannemer aanvaardbaar is (dit kan ook de aannemer zelf zijn, wanneer de opdrachtgever hiermee accoord gaat). De meetgegevens met betrekking tot de gestorte massa zijn in wezen de enige echt harde gegevens met betrekking tot de gerealiseerde kwaliteit van het werk. Het verdient daarom de voorkeur om in ieder geval de eisen ten aanzien van de gemiddeld gerealiseerde laagdikte niet op indirecte schattingen via dieptemetingen maar op deze directe gegevens toe te spitsen. De aannemer wordt op deze wijze beter beschermd tegen de mogelijke systematische meetfouten bij het meten met echolodingsystemen of de halve bol methode.

Voor de controle van de fluctuaties in de hoogteligging van een bestorting is men daarentegen wel aangewezen op dieptemetingen. Daarbij dient te worden bedacht dat vooral bij het gebruik van echolodingsystemen sprake kan zijn van forse toevallige meetfouten, die ertoe kunnen leiden dat de werkelijke fluctuaties in de hoogteligging worden overschat. De bestekschrijver zal hiermee rekening moeten houden bij het stellen van eisen aan de standaardafwijking van de gemeten hoogteligging. Hij kan dit



bijvoorbeeld doen door zijn eis op onderstaande formule te baseren:

$$\sigma_{\text{eis}} = \sqrt{\sigma_{\text{maak}}^2 + \sigma_{\text{meet}}^2}$$

Hierin is σ_{eis} de toetsingswaarde bij controle, σ_{maak} de door de opdrachtgever toegestane standaardafwijking van de werkelijke hoogteligging en σ_{meet} de schatting voor de standaardafwijking van de totale toevallige meetfout. Het verdient aanbeveling om de verschillende waarden voor σ_{eis} , σ_{maak} en σ_{meet} allemaal expliciet in het bestek te noemen. Bij de waarde voor σ_{meet} moet dan tevens worden aangegeven welke typen meet-systemen gebruikt zullen worden, hoe er precies gemeten zal worden (steekproefsgewijs of bodembedekkend, opzet voor raster van meetpunten, beschrijving meettraaien, wijze van opdeling in kleinere meetvakken, etc.) en de wijze waarop men de gemiddelde waarde voor de standaardafwijking uit de diverse meetsignalen zal berekenen. Dit biedt zowel de opdrachtgever als de aannemer de mogelijkheid om de voorgestelde schatting voor de toevallige meetfout op zijn juistheid te kunnen beoordelen en hier al dan niet mee accoord te kunnen gaan. Ten aanzien van de voor σ_{eis} aan te houden waarden dient de bestekschrijver rekening te houden met de in dit rapport vermelde gangbare waarden voor de diverse maak- en meetnauwkeurigheden. Te kleine waarden voor σ_{eis} kunnen leiden tot onuitvoerbare bestekken, te grote waarden tot onnodig grote onnauwkeurigheden in het uitgevoerde werk. Opdrachtgevers moeten zich hierbij ook afvragen in hoeverre strenge eisen aan de toleranties van een baggerwerk of steenbestorting vanuit functioneel oogpunt ook werkelijk noodzakelijk zijn. Aan de toleranties voor een bodembescherming in een kanaal of rivier hoeven bijvoorbeeld meestal niet zulke hoge eisen te worden gesteld als aan de toleranties voor zinkerdekkingen en bestortingen bij kademuren.

Ten aanzien van de gevolgen bij het niet voldoen aan de gestelde eisen moet vooral worden stilgestaan bij de vraag in hoeverre het redelijk is dat de aannemer in bepaalde situaties op zal draaien voor de kosten van eventueel benodigde aanvullende werkzaamheden. Wanneer de bestekschrijver bijvoorbeeld toch voorschrijft dat de gemiddeld gerealiseerde laagdikte ook met dieptemetingen moet worden gecontroleerd, dan zal hij zich moeten realiseren dat het niet redelijk is wanneer de aannemer als gevolg van deze keuze en door toedoen van meetfouten buiten zijn schuld hierdoor op kosten kan worden gejaagd. Er valt iets voor te zeggen om in dergelijke gevallen het aanvullend stortwerk - indien gewenst - voor rekening van de opdrachtgever te laten uitvoeren. De opdrachtgever moet dan voor zichzelf de afweging maken in hoeverre een bij de oplevering te laag gemeten niveau voor de bovenzijde van een bestorting het gevolg is van een werkelijk tekort aan laagdikte of van meetfouten. Hij kan ook genoeg nemen met het te laag gemeten niveau, in de wetenschap dat de vereiste laagdikte in werkelijkheid waarschijnlijk wel gehaald zal zijn. Alleen bij werkelijk aantoonbare nalatigheid van de aannemer zou men deze voor de kosten daarvan moeten laten opdraaien.

Tot slot zij opgemerkt dat van groot belang is om alle in het bestek gebruikte begrippen expliciet en eenduidig te definiëren. Bij het gebruik van het woord meetnauwkeurigheid is nogal wat discussie mogelijk. Gaat het om puntmetingen of over het meten van een vlak? Gaat het over de nauwkeurigheid van één meetwaarde of over de nauwkeurigheid van een gemiddelde van een reeks meetwaarden met bijbehorende standaardafwijking? Om welke standaardafwijking gaat het: om de standaardafwijking van verschillende meetwaarden binnen één meetvak, om de standaardafwijking van verschillende gemiddelde waarden van meerdere meetvakken, of om weer een andere

maat? En wat moet worden verstaan onder "het niveau van het te meten oppervlak"? Is dit het niveau van de toppen van de bodem, het niveau dat correspondeert met het referentievlak dat uit de gegevens over de gestorte massa kan worden afgeleid, het door meetsystemen (en door welke meetsystemen?) opgemeten niveau? Een andere vraag is hoe de begrippen vlakheid en ruwheid worden gedefinieerd: hoe worden deze uit de metingen bepaald? Wordt hierbij wel of niet expliciet onderscheid gemaakt tussen de altijd aanwezige natuurlijke ruwheid en de als gevolg van maakonnauwkeurigheden optredende toegevoegde ruwheid? Belangrijk in het verkeer tussen opdrachtgever en aannemer is dat uitgegaan wordt van eenzelfde formulering van begrippen. Daarnaast moet duidelijk zijn hoe omgegaan moet worden met zaken als proeffouten, systeemfouten en reproduceerbaarheid van metingen. Het verschaffen van duidelijkheid over al deze aspecten geldt voor de bestekschrijver als eerste aanbeveling.

5. Samenvatting

In dit rapport zijn diverse aspecten met betrekking tot het maken en opmeten van bagger- en bestortingswerken toegelicht. Recente ervaringen tijdens verschillende projecten hebben uitgewezen dat er tussen opdrachtgevers en aannemers bij de oplevering van een werk makkelijk onenigheid kan ontstaan over de werkelijk gerealiseerde kwaliteit van dat werk. Deze problemen betroffen vooral de controle van bestortingswerken. In het licht van deze problemen werd het wenselijk geacht zowel opdrachtgevers, aannemers als bestekschrijvers in de gelegenheid te stellen op relatief eenvoudige wijze meer kennis te verwerven over de details van deze materie. Dit rapport beoogt in deze behoefte te voorzien.

In hoofdstuk 2 is eerst het begrip maaknauwkeurigheid toegelicht. Begrippen als de natuurlijke ruwheid en de toegevoegde ruwheid van een bodem zijn

eerst in algemene zin beschreven, waarna voor zowel de baggerwerken als de bestortingswerken in een aparte paragraaf dieper is ingegaan op de grootte van de maaknauwkeurigheden die men bij de uitvoering van deze werken in het algemeen kan verwachten. Daarbij zijn zowel enkele theoretische beschouwingen als gemiddelde praktijkwaarden voor de diverse onnauwkeurigheden aan de orde gekomen. De kwantitatieve informatie is hierbij alleen gegeven om de lezer een indruk te geven over de orde van grootte van de maaknauwkeurigheden. Afwijkingen van deze waarden zijn in de praktijk zeker niet ondenkbaar.

De gang van zaken rond het opmeten van bagger- en bestortingswerken is uitvoerig beschreven in hoofdstuk 3. Omdat vooral veel problemen zijn ontstaan bij de controle van bestortingswerken is veel aandacht besteed aan juist dit onderdeel.

Diverse begrippen zijn eerst in algemene zin toegelicht, onder meer de definitie voor "het niveau" van een bodem, in verband hiermee de relaties tussen het niveau van de toppen van een bodem, het gemiddeld gemeten niveau en het niveau dat correspondeert met de totaal gestorte massa in een stortvak, de mate van indringing van een meetsignaal in een bodem en de mogelijke zakking en verdichting van onderliggende lagen en fysieke indringing van de stenen van een bestorting in deze onderliggende lagen tijdens het storten. Bij de beschrijving van de meet- onnauwkeurigheden bij het baggeren is ook wat dieper ingegaan op de fouten die te maken hebben met de horizontale plaatsbepaling en de kwaliteit van de inrichting van het meetstelsel als geheel. Deze fouten kunnen bij de controle van baggerwerken een belangrijke rol spelen. Bij de controle van bestortingen zijn vooral de mogelijke fouten met betrekking tot de indringing van een meetsignaal in de bestorting en indringing van de bestorting in de onderliggende lagen van belang. Deze onderdelen zijn bij de behandeling van de meet-onnauwkeurigheden bij het controleren van bestortingen daarom centraal gesteld. Aan de hand van praktijkgegevens uit het project in de Waalbocht bij St. Andries (lit. [19]) en gegevens die recentelijk bij de dokproef in Dok VI van de firma Verolme zijn verzameld (lit.[20]) is een beeld geschetst van de grote fouten die in dit opzicht kunnen optreden. De genoemde getalswaarden moeten daarbij niet direkt als algemeen geldige richtwaarden worden opgevat. In deze materie gaan op het moment van schrijven van dit rapport nog zoveel onzekerheden schuil dat het nog niet mogelijk is om reeds dergelijke algemeen geldige richtwaarden met betrekking tot dit type fouten te geven. Bij de analyse van praktijkproblemen zou gebruik kunnen worden gemaakt van het denkraam dat in paragraaf 3.5 van lit. [19] voor deze kwestie is geschetst.

Hoofdstuk 4 is tot slot gewijd aan de mogelijke gevolgen van de diverse fouten die kunnen optreden. Bij het meten met echolodingsystemen kunnen met name de schatting voor de vaardiepte boven de toppen van een bestorting en de schatting voor de werkelijk onder water aangebrachte laagdikte van een bestorting significante problemen opleveren. In verband hiermee zijn enkele aanbevelingen gedaan om deze problemen in de praktijk beheersbaar te kunnen maken. Aan de keuze voor de opzet van contracten met betrekking tot de uitvoering van bestortingswerken is daarbij relatief veel aandacht besteed.

Begrippen, definities en afkortingen

In dit rapport zijn de volgende begrippen, definities en afkortingen gehanteerd:

VBKO

Vereniging van waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken

CROW

Centrum voor Regelgeving en Onderzoek in de Grond-, Weg- en Waterbouw

CUR

Civiltechnisch Centrum Uitvoering Research en Regelgeving

tolerantie

toegestane afwijking (= het volgens het bestek toegestane verschil tussen het gerealiseerde profiel en het voorgeschreven theoretische profiel)

meetnauwkeurigheid

de mate (en zekerheid) waarin de meetwaarden de feitelijke waarden benaderen

maaknauwkeurigheid

de mate (en zekerheid) waarin het gerealiseerd profiel het theoretisch profiel benadert

niveau van het te peilen oppervlak

verzameling van hoogten in een vlak op de overgang van stof met een vaste naar stof met een vloeibare hoedanigheid

vlakheid

de mate waarin niveaus van punten in een gerealiseerd oppervlak afwijken van het niveau van het ter plaatse van deze punten gemiddeld gerealiseerde vlak

lodingsysteem

systeem dat een geometrische (XYZ), meestal acoustische, representatie van de onderwaterbodem

navigatiesysteem

systeem dat vaarinformatie levert voor het vastleggen van bijvoorbeeld onderwaterbodem

GPS

Global Positioning System (plaatsbepalingssysteem op basis van satellietnavigatie)

dGPS

differential Global Positioning System (plaatsbepalingssysteem op basis van satellietnavigatie)

RTK

Real Time Kynematic plaatsbepalingssysteem

toevallige fout

meetruis

systematische fout

fout waarvoor moet worden gecorrigeerd, of ook wel: fouten, die door een nader te bepalen functie kunnen worden beschreven

herhaalbaarheid

het verschil tussen twee meetresultaten die een enkele waarnemer onder gelijkblijvende omstandigheden met hetzelfde meetsysteem verkrijgt

reproduceerbaarheid

het verschil tussen twee meetresultaten die verschillende waarnemers onder variërende omstandigheden met verschillende meetsystemen verkrijgen

betrouwbaarheid

controleerbaarheid van metingen en gevoeligheid van het eindproduct voor onontdekte fouten

Literatuuropgave

[1] Grondig schoon baggeren van te saneren waterbodems, studie naar milieu-effectieve baggertechnieken, Romke van der Veen consulting engineer, i.o.v.

Rijkswaterstaat directie Noordzee;

[2] BS 6349 Maritime Structures, Part 5 "Code of practice for dredging and land reclamation";

[3] Gebruik, beheer en onderhoud van singlebeam lodingen, Rijkswaterstaat Voorschrift nr. 923.00.L006;

[4] Gebruik, beheer en onderhoud van multibeam lodingen, Rijkswaterstaat Voorschrift nr. 923.00.L010;

[5] Testen met het padlodingssysteem ISIS 100, rapport MD-GAM-9756, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, september 1997;

[6] Dynamische dagen met het padlodingssysteem FANSWEEP-20-200, delen I en II, rapport MD-GAM-9740, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, juni 1996;

[7] Detail-ontwerp Vaste Laag bocht St. Andries (A-VL-96000), Haskoning i.o.v. Rijkswaterstaat directie Oost-Nederland, januari 1996;

[8] Evaluatie Realisatiefase bochtverbetering Erlecom, B-WB-96005, Rijkswaterstaat directie Oost-Nederland, januari 1997;

[9] Deel 23 Rapportage Baggerproeven Ketelmeer POSW Fase II (1992-1996), RIZA Rapport 97023, ISBN 9036950708;

[10] Pilot Baggertechniek Metingen MBW-R-98014, Rijkswaterstaat directie Oost-Nederland en Bouwdienst Rijkswaterstaat, juni 1998;

[11] Realisation of the Ketelmeer Storage Depot, Terra et Aqua, number 71 - juni 1998, Roukema, Driebergen en Fase;

[12] CUR Report 169, Manual on the use of rock in hydraulic engineering, CUR en Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, 1995;

[13] Het optimaal benutten van de dicht-

heid en de wateropneming van loskorrelige steenmaterialen in waterbouwkundige constructies, DWW rapport P-DWW-98-073, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, oktober 1998, ISBN 9036937434;

[14] Environmental aspects of dredging, Machines, Methods and Mitigation, IADC/CEDA, Den Haag/Delft, 1998, ISBN 9075254091;

[15] Multibeam Echosounder System Evaluation Trials, Van Oord ACZ Survey Department, May 1998;

[16] Diverse Buitenlandse contractonderdelen, verzameld en ingebracht door Gemeentewerken Rotterdam;

[17] Notitie AK-N-98198 m.b.t. definities t.b.v. maak- en meetnauwkeurigheden, Ing. G.J. Laan, Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde, november 1998;

[18] Toleranties in RAW-bestekken bij grondverzet in den natte en steenbestortingen onder water: beschouwingen rond nauwkeurigheden bij het maken en meten, CROW-werkgroep Maak- en meettoleranties in de waterbouw, versie 25 maart 1999;

[19] Ontmenging en variatie in laagdikte van granulaire materialen bij toepassingen in waterbouwkundige constructies, hoofdstuk 3, Prof. drs. ir. J.K. Vrijling, Ir. M. Hauer, Ir. T. van der Meulen, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek, september 1999;

[20] Een onderzoek naar hoogteligging breuksteen met multi- en singlebeam echosounders, onderzoeksrapport, uitvoeringsrapport & appendix, Gemeentewerken Rotterdam, Port of Rotterdam, Baggermaatschappij Boskalis, Rijkswaterstaat & Vereniging van waterbouwers in bagger-, kust- en oeverwerken, december 1999;

[21] Inventarisatie akoestische meetsystemen, Dr. ir. N.A. Kinneging, Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Geo-Advisering - Advies en Onderzoek

Plaatsbepaling (GAP), MD-rapport MDGAP - 9812, februari 1998;

[22] Kwaliteit van digitale terrein modellen (DTM's), Dr. ir. N.A. Kinneging [et al], Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Geo-Advisering - Advies en Onderzoek Plaatsbepaling (GAP), concept, december 1998;

[23] Procedures en precisie van multi-beam gegevens, Dr. ir. N.A. Kinneging [et al], Meetkundige Dienst Rijkswaterstaat, Hoofdafdeling Geo-Advisering - Advies en Onderzoek Plaatsbepaling (GAP), concept, september 1998;

[24] CUR Report 182, Geofysische technieken voor grondonderzoek, CUR, GG-TNO, Fugro en Grondmechanica Delft, februari 1996;

[25] Inzetbaarheid van Draadgrijskranen, Ir. W.G. Borst & Prof. ir. W.J. Vlasblom, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, Vakgroep Transporttechnologie, mei 1997;

[26] Onderzoek naar het stortresultaat van een steenstorter (verhalend storten), Verslag Q 673 deel I, Waterloopkundig Laboratorium Delft, november 1989;

[27] De vlakheid van steenbestortingen, O.W.A. Weustink, afstudeerscriptie Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek, februari 1998;

[28] Model for the falling processes of stones dumped in water from a point source, Ir. W. Meermans, Technische Universiteit Delft, Faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen, afdeling Waterbouwkunde en Geotechniek, maart 1998;

[29] Een brede bocht: evaluatie van de surveywerkzaamheden voor de verbetering van de bocht in de Waal te Sint Andries, Ir. K.G.F. van den Berg, Directie Oost-Nederland RWS, Afdeling Nieuwe Werken, november 1998.

Voorbeeld van een selectie-tabel voor meetssystemen naar meetgebied en aard van de meting, zoals in gebruik bij het Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam in juni 1998

lokatie/soort	lodingsysteem	plaatsbepaling	nauwkeurigheid (+/-)
nautische/ onderhoudsloding Europoort (eis: $\sigma = 20$ cm)	multibeam Fansweep alt: singlebeam Deso	dGPS t.z.t. RTK	Fansweep: $\sigma = 20$ cm dGPS: $\sigma = 2$ m RTK: $\sigma = 10$ cm Deso: $\sigma = 20$ cm
nautische/ onderhoudsloding Botlek (eis: $\sigma = 20$ cm)	multibeam Fansweep alt: singlebeam Deso	dGPS t.z.t. RTK	Fansweep: $\sigma = 20$ cm dGPS: $\sigma = 2$ m RTK: $\sigma = 10$ cm Deso: $\sigma = 20$ cm
nautische/ onderhoudsloding Stadshaven (eis: $\sigma = 20$ cm)	multibeam Fansweep alt: singlebeam Deso	dGPS t.z.t. RTK alt: Artemis	Fansweep: $\sigma = 20$ cm dGPS: $\sigma = 2$ m RTK: $\sigma = 10$ cm Deso: $\sigma = 20$ cm Artemis: $\sigma = 50$ cm
nautische/ onderhoudsloding Hartelkanaal (eis: $\sigma = 20$ cm)	multibeam Seabat alt: singlebeam Deso	RTK alt: dGPS	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm Deso: $\sigma = 20$ cm dGPS: $\sigma = 2$ m
inspectie kademuur (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat	RTK	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm
inspectie loding zinkerdekking (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat alt: singlebeam Deso	RTK alt: Artemis alt: dGPS	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm Deso: $\sigma = 20$ cm Artemis: $\sigma = 50$ cm dGPS: $\sigma = 2$ m
inspectie loding rond bruggen en tunnels (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat	RTK alt: Artemis	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm Artemis: $\sigma = 50$ cm
inspectie loding onderwateraluds (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat	RTK	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm
monitoring erosie (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat	RTK	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm
begeleiding werken in uitvoering (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat	RTK	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm
begeleiding baggerwerken in uitvoering (eis: $\sigma < 20$ cm)	multibeam Seabat alt: singlebeam Deso	RTK alt: dGPS	Seabat: $\sigma = 10$ cm RTK: $\sigma = 10$ cm Deso: $\sigma = 20$ cm dGPS: $\sigma = 2$ m

Gemeentewerken Rotterdam Ingenieursbureau

Gemeentewerken
ROTTERDAM

Vereniging van waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken



Gemeentelijk Havenbedrijf Rotterdam



juli 2000

