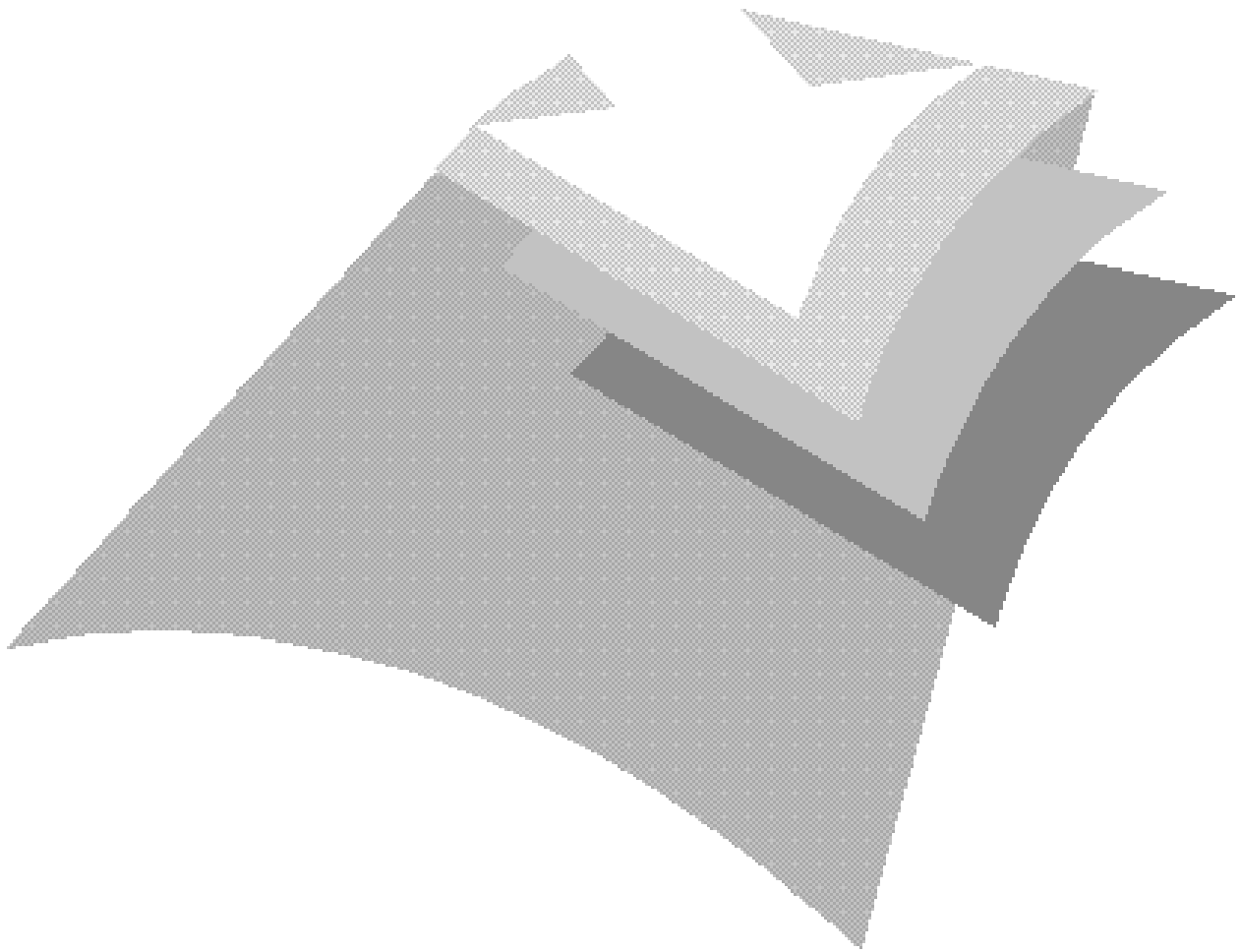


Rijkswaterstaat en het bathymetry assessment system

Verleden, heden en toekomst

Rapport MS2000+.97.08



Meetstrategie 2000+

Rijkswaterstaat en het bathymetry assessment system

Verleden, heden en toekomst

Rapport MS2000+.97.08

dr. J. Vogelzang

17 juli 1997



Ministerie van Verkeer en Waterstaat
Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat
Meetstrategie 2000+

Colofon

Uitgave :
Programmabureau Meetstrategie 2000+
Rijkswaterstaat
Postbus 20907
2500 EX Den Haag



Inhoud

1. Inleiding	1
2. Geschiedenis	3
3. Werking	7
3.1. Algemeen	7
3.2. Voorwaarts model	8
3.3. Invers model	10
4. Demonstraties	13
4.1. Validatie van het BAS	13
4.2. Zandgolven bij Meetpost Noordwijk	15
4.3. Kust bij Zeebrugge	16
4.4. Noordkust van Terschelling	17
4.5. Centrale Waddenzee - 1	18
4.6. Centrale Waddenzee - 2	20
4.7. Plaatgat	22
4.8. Slijkgat, Slijkgeul en Loswal Noord	24
4.9. Validatie Loswal Noord	26
4.10. Zeegat van Ameland	28
5. Mogelijkheden en beperkingen	30
5.1. Toepassing van het huidige BAS	30
5.2. Bevindingen uit achtergrondsonderzoek	31
5.3. Mogelijkheden tot verbetering	32
6. Afkortingen en begrippen	33
6.1. Afkortingen	33
6.2. Begrippen	34

Bijlagen

Bijlage 1. Lijst van figuren	37
------------------------------	----



1. Inleiding

Dieptegegevens zijn onontbeerlijk voor adequaat beleid en beheer van de Nederlandse kust. Thans worden deze gegevens ingewonnen met behulp van (single of multi beam) echolood vanaf schepen. Dit vergt veel personele en financiële inspanning. Rijkswaterstaat heeft daarom al geruime tijd belangstelling voor nieuwe meetmethodes om informatie over de ligging van de zeebodem op efficiëntere wijze te vergaren.

Het Bathymetry Assessment System (BAS) is zo'n methode. Het BAS is een zogenaamd integraal waarnemingssysteem. Diepte kaarten worden vervaardigd op basis van radarbeelden opgenomen vanuit een satelliet (of een vliegtuig), wiskundige modellen en een beperkt aantal echolodingen.

Het BAS lijkt vooral bruikbaar voor monitoringslodingen (vaklodingen en kustlodingen). Deze verwachting is gebaseerd op een aantal demonstraties die in de afgelopen jaren met het BAS zijn verricht. Ontwikkeling van het huidige BAS tot een operationeel systeem binnen Rijkswaterstaat (RWSBAS) vergt nog een flinke inspanning. Voordat een dergelijke ontwikkeling kan worden gestart dient er binnen Rijkswaterstaat consensus te bestaan over de eisen waaraan RWSBAS moet voldoen. Een dergelijke consensus kan alleen dan worden bereikt wanneer alle betrokkenen over voldoende informatie beschikken.

Deze informatie is weliswaar beschikbaar, doch verspreid over een groot aantal rapporten, waarvan een aantal in het Engels geschreven is. Bovendien bevatten de rapporten veel doublures, zoals bijvoorbeeld de beschrijving van het BAS. Hierdoor is het moeilijk een omvattend beeld te verkrijgen over de mogelijkheden en beperkingen van het BAS. Dit rapport beoogt dan ook om de informatie uit de diverse rapporten te bundelen. Het gaat vooral in op de technisch-inhoudelijke kant van de zaak. Er wordt weinig aandacht besteed aan kosten/baten en organisatorische aspecten. Hiervoor wordt verwezen naar de definitiestudie [*Jager en Landa, 1996*].

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de ontwikkelingen die hebben geleid tot de huidige versie van het BAS. Deze poging tot geschiedschrijving is niet essentieel voor beoordeling van de mogelijkheden en beperkingen van het BAS, maar toont wel aan dat het BAS het produkt van een langlopende ontwikkeling is.

In hoofdstuk 3 wordt stap voor stap de werking van het BAS geschetst. Er wordt hier vrij diep ingegaan op de fysica achter het beeldvormend mechanisme en de wiskundige ideeën achter het BAS, echter zonder gebruik te maken van formules. In het bijzonder wordt een aantal technische termen gedefinieerd. Ook dit hoofdstuk is niet essentieel voor beoordeling van de mogelijkheden en beperkingen van het BAS. Het beoogt echter wel bij te dragen aan een beter begrip waarom het huidige BAS bepaalde beperkingen heeft.

Hoofdstuk 4 geeft een overzicht van alle demonstraties die tot dusver voor Rijkswaterstaat, voor de Beleidscommissie Remote Sensing



(BCRS) of voor de Europese Gemeenschap (EG) zijn gehouden. Van iedere demonstratie worden de volgende kenmerken gemeld:

- naam van het project en de opdrachtgever(s);
- locatie en aard van het gebied waar het project plaats vond;
- de gevolgde werkwijze;
- de behaalde resultaten, in het bijzonder de nauwkeurigheid van de diepteschattingen;
- eventuele bijzonderheden;
- beschikbare rapportages.

De belangrijkste kenmerken zijn nog eens samengevat in een tabel. Hoofdstuk 4 laat zien hoe in de loop van de tijd de nauwkeurigheid van het BAS verbetert en het toepassingsgebied groter wordt.

In hoofdstuk 5 wordt een overzicht gegeven van de huidige mogelijkheden en onmogelijkheden van het BAS. Een aantal van de thans geldende beperkingen kan in principe worden verbeterd. Er wordt daarom ingegaan op de resultaten van achtergrondsonderzoek dat in Europees kader wordt uitgevoerd. Tenslotte wordt aangegeven op welke punten het BAS verder verbeterd kan worden.

Een aantal afkortingen en begrippen worden samengevat in hoofdstuk 6.

Hoofdstukken 4 en 5 vormen het meest belangrijke deel van dit rapport. Op basis van het materiaal in hoofdstukken 4 en 5 wordt geconcludeerd dat het BAS qua nauwkeurigheid bruikbaar is voor inzet bij monitoringslodingen (vaklodingen en kustlodingen). Voor operationeel gebruik dient het BAS te worden uitgebreid met een twee-dimensionaal invers model.

Alle resultaten in dit rapport zijn verkregen met het BAS dat eigendom is van het Waterloopkundig Laboratorium c.q. de firma ARGOSS. Wanneer het BAS inderdaad operationeel gebruikt gaat worden binnen Rijkswaterstaat, zullen aanpassingen aan de wensen van Rijkswaterstaat nodig zijn. Een dergelijke versie heet RWSBAS. Een eerste, pre-operationele versie van RWSBAS is thans aanwezig bij de Meetkundige Dienst voor testdoeleinden. Overigens wordt het traject om te komen tot een operationeel BAS ook aangeduid als RWSBAS.



2. Geschiedenis

Het is geruime tijd bekend dat onder gunstige omstandigheden (matige wind en sterke getijstroom) de topografie van de zeebodem zichtbaar is op radarbeelden. Dit verschijnsel is in 1969 ontdekt door G.P. de Loor van het Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO (FEL-TNO). Radarbeelden van de zee in de buurt van Meetpost Noordwijk lieten golfachtige structuren zien die door De Loor werden toegeschreven aan zandgolven.

Figuur 1 toont het radarbeeld uit 1969, opgenomen ten westen van Hoek van Holland. De zandgolven zijn, zij het met enige moeite, zichtbaar als smalle lichte of donkere strepen die van linksboven naar rechtsonder lopen. Tevens zijn schepen te zien als lichte punten waarvan sommigen met een duidelijk kielzog. De grillige witte lijnen worden veroorzaakt door fronten veroorzaakt door de uitstroom van de Rijn. De strepen in het midden worden veroorzaakt doordat de radar hier recht naar beneden kijkt en geen details kan onderscheiden (hetzelfde verschijnsel treedt op bij de radar in het vliegtuig van de Kustwacht).

Op zich is het uiterst merkwaardig dat bodemstructuren zichtbaar zijn op radarbeelden. Bij de gangbare radargolf lengtes (ongeveer tussen 1 cm en 60 cm) is zeewater een vrijwel perfecte geleider. De radarstraling dringt niet door in het zeewater, maar beeldt alleen het oppervlak af. Met "radarogen" zou zeewater er net zo uitzien als kwik. De Loor vermoedde dat de zandgolven het stromingspatroon aan het oppervlak beïnvloeden, hetgeen veranderingen in de ruwheid van het zeeoppervlak veroorzaakt. Deze verschillen in ruwheid zijn zichtbaar op radarbeelden als variaties in de intensiteit van het beeld.

Rond 1974 en 1975 zijn er voor de Nederlandse kust een aantal experimenten uitgevoerd om te onderzoeken in hoeverre radarbeelden gebruikt kunnen worden voor het detecteren van olievlekken. Dit leidde uiteindelijk tot operationeel gebruik van Side Looking Airborne Radar (SLAR) voor oliedetectie. Tijdens deze experimenten werd regelmatig bodemtopografie waargenomen op radarbeelden. Het feit dat de patronen op dezelfde plaats bleven gedurende een tijdspanne van een jaar of langer bewees onomstotelijk dat inderdaad bodemstructuren zichtbaar waren. Bovendien bleek dat bodemstructuren alleen zichtbaar zijn bij voldoende stroming en bij zwakke tot matige wind, en dat het contrast afhangt van de stroomrichting.

Het verschijnsel kreeg rond 1978 internationale aandacht met de missie van de Amerikaanse SEASAT, een satelliet met aan boord onder andere een zogenaamde Synthetic Aperture Radar (SAR), een type beeldvormende radar. SEASAT registreerde spectaculaire beelden van zandbanken en zandgolven in het Kanaal en voor de Amerikaanse oostkust. Helaas functioneerde SEASAT slechts gedurende drie maanden (boze tongen beweerden dat de satelliet moedwillig was uitgeschakeld door het Pentagon, omdat de radarbeelden te veel lieten zien van militaire installaties). De SEASAT missie leidde tot grote activiteit op experimenteel en theoretisch gebied. In 1984 kwamen W. Alpers en I. Hennings met de eerste theoretische verklaring voor het



fenomeen. Hierin werden de eerdere vermoedens van de Loor bevestigd.

In 1987 begon in Nederland de projectgroep bodemtopografie haar activiteiten. Deze groep bestond uit Rijkswaterstaat (RWS), Waterloopkundig Laboratorium (WL), Fysisch en Elektronisch Laboratorium TNO (FEL-TNO) en het Nationaal Lucht-en Ruimtevaartlaboratorium (NLR). Directe aanleiding was de voorgenomen lancering van de eerste Europese Remote Sensing satelliet (ERS-1) door de Europese Ruimtevaartorganisatie ESA. De ERS-1 kan gezien worden als de opvolger van SEASAT en heeft eveneens een beeldvormende radar aan boord. De ERS-1 is in 1991 met succes gelanceerd en in 1995 opgevolgd door de ERS-2. Financieel ondersteund door de Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS) in het kader van het Nationaal Remote Sensing Programma (NRSP) verrichte de projectgroep bodemtopografie onderzoek aan het waarnemen en karteren van de zeebodem met radar. Dit onderzoek was in eerste instantie verkennend van aard, met een grote wetenschappelijke component. Het leidde tot modellen voor het beeldvormend mechanisme die met succes de waarnemingen konden beschrijven. Deze modellen zijn zogenaamde *voorwaartse* modellen. Dat wil zeggen dat deze modellen vanuit een dieptekaart voorspellen hoe een radarbeeld eruit zal zien.

Figuur 2 toont een volledig ERS beeld van de Voordelta met duidelijke signaturen van geulen, platen, zandbanken en zandgolven. Er is geen verklaring voor de streperige patronen in Oosterschelde en Westerschelde. Vermoedelijk hebben zij te maken met het feit dat de wind erg zwak was tijdens het maken van de opname. Figuur 3 is een vergroting van het deel midden boven in Figuur 2, en laat duidelijk de structuur van de zandbanken en zandgolven zien.

Rond 1991 begon de groep van G.J. Wensink, toen verbonden aan het Waterloopkundig Laboratorium maar sinds 1 oktober 1995 zelfstandig opererend als ARGOS B.V., met het zoeken naar methodes om de voorwaartse modellen te inverteren, teneinde dieptekaarten te kunnen vervaardigen uit radarbeelden. Immers, de ERS-1 leverde goede radarbeelden van een groot gebied (ongeveer $100 \times 100 \text{ km}^2$) met grote regelmaat (ongeveer eens per twee weken) tegen relatief geringe kosten (\pm fl. 2000,00 of minder). Dit leidde tot het zogenaamde Bathymetry Assessment System, afgekort als BAS. Al snel bleek dat diepteschatting uit radarbeelden pas dan nauwkeurige resultaten oplevert wanneer een beperkt aantal raaien met echolodgingen wordt meegenomen. Zo kan het BAS de precisie van echolodgingen (± 20 à 30 cm) combineren met het overzicht van radarbeelden ($100 \times 100 \text{ km}^2$).

Het Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ) van Rijkswaterstaat toonde vanaf het begin grote interesse in deze ontwikkeling. Een eerste voorzichtige toepassing vond plaats in het Europese project "Mapping of sea bottom topography in a multi sensor approach". Daarna is het BAS voor Directie Noord Nederland (DNN) gedemonstreerd aan de Noordkust van Terschelling (project "ERS-1/NOUR-TEC") en in de Waddenzee (projecten "ERS-1/VAKLOD" en "EIBERS"). Gedurende deze projecten is het BAS steeds verder uitgebreid en verbeterd.



Eind 1994 vond Directie Noord Nederland (DNN) de resultaten dusdanig belangwekkend dat zij RIKZ aanraade de overige kustdirecties, en met name hun meetdiensten, op de hoogte te brengen van deze ontwikkeling, teneinde een gezamenlijk standpunt te bepalen. Inmiddels raakte ook de Meetkundige Dienst (MD) geïnteresseerd in het BAS. In het voorjaar van 1995 waren alle kustmeetdiensten en het Periodiek Overleg Hoofden Meetdiensten (POHM) geïnformeerd. Dit leidde tot twee nieuwe demonstratieprojecten. Het eerste project was "ERS-1/Plaatgat", samen met DNN en Directie Noord Holland (DNH). Het tweede project was "ERS-1/Slijk-gat/Slijkgeul/Loswal Noord", samen met Directie Noordzee (DNZ), Directie Zuid Holland (DZH) en Directie Zeeland (DZL). Deze projecten zijn in de tweede helft van 1995 uitgevoerd. Tevens liet de MD een definitiestudie en een globaal systeemontwerp uitvoeren. In de definitiestudie werd bekeken in hoeverre het BAS toepasbaar kan zijn binnen Rijkswaterstaat en wat de financiële en personele gevolgen van eventuele invoering zouden zijn. In het globaal systeemontwerp werd op hoofdlijnen vastgelegd hoe een operationeel BAS er uit dient te zien.

In 1996 werd Loswal Noord op verzoek van DNZ, DZH en DZL opnieuw bestudeerd in het project "Validatie Loswal Noord". Medio april verrichtte DNZ nieuwe lodingen met een raaiafstand van 50 m. ARGOS kreeg één op de tien raaien aangeleverd, dus raaien met een onderlinge afstand van 500 m, alsmede een aantal radarbeelden van het gebied en enkele hydro-meteo gegevens, met de opdracht hier een dieptekaart van te maken. De overige raaien werden achtergehouden totdat ARGOS de dieptekaart had opgeleverd, teneinde de nauwkeurigheid van de BAS-schattingen objectief vast te kunnen stellen. Het BAS is eveneens toegepast op de Groote Plaat in de Waddenzee, dit ten behoeve van een vergelijkende studie door de MD naar verschillende technieken voor het bepalen van hoogteligging. Tevens werd een aanvang gemaakt met de bouw van een pre-operationele versie van het BAS voor Rijkswaterstaat - de eerste versie van RWSBAS. De oplevering zal begin 1997 zijn. Dit systeem dient om te onderzoeken in hoeverre RWSBAS de verwachtingen kan waarmaken.

Eind 1996 vond de eerste operationele toepassing plaats. In opdracht van de morfologen van RIKZ maakte ARGOS een nieuwe dieptekaart van het Zeegat van Ameland op basis van beschikbare lodingen (uit 1996, maar ook uit de jaren daarvoor) en radarbeelden uit 1996. De resulterende dieptekaart zal gebruikt worden in golf- en stromingsmodellen van dit gebied. De door het BAS geschatte dieptes worden niet gecontroleerd aan de hand van echolodgingen, simpel omdat er niet genoeg echolodgingen zijn.

Het BAS is niet alleen voor Rijkswaterstaat gedemonstreerd, maar ook voor de Europese Ruimtevaartorganisatie ESA (in de Voordelta) en voor oliemaatschappijen (voor de kust van Zeebrugge en in de Duitse Waddenzee). De demonstratie voor de kust van Zeebrugge zal ook in hoofdstuk 4 behandeld worden.

Gedurende al die tijd is er steeds gewerkt aan verbeteringen van componenten van het BAS. Zaken als het voorwaartse model, ruisonderdrukking in SAR beelden en herkenning van niet-bodem fenomenen worden onderzocht in de Europese projecten "Advanced mapping of sea bottom topography in a multi sensor approach for



use in morphodynamic studies" (AMS**3) en "Coastal sediment transport assessment with SAR" (C-STAR). Onderzoek naar betere inversieschema's wordt verricht in opdracht van Rijkswaterstaat (project "2D data assimilatie").



3. Werking

3.1. Algemeen

Het feit dat bodemstructuren zichtbaar zijn op radarbeelden stelde onderzoekers indertijd voor een raadsel. Immers, zeewater is een vrijwel perfecte geleider bij radarfrequenties, zodat de radarstraling niet in het zeewater doordringt maar alleen het oppervlak waarneemt. Kennelijk is er een indirect effect waardoor bodemstructuren veranderingen aan het zeeoppervlak veroorzaken.

Uit experimenten bleek dat bodemstructuren niet altijd zichtbaar zijn. De structuren zijn alleen zichtbaar als er voldoende getijstroom staat. In de praktijk wordt een minimale stroomsnelheid van ongeveer 0.5 m/s aangehouden, een waarde die voor de Nederlandse kust makkelijk gehaald wordt. In een gebied als de Waddenzee, dat bij iedere cyclus van het getij volloopt en weer leeg stroomt, is er vrijwel altijd een deel waar voldoende stroming staat. Bovendien zijn de structuren alleen zichtbaar bij zwakke tot matige wind. Met de ERS-1 zijn bodemstructuren zichtbaar bij een windsnelheid ongeveer tussen 3 m/s en 10 m/s (voor andere radarsystemen kunnen deze getallen iets wijzigen). Tenslotte bleek dat het contrast op de radarbeelden afhangt van de richting van de stroming.

Alvorens over te gaan tot de verklaring van het fenomeen, moeten er eerst twee belangrijke dingen genoemd worden. Het eerste betreft de watergolven. Korte golven blijven laag en reageren snel op veranderingen in de windsnelheid. Lange golven kunnen veel hoger worden, maar hebben veel meer tijd nodig om die hoogte te bereiken. Het blijkt dat onder gelijke windsnelheid en windrichting de hoogte van watergolven met een bepaalde golflengte steeds hetzelfde is. Dat wil zeggen dat het golfspectrum bij zekere windsnelheid en windrichting een zekere *evenwichtswaarde* heeft. Korte golven bereiken het evenwicht snel. Hoe langer de golven, hoe langer het duurt voordat zij in evenwicht komen. Dit wordt geïllustreerd door het feit dat extreem hoge golven tijdens stormcondities pas optreden als de wind lang genoeg en over een groot gebied aanhoudt.

Een tweede belangrijk aspect betreft de verstrooiing van radarstraling aan het zeeoppervlak. Beeldvormende radars kijken altijd schuin naar opzij. Wanneer het zeeoppervlak volkomen glad is, zal de radarstraling van de radar wegkaatsen. Er wordt geen signaal terugontvangen, zodat het zeeoppervlak pikzwart zal verschijnen op het radarbeeld. Pas wanneer het waait verschijnen er golven op het wateroppervlak, en wordt er signaal van de zee teruggestrooid naar de radar. Het eenvoudigste model hiervoor is *eerste orde Bragg verstrooiing* (zo genoemd naar de overeenkomst met verstrooiing van Röntgenstraling aan een kristal). Het blijkt dat radarstraling verstrooit aan watergolven die zich langs de kijkrichting van de radar bewegen en ongeveer dezelfde golflengte hebben als de radarstraling zelf. Dit zijn de zogenaamde *Bragg golven*. De beeldvormende radars van ERS-1 en ERS-2 hebben een golflengte van 5.7 cm. De bijbehorende Bragg golven hebben een golflengte van 7.3 cm. Dit zijn hele korte watergolven. De watergolven waar we normaal op letten hebben een golflengte die minstens honderd of duizend maal zo groot is. In eerste



orde Bragg verstrooiing is de hoeveelheid teruggestrooide radarstraling evenredig met de hoogte van de Bragg golven. Er bestaan uitgebreidere modellen voor radarverstrooiing waarin het effect van langere golven wordt meegenomen. Ook in deze modellen wordt het meeste signaal teruggestrooid door de Bragg golven en hun directe buren. Anders gezegd: de hoeveelheid teruggestrooide radarstraling hangt af van de *ruwheid* van het zeeoppervlak.

3.2. Voorwaarts model

De Duitse onderzoekers W. Alpers en I. Hennings kwamen als eerste met een mechanisme dat de waarnemingen kon beschrijven (*Alpers and Hennings, 1984*). Het is een zogenaamd *voorwaarts model*, dat wil zeggen dat het model uitgaande van de diepte en een paar andere gegevens (stroomvector op een bepaald punt en windvector) voorspelt hoe het radarbeeld eruit zal zien. Het model van Alpers en Hennings bestaat uit drie stappen:

- (1) De interactie tussen bodem en getijstroom veroorzaakt variaties in de stroomsnelheid aan het oppervlak. Deze stap wordt beschreven met een *stromingsmodel*.
- (2) Variaties in de stroomsnelheid aan het oppervlak beïnvloeden de golven. Waar het water versnelt worden de golven "uitgerekt": ze worden langer en lager, en het zeeoppervlak ziet er minder ruw uit. Waar het water vertraagt worden de golven "samengedrukt": ze worden korter en hoger, en het zeeoppervlak ziet er ruwer uit. Deze stap wordt beschreven door een *golfmodel*.
- (3) Veranderingen in de ruwheid van de zee zijn zichtbaar op radarbeelden als variaties in de intensiteit, zoals beschreven door een *radar verstrooiingsmodel* ofwel *radarmodel*.

Figuur 4 illustreert het beeldvormend mechanisme volgens Alpers en Hennings. De stroming versnelt (is "divergent") boven de linker helling. De golven worden lager en de waargenomen (radar-)intensiteit is lager dan gemiddeld. De stroming vertraagt (is "convergent") boven de rechter helling. Hier zijn de golven hoger, evenals de waargenomen intensiteit.

Het mechanisme werkt niet alleen voor radar, maar ook voor zichtbaar licht: veranderingen in de ruwheid van het zeeoppervlak zijn bij gunstige belichting ook met het blote oog zichtbaar als lichtere of donkerder waterpartijen. Vissers weten al eeuwenlang dat dit kan wijzen op zandbanken. Vanaf de duinen zijn de brekerbanken voor de Nederlandse kust vaak zichtbaar als smalle banden van lichter of donkerder water. Stappen 2 en 3 werken niet alleen voor bodemstructuren maar ook voor andere fenomenen die veranderingen in de stroomsnelheid aan het oppervlak veroorzaken, zoals scheepssporen, interne golven, etc. De drie componenten zullen nu elk in iets meer detail worden besproken. Met name zal aangegeven worden welke modellen in het BAS zijn geïmplementeerd.

Radarmodel

Het BAS gebruikt eerste orde Bragg verstrooiing, het meest eenvoudige radar verstrooiingsmodel. De hoeveelheid



teruggestrooide radarstraling is evenredig met de waarde van het golfrichtingsspectrum (hoogte) van de Bragg golven. Meer gecompliceerde modellen zouden eveneens gebruikt kunnen worden. Deze geven echter geen verbeterde beschrijving terwijl ze wel veel meer rekentijd vragen. Als extra invoer heeft het radarmodel de kijkrichting en de hoek van inval nodig, parameters die de geometrie van de waarneming vastleggen.

Golfmodel

Het golfmodel in het BAS verschilt aanzienlijk van een golfmodel zoals dat gebruikt wordt voor de voorspelling van significante golfhoogte en deining. Het BAS kijkt immers alleen naar de Bragg golven, zeer korte watergolven met een golflengte van 7.2 cm. Dergelijke golven reageren snel op veranderende condities. Het golfmodel in het BAS is gebaseerd op de veronderstelling dat de hoogte van de Bragg golven daarom altijd op of dicht bij de evenwichtswaarde ligt. Het golfmodel berekent dan ook afwijkingen ten opzichte van de evenwichtshoogte.

Variaties in de stroomsnelheid zullen de golven uit hun evenwicht halen. Hoe sterker de variaties in stroomsnelheid, hoe sterker het effect op de golven. Processen als wind, dissipatie en golf-golf interacties zullen trachten de golven weer terug te brengen naar hun evenwicht. De snelheid waarmee dit gebeurt heet de *relaxatiesnelheid*. De relaxatiesnelheid bepaalt de grootte van de variaties in golfhoogte, en is een van de belangrijkste parameters in het BAS. Hoe kleiner de relaxatiesnelheid, hoe groter de afwijking van de golfhoogte t.o.v. het evenwicht. De relaxatiesnelheid neemt toe (de golven keren sneller terug naar hun evenwicht) bij toenemende windsnelheid. Korte golven hebben een grotere relaxatiesnelheid (reageren sneller op veranderingen) als lange golven.

Het is vooralsnog te moeilijk om de relaxatiesnelheid te beschrijven vanuit afzonderlijke fundamentele processen als wind, dissipatie en golf-golf interacties. De relaxatiesnelheid is dan ook een slecht bekende grootheid. Er bestaan parametriseringen op basis van metingen en/of theoretische overwegingen, maar deze kunnen onderling wel een factor 10 of meer verschillen. In het BAS wordt de relaxatiesnelheid daarom aangepast aan de metingen, in navolging van Alpers en Hennings. De parametriseringen worden enkel gebruikt voor een eerste schatting van de relaxatiesnelheid. Hiervoor is de windsnelheid en -richting nodig. Het golfmodel in het BAS is daarom een effectief model.

Stromingsmodel

Het BAS heeft de stroming aan het wateroppervlak nodig. In principe zou hiervoor een volledig of quasi drie-dimensionaal stromingsmodel nodig zijn. Echter, het BAS heeft de stroomsnelheden nodig op een fijn rooster, 12.5 m ´ 12.5 m voor ERS-1 beelden. Het is niet doenlijk om een volledig stromingsmodel te draaien op zo'n fijn rooster vanwege de rekentijd. Bovendien kijkt het BAS naar variaties in de intensiteit van een radarbeeld. Deze hangen hoofdzakelijk af van de variaties in de stroomsnelheid en niet zozeer van de grootte. Het stromingsmodel in het BAS werkt als volgt:

- (1) Een operationeel twee-dimensionaal stromingsmodel berekent de gemiddelde (over de verticaal) stroomsnelheid en



stroomrichting op een grof rooster met een roostergrootte van typisch enkele honderden meters. Hiervoor is het tijdstip van opname van het radarbeeld in de getijcyclus nodig.

- (2) Met behulp van vereenvoudigde modellen wordt de gemiddelde stroomsnelheid geïnterpoleerd naar het fijne rooster van het radarbeeld.
- (3) Met een één-dimensionaal profielmodel wordt tenslotte op ieder roosterpunt van het radarbeeld de stroomsnelheid aan het oppervlak berekend. Het effect van de wind kan hierin meegenomen worden.

De vereenvoudigde modellen in stap 2 zijn thans één-dimensionaal: ze berekenen de diepte-gemiddelde stroomsnelheid langs een lijn. Deze beperking wordt niet opgelegd door de stromingsmodellen, maar door het inverse model (zie volgende paragraaf). Het huidige BAS bevat twee één-dimensionale modellen: het *zandgolvenmodel* en het *geulenmodel*.

In het zandgolvenmodel varieert de stroomsnelheid langs de stroomlijnen (zie figuur 5a). De stroomsnelheid dwars op de stroomlijn is constant. De stroomsnelheid wordt bepaald aan de hand van massabehoud. Dit model is het eerst gebruikt boven zandgolven in de Noordzee, en dankt daaraan zijn naam. Het model is echter ook toepasbaar boven andere bodemstructuren zoals zandplaten.

In het geulenmodel varieert de stroomsnelheid juist dwars op de stroomlijnen (zie figuur 5b), en is de stroomsnelheid langs de stroomlijnen constant. Bodenvrijving is hier de grootte die de stroomsnelheid bepaalt. Dit model wordt gebruikt voor geulen zoals die in de Waddenzee voorkomen.

Het voorwaartse model is schematisch weergegeven in figuur 6. Als tussenproducten levert het de stroomsnelheid aan het oppervlak en de hoogte van de Bragg golven.

3.3. Invers model

Zoals reeds eerder opgemerkt, berekent het voorwaartse model vanuit de diepte hoe het radarbeeld eruit zal zien. Voor praktische toepassingen wil men juist het omgekeerde: uit een radarbeeld de diepte bepalen. Het voorwaartse model moet daarom worden omgekeerd (geïnverteerd) tot een invers model.

Dit is makkelijker gezegd dan gedaan om twee redenen. In de eerste plaats is het voorwaartse model niet direct omkeerbaar. Hoewel het voorwaartse model zo eenvoudig mogelijk is, zijn extra benaderingen nodig om het direct te inverteren. Deze extra benaderingen doen de werkelijkheid te veel geweld aan. In de tweede plaats bevatten radarbeelden altijd ruis. Dat is een gegeven waar verder weinig aan te doen valt. Men moet er echter voor oppassen dat het invers model de ruis gaat interpreteren als dieptevariaties. Ruisfilters bieden geen soelaas, omdat ze niet alleen de ruis maar ook het signaal beïnvloeden. Hooguit kan de ruis wat verminderd worden door de radarbeelden opnieuw te berekenen vanuit de ruwe gegevens.



Deze twee problemen zijn opgelost door gebruik te maken van *numerieke inversie*. Deze techniek wordt vaak gebruikt om wiskundige modellen te verbeteren door het gebruik van metingen, en heet dan *data assimilatie*. Een algemene inleiding wordt gegeven door *Knaapen* [1996].

In het BAS werkt dit als volgt: er wordt een zogenaamde *kostenfunctie* opgesteld, die de overeenkomst tussen een berekend en een gemeten beeld beschrijft (de kostenfunctie heeft dus niets met geld te maken). Per pixel (beeldelement) wordt het verschil genomen tussen de intensiteit in het berekende radarbeeld en dat in het gemeten radarbeeld. Dit verschil wordt gekwadrateerd, en alle gekwadrateerde verschillen over het hele beeld worden opgeteld. Het resultaat is de kostenfunctie. Als het berekende beeld precies gelijk is aan het gemeten beeld, zal de kostenfunctie nul zijn. Als er verschillen zijn, zal de kostenfunctie groter dan nul zijn. De intensiteit in het berekende beeld hangt af van de diepte op ieder pixel, van de stroomsnelheid en van de relaxatiesnelheid, zoals beschreven in de vorige paragraaf. Dit zijn dus de variabelen van de kostenfunctie. Afhankelijk van de situatie kan het aantal variabelen enorm groot worden. Het is nu de kunst om deze variabelen, waaronder de dieptewaarden, zodanig te kiezen dat de kostenfunctie zo klein mogelijk is. Het berekende beeld lijkt dan zo goed mogelijk op het gemeten beeld, en de diepte waarbij dat gebeurt is een maat voor de werkelijke diepte.

Wiskundig gezien komt het probleem neer op het vinden van het minimum van een functie met veel variabelen. Men kan gewoon alle variabelen laten variëren en die combinatie kiezen die de kleinste waarde voor de kostenfunctie geeft. Deze methode kost echter veel rekentijd. Wanneer de kostenfunctie 10 variabelen heeft die elk 9 waarden aannemen, zijn er 10^9 (één miljard) aanroepen van het voorwaartse model nodig. En dit is nog maar een heel bescheiden probleem! Gelukkig zijn er slimmere manieren ontwikkeld om dit probleem aan te pakken. Het BAS gebruikt de zogenaamde *gradiënten methode*. Dit is een iteratieve manier. Uitgaande van een beginsituatie wordt gekeken hoe de kostenfunctie verandert wanneer steeds één variabele een klein beetje wordt veranderd. Op basis van deze informatie wordt de zoekrichting bepaald en zoekt het algoritme in die richting naar de minimale waarde van de kostenfunctie. Wanneer deze gevonden is, wordt opnieuw de zoekrichting bepaald en wordt een nieuw minimum gezocht. Dit proces gaat door totdat het minimum bereikt is. Hoe dichterbij de beginschatting bij het minimum zit (dus hoe beter de eerste schatting van de dieptekaart), hoe sneller het algoritme convergeert.

De kostenfunctie wordt ook gebruikt om te voorkomen dat de ruis in het gemeten radarbeeld wordt geïnterpreteerd als dieptevariëaties. Er zit een tweede term in de kostenfunctie die gelijk is aan de som van de bodemhellingen op ieder punt. Voor een vlakke bodem is deze term klein, voor een wild variërende bodem wordt deze groot. Het berekende radarbeeld kan dus nooit precies gelijk zijn aan het gemeten radarbeeld. Immers, het gemeten radarbeeld bevat ruis. Om deze ruis te reproduceren, moet de diepte ook ruis bevatten. De eerste term van de kostenfunctie (verschil tussen gemeten en berekend beeld) is weliswaar klein, maar de tweede term (ruis op de dieptekaart) is groot.



Tenslotte wordt de kostenfunctie gebruikt om lodingen in het BAS mee te nemen. Een derde term in de kostenfunctie beschrijft het verschil tussen gemeten diepte en berekende diepte. Kleine afwijkingen van de berekende diepte t.o.v. de gemeten diepte doen de kostenfunctie al snel toenemen. Met andere woorden, dergelijke escapades worden streng bestraft.

Met deze procedure, schematisch weergegeven in figuur 7, zoekt het BAS een diepte die:

- (1) zo goed mogelijk aansluit bij het gemeten radarbeeld,
- (2) zo glad mogelijk is, en
- (3) zo goed mogelijk aansluit bij de gemeten dieptes.

Merk op dat deze drie eisen tegenstrijdig kunnen zijn, zodat het BAS met een soort compromis komt. Afhankelijk van het relatieve gewicht van de drie termen in de kostenfunctie zal het compromis kunnen verschuiven naar een van de eisen. Dit geeft tevens de mogelijkheid om het BAS te sturen, bijvoorbeeld naar zo goed als mogelijke overeenkomst met het gemeten radarbeeld wanneer alleen verouderde dieptemetingen beschikbaar zijn.

De kostenfunctie kan op allerlei manieren uitgebreid worden. Zo kunnen er meerdere radarbeelden worden meegenomen. Ieder radarbeeld krijgt dan zijn eigen term en zijn eigen gewicht in de kostenfunctie. Goede beelden kunnen zwaarder wegen in de diepteschatting dan minder goede beelden door ze een groter gewicht te geven. Op dezelfde manier kunnen nauwkeurige/recente en minder nauwkeurige/oude dieptemetingen worden meegenomen. Ook kan binnen een radarbeeld onderscheid worden gemaakt door het gewicht afhankelijk te maken van de plaats. Op deze manier kunnen signatures worden onderdrukt van fenomenen die niets met de bodem te maken hebben zoals schepen, scheepssporen en olievlekken.



4. Demonstraties

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van alle demonstraties die met het BAS zijn uitgevoerd in opdracht van Rijkswaterstaat. Bovendien zijn projecten opgenomen die zijn uitgevoerd voor andere opdrachtgevers, voor zover de resultaten daarvan openbaar zijn. Van ieder project wordt vermeld:

1. Naam van het project en de opdrachtgever(s);
2. Locatie en aard van het gebied waar het project plaats vond;
3. De gevolgde werkwijze;
4. De behaalde resultaten, in het bijzonder de nauwkeurigheid van de diepteschattingen;
5. Eventuele bijzonderheden;
6. Beschikbare rapportages.

Aan het eind van het hoofdstuk staan de belangrijkste gegevens nog eens samengevat in tabel 1. Dit hoofdstuk begint met een beschrijving van de methodes die gevolgd zijn om de resultaten van het BAS te controleren. In dit hoofdstuk zal de term dieptekaart niet alleen gebruikt worden voor een papieren kaart op A0 formaat, maar ook voor een digitaal bestand waaruit een dergelijke kaart gemaakt kan worden.

4.1. Validatie van het BAS

De demonstratieprojecten zijn over het algemeen uitgevoerd in relatief kleine gebieden met een oppervlakte in de orde van tientallen kilometers. Van al deze gebieden waren lodingen beschikbaar. Als vuistregel is gesteld dat de tijd tussen het uitvoeren van de lodingen en de opname van het radarbeeld maximaal zes weken mag bedragen, met dien verstande dat er in die periode geen storm is opgetreden. In alle demonstraties waren de lodingen opgenomen met een single beam echolood. De dieptemetingen waren dus beschikbaar als min of meer parallelle raaien.

De meest nauwkeurige dieptekaart wordt verkregen door alle lodingen te combineren met het radarbeeld (of de radarbeelden). Merk op dat de kaart die door het BAS wordt geproduceerd niet precies de gemeten dieptes hoeft te geven langs de lodingsraaien: kleine afwijkingen van enkele centimeters zijn toegestaan. Tussen de raaien is geïnterpoleerd op basis van de informatie in het radarbeeld.

Om de besparing in hoeveelheid echolodgingen te bepalen wordt het raaienpatroon steeds verder uitgedund: het BAS wordt opnieuw gedraaid maar nu met iedere tweede raai, iedere derde raai, vierde raai, etc. De diepte langs raaien die niet zijn meegenomen wordt nu geschat op grond van het radarbeeld en naburige raaien. De gemeten dieptes kunnen nu gebruikt worden om de nauwkeurigheid van de schatting te bepalen.

Boven vlakke platen in de Waddenzee bleek de raaiafstand vergroot te kunnen worden tot enkele kilometers, de omvang van het testgebied. De dieptes zijn in deze gevallen verkregen door voor iedere rand van het testgebied de snijpunten met de lodingsraaien te



bepalen, en de gemeten dieptes op de snijpunten langs rand te interpoleren. Op deze manier lijkt het alsof een rechthoekig raaienpatroon is gevaren. De dieptes in het binnengebied worden vervolgens bepaald door het BAS. Alle metingen in het binnengebied kunnen worden gebruikt om de resultaten van het BAS te controleren.

Deze controle kan op twee manieren. De eerste manier gaat uit van het rooster waarop het BAS de dieptekaart levert, en is schematisch weergegeven in Figuur 8a. De roostercellen van de BAS dieptekaart zijn aangegeven met stippelijnen. Met iedere roostercel is een dieptewaarde verbonden, gesymboliseerd als een punt in het centrum, welke representatief is voor de gehele roostercel. De lodingen zijn aangegeven met de open cirkels. Controle van het BAS is mogelijk voor die roostercellen waarin een of meer lodingen liggen. Deze roostercellen zijn met een getrokken lijn omrand. Meestal vallen meerdere lodingen binnen een roosterpunt, en wordt het gemiddelde van de gemeten dieptes genomen. Dit wordt vergeleken met de schatting van het BAS. De tweede manier gaat uit van de individuele lodingen (zie Figuur 8b). Iedere loding valt binnen het rooster waarin het BAS de diepte heeft berekend. Via interpolatie uit de omringende BAS waarden, aangegeven met de vier getrokken lijnen, kan nu de diepte op ieder willekeurig punt worden berekend en vergeleken met de echoloding.

In de eerste manier wordt het resultaat van het BAS vergeleken met het gemiddelde van een aantal metingen. In het proces van middeling wordt het effect van de toevallige fout in de gemeten diepte kleiner: er zit minder ruis op de gemeten waarden. Vergeleken met de tweede manier zal de eerste manier daarom verschillen tussen lodingen en BAS schatting laten zien die enkele centimeters kleiner zijn.



4.2. Zandgolven bij Meetpost Noordwijk

Projectnaam en opdrachtgever

Het werk vond plaats bij het WL als eigen onderzoek flankerend aan een EEG project in het kader van het Marine Science and Technology (MAST) programma.

Gebied

De eerste test vond plaats in een gebied 20 km ten noordwesten van Meetpost Noordwijk (MPN). Dit gebied wordt vaak gebruikt voor onderzoek naar de afbeelding van bodemtopografie met beeldvormende radar. De bodem wordt gekarakteriseerd door zandgolven met een onderlinge afstand van ongeveer 500 m en een hoogte tussen 2 m en 6 m op een gemiddelde diepte van 22 m. Het gebied heeft een grootte van ongeveer 5 km bij 5 km. Van het gebied is een dieptekaart beschikbaar, opgenomen in 1991 met multi-beam echolood, en een gedetailleerd quasi drie-dimensionaal stromingsmodel.

Werkwijze

In 1989 zijn radarbeelden van het zandgolvengebied ten noordwesten van MPN opgenomen met een gevlogen systeem uit de Verenigde Staten. Een van de beelden laat de steile hellingen van de zandgolven zien als smalle donkere banden, precies zoals verwacht werd op grond van het eenvoudige model van Alpers en Hennings. Dit model beschreef de waarnemingen zo goed, dat inversie voor de hand lag. Als eerste schatting werd een vlakke bodem op een diepte van 22 m gebruikt. Verder zijn er geen echolodingen gebruikt. De stroomsnelheid in het gebied werd berekend met behulp van de continuïteitsvergelijkingen, aangepast aan gemeten stroomsnelheden tijdens opname van het radarbeeld. Figuur 9 toont de resultaten. Links staat de dieptekaart van het gebied welke is opgenomen met multi-beam echosounder. In het midden staat het radarbeeld, en rechts de diepteschatting van het BAS.

Nauwkeurigheid

De uit het radarbeeld berekende dieptes zijn vergeleken met de dieptekaart. De nauwkeurigheid bedroeg ongeveer 50 cm.

Bijzonderheden

Pas later werd duidelijk dat de schattingen aanzienlijk verbeteren wanneer een aantal echolodingen wordt meegenomen.

Rapportages

- J. Vogelzang, 1993, Mapping of sea bottom topography in a multi-sensor approach. In *Mast days and Euromar market*, 15 to 17 March 1993, edited by M. Weydert and C. Fragakis, Commission of the European Communities, ISBN 92-826-5626-8, pp. 534-547.
- J. Vogelzang, G.J. Wensink, C.J. Calkoen, G.H.F.M. Hesselmanns, M.W.A. van der Kooij, W. Alpers, R. Romeiser, V. Wismann, K. Boehnke, I. Hennings, J.P. Matthews, K. Lwiza, J. Bennell, G.P. de Loor and M. Metzner, 1995 Mapping of sea bottom topography in a multi sensor approach. Final report. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.



4.3. Kust bij Zeebrugge

Projectnaam en opdrachtgever

In het project "ZEEPIPE" werden een aantal pijpleidingen gelegd tussen de Noorse gasvelden en de haven van Zeebrugge. Gedurende een dergelijk project zijn dieptegegevens nodig. Het project werd uitgevoerd door het WL in samenwerking met Oceonics Intersite B.V. met financiële ondersteuning van de beleidscommissie remote sensing (BCRS).

Gebied

Het gebied van interesse mat 28 km bij 20 km en lag ten noorden van Zeebrugge. Speciale aandacht ging uit naar een smalle strook van 200 m breed langs de voorgenomen route van de gasleiding. De bodem wordt gekarakteriseerd door zandbanken en zandgolven. De diepte varieert van 5 m tot 37 m.

Werkwijze

Een radarbeeld van het testgebied is gecombineerd met oude dieptegegevens uit de admiralty charts. De aldus verkregen eerste indruk van de bodemligging is veel beter dan wanneer deze verkregen moet worden uit de admiralty charts alleen. In de strook van 200 m breed langs de route van de pijpleiding zijn lodingen uitgevoerd met een multibeam echolood. Met deze gegevens zijn raaien gesimuleerd.

Nauwkeurigheid

De r.m.s. afwijking tussen de lodingen en de BAS schattingen bedroeg 26 cm bij een raaiafstand van 200 m. Deze raaien zijn gesimuleerd door alleen de buitenste metingen van het multi-beam echolood te gebruiken. De diepte tussen de twee raaien is ook bepaald met lineaire interpolatie. De resultaten hiervan zijn minder nauwkeurig dan die van het BAS.

Figuur 10 toont de resultaten van het BAS (streepjeslijn) en de echolodingen (getrokken lijn) langs de route van de pijpleiding. Horizontaal staat de afstand langs de pijpleiding tot het gasveld. Alleen in het linkerdeel zijn enkele kleine afwijkingen zichtbaar.

Bijzonderheden

Met "ERS-1/NOURTEC" is dit het enige project tot dusver waarin de prestaties van het BAS zijn vergeleken met die van een interpolatie. Er is ook een schatting gemaakt van de reductie in kosten voor de diverse fasen van een hydrografische opname ten behoeve van de offshore industrie.

Rapportages

G.H.F.M. Hesselmanns, G.J. Wensink, C.J. Calkoen, and H. Sidhu, 1993, Application of ERS-1 SAR data to support the routing of offshore pipelines. *Report BCRS-93-34*, Netherlands Remote Sensing Board, Rijkswaterstaat, Survey Department, Delft.

G.H.F.M. Hesselmanns, G.J. Wensink, C.J. Calkoen, and H. Sidhu, 1994, Application of ERS-1 SAR data to support the routing of offshore pipelines. *Report H 1787*, Delft Hydraulics, Delft.



4.4. Noordkust van Terschelling

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "ERS-1/NOURTEC" werd uitgevoerd door het WL in opdracht van DNN met steun van het RIKZ. Het doel was na te gaan of de inspanning voor het monitoren van een onderwater suppletie verminderd kon worden door gebruik van het BAS.

Gebied

Dit project vond plaats aan de Noordkust van Terschelling in een gebied van 10 km bij 1.5 km. Hier is in 1992 een experimentele onderwater zandsuppletie uitgevoerd in het kader van het MAST project NOURTEC. De bodem wordt gekenmerkt door brekerbanken parallel aan de kustlijn in de zone van 100 tot 800 m uit de kust. Tussen 800 m en 1500 m uit de kust zijn in het westelijk deel zandgolven dwars op de kustlijn aanwezig, terwijl in het oostelijk deel de bodem alleen een flauwe helling heeft.

Werkwijze

Het gebied is in April 1993 gelood met single beam echolood. De raaiafstand bedroeg 200 m behalve boven de suppletie zelf, waar de raaiafstand 25 m bedroeg. In de periode maart-april zijn drie ERS-1 beelden opgenomen. Het beeld van 7 maart laat de bodemstructuren het duidelijkst zien. Er is uitgegaan van de raaien met 200 m onderlinge afstand. Vervolgens zijn raaien met een afstand van 400 m, 800 m en 1200 m in het BAS ingevoerd.

Nauwkeurigheid

In het zandgolvengebied loopt de r.m.s. afwijking tussen de BAS schattingen en de metingen van 19 cm bij een raaiafstand van 400 m tot 36 cm bij een raaiafstand van 1200 m. Lineaire interpolatie geeft ongeveer een tweemaal zo grote fout, zodat het BAS duidelijk informatie uit het radarbeeld haalt. In het vlakke deel en het deel met de brekerbanken loopt de r.m.s. afwijking van 30 cm bij een raaiafstand van 400 m tot 60 cm bij een raaiafstand van 1200 m. Lineaire interpolatie geeft vrijwel dezelfde nauwkeurigheid, zodat het BAS nauwelijks informatie uit het radarbeeld haalt. Toch zijn de brekerbanken duidelijk zichtbaar in de radarbeelden. De oorzaak is dat de stroomsnelheid boven de brekerbanken wordt gedomineerd door bodemwrijving: de stroomsnelheid is het grootst tussen de brekerbanken. Dit effect was nog niet opgenomen in het BAS. Een kleine diepe put tussen de brekerbanken is niet zichtbaar op de radarbeelden.

Bijzonderheden

Met ZEEPIPE is dit het enige project tot dusver waarin de prestaties van het BAS zijn vergeleken met die van een interpolatie.

Rapportages

C.J. Calkoen, G.J. Hessink, and G.H.F.M. Hesselmanns, 1993, ERS-1 SAR imagery to optimize the NOURTEC shipbased bathymetric survey: feasibility study. *Report H 1875*, Delft Hydraulics, Delft.



4.5. Centrale Waddenzee - 1

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "ERS-1/VAKLOD" is uitgevoerd door het WL in opdracht van DNN met steun van RIKZ. Het project was een vervolg op "ERS-1/NOURTEC" en had als doel na te gaan in hoeverre het BAS besparingen kan opleveren bij vaklodingen. In het project is veel aandacht besteed aan vlakke platen. Deze kunnen immers alleen bij hoog water worden gelood, en dan nog gedurende korte tijd. Zulke gebieden kosten veel inspanning en dicteren de gehele planning.

Gebied

- (1) Hendrik Tjaarsplaat
- (2) Grienderwaard
- (3) Schuitemgat-Oost

De Hendrik Tjaarsplaat is een eenvoudige vlakke plaat met twee kleine geulen in het noordelijk deel. De Grienderwaard is een complexer droogvallend gebied nabij het eiland Griend, terwijl het Schuitemgat-Oost gebied wordt gedomineerd door getijgeulen.

Figuur 11 toont het ERS-1 radarbeeld van 31 mei 1992 van de westelijke Waddenzee. De drie testgebieden alsmede de contouren van Vlieland, Terschelling en Friesland zijn ingetekend. De horizontale en verticale schaal is in km in het Rijksdriehoek meetnet (RDM). Figuur 12 toont de beschikbare vaklodingen op dezelfde schaal als Figuur 11. Let op de overeenkomst in structuren tussen de beide figuren.

Werkwijze

Het BAS is toegepast op bovengenoemde gebieden waarvan vaklodingen beschikbaar waren met een raaiafstand van gemiddeld 200 m. Het aantal raaien dat in het BAS wordt gebruikt is steeds verminderd, waarbij de niet gebruikte raaien dienden ter controle van de nauwkeurigheid van het BAS. Boven de Hendrik Tjaarsplaat is een rechthoekig raaienpatroon gesimuleerd met een raaiafstand van ruim 2 km.

Nauwkeurigheid

Boven de Hendrik Tjaarsplaat werden goede resultaten behaald: de diepte kon worden teruggeschat met een r.m.s. fout van 28 cm en een bias van 9 cm bij een raaiafstand van ruim 2 km. De maximale fout van 100 cm trad op boven een kleine geul.

Toepassing van het BAS was lastiger boven de Grienderwaard. Tijdens de opname van het radarbeeld lagen hier een aantal delen droog. Op een radarbeeld is het lastig om een precieze scheiding aan te brengen tussen drooggevallen en natte delen. Tevens bevatte het beeld enkele storende fenomenen, vermoedelijk natuurlijke drijfzagen. De diepte is teruggeschat voor een gebied van 2 km bij 2.5 km ten oosten van Griend. De r.m.s. afwijking bedroeg 30 cm.

Ofschoon de geulen duidelijk zichtbaar zijn op het radarbeeld, was alleen kwalitatieve vergelijking met de lodingen mogelijk. Immers, geulen zijn zichtbaar op radarbeelden door variaties in stroomsnelheid dwars op de stroomlijnen, een effect dat nog niet in het BAS zat.



Bijzonderheden

Uit deze studie kwamen een groot aantal punten naar voren welke verbetering behoeften:

- (1) De gebruikte handmatige positionering van de radarbeelden is inefficiënt;
- (2) In een gebied als de Waddenzee zijn twee-dimensionale modellen nodig;
- (3) Analyse op basis van meer dan één radarbeeld is nodig om storende fenomenen te kunnen onderscheiden van bodemsignaturen.

Rapportages

C.J. Calkoen and G.J. Wensink, 1993, Use of ERS-1 SAR to optimize ship-based bathymetric surveys in the Waddenzee. *Report H1985*, Delft Hydraulics, Delft.



4.6. Centrale Waddenzee - 2

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "Efficiency Improvement of Bathymetric surveys with ERS-1", acroniem EIBERS, was een direct vervolg op "ERS-1/VAKLOD". Het project werd in 1994 uitgevoerd door WL en RWS met financiële steun van de Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS). Het project had als doel:

- (1) het voorwaartse model uit te breiden naar twee dimensies, en
- (2) het BAS geschikt te maken voor analyses gebaseerd op meerdere radarbeelden (multi image analysis).

Gebied

Het project besloeg de volgende deelgebieden:

1. Hendrik Tjaarsplaat (zelfde gebied als in "ERS-1/VAKLOD")
2. Noord Meep

Werkwijze

De kostenfunctie is uitgebreid zodat de diepteschattingen kunnen worden uitgevoerd op basis van meer dan één radarbeeld. De diepte boven de Hendrik Tjaarsplaat is opnieuw geschat, maar nu op basis van vier radarbeelden in plaats van één zoals in "ERS-1/VAKLOD". De gewichten zijn "op het oog" bepaald. Twee radarbeelden waren van goede kwaliteit en kregen gewicht 1, de twee andere beelden waren van redelijke kwaliteit en kregen gewicht 1/2. Er zijn dus effectief drie beelden gebruikt.

Het voorwaartse model is uitgebreid naar twee dimensies. Voor wat betreft het radar verstrooiingsmodel en het golfmodel was dit betrekkelijk eenvoudig. Voor wat betreft het stromingsmodel was meer inspanning vereist. Immers, het stroomveld moet berekend worden op een zeer fijn rooster (12.5 m bij 12.5 m), en de berekening mag niet te veel tijd kosten. Het model blijkt goed in staat de signaturen van getijgeulen op radarbeelden te beschrijven. Tijdens het project werd duidelijk dat het inverse model niet eenvoudig uitgebreid kon worden naar twee dimensies. Daarom zijn geen gedetailleerde dieptekaarten boven getijgeulen gemaakt, maar zijn alleen geulparameters als maximale diepte, helling van de geulwand en geulbreedte teruggeschat.

Nauwkeurigheid

De r.m.s. afwijking tussen echolodingen en BAS schattingen voor de diepte boven de Hendrik Tjaarsplaat liep terug van 28 cm bij gebruik van één beeld (zie paragraaf 4.5) tot 19.5 cm bij gebruik van effectief drie beelden. Deze verbetering in de nauwkeurigheid wordt toegeschreven aan het verminderde effect van ruis bij gebruik van meer beelden. Figuur 13 toont een scatterplot voor de Hendrik Tjaarsplaat met verticaal de diepte gemeten met echosounder en horizontaal de diepte bepaald met het BAS.

De maximale geuldiepte kon worden teruggeschat met een nauwkeurigheid van 50 cm. De breedte van de geul kon worden bepaald op 20 m, de maximale helling van de geulwand op 5%.

Bijzonderheden

In het kader van dit project is ook gekeken naar de eisen die gebruikers stellen aan dieptegegevens van de Waddenzee. Voor zover zij



gebruik maken van vaklodingen, eisen zij een verticale nauwkeurigheid van 30 cm (systematische plus stochastische fout) en een horizontale nauwkeurigheid van 10 m. Mocht het mogelijk zijn om met het BAS ieder jaar een kaart van de gehele Waddenzee te maken, dan is een fout van maximaal 50 cm aanvaardbaar. Interessante gebieden kunnen dan alsnog nauwkeuriger worden bemeten.

Rapportages

C.J. Calkoen, G.J. Wensink, J. Vogelzang, and P.F. Heinen, 1995, EIBERS. Efficiency Improvement of bathymetric surveys with ERS-1. *Report BCRS-95-01*, Netherlands Remote Sensing Board, Rijkswaterstaat, Survey Department, Delft.



4.7. Plaatgat

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "ERS-1/PLAATGAT" is in 1995 uitgevoerd door ARGOSS in opdracht van DNN met steun van het RIKZ en de MD. DNH had als waarnemer zitting in het projectteam.

Gebied

Het project vond plaats in het Plaatgat tussen Ameland en Schiermonnikoog in het gebied aangegeven in Figuur 14. De horizontale en verticale schaal in Figuur 14 is in km in het RDM. Onder invloed van natuurlijke morfologische processen verzandt de vaargeul naar Louwersoog en verplaatst zich naar het oosten. Tegelijkertijd ontwikkelt zich ten westen hiervan een nieuwe vaargeul, het Westgat. In het midden van het testgebied komen beide geulen samen. Teneinde de veiligheid van de scheepvaart naar Louwersoog te garanderen, wordt dit gebied vier maal per jaar gelood door DNN.

Het doel van dit project was na te gaan in hoeverre het BAS gebruikt kon worden om de lodingsinspanning in dit gebied terug te brengen.

Werkwijze

Het gebied is gelood in juli 1995 met een raaiafstand van 100 m in het zuidoostelijk deel en 200 m in de rest van het gebied. Door steeds meer raaien weg te laten uit het BAS en in plaats daarvan te gebruiken om de nauwkeurigheid te controleren, kon de optimale raaiafstand worden afgeleid. Teneinde voldoende nauwkeurigheid te behalen lag het in de bedoeling een analyse uit te voeren op basis van meerdere SAR beelden opgenomen in de periode juli t/m september. Het FEL-TNO positioneerde de radarbeelden door de projectie van de SAR op de Aarde opnieuw te berekenen uitgaande van verbeterde baangegevens.

Nauwkeurigheid

In de periode juli t/m september 1995 zijn er in totaal zes radarbeelden van het gebied opgenomen. Het beeld van 3 augustus is in kwaliteit dusdanig superieur aan de andere beelden dat geen verbetering in de diepteschatting wordt bereikt wanneer de andere beelden worden meegenomen in de analyse. Dit betekent dat een periode van drie maanden te kort kan zijn om voldoende radarbeelden van goede kwaliteit te kunnen verzamelen.

In het centrum van het gebied, waar het Plaatgat en het Westgat samenkomen geeft het BAS grote afwijkingen tot 3 m. Dit komt doordat het stromingspatroon hier duidelijk twee-dimensionaal is, hetgeen niet in het BAS is ingebouwd. Wanneer de geulsplitsing niet wordt meegenomen, is de r.m.s. nauwkeurigheid van de diepteschatting ongeveer 24 cm bij een raaiafstand van 600 m en 28 cm bij een raaiafstand van 1000 m. De systematische afwijking was hooguit 1 cm. Korte zandgolven met een golflengte van 50 m zijn niet zichtbaar op ERS SAR beelden en komen daardoor niet terug in de diepteschatting. Overigens poetst ook CONLOD dergelijke fijne structuren weg in de interpolatie.

Merk op dat het BAS nu ook in staat is om nauwkeurige dieptes te schatten boven rechte geulen, in situaties waarin de stroming varieert



dwars op de stroomlijnen. Een jaar eerder (zie paragraaf 4.6) was dit nog niet mogelijk.

Bijzonderheden

In dit project zijn de verschillen tussen de BAS schattingen en de lodingen bijzonder uitgebreid bestudeerd. Behalve statistische kentallen als bias, r.m.s. afwijking, etc. zijn er ook histogrammen en verschilkaarten gemaakt.

Op basis van dit project is geconcludeerd dat het BAS slechts toegepast kan worden voor lodingen met een frequentie van hooguit eens per jaar. Dit geldt uiteraard voor het huidige aantal radarsatellieten. Deze restrictie vervalt wanneer er meer satellieten beschikbaar komen, of een gevlogen systeem.

Verdere analyse van de splitsing Plaatgat/Westgat met voorwaartse modellen in de EG projecten (AMS)**3 en C-STAR toonde aan dat er problemen zijn met het stroomveld afkomstig uit een WAQUA modelberekening. Zie ook paragraaf 5.2.

Rapportages

C.J. Calkoen and G.J. Wensink, 1996, ERS-1 SAR survey Plaatgat.
Report A013, ARGOSS, Marknesse.



4.8. Slijkgat, Slijkgeul en Loswal Noord

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKGEUL/LOSWAL NOORD" is eveneens in 1995 uitgevoerd, nu in opdracht van DZH (voor het Slijkgat en de Slijkgeul) en DNZ (voor Loswal Noord). Het projectteam werd gecompleteerd door DZL als waarnemer, MD en RIKZ. Het doel van het project was om de mogelijkheden van het BAS te demonstreren voor deze directies.

Gebied

De demonstratie is uitgevoerd in twee gebieden. Het eerste gebied is de mond van het Haringvliet en omvat het Slijkgat en de Slijkgeul. Het Slijkgat is een ondiep gebied aan het begin van het Haringvliet. De diepte varieert van 0 tot 10 meter. De Slijkgeul is een geul met een breedte van 50 m tot 100 m en een maximale diepte van 15 m. In het testgebied bevinden zich twee ondieptes. De eerste is een zandplaat ten noorden van Goeree die droogvalt bij laag water; de tweede is een zandbank ten westen van Goeree aan de rand van het testgebied.

Het tweede gebied is Loswal Noord, een gebied voor de kust van Zuid Holland waar baggerslib wordt gestort. Dit is een vlak aflopend gebied, van 10 m tot 23 m, met lokale heuvels van gestort materiaal. Ten zuiden van Loswal Noord is een zanddam aangelegd om te voorkomen dat gestort slib te snel terugvloeit naar de Euro/Maasgeul.

De testgebieden en de beschikbare echolodgingen zijn aangegeven in Figuur 15. De horizontale en verticale schaal is in km in het RDM.

Werkwijze

De diepteschattingen zijn uitgevoerd op basis van één radarbeeld dat door het FEL-TNO is gepositioneerd. De lodgingen hebben een raaiafstand van 60 m tot 100 m. De werkwijze was identiek als voor het project "ERS-1/PLAATGAT" (zie paragraaf 4.7).

Nauwkeurigheid

Ondanks het feit dat Slijkgat, Slijkgeul en Loswal Noord onderling aanzienlijke verschillen in morfologie vertonen, was de nauwkeurigheid van de BAS diepteschattingen in de drie gebieden vrijwel gelijk: ongeveer 20 cm bij een raaiafstand van 300 m, 30 cm bij een raaiafstand van 500 m en 40 cm à 45 cm bij een raaiafstand van 1000 m. Behalve statistische kentallen zijn ook histogrammen van de foutenverdeling en verschilkaarten gemaakt.

De verschilkaarten laten een aantal gebieden zien waarop het BAS grotere fouten maakt. Afwijkingen tot 1 m of meer komen voor boven de ondieptes in het Slijkgat/Slijkgeul gebied en langs de kust van Voorne. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt door golfbreking boven ondiepe gebieden, een effect dat niet in het BAS wordt meegenomen. In het Loswal Noord gebied treden fouten op van ruim 1 m boven baggerstorten en meer dan 2 m boven de zanddam. Dit wordt hoogstwaarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat het stromingspatroon boven deze deelgebieden twee-dimensionaal is. Het BAS verwacht dat alle stroming over een heuvelvormige baggerstort heen zal gaan. In werkelijkheid stroomt een deel van het water langs de heuvel, en varieert de stroming over de heuvel minder sterk dan



het BAS verwacht. Het gevolg is dat het BAS de hoogte van de heuvel ten opzichte van de bodem onderschat.

In het Loswal Noord gebied bevindt zich ook een wrak. Zoals verwacht is dit te klein om zichtbaar te zijn op het radarbeeld.

Bijzonderheden

De resultaten in het Slijkgat/Slijkgeul gebied tonen aan dat het BAS behoorlijke resultaten levert tot vlak onder de kust. Pas wanneer de diepte minder dan twee meter is kunnen afwijkingen optreden ten gevolge van golfbreking.

Rapportages

G.H.F.M. Hesselmans and G.J. Wensink, 1996, ERS-1 SAR survey Slijkgat, Slijkgeul and Loswal Noord. *Report A011*, ARGOSS, Marknesse.



4.9. Validatie Loswal Noord

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "VALIDATIE ERS-1/LOSWAL NOORD" is in 1996 uitgevoerd door ARGOSS in opdracht van DNZ. In het projectteam hadden verder zitting DZH, DZL, MD en RIKZ. Het project had als doel:

- te onderzoeken of de prestaties van het BAS het voorafgaande project "ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKEUL/LOSWAL NOORD" (zie paragraaf 4.8) herhaalbaar waren voor een nieuwe dataset ("repeatability");
- te onderzoeken in hoeverre het BAS kan extrapoleren buiten de raaien.

Gebied

Het project is uitgevoerd boven Loswal Noord. Vergeleken met project "ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKEUL/LOSWAL NOORD" was het testgebied met 300 m uitgebreid in noordelijke, westelijke en zuidelijke richting.

Werkwijze

Loswal Noord is in de periode 15-19 April 1996 door DNZ gelood met een single beam echolood en een raaiafstand van 50 m. ARGOSS kreeg de beschikking over raaien om de 500 m en een aantal ERS radarbeelden, waaruit het ERS-1 beeld van 17 April en het ERS-2 beeld van 18 April gekozen zijn voor verdere bewerking.

De beelden zijn gepositioneerd aan de hand van het beeld dat gebruikt is in het project "ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKEUL/LOSWAL NOORD". Alle beelden bestrijken hetzelfde gebied zodat de relatieve positie zeer nauwkeurig bepaald kan worden door de beelden over elkaar te leggen. De absolute positie volgt dan uit de positie van het oude radarbeeld.

Validatie vond plaats door DNZ en door ARGOSS. Merk op dat ARGOSS pas de beschikking kreeg over alle lodingen nadat de BAS dieptekaart was opgeleverd.

Nauwkeurigheid

In het project "ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKEUL/LOSWAL NOORD" werd een r.m.s. nauwkeurigheid behaald van 30 cm bij een raaiafstand van 500 m. In dit project lag de r.m.s. afwijking tussen 18 cm en 20 cm, afhankelijk van de methode van validatie (zie paragraaf 4.1). Deze verbetering ten opzichte van het eerdere project is het gevolg van verbeteringen in het BAS en, mogelijk, betere radarbeelden.

De lodingsraaien van 1996 vallen binnen enkele meters op die van 1995. Langs sommige raaien laten de echolodingen uit 1995 en 1996 systematische verschillen tot 30 cm zien. De oorzaak hiervan is niet duidelijk.

Op sommige stukken vertoont het BAS grotere afwijkingen ten opzichte van de lodingen. Dit zijn de zanddam in het zuiden en baggerstorten in het midden van het testgebied: precies dezelfde gebieden als waar het BAS in project "ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKEUL/LOSWAL NOORD" problemen had. Zoals reeds opgemerkt in de vorige paragraaf is dit te wijten aan het



ontbreken van een twee-dimensionaal inversieschema in het BAS. Volgens verwachting is het wrak ook deze keer weer niet waargenomen op de radarbeelden.

De extrapolatie in noordelijke, westelijke en zuidelijke richting is slechts beperkt mogelijk. Enkele honderden meters buiten de raaien neemt de fout in de diepte snel toe. Het is dus niet mogelijk het BAS af te regelen met behulp van lodingen op de ene deel van een radarbeeld en vervolgens de diepte te bepalen op het andere deel.

Figuur 16 laat de BAS dieptekaart van Loswal Noord zien. De horizontale en verticale schaal is in km in het RDM. De contourlijnen van de diepte zijn iedere meter gegeven.

Bijzonderheden

In dit project zijn de schatting van de diepte door het BAS en de validatie volledig gescheiden geweest: de volledige verzameling lodingsgegevens is pas door DNZ vrijgegeven nadat ARGOSS de dieptekaart had opgeleverd.

Rapportages

G.H.F.M. Hesselmanns, 1996a, Validatie ERS-1 Loswal Noord. *Rapport A29*, Marknesse.

J. Lagàs en W.G. Bos, 1996, Validatie BAS. *Rapport NZ-96.10*, Rijkswaterstaat, Directie Noordzee, Rijswijk.



4.10. Zeegat van Ameland

Projectnaam en opdrachtgever

Het project "ZEEGAT VAN AMELAND" is in 1996 door ARGOSS uitgevoerd in opdracht van RIKZ en met financiële steun van DNN als deelproject binnen KUST*2000. Het doel was om een nieuwe dieptekaart van het testgebied te maken ten behoeve van het morfologisch onderzoek.

Gebied

Het gebied beslaat de vloedkom van het Zeegat van Ameland tussen het vasteland en de waddeneilanden Terschelling en Ameland. Het gebied beslaat 25 km bij 35 km. Het is een complex geheel van geulen en platen.

Werkwijze

Een deel van de geulen en de ebdelta is gelood gedurende de zomer van 1996. Ten behoeve van dit project heeft DNN lodingen uitgevoerd langs enkele additionele raaien. Een ander deel van de geulen is gelood in 1995. Deze lodingen beslaan slechts een deel van het testgebied, en zijn niet genoeg voor gebruik binnen het BAS. Een volledige doch verouderde dieptekaart van het hele gebied is gemaakt in 1993 met lodingen uit dat jaar en mogelijk het jaar daarvoor. Alleen de geïnterpoleerde dieptes op een rooster zijn beschikbaar.

De basis van de eerste schatting van de diepte wordt gevormd door de dieptekaart uit 1993 welke op een rooster is gegeven. Waar mogelijk zijn deze dieptes vervangen door meer recente waarden. De lodingen uit 1995 zijn minder betrouwbaar dan die uit 1996 omdat ze niet meer actueel hoeven te zijn. Dit is verdisconteerd in het BAS door het gewicht van de lodingen uit 1995 in de kostenfunctie een factor tien lager te nemen dan dat van de lodingen uit 1996. Op dezelfde manier is het gewicht van de lodingen uit 1993 een factor honderd kleiner dan dat van de lodingen uit 1996. Op deze wijze heeft het BAS meer vrijheid om van gemeten dieptes af te wijken naarmate de metingen ouder zijn.

Nauwkeurigheid

Omdat alle beschikbare metingen gebruikt zijn voor afregeling van het BAS kan de nauwkeurigheid niet bepaald worden. Dit was dan ook niet het doel van het project: het doel was een dieptekaart te maken op grond van de beschikbare gegevens. Vergelijking met de kaart uit 1993 laat duidelijke verschillen zien in de posities van geulen en brekerbanken ten noorden van Terschelling en Ameland. Merk op dat de diepte boven brekerbanken nu wel bepaald kan worden, dit in tegenstelling tot de situatie tijdens uitvoering van het project "ERS-1/NOURTEC" drie jaar eerder (zie paragraaf 4.4).

Bijzonderheden

In feite is dit het eerste operationele gebruik van het BAS. Het was niet mogelijk een nieuwe dieptekaart van het gebied te maken op basis van lodingen alleen. Dit lukte wel door de beschikbare gegevens te combineren met radarbeelden.

Rapportages

G.H.F.M. Hesselmans, 1996b, SAR survey Zeegat van Ameland.
Report A43, ARGOSS, Marknesse.



Naam project	Jaar	Opdracht-gever	Gebied	Gebiedstype	Nauwkeurigheid (r.m.s.)
MAST	1991	EEG	Meetpost Noordwijk	Zandgolven	50 cm
ZEEPIPE	1993	BCRS	Kust voor Zeebrugge	Zandbanken	26 cm bij raaiafstand 200 m
ERS-1/NOURTEC	1993	DNN	Noordkust Terschelling	- Brekerbanken - Zandgolven	- Geen verbetering t.o.v. lineaire interpolatie - 19 cm bij raaiafstand 400 m en 36 cm bij raaiafstand 1200 m
ERS-1/VAKLOD	1993	DNN	Centrale Waddenzee	- Platen - Geulen	- 28 cm bij raaiafstand van ruim 2 km - Alleen kwalitatieve vergelijking
EIBERS	1994	BCRS	Centrale Waddenzee	- Platen - Geulen	- 20 cm bij raaiafstand van ruim 2 km (effectief drie beelden) - Alleen geulparameters teruggeschat
ERS-1/PLAATGAT	1995	DNN	Plaatgat	Geulen en Platen	24 cm bij raaiafstand 600 m en 28 cm bij raaiafstand 1000 m, waarbij de splitsing Plaatgat/Westgat buiten beschouwing is gelaten
ERS-1/SLIJKGAT/SLIJKGEUL/LOSWAL NOORD	1995	- DZH - DNZ	- Mond Haringvliet - Loswal Noord	- Geulen en platen - Aflopende kust	20 cm bij raaiafstand 300 m, 30 cm bij raaiafstand 500 m en 40 à 45 cm bij raaiafstand 1000 m voor zowel Slijkgat en Slijkgeul als Loswal Noord
VALIDATIE ERS-1/LOSWAL NOORD	1996	DNZ	Loswal Noord	Aflopende kust	18 à 20 cm bij raaiafstand 500 m
ZEEGAT VAN AMELAND	1996	RIKZ	Waddenzee tussen vaste land, Ameland en Schiermonnikoog	Geulen en platen	Niet bepaald.

Tabel 1. Overzicht van de demonstraties met het BAS.

5. Mogelijkheden en beperkingen

In het vorige hoofdstuk is een chronologisch overzicht gegeven van alle demonstraties met het BAS waarvan de resultaten openbaar zijn. In de loop van de tijd is het BAS steeds verder uitgebreid en verbeterd. Het is daarom moeilijk, zo niet onmogelijk, om aan te geven wat de maximaal haalbare prestaties van het BAS zullen zijn.

In paragraaf 5.1 wordt een schatting gemaakt van de huidige mogelijkheden van het BAS. Tevens worden een aantal beperkingen op een rij gezet. In paragraaf 5.2 worden een aantal resultaten uit achtergrondsonderzoek gepresenteerd welke van belang zijn voor de verdere ontwikkeling van het BAS. Het betreft hier de MAST projecten (AMS)**3 en C-STAR die met steun van de EG worden uitgevoerd. In paragraaf 5.3 tenslotte worden enkele aspecten genoemd die niet aan de orde komen in EG projecten.

Met name onderzoek op het gebied van het inverse model wordt bewust buiten de MAST projecten gehouden. Immers, dit wordt door ARGOSS beschouwd als strategische kennis, terwijl resultaten van MAST projecten openbaar zijn.

5.1. Toepassing van het huidige BAS

Het BAS kan dieptekaarten genereren met een nauwkeurigheid van 20 cm à 30 cm bij een raai afstand van ongeveer 500 m voor gebieden met een diepte tussen ongeveer 2 m en 30 m. Het lijkt daarom een geschikt instrument voor het efficiënt uitvoeren van monitoringslodingen in het kader van de Monitoring Waterstaatskundige Toestand des Lands (MWTL, vaklodingen en kustlodingen).

Ten aanzien van het gebruik gelden thans de volgende beperkingen:

- (1) Operatie van het BAS vergt nog veel handwerk.
- (2) Alleen een kenner kan op radarbeelden structuren herkennen die niet aan de bodem gerelateerd zijn.
- (3) Met de huidige radarsatellieten (ERS-2 en RADARSAT) bestaat de mogelijkheid dat in een periode van drie maanden niet voldoende geschikte beelden beschikbaar komen. Daarom kan het BAS worden toegepast bij lodingen die niet frequenter als eens per jaar worden verricht.
- (4) Het is niet mogelijk om op radarbeelden geïsoleerde objecten als wrakken en verloren lading te detecteren zolang die niet groter zijn dan de resolutie van het radarbeeld. Dit maakt het BAS vooralsnog ongeschikt voor gebruik in een groot aantal beheerslodingen, waar goede detectie van wrakken juist een van de vereisten is. De resolutie is ongeveer 30 m voor ERS-1 en ERS-2, maar kan fijner als 5 m zijn voor gevlogen systemen. Voor langgerekte structuren als de steile helling van zandgolven geldt dat de breedte van de zelfde orde als de resolutie moet zijn.



- (5) Het huidige BAS kan alleen dan nauwkeurige diepteschattingen leveren als de stroming varieert òf alleen langs de stroomlijn (zandgolvenmodel) òf alleen dwars op de stroomlijn (geulenmodel). Deze beperking is niet fundamenteel van aard maar wordt opgelegd door het gehanteerde inversie-schema. In (deel-)gebieden waar hier niet aan voldaan is, dus waar het stromingspatroon duidelijk twee-dimensionaal is, kan het BAS niet goed worden toegepast. In zulke gebieden moeten lodingen de gewenste informatie leveren.

5.2. Bevindingen uit achtergrondsonderzoek

In de projecten "Advanced Mapping of Sea bottom topography in A Multi Sensor Approach for Morphodynamic Studies", afgekort als (AMS)**3, en "Coastal Sediment Transport Assessment with SAR", afgekort als C-STAR, worden een aantal aspecten van het BAS nader bestudeerd. Deze projecten worden financieel ondersteund door de Europese Gemeenschap (EG) in het kader van het Marine Science and Technology (MAST) programma. Project C-STAR loopt nog tot 1999; (AMS)**3 is per 31 januari 1997 afgerond [Wensink, 1997].

In (AMS)**3 zijn een aantal voorwaartse modellen vergeleken voor de afbeelding van een onderwaterrif nabij het Duitse eiland Helgoland. Het BAS model, waarin de relaxatiesnelheid wordt aangepast aan de metingen, geeft een minstens zo goede beschrijving van de metingen als meer uitgebreide modellen. Dit geeft vertrouwen in de aanpak zoals die voor het BAS gevolgd is.

Geen van de modellen bleek in staat om de afbeelding van de splitsing Plaatgat/Westgat op een ERS-1 beeld te verklaren. Een deel van de verklaring hiervoor is dat het stromingsmodel in het BAS een verkeerd stromingspatroon geeft. Dit is niet te wijten aan het stromingsmodel in het BAS, maar aan verkeerde beginwaarden gegeven door het WAQUA model van de Waddenzee. Dit punt zal verder onderzocht worden in C-STAR.

Het is mogelijk om bepaalde storende fenomenen als olievlekken, drijf-vlagen, schepen en scheepssporen automatisch te herkennen op SAR beelden. Dit kan een belangrijk hulpmiddel vormen bij het classificeren van fenomenen op radarbeelden. Het is niet mogelijk dergelijke storin-gen "weg te poetsen": ze laten altijd een "litteken" achter waardoor ter plekke geen informatie over de diepte meer aanwezig is.

Een van problemen waarmee het BAS te kampen heeft is "speckle", ruis in de SAR beelden. Deze kan verminderd worden door de ruwe SAR gegevens opnieuw te verwerken. FEL-TNO heeft een methode gevonden om de speckle terug te brengen tot 71% van het oorspronkelijke niveau zonder verslechtering van de resolutie. In (AMS)**3 bleek dat gebruik van een verbeterd SAR beeld van het Plaatgat leidde tot een iets nauwkeuriger diepteschatting: de r.m.s. afwijking bij een raaiafstand van 400 m verbeterde met één centimeter van 19 cm naar 18 cm. Echter, gezien de korte tijd die beschikbaar was voor deze analyse is het niet ondenkbaar dat verdere verbetering gehaald kan worden. Ook dit zal binnen C-STAR nader onderzocht worden.



5.3. Mogelijkheden tot verbetering

Twee-dimensionale inversie.

Een volledig twee-dimensionale inversie zou de toepasbaarheid van het BAS zeer ten goede komen. Het is dan mogelijk om het BAS toe te passen in alle gebieden die voor monitoring van belang zijn. Tevens maakt het systeem gebruik van één stromingsmodel. Tenslotte vervalt de noodzaak om het stromingsmodel te kiezen c.q. het BAS deze keuze zelf te laten maken.

De belangrijkste overweging achter de huidige inversie in slechts één dimensie is beperking van het aantal vrijheidsgraden in de kostenfunctie. In twee dimensies is het aantal vrijheidsgraden veel groter, waardoor de benodigde rekentijd explosief toeneemt. Dit is echter een technisch probleem. Recentelijk is een eerste verkenning gehouden naar de mogelijkheid van inversie in twee dimensies [Calkoen, 1996]. De conclusie is dat twee-dimensionale inversie haalbaar lijkt. Het onderzoek in deze richting zal onder leiding van RIKZ worden voortgezet.

Andere radarsystemen

Het huidige BAS is gebaseerd op radarbeelden van de ERS-1 en ERS-2 satellieten van de ESA. Rond 1999 zal de taak van ERS-2 worden overgenomen door ENVISAT, zodat aanvoer van radarbeelden voorlopig min of meer gegarandeerd is. Het voordeel van satellietbeelden is dat ze betrekkelijk goedkoop zijn (ongeveer 2 à 3 kf voor een beeld van 100 km bij 100 km). Het nadeel is het totaal ontbreken van flexibiliteit in tijdstip van de opname.

Al deze satellieten maken radarbeelden in de zogenaamde C-band bij een radar golflengte van ongeveer 5 cm. Uit experimenten met gevlogen systemen bij andere golflengtes is gebleken dat gebruik van grotere golflengtes (L- of P-band, golflengte tussen 20 cm en 100 cm) een aantal voordelen heeft:

- de signaturen van bodemstructuren zijn sterker;
- het voorwaartse model geeft betere resultaten;
- L- en P-band radarbeelden zijn minder gevoelig voor storende fenomenen als windvegen en natuurlijke drijfvlagen.

De eerstkomende tien jaar maken alle geplande satellieten met beeldvormende radar gebruik van C-band. Voor het jaar 2005 zal er geen L- of P-band SAR aan boord van een satelliet zijn. De enige mogelijkheid is gebruik te maken van een radarsysteem aan boord van een vliegtuig. Dit heeft de volgende voordelen:

- de radargolflengte is zelf te kiezen;
- het systeem is flexibel inzetbaar;
- de resolutie is beter dan die van een satellietsysteem vanwege de kleinere hoogte.

Het grote nadeel van gevlogen systemen ligt in de veel hogere kosten.



6. Afkortingen en begrippen

6.1. Afkortingen

ARGOSS	Advisory and Research Group on Geo Observation Systems and Services
BAS	Bathymetry Assessment System
BCRS	Beleidscommissie Remote Sensing
DNH	Directie Noord Holland
DNN	Directie Noord Nederland
DNZ	Directie Noordzee
DZH	Directie Zuid Holland
DZL	Directie Zeeland
EG	Europese Gemeenschap
ERS	European Remote sensing Satellite
ESA	European Space Agency
FEL-TNO	Fysisch en Electronisch Laboratorium TNO
MAST	Marine Science and Technology
MD	Meetkundige Dienst
RIKZ	Rijksinstituut voor Kust en Zee
RDM	Rijksdriehoek Meetnet
SAR	Synthetic Aperture Radar
WL	Waterloopkundig Laboratorium



6.2. Begrippen

Beeldvormende radar Apparaat waarmee foto's gemaakt worden met radarstraling i.p.v. zichtbaar licht.

Beeldvormend mechanisme Verklaring voor het feit dat bodemstructuren zichtbaar kunnen zijn op radarbeelden. Het beeldvormend mechanisme bestaat uit drie stappen.

Bragg golven Korte watergolven waaraan de meeste radarstraling verstrooit. Bragg golven hebben een golflengte van dezelfde orde van grootte als die van de radarstraling.

Bragg verstrooiing Verstrooiingsmechanisme waarin alle radarstraling verstrooit aan de Bragg golven.

Geulen model Stromingsmodel in het BAS waarin de stroomsnelheid varieert dwars op de stroomlijnen.

Inverse model Omgekeerde van het voorwaarts model (zie aldaar). Het inverse model berekent de diepte uit een radarbeeld.

Relaxatiesnelheid Parameter in de golven-module van het voorwaarts model (zie aldaar) die aangeeft hoe snel golven reageren op veranderingen in de stroomsnelheid.

Synthetic Aperture Radar (SAR) Type beeldvormende radar waarbij een grote antenne, en dus een groot scheidend vermogen, wordt gesimuleerd door de eigen beweging van het platform. Omdat hiervoor een relatief kleine antenne volstaat, is dit type radar populair voor gebruik vanuit vliegtuigen en vooral satellieten.

Voorwaarts model Model van het beeldvormend mechanisme dat gegeven de bodem, de getijfase en de wind beschrijft hoe een radarbeeld eruit zal zien. In het BAS bestaat het voorwaarts model uit drie modules: een stromingsmodel, een golvenmodel en een radar verstrooiingsmodel.

Zandgolven model Stromingsmodel in het BAS waarin de stroomsnelheid varieert langs de stroomlijnen.



Referenties

- Calkoen, C.J., G.J. Wensink, and G.H.F.M. Hesselmanns, 1993, ERS-1 SAR imagery to optimize the NOURTEC shipbased bathymetric survey: feasibility study. *Report H 1875*, Delft Hydraulics, Delft.
- Calkoen, C.J., and G.J. Wensink, 1993, Use of ERS-1 SAR to optimize ship-based bathymetric surveys in the Waddenzee. *Report H1985*, Delft Hydraulics, Delft.
- Calkoen, C.J., G.J. Wensink, J. Vogelzang, and P.F. Heinen, 1995, EIBERS. Efficiency Improvement of bathymetric surveys with ERS-1. *Report BCRS-95-01*, Netherlands Remote Sensing Board, Rijkswaterstaat, Survey Department, Delft.
- Calkoen, C.J., and G.J. Wensink, 1996, ERS-1 SAR survey Plaatgat. *Report A013*, ARGOSS, Marknesse.
- Calkoen, C.J., 1996, 2-D data assimilatie. *Rapport A36*, ARGOSS, Marknesse.
- Hesselmanns, G.H.F.M., G.J. Wensink, C.J. Calkoen, and H. Sidhu, 1993, Application of ERS-1 SAR data to support the routing of offshore pipelines. *Report BCRS-93-34*, Netherlands Remote Sensing Board, Rijkswaterstaat, Survey Department, Delft.
- Hesselmanns, G.H.F.M., G.J. Wensink, C.J. Calkoen, and H. Sidhu, 1994, Application of ERS-1 SAR data to support the routing of offshore pipelines. *Report H 1787*, Delft Hydraulics, Delft.
- Hesselmanns, G.H.F.M., and G.J. Wensink, 1996, ERS-1 SAR survey Slijkgat, Slijkgeul and Loswal Noord. *Report A011*, ARGOSS, Marknesse.
- Hesselmanns, G.H.F.M., 1996a, Validatie ERS-1 Loswal Noord. *Rapport A29*, Marknesse.
- Hesselmanns, G.H.F.M., 1996b, SAR survey Zeegat van Ameland. *Report A43*, ARGOSS, Marknesse.
- Jager, R. en H.C. Landa, 1996 Definitiestudie RWSBAS. Rijkswaterstaat, Meetkundige Dienst, Delft.
- Knaapen, M.A.F., 1996, Data-assimilatie. Overzicht van technieken en mogelijkheden. *Rapport RIKZ-96.039*, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, 's Gravenhage.
- J. Lagàs en W.G. Bos, 1996, Validatie BAS. *Rapport NZ-96.10*, Rijkswaterstaat, Directie Noordzee, Rijswijk.
- Vogelzang, J., 1993, Mapping of sea bottom topography in a multi-sensor approach. In *Mast days and Euromar market*, 15 to 17 March 1993, edited by M. Weydert and C. Fragakis, Commission of the European Communities, ISBN 92-826-5626-8, pp. 534-547.



Vogelzang, J., G.J. Wensink, C.J. Calkoen, G.H.F.M. Hesselmanns, M.W.A. van der Kooij, W. Alpers, R. Romeiser, V. Wismann, K. Boehnke, I. Hennings, J.P. Matthews, K. Lwiza, J. Bennell, G.P. de Loor and M. Metzner, 1995, Mapping of sea bottom topography in a multi sensor approach. Final report. Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee, 's Gravenhage.

Wensink, G.J., 1997, Advanced mapping of sea bottom topography in a multi sensor approach for morphodynamic studies (AMS) * *3 final report. ARGOSS, Marknesse.



Bijlage 1. Lijst van figuren

FIGUREN

- Figuur 1 Radarbeeld uit 1969 ten westen van Hoek van Holland waarop voor het eerst zandgolven te zien zijn. (Met dank aan G.P. de Loor, FEL-TNO.)
- Figuur 2 ERS-1 SAR beeld van de Voordelta met daarop duidelijke bodemstructuren. (Met dank aan H. Greidanus, FEL-TNO.)
- Figuur 3 Uitsnede van Figuur 2 met zandgolven en zandbanken. (Met dank aan H. Greidanus, FEL-TNO.)
- Figuur 4 Beeldvormend mechanisme volgen Alpers en Hennings.
- Figuur 5 Stroomvectoren aan het oppervlak volgens (a) het zandgolven model en (b) het geulenmodel.
- Figuur 6 Schema van het voorwaarts model.
- Figuur 7 Schema van het BAS.
- Figuur 8 Validatie van het BAS vanuit (a) de BAS resultaten en (b) de echolodgingen.
- Figuur 9 Eerste stapjes van het BAS. Links de dieptekaart opgenomen met multi-beam echosounder, in het midden het radarbeeld en rechts de geschatte diepte. (Met dank aan G.J. Wensink, ARGOS.)
- Figuur 10 Diepte gemeten met echolood (getrokken lijn) en geschat met het BAS (streepjeslijn) langs de route van de pijpleiding. (Uit *Hesselmans et al.* [1993, 1994].)
- Figuur 11 ERS-1 radarbeeld met de drie testgebieden. (Uit *Calkoen and Wensink* [1993].)
- Figuur 12 Vaklodgingen van 1992. (Uit *Calkoen and Wensink* [1993].)
- Figuur 13 Scatterplot van de echolodgingen en de BAS schattingen voor de Hendrik Tjaarsplaat. (Uit *Calkoen et al.* [1995].)
- Figuur 14 Plaatgat testgebied. (Uit *Calkoen and Wensink* [1996].)
- Figuur 15 Slijkgat (midden onder), Slijkgeul (links onder) en Loswal Noord (rechts boven). De beschikbare raaien met echolodgingen zijn aangegeven. (Uit *Hesselmans and Wensink* [1996].)
- Figuur 16 BAS dieptekaart van Loswal Noord. (Uit *Hesselmans* [1996a].)

