Meten met MEDUSA

Een leidraad voor gebruik bij Rijkswaterstaat

Rapport RIKZ/2001.035

auteur : J.R. Roberti
gecontroleerd door : H.L.H Cox
goedgekeurd door : J.J. Bosman

Den Haag, september 2001

Dit rapport is gefinancieerd vanuit het programma basisinformatie natte infrastructuur (artikel 02.02.06) onder het thema technologische vernieuwing.

Samenvatting

MEDUSA is een in-situ meetsysteem voor kartering van de waterbodem. Het geeft informatie over bodemsamenstelling en radioactiviteit. Dit document vormt een algemene inleiding op het gebruik van MEDUSA door projectleiders bij Rijkswaterstaat.

Behandeld worden de volgende punten
- Basiskennis achter MEDUSA
- MEDUSA meetmethode
- Mogelijke toepassingen van MEDUSA
- Aanbevolen werkwijze voor MEDUSA
- Overzicht van RWS-projecten met MEDUSA
- Literatuur

Met deze kennis zal iedereen, die met MEDUSA aan de slag wil beter voorbereid zijn.

Voorwoord

In het najaar 1998 stond de projectleider van het project "monitoring alternatieve loswallen" (MAL) op het punt RIKZ te verlaten en wilde de ervaring die was opgedaan bij het project met een nieuwe meetmethode MEDUSA ergens binnen RIKZ verankeren. Daarom klopte hij aan bij de afdeling Hydroinstrumentatie. Hoewel de waterbodem niet tot het directe werkgebied van Hydroinstrumentatie (meten aan waterkolom en oppervlak) behoort , verleent de afdeling sindsdien om praktische redenen inhoudelijke ondersteuning aan projecten, waarbij MEDUSA wordt ingezet. De ondersteuning beperkt zich tot advisering over de toepassing van de meetmethode.

MEDUSA is een meetsysteem, waarvan de expertise en exploitatie geheel buiten Rijkswaterstaat liggen. Om precies te zijn bij het Kernfysische Versneller Instituut (KVI) van de Universiteit van Groningen en MEDUSA Explorations BV. Om te zorgen dat Rijkswaterstaat toch als deskundig opdrachtgever kon optreden richting deze aanbieders heb ik mij vanuit mijn functie bij Hydro-instrumentatie verdiept in MEDUSA, zodat ik waar nodig kon optreden als adviseur over de meetmethode. Vanuit deze rol heb ik de nieuwe projectleider van het MAL project ook inhoudelijk ondersteund bij de voortzetting van het project.

Mijn kennismaking met MEDUSA is tot op heden zeer positief en ik ben van mening dat dit meetsysteem een belangrijke informatiebron zal blijven in een scala aan Rijkswaterstaat projecten, die gerelateerd zijn aan waterbodems.

De kracht van het systeem zal in dit rapport geïllustreerd worden, aan de hand van de sterk verschillende projecten, waarbij MEDUSA is ingezet. Het streven van dit rapport is de ervaring uit deze projecten toegankelijk te maken voor toekomstige projectleiders die met de techniek aan de gang willen.

Hans Roberti

Inhoudsopgave

1 INLEIDING 1

2 BASISKENNIS 3

2.1 Radioactief verval 3
2.2 Achtergrondstraling 4

3 MEETMETHODE MEDUSA 5

3.1 Detectie van gamma 5
3.2 Verwerking van gammaspectra tot nuclidenconcentraties 7
3.3 Van radioactiviteit naar sedimentsamenstelling 7
3.4 MEDUSA: in-situ gamma radiometrie 9
3.5 Door interpolatie naar een MEDUSA kartering 12

4 WAARVOOR KAN MEN MEDUSA METINGEN GEBRUIKEN 13

4.1 Detectie van gammastralen en bijbehorende energie 13
4.2 Bepaling van de concentratie radionucliden in de toplaag van de waterbodem 13
4.3 Bepaling van de sedimentsamenstelling van de toplaag van de waterbodem 13
4.4 Detectie van morfologische veranderingen in de toplaag door transportprocessen 13

5 AANBEVOLEN WERKWIJZE MET MEDUSA 15

5.1 Projectvraagstelling 15
5.2 Voorbereiding 15
5.3 Verkennende MEDUSA meting 16
5.4 Bodemmonsters verzamelen voor de sediment fingerprints 17
5.5 Produktie sediment kaart 18

6 RWS-PROJECTEN MET MEDUSA 19

6.1 Monitoring van de Alternatieve Loswallen (MAL) voor het storten bagger uit de Rotterdamse haven 19
6.2 Zandslib kaart van het Hollandsch Diep en de Haringvliet 20
6.3 Boorspecie storten in de Westerschelde 21
6.4 Morfologie bij de Pannerdensche Kop 22
6.5 Radiometrische Kartering van de kust bij Terschelling en Ameland 23
6.6 TOXCOMBI tocht; Radioactiviteit en Olie voor MON*Chemie 24
6.7 Zandtransport in het Oostgat bij Walcheren 25

7 CONCLUSIE 27

8 LITERATUUR 29

1 Inleiding

Kennis over de bodemsamenstelling is voor veel verschillende activiteiten van Rijkswaterstaat van belang. Bij baggerwerkzaamheden voor bodemsaneringswerkzaamheden zijn actuele kaarten van de bodemsamenstelling gewenst om te kunnen bepalen waar en hoeveel materiaal moet worden weggehaald. Voor controle van de bodemsamenstelling na de sanering zou men eigenlijk ook snel een nieuwe kaart willen hebben. Tot voor kort was het aantal beschikbare middelen waarmee in korte tijd een dergelijke gebiedsdekkende kaart kan worden opgebouwd van de waterbodem beperkt of geheel afwezig. Nu is er echter een meetsysteem beschikbaar gekomen, waarmee voor diverse situaties wel invulling kan worden gegeven aan deze wens.

Dit systeem heet MEDUSA (Multi-Element Detector for Underwater Sediment Activity). Het betreft een krachtig meetsysteem, dat natuurlijke radioactiviteit meet. MEDUSA is ontwikkeld door het Kernfysisch VersnellerInstituut (KVI) in Groningen. Dit instituut is direct gelieerd aan de Universiteit Groningen. Het meetsysteem bestaat uit een sensor, die over de waterbodem achter een schip wordt aangesleept. Met deze sleepsensor kan de concentratie radionucliden in de toplaag van de waterbodem in kaart kan worden gebracht. In de natuur blijken vaste relaties te bestaan tussen deze concentraties radionucliden en de sedimentsamenstelling van de waterbodem. Hierdoor is natuurlijke radioactiviteit een goede indicator voor de bodemsamenstelling. Binnen bepaalde randvoorwaarden kan men daarom MEDUSA metingen vertalen naar sedimentkaarten.

Dit document is erop gericht om de meetmethode en de gegevensverwerking van MEDUSA onder de aandacht te brengen. De complexiteit van de MEDUSA meettechniek maakt het voor de buitenstaander moeilijk om grip te krijgen op de kwaliteit van de resultaten. De hiervoor noodzakelijke kennis en ervaring is opgedaan in eerdere rijkswaterstaatprojecten en is opgenomen in dit rapport. Projectleiders, die met het meetsysteem aan de slag willen, kunnen zich hiermee beter voorbereiden op de mogelijkheden en de beperkingen van MEDUSA voor hun specifieke toepassing.

De initiële context waarbinnen de basis voor dit document tot stand kwam was het MAL (Monitoring Alternatieve Loswallen) project waarbij een baggerstort locatie voor de Hollandse kust werd verplaatst om tot een reductie van de aanvoer van marien slib naar de Rotterdamse haven te komen. MEDUSA is hierbij gebruikt om sedimentkaarten te maken van het gebied rond de nieuwe stortlocatie voor en na de aanvang van het storten. Met behulp van deze sedimentkaarten wilde men inzicht krijgen in de verspreiding van slib vanaf de nieuwe stortlocatie. Gebleken is dat deze sedimentkaarten één van de belangrijkste, maar ook één van de meest controversiële onderdelen in het fysische deel van het monitoring programma waren. De onbekendheid met MEDUSA creëerde onzekerheid bij de rijkswaterstaatgebruikers over de bruikbaarheid en de hardheid van de resultaten.

Weten wat je meet is essentieel als je tot een goede analyse van de foutenbronnen in een meetmethode wil komen. Daarom is dit rapport

stapsgewijs opgebouwd van de initiële signaalbronnen tot aan de soort en kwaliteit van de informatie in de uiteindelijke kaarten. Naast de opbouw van de meetfout zijn ook de aannames, die men moet doen voor het verkrijgen van het resultaat van groot belang, omdat deze wezenlijke invloed hebben op het uiteindelijke resultaat. Getracht is ook de belangrijkste aannames en hun consequenties voor de resultaten van MEDUSA in het rapport te verwerken.

2 Basiskennis

De fysische meetmethode van MEDUSA is het resultaat van een multidisciplinaire onderzoeksinspanning op het grensvlak van geochemie, sedimentologie, hydrodynamica, vaste stof fysica en kernfysica. Uit de geochemie en de geologie was al langer bekend dat er een directe relatie bestaat tussen natuurlijke radioactiviteit en de minerale samenstelling van sedimenten. De sterkte van de natuurlijke radioactiviteit varieert van plaats tot plaats afhankelijk van de bodemsamenstelling. Een zandige bodem heeft een andere natuurlijke radioactiviteit dan een kleiachtige bodem en die is weer anders dan van bijvoorbeeld een veenbodem. Dat we dagelijks bloot staan aan radioactieve straling is niet iets waar we vaak bij stilstaan. Deze radioactieve straling, ook wel gammastraling genoemd, is ultrakortgolvige elektromagnetische straling, die vrijkomt bij processen waarbij atoomkernen van samenstelling veranderen. Op aarde is er eigenlijk maar één natuurlijk proces waarbij gammastraling vrijkomt: Dit is het proces van radioactief verval. Daarnaast worden we ook blootgesteld aan gammastraling uit het heelal, het hoogenergetische deel hiervan wordt kosmische straling genoemd. Een kenmerk van hoogenergetische elektromagnetische straling is dat het een hoog penetrerend vermogen heeft. Deze straling kan diep indringen in lagen materie.

2.1 Radioactief verval

Radioactief verval van atomen treedt op als atoomkernen niet stabiel zijn en na enige tijd uit elkaar vallen. De typische radioactieve vervaltijd van niet-stabiele atomen loopt sterk uiteen, afhankelijk van het soort atoom (isotoop). Dit proces van uit elkaar vallen gaat net zolang door totdat er alleen atomen over blijven die wel stabiel zijn. Bij elk radioactief verval komt energie vrij. Dit kan in de vorm van deeltjes of in de vorm van gammastraling zijn. De hoeveelheid energie die vrijkomt bij radioactief verval is direct afhankelijk van welk isotoop uit elkaar valt en welke stukken (atomen) daarbij vrijkomen. Dit betekent dat energie van vrijkomende gammastraling je iets kan vertellen over het isotoop dat verviel. Dit gegeven wordt gebruikt bij het meten van gammastraling de zogenaamde radiometrie.

2.1.1 Natuurlijke en antropogene radioactiviteit van de bodem

In de natuur komt slechts een beperkt aantal radioactieve isotopen in meetbare hoeveelheden voor in het sediment en gesteente. Dit zijn radioactieve isotopen (radionucliden) met zeer lange levensduur (vervaltijd). In de praktijk blijkt de natuurlijke radioactieve straling uit de bodem hoofdzakelijk afkomstig te zijn uit gammastraling, die vrijkomt uit de vervalreeksen van de volgende langlevende radionucliden ^{40}K, ^{238}U en ^{232}Th. Op sommige locaties is de radioactiviteit hoger dan men op grond van de voorraad natuurlijke radionucliden zou verwachten. Dit komt omdat de bodem op deze locaties is verrijkt met door de mens geproduceerde (antropogene) radionucliden, zoals ^{60}Co en ^{137}Cs, die ook gammastraling uitzenden bij hun verval. Antropogene radionucliden zijn door hun artificiële oorsprong over het algemeen niet kenmerkend voor de minerale bodemsamenstelling van het sediment. Echter deze antropogene radioactiviteit

is soms wel kenmerkend voor materiaal wat door de mens in het milieu is gebracht.

2.2 Achtergrondstraling

Bij meting van gammastraling uit de bodem moet men rekening houden met achtergrondstraling vanuit andere bronnen. Een belangrijke storingsbron is gamma straling uit de kosmos. Voor dit soort achtergrondstraling zal gecorrigeerd moeten worden. Op de herkomst van deze kosmische straling gaan we nu niet in, omdat het heelal nogal divers in zijn bronnen is.
Een tweede storingsbron is röntgenstraling. Er bestaat energetisch gezien een gebied van overlap tussen gamma en röntgenstraling. De herkomst is echter verschillend. Röntgenstraling komt vrij bij toestandsovergangen van elektronen in de binnenste elektronbanden van het atoom, terwijl gammastraling zoals reeds vermeld uit de kern afkomstig is. Voor de detectie is het echter wel van belang om te beseffen dat röntgenfotonen in het overlapgebied energetisch niet te onderscheiden zijn van gammafotonen. Over het algemeen komt röntgenstraling echter alleen vrij als een atoom wordt bestookt met hoogenergetische deeltjes of straling. Bij radioactief verval kan door botsing van de vrijkomende deeltjes of gammastraling met de elektronen dus röntgenstraling geproduceerd worden.

3 Meetmethode MEDUSA

MEDUSA meet gammastraling. Elke gammastraal wordt geteld en gesorteerd op energie, zodat een gamma spectrum ontstaat. Dit noemt men gammaspectroscopie of ook wel gammaradiometrie. Om de gammaspectra te kunnen vertalen naar de bronnen van herkomst, de concentratie radioactieve elementen, moet men precies de stralingseigenschappen van deze elementen kennen. Bovendien speelt de wijze waarop de straling gedetecteerd wordt een rol.
Zoals in elke vorm van spectroscopie kan de éénduidigheid van een gammaspectrum beperkt zijn als twee isotopen energetisch vrijwel identieke gammastraling zouden uitzenden. In beide gevallen zouden we hetzelfde spectrum meten, zodat de isotopen voor MEDUSA niet te onderscheiden zijn.
In dit hoofdstuk behandelen we de meetmethodiek van MEDUSA stapsgewijs.

3.1 Detectie van gamma

Op welke wijze kunnen we gammastraling detecteren? Voor het vangen van gammafotonen is een botsing met andere materie noodzakelijk, omdat men uiteindelijke een elektronisch signaal nodig heeft voor de data-acquisitie. Zoals reeds eerder vermeld heeft gammastraling een zeer hoog penetrerend vermogen, de straling heeft een grote kans om diep door te dringen in een materiaal voordat er een interactie optreedt tussen het foton en de materie.

3.1.1 Interacties tussen gammastraling en materie

Er zijn verschillende processen mogelijk bij een botsing tussen een gammafoton en een atoom. Gammafotonen zijn ioniserende stralingsdeeltjes, dat wil zeggen ze hebben zoveel energie dat ze in staat zijn elektronen weg te kaatsen uit de elektronenschillen van het atoom. Door zo'n botsing ontstaat een vacature in de elektronenschillen van het atoom, die vrijwel direct weer zal worden opgevuld door elektronen uit meer naar buiten gelegen schillen. Maar het tekort aan elektronen blijft enige tijd bestaan, zodat het atoom een netto lading krijgt. Een dergelijk atoom noemen we een ion,vandaar de term "ioniserende straling". Bij overgangen van elektronen van de ene baan naar de andere komt energie vrij in de vorm van licht of roostertrillingen. Bij de botsing van gammastraling met materie komt dus energie vrij in de vorm van elektronen, roostertrillingen en/of licht. Detectors waarmee gammastraling gedetecteerd wordt maken gebruik van deze interacties.

3.1.2 Detectors

Voor ons geval zijn twee soorten Gamma detectors van belang: de scintillation detector en de halfgeleider detector. De eerste detector zit in MEDUSA en de laatste detector wordt gebruikt in een laboratorium opstelling van het KVI.

- De scintillation detector

Bij de interactie tussen een gammafoton en een scintillation kristal komt licht vrij. De lichtflitsen uit het scintillation kristal worden geconverteerd naar elektrische signalen met behulp van een fotomultiplicator buis (PMT). Een PMT geeft elektrische signaalpulsen af waarvan de hoogte evenredig is met de

intensiteit van de lichtflitsen. De elektrische pulsjes uit de PMT worden zodanig versterkt dat ze geschikt zijn voor digitalisatie.

Een goed scintillation kristal is groot, helder en doorzichtig en heeft een hoge dichtheid, Daarnaast moet de lichtopbrengst evenredig zijn met de energie van de passerende gammastraal. Er zijn maar weinig materialen, die deze eigenschappen hebben. Voorbeelden van scintillation materialen, die in het MEDUSA systeem zijn toegepast zijn NaI (Natriumjodide) en BGO (Berillium Germanium oxyde) kristallen. Dit laatste kristal heeft een hogere detectie efficiëntie en wordt daarom momenteel als standaard detector gebruikt. Het vermogen om dicht bij elkaar gelegen energiepieken te onderscheiden is van BGO kristal wel lager dan van een NaI kristal

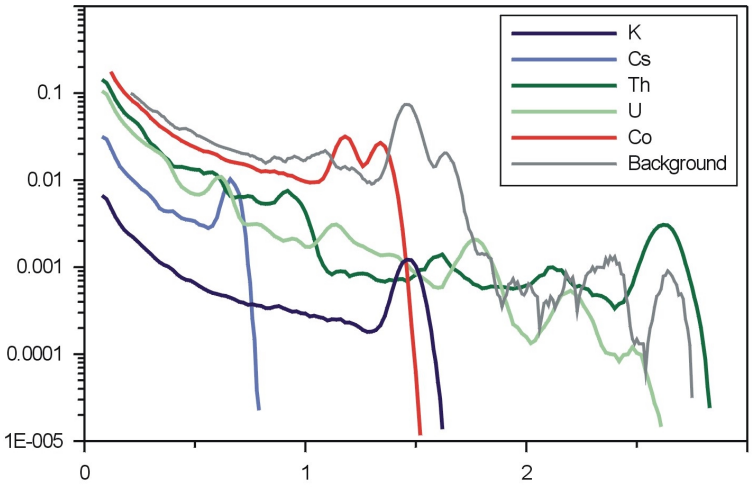
- De halfgeleider detector

Bij de radiometrische metingen aan bodemmonsters in het KVI-laboratorium wordt gebruik gemaakt van een ander type detector, namelijk een halfgeleider detector. Halfgeleider detectors hebben een diode structuur, die zodanig is dat als er op de juiste manier spanning overgeplaatst wordt er geen stroom loopt. Dit komt doordat er in de detector een laag gecreëerd wordt waar alle ladingdragers uit weggevoerd zijn, de depletielaag. Wanneer een gammastraal door de depletielaag gaat, worden hier nieuwe ladingdragers gecreëerd, die onder invloed van de opgelegde spanning weer snel worden afgevoerd. Hierdoor loopt er een klein stroompulsje, dat evenredig is met de energie van het passerende gammafoton. Na versterking wordt dit pulsje gedigitaliseerd.

3.1.3 Van counts naar spectra

Radioactief verval is een stochastisch proces, waarbij het optreden van verval met een zekere willekeur plaats vindt in de tijd. Het tijdsinterval tussen binnenkomende counts schommelt hierdoor rond een zeker gemiddelde met vaste onzekerheidsmarge, die bij radioactiviteit volgt uit de Poisson verdeling. De Poisson verdeling geeft bij detectie van N gebeurtenissen een gemiddelde met een standaard afwijking van √N.

Door over een periode alle gedetecteerde pulsen op hun intensiteit te sorteren en te tellen kan een staafdiagram worden opgebouwd waarbij de hoogte van elke staafje het aantal binnenkomende pulsen met een bepaalde intensiteit voorstelt. Zo'n diagram is het gammaspectrum, zie figuur 1 voor de gammaspectra van een aantal belangrijke radionucliden



Figuur 1: referentie gammaspectra gemeten met MEDUSA voor een aantal belangrijke radionucliden

3.2 Verwerking van gammaspectra tot nuclidenconcentraties

Een gammaspectrum bestaat uit een achtergrond signaal met daarop gesuperponeerd een reeks energiepieken, die kunnen worden toegekend aan specifieke radionucliden. Een gemeten gammaspectrum kan men opdelen naar activiteitsconcentraties voor de verschillende radionucliden en een achtergrondsignaal. Als het achtergrondsignaal niet onafhankelijk gemeten kan worden moeten er voldoende counts in de specifieke pieken aanwezig zijn om het signaal te kunnen scheiden van de achtergrond. Het aantal counts is o.a. afhankelijk van de meettijd waarin een spectrum wordt opgebouwd. Gebruikelijk is echter om een achtergrond spectrum te bepalen door de detector ruim vrij van de bodem in het water te hangen.

3.2.1 Herkenning nucliden uit spectra

Bij elk radioactief verval komt een voor deze overgang specifieke hoeveelheid energie vrij. Deze energie kan vrijkomen in de vorm gammastralen met deze kenmerkende hoeveelheid energie. In het gedetecteerde gammaspectrum komen gammastralen met gelijke energie op één plaats terecht in het spectrum. Bij verval van verschillende radioactie isotopen komen verschillende hoeveelheden energie vrij waardoor de pieken in het spectrum op verschillende plaatsen liggen. De ligging van deze pieken is voor de meeste radioactieve isotopen bekend, alsmede het verband tussen de piekhoogte en de concentratie van de betreffende radionucliden, zie figuur 1
Zoals reeds eerder vermeldt, zijn er bij natuurlijke radioactiviteit drie radioisotopen van belang. Het betreft K^{40}, Th^{232} en Bi^{214}. Daarnaast kan men door menselijk toedoen ook sporen van Cs^{137} en Co^{60} in het veld terugvinden.

3.2.2 concentratiebepaling van een radionuclide uit gammaspectra

Voor de bepaling van de activiteitsconcentraties van de radionucliden in de *natte* waterbodem moet men de detector kalibreren. Dit doet men door bestudering van de respons van het meetsysteem op kalibratiemonsters waarvan de concentraties van de radionucliden bekend zijn. Bij een bepaalde concentratie van een zeker radionuclide registreert het systeem een vaste gemiddelde countrate (radioactiviteit) voor dat radionuclide. Is de concentratie van datzelfde isotoop in het veld de helft lager dan zal de gedetecteerd radioactiviteit ook gehalveerd zijn. Door een kalibratieprocedure van de detector te doorlopen voor alle in het veld aanwezige radionucliden kan men in het veld simultaan de activiteitsconcentraties hiervan bepalen. Belangrijk in deze procedure is dat de geometrie waarin het monstermateriaal wordt aangeboden vergelijkbaar is met de geometrie waarin de veldmonsters worden geanalyseerd. Een detector omringd door monstermateriaal ziet meer activiteit dan een detector liggend op het hetzelfde monstermateriaal.

3.3 Van radioactiviteit naar sedimentsamenstelling

Voor de vertaling van de activiteitsconcentraties van natuurlijke radionucliden naar sedimentsamenstelling is het noodzakelijk dat er een vaste relatie bestaat tussen de minerale samenstelling van de sedimentsoorten en de concentraties radionucliden. In de praktijk worden deze vaste relaties ook gevonden. De typische concentraties natuurlijke radionucliden in een soort sediment noemen we de radiometrische fingerprint van het sediment. Als sedimentsoorten verschillende fingerprints hebben dan kun je ze radiometrisch onderscheiden. Van een mix van beide sedimentsoorten kan men op basis van radiometrie ook de onderlinge verhouding bepalen. Echter voordat men zover is zal men eerst

de geschikte radiometrische fingerprints voor de aanwezige sedimentsoorten bepaald moeten hebben.

3.3.1 Opsporen van representatieve sedimentmonsters

Het opbouwen van een reeks representatieve radiometrische fingerprints voor de sedimenten in een bepaald gebied is één van de moeilijkste onderdelen bij de inzet van gammaradiometrie voor bodemsamenstelling. Het begint al bij de opsporing van een goede set monsters, op grond waarvan de basis gelegd kan worden voor de set met fingerprints. Voor deze opsporing is een goede morfologische kennis van het onderzoeksgebied vereist. In de ideale situatie heeft men van alle relevante sedimentsoorten *zuivere* monsters.

3.3.2 Aanpak bij niet ideale sedimentmonsters

In de praktijk blijkt echter dat men vaak te maken heeft met een situatie waarbij alleen gemengde monsters voor handen zijn. Een voorbeeld is het vinden van zand en slib monsters. Het onderscheid tussen zand en slib wordt in principe gemaakt op basis van het verschil in korrelgrootte. Men zou in dit geval kunnen proberen de beschikbare monsters zodanig voor te bewerken dat men uiteindelijk toch zuivere monsters heeft. Zeven is een techniek die men voor zand/slib scheiding gebruikt wordt. Echter, Het blijkt dat deze aanpak nogal bewerkelijk en daarmee kostbaar is.

Een alternatief is het gebruik van andere goedkopere laboratorium meettechnieken voor classificatie van de sedimentsoorten.
Voor de bepaling van de zand/slib verhouding in een monster kan men ook een deeltjesgroottebepaling doen met laserdiffractie (malvern analyse). Deze strategie is bij de kartering van het Hollandsch Diep in 1998 toegepast. Daarnaast blijkt een verdere analyse van de geochemie van de monsters ook vaak nuttig voor de onderbouwing van de gevonden fingerprints.

3.3.3 Bepaling radiometrie van representatief sediment

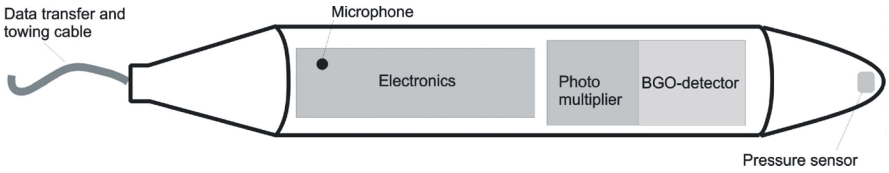
Als men uiteindelijk een geschikte reeks monsters heeft dan moet van deze monsters de radiometrische fingerprint bepaald worden. Dit doet men door radiometrische meting in het laboratorium met een speciale hoge resolutie halfgeleider detector meetsysteem. In deze opstelling worden alleen *droge* monsters geanalyseerd.

3.3.4 Significantie van de radiometrische verschillen tussen de sedimenttypen

Op basis van de gevonden fingerprints is een conversie matrix op te stellen waarmee men de activiteitsconcentraties kan vertalen naar een sedimentsamenstelling. Hiervoor is het noodzakelijk dat de fingerprints van de sedimentsoorten lineair onafhankelijk van elkaar zijn. Dit betekent dat de sediment soorten binnen de meetfout voldoende radiometrisch verschillende fingerprints moeten hebben.

3.3.5 Door toepassing fingerprintmatrix van radiometrie naar sedimentsamenstelling

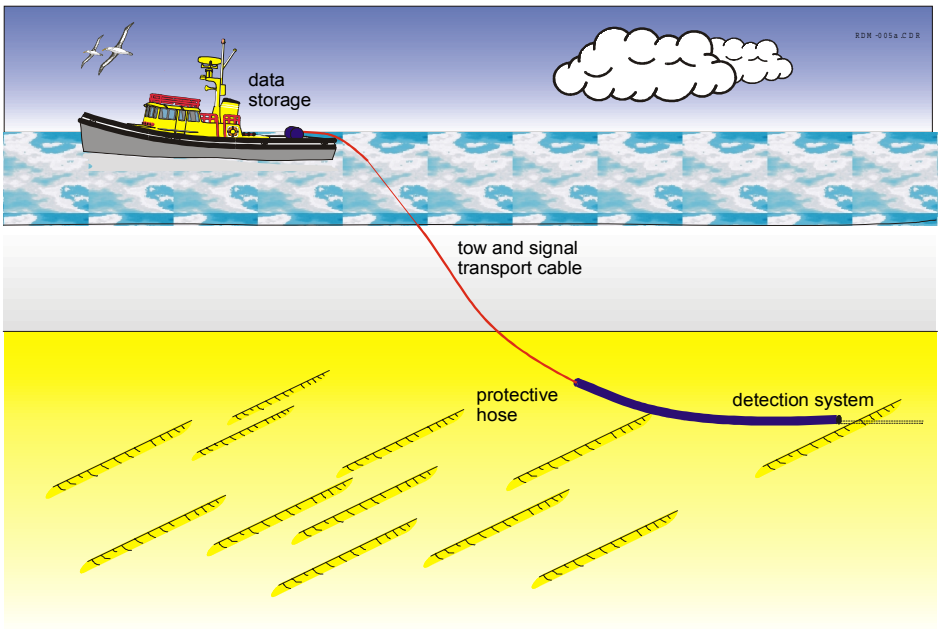
Als men eenmaal een goed onderbouwde conversiematrix heeft opgesteld dan kan men elke verhouding in concentraties van de radionucliden in het veld omzetten in een de bijbehorende sedimentsamenstelling.



Figuur 2: schematische weergave van de opzet van de MEDUSA sleepdetector

3.4 MEDUSA: in-situ gamma radiometrie

In plaats van de bodemmonsters naar het laboratorium te brengen kan men ook de detector meenemen het veld in. Het MEDUSA systeem behelst deze laatste toepassing van gammaradiometrie. MEDUSA is een gammadetector, die over de waterbodem wordt gesleept (figuur 2 en 3) met een snelheid van circa 2 meter/sec. Het opbouwen van een spectrum duurt 10 sec. Dit spectrum wordt volledig automatisch geanalyseerd, zodanig dat men de activiteitsconcentraties van de verschillende natuurlijke radionucliden meet. Men krijgt dus informatie met een plaatsresolutie van circa 20 m langs een lijn. Door raaien te varen binnen een surveygebied is voldoende informatie in te winnen voor een gebiedsdekkende kaart. In figuur 4 is schematisch weergegeven via welke stappen we met medusa sediment kaart op kunnen bouwen.



Figuur 3: de MEDUSA detector wordt achter een schip over de bodem gesleept

3.4.1 Wat ziet MEDUSA van de waterbodem

Gammastraling heeft een hoog penetrerend vermogen. Doordat kans is op absorptie in het bodemmateriaal zal niet elke gammastraal de detector

bereiken. De kans dat een gammastraal van een diepere laag de detector bereikt is kleiner dan voor gammastraling van de toplaag. De kansverdeling voor detectie heeft een exponentiële vorm als functie van de afstand tot de detector. Het KVI hanteert een effectieve laagdikte van 30 cm waar circa 95 % van het signaal vandaan komt. Deze laagdikte is niet gegarandeerd. De absorptie van gammastraling wordt namelijk bepaald door de dichtheid van het sediment. Hoe hoger de dichtheid hoe groter de kans op absorptie is. Dus dichtheidsvariaties spelen een belangrijke rol met betrekking tot de gehanteerde laagdikte. Daarnaast is het penetrerend vermogen van gammastraling energieafhankelijk. Hoe hoger de energie van de fotonen hoe dieper de fotonen door zullen dringen.

3.4.2 Verschil tussen in-situ en laboratorium radiometrie

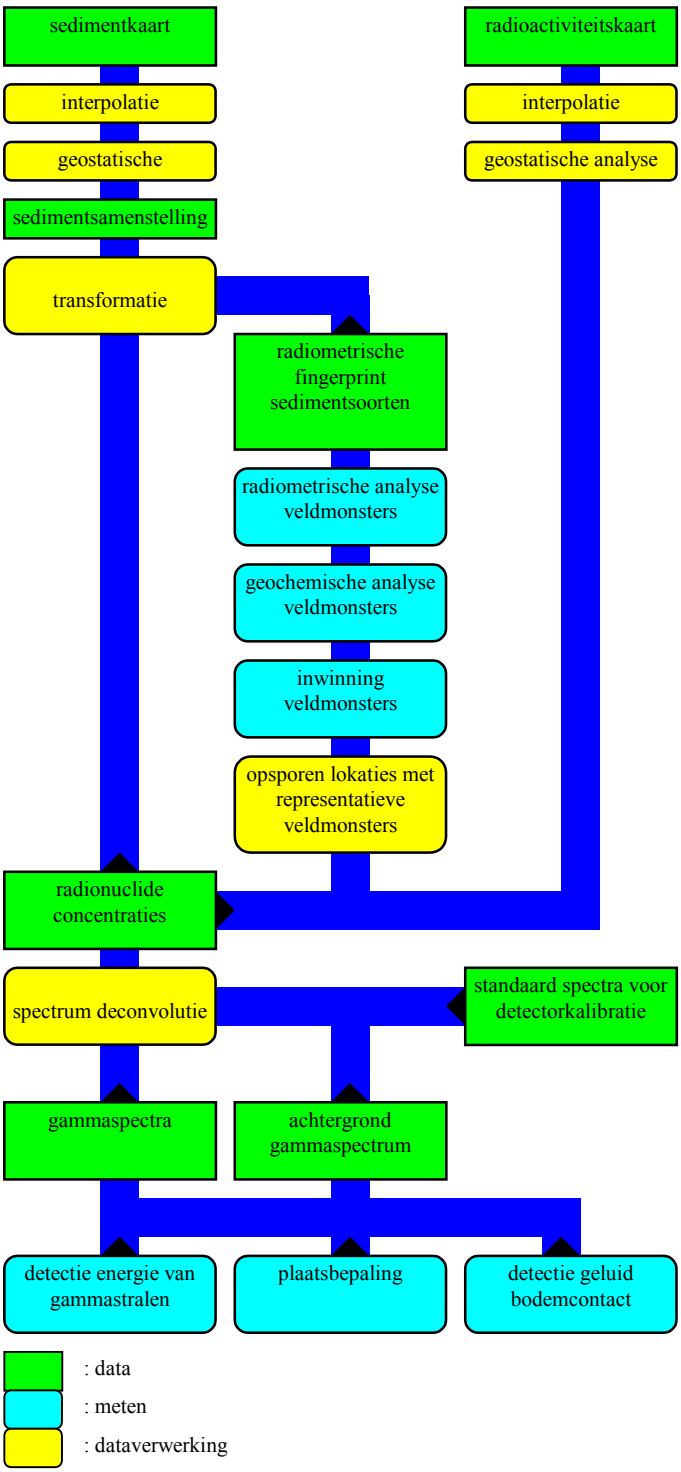
Wanneer men een waterbodem gammaradiometrisch zou onderzoeken met MEDUSA en ter vergelijking een bodemmonster van dezelfde bodem in het laboratorium gammaradiometrisch zou laten analyseren, dan verwacht je vergelijkbare resultaten. Echter er zijn een paar dingen waar men rekening mee moet houden. De detectors hebben verschillende gevoeligheden. Voor een goede vergelijking moet hiervoor gecorrigeerd worden. Daarnaast zijn in het laboratorium de waterbodemmonsters droog gemaakt, terwijl de in-situ waterbodem natuurlijk doorweekt is. De invloed hiervan op de gammaradiometrie is nog niet geheel duidelijk. De intuïtieve verwachting is dat je in de in-situ waterbodem tot een lagere countrate komt bij een gelijke concentratie radionucliden in het sediment door de extra absorptie van water. Om met MEDUSA tot de juiste concentraties radionucliden te komen wordt voor de waterabsorptie in de bodem gecorrigeerd.

3.4.3 Varen met MEDUSA

Om tot een goed meetresultaat te komen bij het varen met MEDUSA is het belangrijk dat de detector contact maakt met de bodem, maar er niet in wegzakt. Om te controleren of aan de eerste eis voldaan is heeft men in de MEDUSA sleepsensor een microfoon opgenomen, waarmee men controleert op de aanwezigheid van het wrijvingsgeluid, dat vrijkomt bij sleepcontact van de sensor met de bodem.

Het effect van inzinking van de MEDUSA sensor in de bodem werd onderzocht in het kader van de sediment kartering van de binnenzijde Haringvliet in de zomer van 1999. Hierbij werd de inzinking op de bodem van de sensor gevolgd door duikers met een camera, gecombineerd met de gemeten signalen. De eerste resultaten zijn bemoedigend. Zandbodems vormen geen probleem, maar ook in weke slibbodem zakt de sensor vanzelf niet erg diep weg. Met wat externe hulp kan men de sensor wel in zo'n bodem duwen, het effect is dan ook direct in de meetresultaten waarneembaar.

De afstand tussen de detector en het schip maakt dat er afwijkingen kunnen optreden tussen de gegeven locatie en de gemeten locatie, zeker als men in een traject met bochten vaart. Dit komt om dat het plaatsbepaling systeem zich aan boord van het schip bevindt, terwijl de sensor achter het schip wordt aangesleept. Hiervoor moet men compenseren door een koppeling met de gegevens van de winch en de gevaren route. Het KVI heeft met dit soort compensaties al enige ervaring opgedaan. Verder is er in het MEDUSA systeem een druksensor opgenomen, waarmee men de hoogte van de waterkolom boven de sensor bepaald.



Figuur 4: stappenschema voor het verkrijgen van sediment en radioactiviteitskaarten met MEDUSA

3.5 Door interpolatie naar een MEDUSA kartering

Op de raaien heeft men een groot aantal meetpunten, om de 20 meter een punt. Voor het verkrijgen van een gebiedsdekkend beeld zal men zich van een interpolatieprocedure moeten bedienen. Uitvoering van een geschikte interpolatie op dit soort data is een specialisme. Dit specialisme wordt geostatistiek genoemd.
Voor de interpolatie is het van groot belang dat de dichtheid van de raaien voldoende is om de variaties in de bodemsamenstelling te kunnen volgen. Hiervoor moet de mate van verwantschap tussen de punten als functie van de onderlinge afstand of andere parameters worden uitgewerkt. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van een speciale soort plot een variogram genaamd. Uit een dergelijk variogram volgen eisen voor de raaiafstand. Wordt aan deze eisen niet voldaan dan is het risico van interpolatie artefacten groot.

In de praktijk blijken sterke correlaties te bestaan tussen de bodemligging (diepte) en bodemsamenstelling. Dit soort correlaties kunnen gebruikt worden om het interpolatieschema te verbeteren. Zodat men uiteindelijk een betrouwbaarder bodemsamenstellingskaart heeft.

4 Waarvoor kan men MEDUSA metingen gebruiken

In de volgende paragrafen volgt een overzicht van toepassingen, waar MEDUSA metingen geschikt voor zijn:

4.1 Detectie van gammastralen en bijbehorende energie

Met MEDUSA kan men zowel de intensiteit als het energie spectrum van de aanwezige gammastralen bepalen als functie van de plaats (x,y,z). Mits men voldoende meetpunten heeft kan men een kaart van deze parameters opbouwen.

4.2 Bepaling van de concentratie radionucliden in de toplaag van de waterbodem

Door analyse van de gammaspectra en kalibratie van de sensor aan standaard monsters kan voor de aanwezige radionucliden een activiteitsconcentratie worden bepaald als functie van de plaats(x,y,z). Ook hier geldt weer dat, mits men voldoende meetpunten heeft, men kaarten van deze parameters kan opbouwen.

4.3 Bepaling van de sedimentsamenstelling van de toplaag van de waterbodem

Als er in een gebied een beperkt aantal radiometrisch onderscheidbare sedimenten aanwezig zijn kan men op basis van de radiometrische fingerprints van deze sedimenten de verhouding van de activiteitsconcentratie van de radionucliden vertalen naar een sedimentsamenstelling. Deze sedimentsamenstelling wijkt af van de werkelijkheid zodra er niet meer wordt voldaan aan een reeks aannames over de bodemopbouw en bodemeigenschappen. Ook hier geldt weer, dat mits men voldoende meetpunten heeft, men kaarten van de sedimentsamenstelling kan opbouwen

4.4 Detectie van morfologische veranderingen in de toplaag door transportprocessen

Metingen met MEDUSA zijn reproduceerbaar. Als men de sensor voldoende lang op dezelfde plek legt dan zal men steeds hetzelfde gammaspectrum meten als de bodemsamenstelling niet veranderd. Hierdoor is MEDUSA zeer goed geschikt voor het detecteren en kwantificeren van morfologische veranderingen in de waterbodem. Alleen als er sprake is van een nieuw radiometrisch onderscheidbaar sediment in een bestaande omgeving kan men sedimentkaarten van verschillende tijdstippen gebruiken om informatie te krijgen over netto sediment transport. Daarbij moet worden aangeven dat niet het transportproces zelf wordt weergegeven, maar het resulterende *netto effect* op de bodemstelling van de som van alle relevante sediment transport mechanismen. Een andere insteek is de kaarten van MEDUSA te laten functioneren als een soort randvoorwaarde in de transportmodellering.

5 Aanbevolen werkwijze met MEDUSA

5.1 Projectvraagstelling

Op het moment dat een projectleider een project heeft, waarin de samenstelling van de waterbodemtoplaag van een gebied een belangrijke rol speelt, dan moet deze projectleider zich serieus afvragen of inzet van MEDUSA nuttig zou kunnen zijn. Dit systeem is het krachtigste meetsysteem, waarmee op dit moment kwantitatieve reproduceerbare metingen van de bodemsamenstelling uitgevoerd kunnen worden in korte tijd over een groot oppervlak. In dit stadium zou deze projectleider in staat moeten zijn om de volgende vragen te beantwoorden

- Wat wil men weten van het gebied?
- Welke relatie heeft de projectdoelstelling met de bodem?
- Welke sedimenttypen zijn van belang voor het onderzoek?
- Welke deel van de vraag kan men met de gamma-radiometrische metingen beantwoorden?

Op het moment dat de projectleider het meetprobleem helder voor ogen heeft en denkt dat inzet van MEDUSA nuttig zou kunnen zijn, is het verstandig contact op te nemen met mensen die ervaringen hebben met MEDUSA. Zowel bij RIKZ als bij RIZA zijn er projectleiders met dergelijke ervaring, zie voor concrete namen de RWS projectenlijst en de literatuurlijst. Deze mensen zijn over het algemeen zeker bereid om mee te denken met het probleem. Toch is er op dit moment al een soort basis werkwijze voor MEDUSA metingen te formuleren op grond van ervaringen die in het verleden zijn opgedaan.

5.2 Voorbereiding

Stel dat er is besloten dat MEDUSA waarschijnlijk nuttig is in te zetten bij het project. De ingewikkeldste MEDUSA meting is een meting waarbij we een sediment kartering van een gebied willen maken. Andere produkten, die we met MEDUSA kunnen meten zullen we beschouwen als tussenprodukten. Als men ook geïnteresseerd is in veranderingen in de waterbodem over een gegeven periode dan zal men meerdere keren met MEDUSA in deze periode een dergelijke kaart willen maken. Daarom beperken we ons in deze beschrijving van de werkwijze tot produktie van één eerste MEDUSA sediment kaart.

- Wat voor soort gegevens kunnen nuttig zijn bij de voorbereiding van een dergelijke meting. Want we willen voor zo min mogelijke verrassingen komen te staan. Verrassingen zijn echter heel goed mogelijk omdat in de meeste gevallen slechts een beperkte hoeveelheid gegevens beschikbaar is van het gebied. Het is in elk geval gewenst om alle informatie die over de bodem in het gebied al bekend is boven tafel te krijgen voordat er gemeten gaat worden. Minimaal is een kaart van de bodemligging wel erg handig. We moeten immers het MEDUSA systeem door het gebied gaan slepen met een schip, een WESP of een auto.

Maar ook informatie over de variatie in sedimenten en de gelaagdheid van de bodem zijn nuttige gegevens om te hebben bij het uitstippelen van MEDUSA metingen.

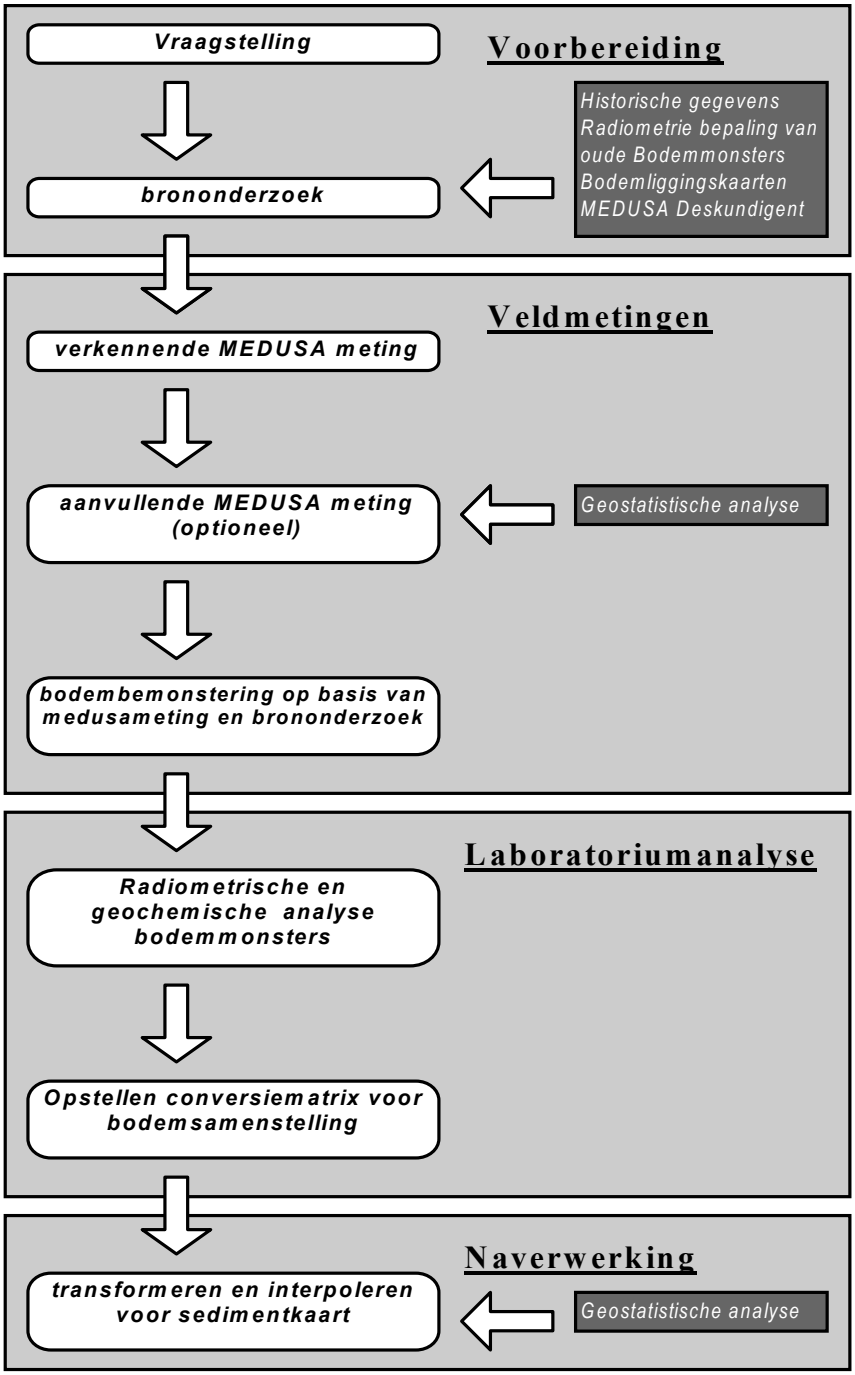
Voor een MEDUSA sedimentkartering zullen we moeten nagaan of er binnen het gegeven gebied aan de randvoorwaarden voor een MEDUSA kartering wordt voldaan. Deze randvoorwaarden komen voor deel voort uit de aannames die men moet gaan doen. De controle van deze randvoorwaarden kan in de meeste gevallen niet voorafgaand aan de meting al volledig beantwoord worden. In de meeste gevallen is de beste en goedkoopste aanpak een MEDUSA meting gevolgd door gericht bodembemonstering op basis van de MEDUSA meetresultaten. Voor de toetsing van de belangrijkste randvoorwaarden moeten de volgende vragen beantwoord worden:

- Hoeveel sedimenttypen zijn er in het onderzoeksgebied?
- Hoe gelaagd is het sediment van de toplaag?
- Hoeveel sedimenttypen kunnen we radiometrisch onderscheiden?
- Hebben we voldoende MEDUSA metingen om de bodemvariaties in het gebied met voldoende nauwkeurigheid te kunnen volgen?

Een verkennende stap is mogelijk in het geval er al oude bodemmonsters van de belangrijkste sedimenten in een gebied beschikbaar zijn. Door deze monsters voorafgaand aan meting in het laboratorium van het KVI te laten analyseren kan men een indicatie krijgen of deze sedimenten radiometrisch voldoende verschillend zijn om ze in het gebied te kunnen onderscheiden. Als inderdaad sprake is van voldoende verschil dan kan men daarmee een verkennende MEDUSA meting onderbouwen. Zijn er geen oude monsters beschikbaar dan is een verkennende MEDUSA meting toch de handigste eerste stap.

5.3 Verkennende MEDUSA meting

Met MEDUSA kan men in korte tijd een groot gebied dicht bemonsteren. De werkwijze is vergelijkbaar met lodingsmetingen voor de bodemligging. Om een kaart te kunnen bouwen zullen we een netwerk van raaien in het gebied moeten varen. Langs de raaien zal men veel meetpunten hebben tussen de raaien zal geïnterpoleerd moeten worden. De kwaliteit en onzekerheid van de uiteindelijk kaart hangen af of er voldoende dicht bemonsterd is om de variaties in de bodemsamenstelling te kunnen volgen. Een veelgekozen raaiafstand is circa 500m bij een verkennende MEDUSA meting. De raaien worden meestal zo gelegd dat ze liggen in de richting met de grootste variatie in de bodemsamenstelling. Vaak zal men voor de zekerheid ook raaien dwars op de richting van de eerste set raaienwillen varen.
Als men op grond van deze eerste meting gelijk een kaart wil maken dan is het handig om al tijdens de metingen de eerste MEDUSA resultaten te analyseren op de juistheid van de gekozen raaiafstand. Dit kan door een variogram van de activiteitsconcentraties van de nucliden op te stellen. Deze activiteitsconcentraties vormen immers de basis voor de uiteindelijke sedimentkaart. Uit zo'n variogram blijkt in welke mate de punten aan elkaar gecorreleerd zijn. Mocht uit deze eerste analyse blijken dat de bemonsteringsdichtheid te laag is voor een betrouwbare interpolatie dan kan overwogen worden om de tussen liggende raaien met metingen in te vullen.
Na afronding van de MEDUSA meting kunnen op grond van gemeten data de radiometrisch meest verschillende locaties worden opgespoord. De ervaring leert dat deze locaties ook de grootste verschillen in sedimentsamenstelling zullen hebben. Het zijn de bodemextremen in het gebied.



Figuur 5: stappenschema voor een MEDUSA project

5.4 Bodemmonsters verzamelen voor de sediment fingerprints

De ruwe activiteitsconcentraties uit de MEDUSA meting gebruiken we voor het vaststellen van de locaties waar de bodem bemonsterd zal moeten gaan worden. Voor de omzetting van activiteitsconcentraties van radionucliden naar sedimentsamenstelling hebben we de karakteristieke radiometrisch fingerprints nodig van de in het gebied aanwezige sedimenten. Hiervoor zullen de bodemmonsters in het laboratorium geanalyseerd moeten worden. Voor de bodembemonstering kunnen het beste boxcore monsters gestoken worden

omdat bij deze monsters de verticale gelaagdheid in tact blijft. Uit elke boxcore moet een tweetal boorkernen gestoken worden. Deze worden voor analyse aan de laboratoria aangeboden.

Standaard wordt er naast een nauwkeurige radiometrisch analyse ook een geochemische analyse uitgevoerd. De volgende systemen worden bij deze geochemische analyse gebruikt:

- Röntgen fluorescentie metingen (XRF)
- Laser diffractie korrelgrootte analyses
- foto's van de dwarsdoorsnede van de boorkernen

Alleen als men zeker weet dat men uitsluitend zuivere bodemmonsters heeft van één soort, dan zou men kunnen overwegen geen geochemische analyse uit te voeren, maar in het algemeen wordt het afgeraden.

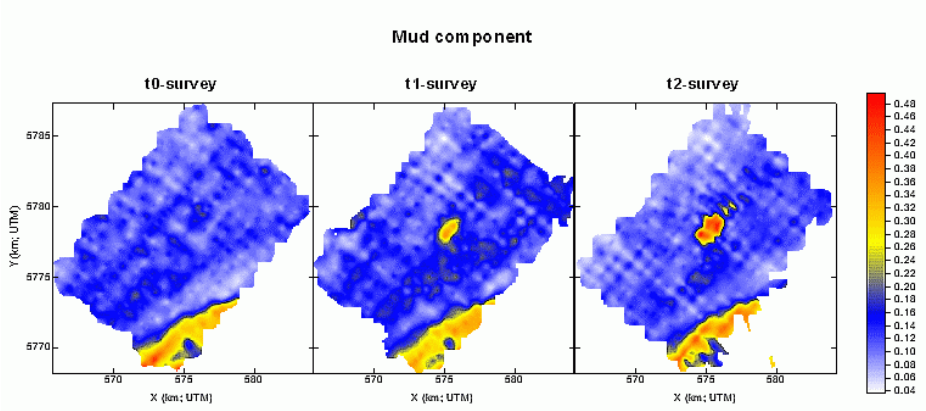
Op grond van deze resultaten is het KVI in staat om een verantwoorde conversiematrix op te stellen. Ook kan worden nagegaan of aan de meeste randvoorwaarden van een kartering is voldaan. Voor de controle op de gelaagdheid in het gebied zou men nog kunnen besluiten wat extra aanvullende bodembemonstering te doen, als daar aanwijzingen voor zijn.

5.5 Produktie sediment kaart

Met de resultaten van de voorafgaande metingen kunnen de MEDUSA metingen worden omgezet naar een gebiedsdekkende kaart voor de bodemsamenstelling. Desgewenst kan bij de interpolatie nog aanvullende informatie gebruikt worden zoals bijvoorbeeld de bodemligging.

In figuur 5 is zijn de stappen in de werkwijze schematisch weergegeven.

6 RWS-projecten met MEDUSA



Figuur 6: sedimentkarteringen van de loswal Noordwest op T0, T1 en T2

6.1 Monitoring van de Alternatieve Loswallen (MAL) voor het storten bagger uit de Rotterdamse haven

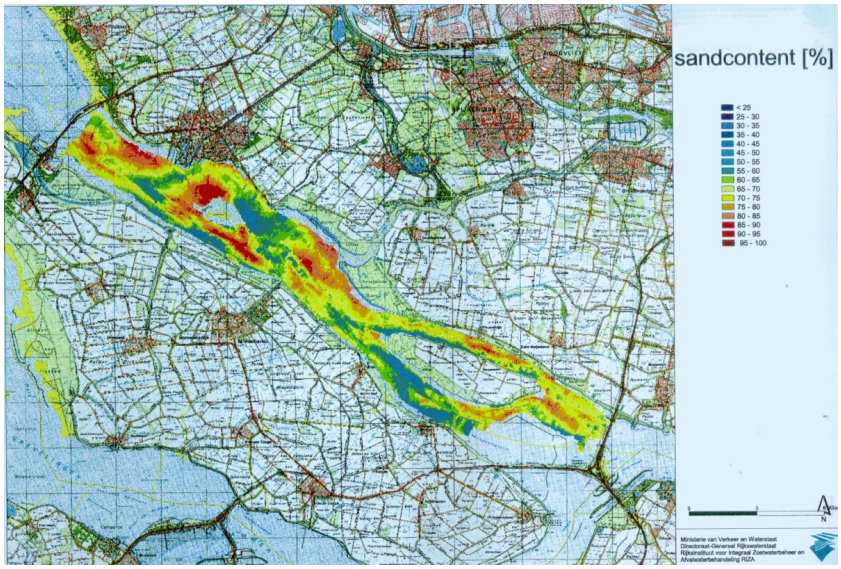
Uit modelstudies van de verspreiding van baggerslib vanaf de toenmalige buitengaatse stortlocatie Loswal Noord was gebleken dat een groot deel van dit baggerslib weer terug de haven in stroomde. Bij het project MAL is gezocht naar alternatieve stortlocaties waardoor deze retourstroom zou verminderen. Twee ideeën voor alternatieve stortlocaties zijn bij deze projecten getest. De verderweg gelegen loswal Noordwest en een aantal verdiepte loswallen werden in gebruik genomen.
Een uitgebreid monitoring programma werd ingericht om te controleren of er inderdaad sprake was van een gereduceerde retourstroom van baggerspecie naar de Rotterdamse haven. MEDUSA werd periodiek ingezet om gedetailleerde kaarten te produceren van de resulterende verspreiding van baggerslib van de stortlokaties.
Op Loswal Noordwest is voorafgaand aan de eerste stortingen een T_0 meting uitgevoerd. Het is essentieel bij dit soort toepassingen dat de uitgangssituatie voorafgaand aan de ingreep wordt vastgelegd anders heb je geen goed vergelijkingsmateriaal. Na aanvang van het storten zijn een T_1 en een T_2 situatie met MEDUSA vastgelegd, zie figuur 6. Van alle metingen die in dit project gedaan zijn waren de MEDUSA metingen de enige metingen die een redelijke indicatie gaven voor de grootte van de retourstroom van de nieuwe stortlocaties in de richting van de haven.

6.1.1 aanvullende informatie

project	MAL
opdrachtgever(s)	Gemeentelijk Haven Bedrijf, Dir. Zuid-Holland, Dir. Noordzee en Meetstrategie 2000+
opdrachtnemer	RIKZ
projectleider(s)	Sandeh Stutterheim (RIKZ-AB) Floris Groenendijk (RIKZ-AB)
advisering	Hans Roberti (RIKZ-IT)
uitvoering MEDUSA meting	KVI , meetdienst van DNZ, TNO-NITG
schip	MITRA
aantal sedimentkarteringen	4
kosten MEDUSA per sedimentkartering	circa 200 kf.

6.2 Zandslib kaart van het Hollandsch Diep en de Haringvliet

De grote rivieren, Rijn en Maas stromen uit in het voormalig estuarium Hollandschdiep en Haringvliet. Door de afsluiting bij de deltawerken is de getijdynamiek grotendeels uit dit watersysteem verdwenen. Sindsdien sedimenteert het grootste deel van het gesuspendeerd materiaal in deze bekkens. Het gebied fungeerde jarenlang als een soort vergaarbak van vervuild slib. Momenteel is het aangevoerde slib aanmerkelijk schoner, zodat de oude



Figuur 7: sedimentkaart Haringvliet

vieze sliblaag wordt bedekt met een nieuwe schonere. Als voorbereiding op mogelijke ingrepen in het gebied is door het RIZA onderzoek gedaan naar de ontwikkeling van de morfologie in het gebied. Deze plannen kunnen invloed hebben op de slibhuishouding in het gebied. Één van de mogelijke ingrepen is het terugbrengen van het getij in het gebied. Het risico dat bij deze ingreep vervuilde sliblagen weer in beweging komen is zeker aanwezig.

MEDUSA werd bij dit onderzoek ingezet voor de produktie van een gedetailleerde zand/slib kaart van het gebied zie figuur 7. Hierbij is veel aandacht besteed aan de geochemische onderbouwing en validiteit van de MEDUSA metingen. Later uitgevoerde projecten hebben zeer geprofiteerd van de kennis, die bij dit project is opgedaan.

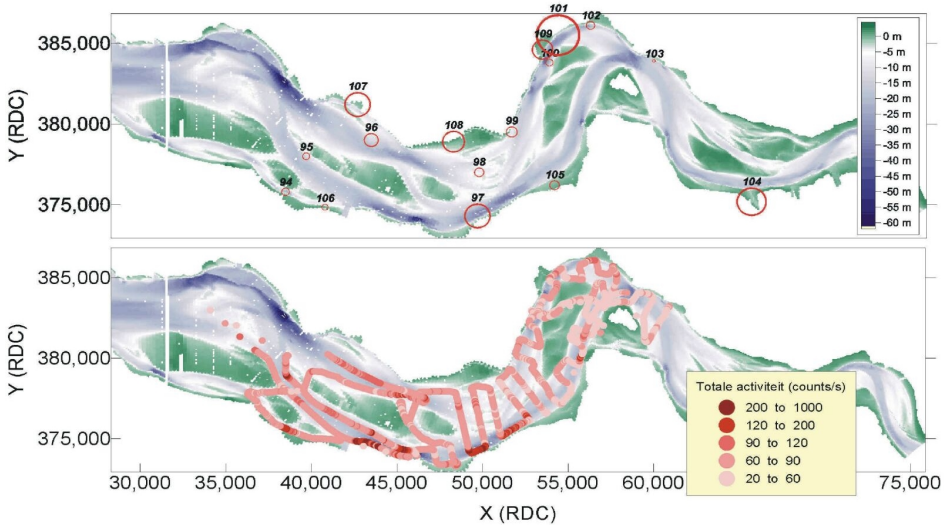
6.2.1 aanvullende informatie

project(en)	sediment kartering Hollands Diep en Haringvliet
opdrachtgever(s)	Dir. Zuid-Holland en RIZA
opdrachtnemer	RIZA
projectleider	Marjolein van Wijngaarden (RIZA-WST)
uitvoering MEDUSA meting	RIZA, KVI , meetdienst van DZH, TNO-NITG
aantal sedimentkarteringen	2
kosten MEDUSA per sedimentkartering	circa 200 kf.

6.3 Boorspecie storten in de Westerschelde

In 1995 is besloten om Zeeuws-Vlaanderen middels een tunnel onder de Westerschelde te verbinden met de rest van Zeeland. Bij de bouw van deze tunnel wordt een boortechniek gebruikt om de kleilagen onder de Westerschelde te penetreren. Het materiaal, boorspecie, dat hierbij vrijkomt moet zoveel mogelijk op milieuverantwoorde wijze afgevoerd worden. Een deel van het materiaal zal in de Westerschelde geloosd worden. Voor deze lozing is vergunning afgegeven door RWS dir. Zeeland. De rechtvaardiging van deze vergunningsverlening moet worden getoetst middels een monitoring programma wat door het RIKZ is opgesteld. MEDUSA wordt bij dit project ingezet om de depositie van het gestorte materiaal in het gebied in beeld in te brengen. Tot nog toe is enkel de voorafgaande T0 meting uitgevoerd zie figuur 8. Bij dit project is veel ervaring opgedaan op het vlak van de praktische uitvoering van een MEDUSA meting in een hoogdynamisch estuarium.

Boven: Westerschelde diepte (lodingen 1998, bron: RWS Dir. Zeeland). Inzet: monsterlokaties. In de labels zijn de K, U en Th waarden per monster genoteerd. De grootte van de lokatiecirkels is indicatief voor de totale activiteit van het monster.
Onder: Idem, nu met Medusa data als inzet. Gegeven zijn de Medusa metingen van de totale activiteit.



Figuur 8: radioactiviteit in Westerschelde

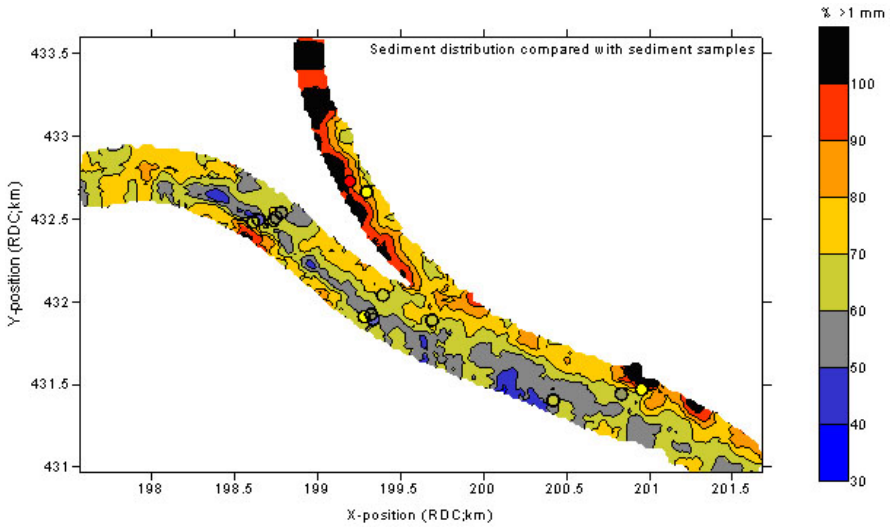
Dergelijke gebieden vragen om een zeer goede voorbereiding. Op dit moment is de ideale werkwijze voor zo'n gebied nog niet uitgekristalliseerd. Verder zijn ook de geochemische aspecten van het gebied weer uitvoerig onder de loep genomen.

6.3.1 aanvullende informatie

project	BOORSPECIE
opdrachtgever(s)	Dir. Zeeland, NV Westerscheldetunnel
opdrachtnemer	RIKZ
projectleider(s)	Thomas Rutten (RIKZ-IT) Aline Arends (RIKZ-AB)
advisering	Hans Roberti (RIKZ-IT)
uitvoering MEDUSA meting	KVI , meetdienst van DZL
schip	KALOO
radiometrische survey	1
kosten MEDUSA survey	circa 50 kf.
Radiometrisch geanalyseerde bodemmonsters	16 stuks
kosten per analyse	circa 400 gulden

6.4 Morfologie bij de Pannerdensche Kop

De duinvorming van de rivierbodem kan bij hoog afvoeren in de rivieren zo groot zijn dat in latere perioden met laagwater de doorvaart van schepen belemmerd wordt. Om betere oplossingen te kunnen aandragen was onvoldoende kennis aanwezig over de processen die hieraan ten grondslag liggen. Daarom heeft het RIZA de afgelopen jaren nieuwe impulsen gegeven aan het onderzoek naar de transportprocessen van zand en stenen in de Nederlandse rivieren. De resultante van deze transportprocessen bepaald de morfologisch ontwikkeling van de rivierbodem. Één van de projecten in dit kader richtte zich op de inzet van nieuwe technieken, die nuttige informatie konden verschaffen bij dit onderzoek. De rol van MEDUSA bij dit project was om inzicht te verschaffen in de morfologische ontwikkeling van de rivierbodem. Met het systeem is een gedetailleerde sedimentkaart gemaakt van het rivierengebied rond de Pannerdensche kop, zie figuur 9.



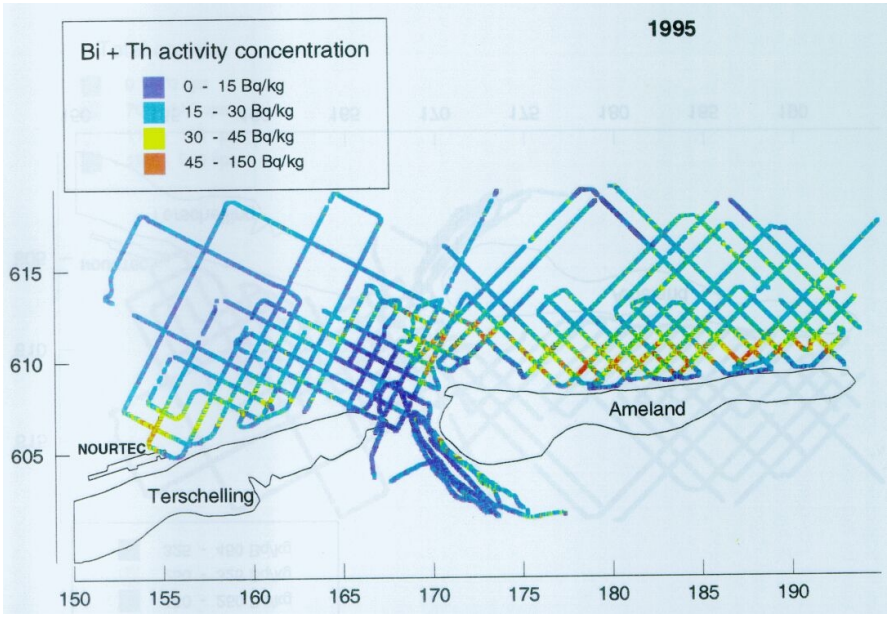
Figuur 9: sedimentkaart pannerdensche kop

6.4.1 aanvullende informatie

project	RIV*MEETMETH
opdrachtgever(s)	HK, RIZA, Dir. Oost Nederland
opdrachtnemer	RIZA
projectleider(s)	Wilfried Ten Brinke (RIZA)
uitvoering MEDUSA meting	KVI , meetdienst van DNZ, TNO-NITG
schip	Ir. F.W. Conrad
aantal sedimentkarteringen	1
kosten MEDUSA per sedimentkartering	circa 100 kf.

6.5 Radiometrische Kartering van de kust bij Terschelling en Ameland

De optimalisatie van de kustsuppleties bij de Waddeneilanden zijn in het kader van het programma K2000 onderzocht. De morfologische ontwikkeling bij de eilanden is ingewikkeld. MEDUSA is bij dit onderzoek in 1995 voor het eerst ingezet om een verband te zoeken tussen de morfologische ontwikkeling van



Figuur 10: radioactiviteit bij de waddeneilanden

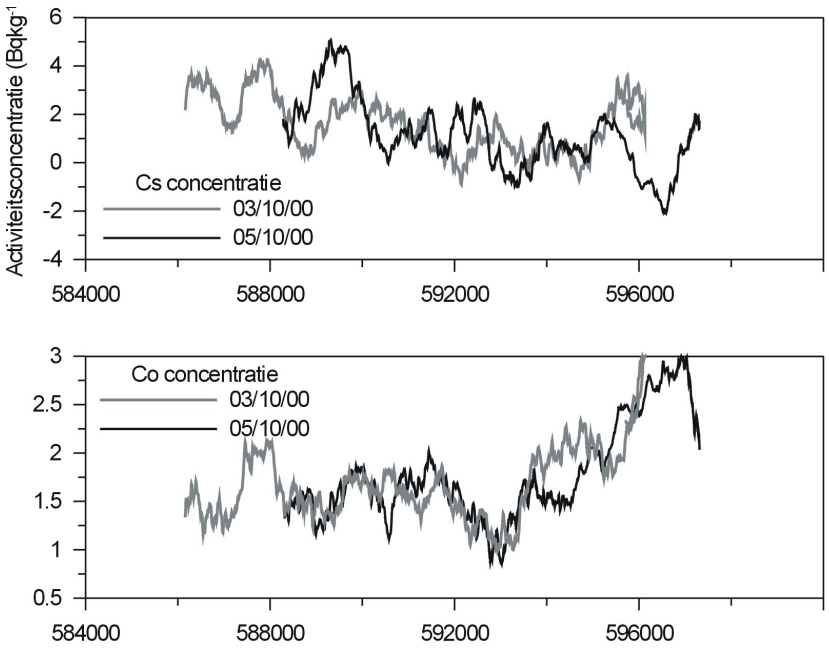
het gebied en natuurlijke radioactiviteit, zie figuur 10. Onderscheid werd gemaakt tussen zwaar zand en licht zand. Zwaar zand bevat meer zware mineralen en is daarom ook radioactiever dan licht zand. Over het algemeen is zwaar zand ook minder mobiel dan licht zand. Dit gegeven zou men kunnen benutten bij kustsuppleties. Bij dit MEDUSA project is veel basis kennis opgedaan die in latere projecten is benut voor echte morfologische karteringen.

6.5.1 aanvullende informatie

project	Sediment Mapping of the seafloor near ameland and Terschelling
opdrachtgever(s)	WONS*K2000, MAST III (SAFE)
opdrachtnemer	RIKZ
projectleider(s)	Albert Oost (RIKZ-AB)
uitvoering MEDUSA meting	KVI, RWS-DNN
schip	Capella
aantal sedimentkarteringen	2

6.6 TOXCOMBI tocht; Radioactiviteit en Olie voor MON*Chemie

Het monitoring programma voor radioactiviteit is erop gericht "een vinger aan de pols te houden" en qua meetkennis voorbereid te zijn op eventuele calamiteiten. Antropogene radioactiviteit in het sediment in de zeebodem was tot nog toe een onderbelicht punt in het programma. Één van de doelstellingen



Figuur 11: Concentraties antropogene radionucliden langs de noordwijkraai

van het TOXCOMBI project was de bruikbaarheid van MEDUSA te testen voor het opsporen en monitoren van antropogene radionucliden in de zeebodem. In zijn huidige vorm kan met MEDUSA ^{137}Cesium en ^{60}Cobalt worden gedetecteerd. Naast de directe toepassing van MEDUSA voor radioactiviteit werd er gekeken naar de bruikbaarheid van de Uranium/Thorium balans als indicator voor olie in de bodem. Het project is eind 2000 afgerond. In figuur 11 is de gemeten concentratie antropogene radionucliden op de Noordwijk raai weergegeven.

6.6.1 aanvullende informatie

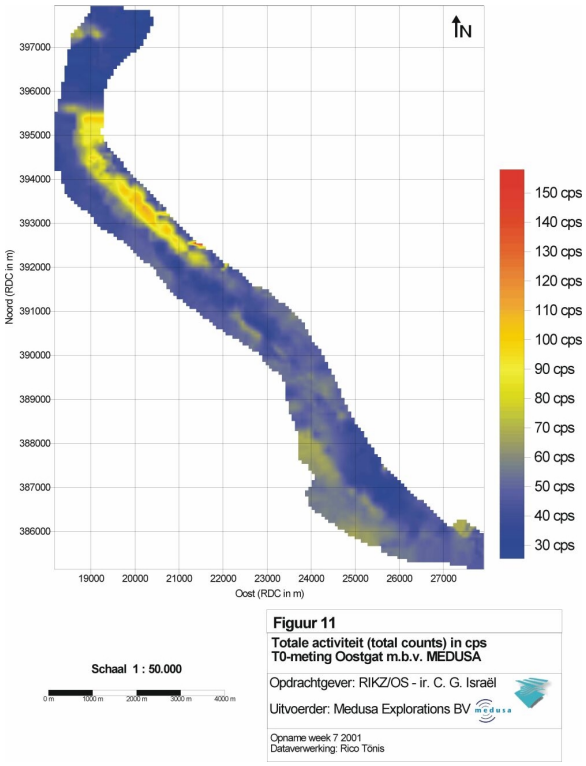
project	MON*Chemie
opdrachtgever(s)	PBNI, MWTL, HK
opdrachtnemer	RIKZ
projectleider(s)	Otto Swertz (RIKZ-IT) Wiegert Dulfer (RIKZ-OS)
advisering	Hans Roberti (RIKZ-IT)
uitvoering MEDUSA meting	MEDUSA explorations, meetdienst van DNZ
schip	MITRA
MEDUSA survey	1
kosten MEDUSA per survey	circa 50 kf.

6.7 Zandtransport in het Oostgat bij Walcheren

De kust van Walcheren staat bloot aan sterke erosie door de schurende werking van het Oostgat. Deze eb-geul van de Westerschelde verplaatst zich van nature landinwaarts in de richting van het strand. De combinatie van sterke erosie en strandsuppleties hebben er al toegeleid dat hier zich de steilste vooroever van de Nederlandse kust heeft gevormd. In het kader van het programma K2005 wordt gekeken naar methoden waarmee de huidige suppletieinspanning gereduceerd kan worden, zonder dat de kust verder erodeert. Één van de ideeën is om te proberen vooroeversuppleties toe te passen, echter directie Zeeland wil geen extra zand kwijtraken aan de Noordzee. Men wil MEDUSA gebruiken om na te gaan in welke mate gesuppleerd zand op de vooroever verdwijnt naar de Noordzee. Het idee is om hiervoor glauconiethoudend zand te gebruiken dat bij de boring onder Westerscheldetunnel vrijkomt. In een soort pilot suppletie wordt dit zand op één locatie op de vooroever gestort. Daar glauconiethoudend zand radiometrisch verschillend is van het Oostgeulzand zal men de verspreiding van dit zand met MEDUSA technologie kunnen volgen. De T0-meting van dit project is begin jaar 2001 uitgevoerd. In figuur 12 is van de T0 de totale radioactiviteitskaart weergegeven.

6.7.1 aanvullende informatie

project	K2005*oostgat
opdrachtgever(s)	Dir. Zeeland
projectleider	Cornelis Isreal (RIKZ-OS)
advisering	Ruud Spanhof (RIKZ-OS) Hans Roberti (RIKZ-IT)
uitvoering MEDUSA meting	MEDUSA explorations, KVI , meetdienst van DZL
schip	Kaloo
aantal sedimentkarteringen	2
kosten MEDUSA voor T0 survey	circa 80 kf.



Figuur 12: Totale radioactiviteitskaart van het oostgat in de monding van de Westerschelde

7 Conclusie

Met het beschikbaar komen van MEDUSA heeft Rijkswaterstaat (RWS) toegang tot een veelzijdig meetmethode voor de productie van morfologische en radioactiviteit kaarten van de waterbodem voor diverse toepassingen. De veelzijdigheid van de meetmethode wordt bevestigd in het overzicht van de verschillende RWS-projecten, waarbij MEDUSA is ingezet.

Voor een goede inzet van het meetsysteem is een doordachte project aanpak, en kennis van zaken betreffende de werking van MEDUSA, echter een absolute noodzaak. De aanwezige ervaring en kennis over het meetsysteem binnen Rijkswaterstaat is in deze leidraad op beknopte wijze gebundeld, zodat een projectleider, die met MEDUSA aan de slag wil, een vliegende start kan maken. Een extra hulpmiddel hierbij vormt het hoofdstuk over de aanbevolen werkwijze voor inzet van MEDUSA.

Een punt van zorg met betrekking tot de beschikbaarheid van MEDUSA meetresultaten is dat momenteel nog geen centrale archivering van MEDUSA meetgegevens plaatsvindt bij RWS. Tot dusver geldt voor de data van de MEDUSA meetcampagnes zover ze al daadwerkelijk binnen RWS aanwezig zijn, dat ze bij de individuele projectleiders op de plank staan. De toegankelijkheid van de gegevens is hierdoor verre van optimaal. Op termijn loopt RWS het risico dat de MEDUSA metingen die tot nu toe zijn uitgevoerd niet meer beschikbaar zijn voor nadere analyse of vergelijking bij nieuwe projecten of calamiteiten.

8 Literatuur

KVI-rapport Z-43	**Mapping of the seafloor near ameland Terschelling in june-july 1995**
KVI-rapport Z-44	**Improved and new uses of natural radioactivity in mineral exploration and processing**
KVI-rapport Z-47	**t0-survey at 'Loswal Noordwest' - Part I**
KVI-rapport Z-54	**Heavy minerals: from edelstein to einstein**
KVI-rapport Z-56	**Survey Loswal Noordwest t1 - voorlopige resultaten**
KVI-rapport Z-59	**Sample analysis for 'Loswal Noordwest' -t0- and -t1- survey Part II**
KVI-rapport Z-61	**t1-survey at 'Loswal Noordwest' - Part I**
KVI-rapport Z-66	**Radiometric Surveys 'Loswal Noordwest' t0- and t1- Synthesis Report**
KVI-rapport Z-70	**Radiometric Survey of 'Hollands diep' Part I: Feasibility Study, Radiometric and Geochemical Characterisation**
KVI-rapport Z-77	**t2-survey at 'Loswal Noordwest' -part I- Data report of survey**
KVI-rapport Z-78	**Radiometric Survey of 'Hollands diep' Part II: Mud-sand mapping**
KVI-rapport Z-79	**In-situ en on-line sediment en bodemkarakterisering met MEDUSA (radiometrie)**
KVI-rapport Z-90	**Radiometric t2-survey of 'Loswal Noordwest' Part II: Radiometric and Geochemical Characterisation**
KVI-rapport Z-91	**Radiometric t2-survey of 'Loswal Noordwest' Part III: Synthesis**
KVI-rapport Z-96	**Westerschelde t0-survey; Data rapport**
KVI-rapport Z-99	**Radiometric charaterisation of 'Haringvliet ' sediment**
KVI rapport Z-108	**Assesment of the 'Verdiepte-Loswal' t_0-survey for radiometry**
KVI-rapport Z-109	**Radiometric Characterisation of rhine sediment; II Extended data analysis**
KVI-intern rapport S48	**Bepaling van de radioactiviteit in dertien sediment monsters**
KVI-intern rapport S50	**HPGe-analyse van 6 monsters t.b.v. Westerscheldetunnel**
KVI-intern rapport S72	**HPGe-analyse van 20 monsters t.b.v. assesment t1 meting verspreiding boorspecie Westerscheldetunnel**
Voorstudie TOXCOMBI tocht MEDUSA Explorations	**Meting van antropogene radionucliden met MEDUSA**
Datarapport TOXCOMBI tocht MEDUSA Explorations	**Meting van antropogene radionucliden met MEDUSA**
Rapport RIZA 2000.005	**Bodem in beeld, M v Wijngaarden en G v. d. Berg**

Werkdocument RIKZ/AB-98.122x	**Radiometrische kartering Loswal Noordwest**
Werkdocument RIKZ/AB-99.132x	**Bagger vaart een stukje verder**
Rapport RIKZ-99.038	**Evaluatie van de monitoringscampagne Loswal Noord en Noordwest 1996-1999**
Rapport RIKZ-2000.041	**Radioactieve stoffen in de zoute wateren**
TNO-rapport HAI-RPT-990035	**Review rapporten KVI Loswal Noordwest versie 2**
Bouwdienst RWS WBTGP-T3-98007	**Toepassing geostatistiek bij de waterbodemsanering petroleumhaven, A. Baas en F.M. Stroeve**
J. of Geochemical Exploration 62 (1998) 81-103	**Heavy minerals: from edelstein to einstein, R.J. de Meijer**
Meetstrategie 2000+.99.04	**Bodem beter bemeten; Innovatieve survey van de waterbodem**