
Meting van antropogene radionucliden met MEDUSA

Datarapport

R.L. Koomans, J. Limburg

December 00

MEDUSA Explorations BV

Zernikelaan 25

9747 AA Groningen

Samenvatting

In het kader van het monitorings programma MWTL is de verspreiding van de radionucliden ^{137}Cs en ^{60}Co in het sediment *in situ* in kaart gebracht met het MEDUSA systeem.

De nauwkeurigheid waarmee de activiteitsconcentraties van ^{137}Cs en ^{60}Co bepaald kunnen worden is afhankelijk van de meettijd en de achtergrondstraling. Een deel van deze achtergrondstraling is constant en kan nauwkeurig bepaald worden, een ander deel van de achtergrond is afkomstig van verval series van de natuurlijk voorkomende radionucliden ^{40}K , ^{238}U en ^{232}Th en varieert met sediment samenstelling.

Bij de kartering zijn vier gebieden in kaart gebracht: bij Noordwijk en Terheijde is een raai uit de kust gevaren, bij Texel en rondom de verdiepte loswallen is een grid gevaren. De activiteitsconcentraties van ^{137}Cs en ^{60}Co zijn erg laag en komen niet boven de 5 BqKg^{-1} uit. Het ^{137}Cs gehalte vertoont een random spreiding door het gebied, het ^{60}Co lijkt in een aantal locaties verhoogd te zijn. Een herhaalde meting langs de Noordwijk raai laat zien dat grootschalige variaties in de gemeten concentraties ^{137}Cs en ^{60}Co consistent zijn.

In onderstaande tabel staan de gemiddelde activiteitsconcentraties en de variantie in de verschillende gebieden weergegeven. Deze resultaten geven aan dat het ^{137}Cs gehalte constant is alle gebieden. De activiteitsconcentraties van ^{60}Co en van ^{40}K , ^{238}U en ^{232}Th lijken toe te nemen in zuidelijke richting (van Texel tot de verdiepte loswal).

	Cs (BqKg^{-1})	Co (BqKg^{-1})	K (BqKg^{-1})	U (BqKg^{-1})	Th (BqKg^{-1})
Texel	1.3 (1.2)	1.5 (0.4)	240 (40)	7 (2)	8 (2)
Noordwijk	1.5 (1.2)	1.5 (0.4)	260 (17)	7 (2)	8 (3)
Terheijde	1.5 (1.2)	1.9 (0.4)	280 (40)	10 (4)	10 (2)
Verdiepte Loswal	1.5 (1.3)	2.2 (0.5)	310 (40)	11 (5)	10 (3)

De activiteitsconcentraties van de nucliden ^{137}Cs en ^{60}Co in het sediment zijn erg laag en komen in de buurt van de detectiegrens van het huidige meetsysteem. Verhoging in de concentraties van deze nucliden als gevolg van lozingen zullen echter goed te detecteren zijn.

Als onderdeel van de studie is tevens onderzocht of verhoogde olieconcentraties in het sediment *in situ* kunnen worden gedetecteerd. De huidige meetgegevens kunnen daar geen uitsluitel over geven en een meer diepgaand onderzoek is nodig om te bepalen of *in situ* detectie van olievervuiling mogelijk is.

Inhoud

SAMENVATTING	2
INHOUD	3
1 INLEIDING	4
2 ALGEMENE BESCHRIJVING MEDUSA MEETSYSTEEM	5
2.1 Het MEDUSA systeem	5
2.2 Technologie	6
3 DETECTIELIMIETEN KARTERING MET MEDUSA	8
3.1 Vergelijk <i>in situ</i> metingen - sediment monsters	9
4 SURVEY	11
5 RESULTATEN	14
5.1 Kartering	14
5.2 Verdeling kunstmatige radionucliden langs de kust	17
5.3 Olieconcentraties in het sediment	18
5.4 Conclusies	19
6 OUTLOOK	20
6.1 Aanbevolen locaties voor monsternamen	20
6.2 Correcties sediment samenstelling	20
6.3 Olieconcentraties in het sediment	21
6.4 <i>In situ</i> spectrometrie	21
7 REFERENTIES	22
APPENDIX A FIGUREN	1

1 Inleiding

Radioactieve stoffen kunnen als gevolg van lozingen door opwerkingsfabrieken (Cap La Hague en Sellafield), productieplatforms van olie, fosfaatverwerkende industrie en ziekenhuizen en laboratoria, in kustwateren belanden. Deze concentraties zijn over het algemeen niet hoog, maar een continue monitoring is noodzakelijk om te toetsen of de concentraties niet boven de streefwaarden uitkomen. Het meetnet MWTL heeft tot doel “de verontreinigingsgraad van radioactieve stoffen in algemene zin vast te stellen, en, daar waar specifieke bronnen aanwezig zijn te monitoren op de individuele nucliden die vrijkomen” (Jong and Swertz, 2000). In het rapport “Radioactieve stoffen in de zoute wateren” (Jong and Swertz, 2000), is een evaluatie gemaakt van de het huidige meetnet en de meetmethoden die tot 1999 gebruikt zijn.

In het rapport worden een aantal aanbevelingen gedaan, waaronder:

- Losse puntmetingen dienen te worden vervangen door raaionderzoeken.
- De invloed van lozingen van olie en gas (bijvoorbeeld door olieplatforms en schepen) moet worden bestudeerd.
- Aanbevolen wordt om te bestuderen of metingen in zwevende stof vervangen kunnen worden door metingen aan sedimentmonsters.
- De binding van radionucliden aan organische koolstof en lutum dient te worden vastgesteld om de “sediment formule” correct te kunnen toepassen.

Dit project heeft tot doel de eerste drie van bovengenoemde punten uit te werken. Daarvoor worden op raaien sedimentmonsters genomen en wordt nadruk gelegd op bemonstering van sedimenten waar verhoogde concentraties olie verwacht kunnen worden. Het MEDUSA systeem wordt ingezet om te bestuderen of de arbeidsintensieve sedimentmonsters te vervangen zijn door *in situ* metingen met het MEDUSA systeem. Voor de huidige meetcampagne hebben de metingen met het MEDUSA systeem twee doelen:

- 1) Het met zo groot mogelijk gevoeligheid detecteren van de activiteitsconcentraties van ^{137}Cs en ^{60}Co .
- 2) Onderzoeken over de $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ balans kan dienen als maat voor de concentratie van olie in sediment.

Dit rapport geeft een beknopte algemene beschrijving van het MEDUSA systeem, en presenteert de resultaten van de meetcampagne met het MEDUSA systeem.

2 Algemene beschrijving MEDUSA meetsysteem

MEDUSA (het *Multi-Element Detector system for Underwater Sediment Activity*) is een systeem waarmee op een efficiënte manier de samenstelling van bodemmateriaal in kaart kan worden gebracht. Het systeem integreert data afkomstig van een aantal sensoren, zoals een detector van gamma straling, een trillingsmeter, GPS, temperatuur, waterdruk. Het systeem is open – er kunnen naar believen elementen worden toegevoegd of verwijderd.

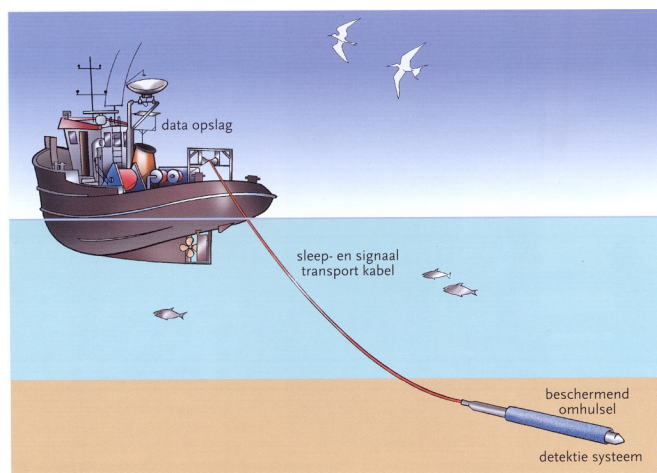
2.1 Het MEDUSA systeem

Het MEDUSA meetsysteem is geplaatst in een aluminium buis van ongeveer 100 cm lengte en een diameter van 7 cm (zie Figuur 1). Deze buis is door een met kevlar versterkte coaxkabel via een lier met een computer verbonden.



Figuur 1: De MEDUSA detector in een gedeelte van de blauwe PVC buis.

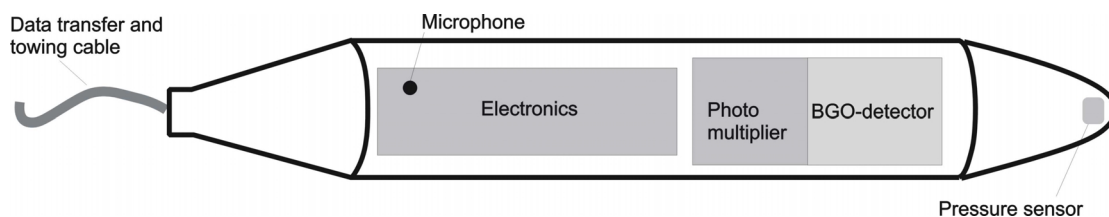
Bij metingen aan de onderwaterbodem wordt MEDUSA in een beschermende PVC buis achter een schip over het sediment gesleept (Figuur 2). Voor een goede meting, is het van belang dat het meetsysteem in contact met de waterbodem is. Dit wordt bereikt door voldoende gewicht aan de kabel vast te maken, maar het geeft ook beperkingen aan de vaarsnelheid.



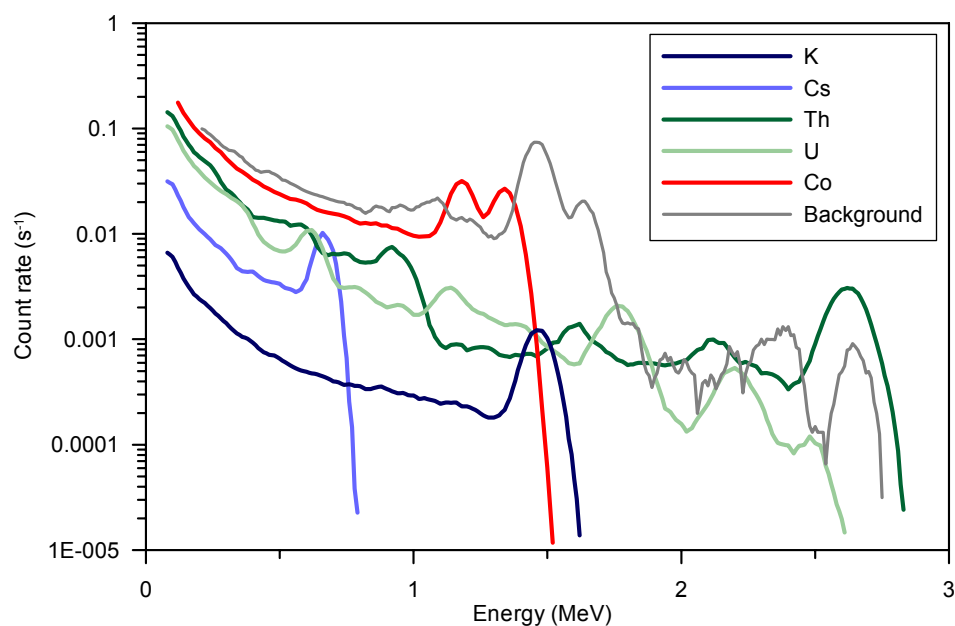
Figuur 2: Het MEDUSA systeem achter een schip gesleept.

2.2 Technologie

De gammastraling van het sediment wordt gedetecteerd met een scintillatie kristal en een fotomultiplier buis (Figuur 3). Aangezien de gamma straling van ieder nuclide een kenmerkende energie heeft, kan het energiespectrum van het stralingssignaal informatie geven over de bijdrage van ieder nuclide aan het totale stralingsspectrum (zie Figuur 4). Het totale stralingsspectrum wordt geanalyseerd met behulp van *spectrum deconvolutie*. Deze analyse gaat uit van het gegeven dat het totale energiespectrum de som is van de bijdragen van de *standaard spectra* van ieder afzonderlijk radionuclide. Het standaard spectrum is de respons van de detector op 1 Bqkg^{-1} van het betreffende nuclide. In de analyse wordt berekend hoe vaak de verschillende standaard spectra in het gemeten totale spectrum passen. Deze getallen geven de activiteitsconcentraties (in Bqkg^{-1}) van de radionucliden.



Figuur 3: Opbouw van het MEDUSA systeem, met electronica, de foto-multiplier buis en de BGO-detector (scintillatie kristal).



Figuur 4: Response van MEDUSA detector op 1 BqKg⁻¹ (standaard spectra) van ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²³⁸U, ²³²Th.

De standaard spectra van ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K en ¹³⁷Cs zijn bemeaten met behulp van betonnen calibratieplaten. Het standaardspectrum van ⁶⁰Co is berekend met behulp van Monte-Carlo simulatietechnieken door NGD/KVI. De achtergrond gammastraling, afkomstig van bijvoorbeeld kosmische straling en zeewater, wordt voor elke meting opnieuw bepaald, door de detector ruim boven de bodem in het water te laten hangen.

3 Detectielimieten kartering met MEDUSA

Voor de bepaling van de activiteitconcentraties van de antropogene radionucliden, worden de meetresultaten in de Full Spectrum Analyse (FSA (Hendriks *et al.*, 2000)) door middel van een χ^2 minimalisatie aan de standaardspectra gefit. Als deze standaardspectra volledig orthogonaal zijn, is er geen detectielimiet voor de activiteitsconcentraties en theoretisch zouden de activiteitconcentraties oneindig nauwkeurig te bepalen zijn. De standaardspectra zijn echter niet orthogonaal en als gevolg van hiervan, is de detectielimiet van ^{137}Cs en ^{60}Co afhankelijk van de intensiteit van de overige bronnen (kosmische straling, achtergrond van de detector en de natuurlijke achtergrond van het sediment).

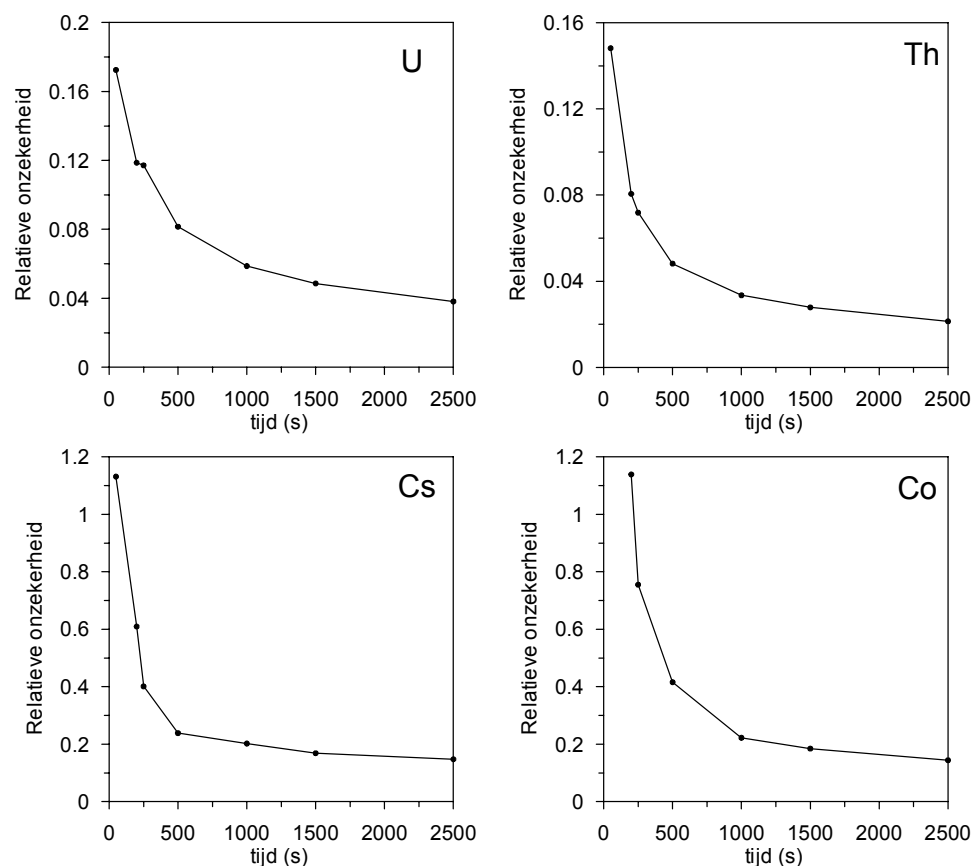
Tabel 1: Kwadraat van de correlatiecoëfficiënten (R^2) tussen de verschillende standaardspectra bepaald tussen 300 keV en 3000 keV.

	K	Th	U	Cs	Co	Background
K	1					
Th	0.00051	1				
U	0.00048	0.00085	1			
Cs	0.00137	0.00000	0.00086	1		
Co	0.00508	0.00202	0.00652	0.37456	1	
Background	0.00166	0.00477	0.00986	0.30106	0.38294	1

Tabel 1 geeft een overzicht van de correlatiecoëfficiënten tussen de verschillende standaardspectra en de standaardspectra met het achtergrond spectrum. Deze waarden kunnen worden geïnterpreteerd als het deel van de variantie van de achtergrondbron (de parameter in de rij) die bijdraagt in de variantie van de gemeten parameter (de parameter in de kolom). Bijvoorbeeld een verhoging van de activiteitsconcentratie van Cs, leidt tot een vergroting in de activiteit van Co van 37% van de verhoging in Cs. Deze gegevens laten zien dat met name de activiteitsconcentraties van Cs en Co ook erg gevoelig zijn voor onzekerheden (en dus ook de totale bijdrage) in de achtergrond. Tevens is het Cs signaal sterk gecorreleerd aan het signaal van Co. De activiteitsconcentraties van Cs en Co zijn ongevoeliger voor de onzekerheden in de andere standaard spectra. De effecten van niet orthogonaliteit van de standaardspectra op onzekerheden van de activiteitconcentraties in metingen zijn complex te bepalen en is deel van het wetenschappelijk onderzoek van de Nuclear Geophysics Division van het KVI, Groningen.

Metingen voor de kust van Californie samen met USGS (US Geological Survey) en BGS (British Geological Survey) hebben geleerd dat in een gebied met zandig sediment (met een relatief lage achtergrond van natuurlijke radionucliden) en een meettijd van 500 seconden, Cesiumconcentraties van 1-2 Bqkg⁻¹ gemeten kunnen worden (Jones *et al.*, 1999). De activiteitconcentratie van Co is sterker gecorreleerd aan K,U,Th en de achtergrond dan Cs gecorreleerd is aan de achtergrond. We kunnen daarom verwachten dat de detectielimiet van

Co sterker afhangt van de achtergrond bijdrage van de natuurlijke radionucliden.



Figuur 5: Relatieve onzekerheden van U, Th, Cs en Co als functie van meettijd.

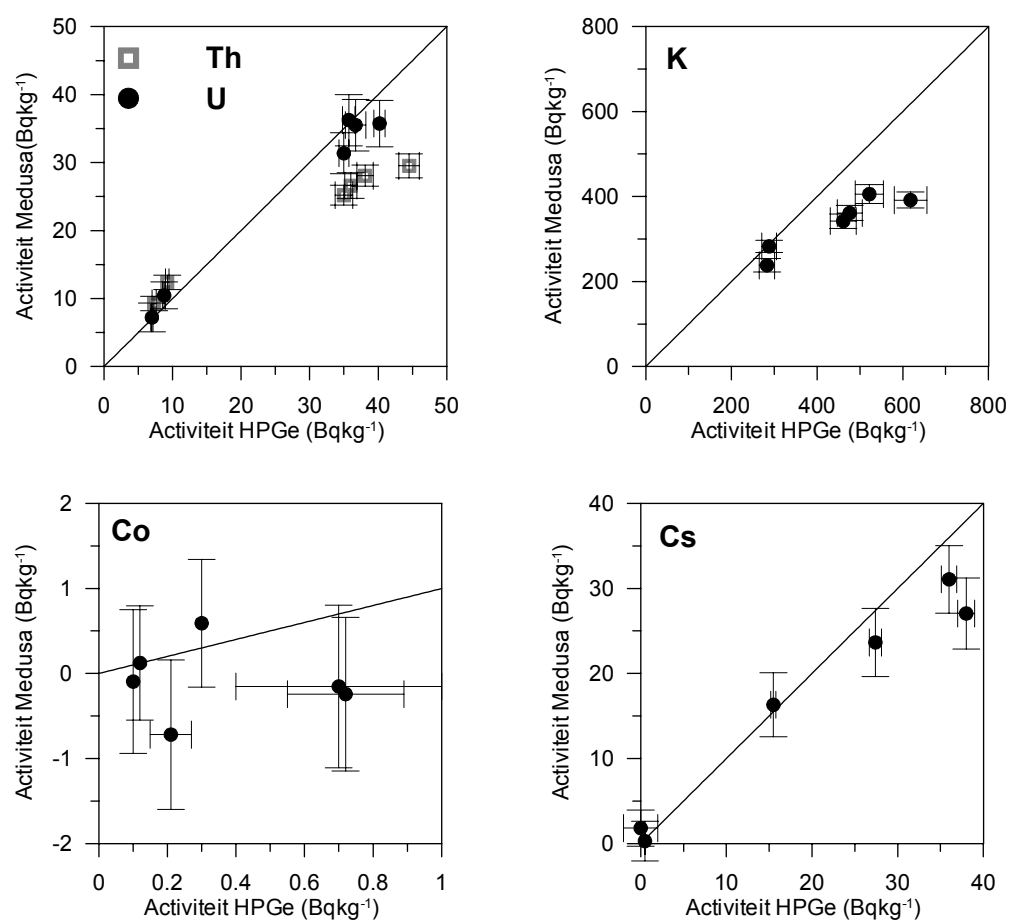
De (empirisch bepaalde) relatie tussen relatieve onzekerheden en de meettijd is gepresenteerd in Figuur 5. Deze gegevens laten zien dat de onzekerheid nog maar weinig afneemt bij integratietijden boven de 1000 seconden.

3.1 Vergelijk *in situ* metingen - sediment monsters

Om de gemeten activiteitsconcentraties gemeten met het MEDUSA systeem te valideren zijn in het kader van de kartering van Haringvliet sediment (Venema *et al.*, 2000), sediment monsters vergeleken met de *in situ* metingen van MEDUSA (Figuur 6). Hiervoor heeft MEDUSA ongeveer 15 minuten op één locatie gemeten. Vervolgens zijn door duikers 5 sediment kernen gestoken rondom het MEDUSA systeem. Deze kernen zijn gemengd en vervolgens geanalyseerd op de activiteitsconcentraties van ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K , ^{60}Co en ^{137}Cs op het HPGe systeem van NGD volgens NEN5623 (1991).

De resultaten in Figuur 6 laten zien dat voor lage radionuclideconcentraties van ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K en ^{137}Cs de waarden gemeten met MEDUSA goed overeenkomen met de radionuclideconcentraties gemeten aan de sedimentmonsters. Voor hogere activiteitsconcentraties onderschat het MEDUSA systeem de

activiteiten. Deze onderschatting is het gevolg van verandering van de dichtheid van het sediment. In het Haringvliet sediment zijn de U, Th en K concentraties een maat voor het slibgehalte van het sediment. Het is gebleken dat voor slibfracties >60%, de sedimenteigenschappen, met name de dichtheid, sterk veranderen (Torfs *et al.*, 1996; Venema *et al.*, 2000). Deze veranderingen van dichtheid zorgen effectief voor een “verdunning” van de activiteitsconcentraties van de nucliden bij de *in situ* metingen. Voor de metingen aan sediment monsters wordt het sediment eerst gedroogd en wordt de vaste stof bemeten. De effecten van dichtheidvariatie op de gemeten activiteitsconcentraties zijn momenteel onderwerp van studie o.a. bij de Nuclear Geophysics Division van het KVI.



Figuur 6: Activiteitsconcentraties gemeten in het veld en de activiteitsconcentraties van sediment monsters genomen door duikers en gemeten in het laboratorium (Venema *et al.*, 2000). De lijn representeert de verwachte waarden volgens $y=x$.

De activiteitsconcentraties van ^{60}Co in het sediment zijn erg laag ($< 1 \text{ Bqkg}^{-1}$). De analyses van de ^{60}Co concentratie met het MEDUSA systeem geven echter nominale waarden < 0 . Deze analyses laten zien dat activiteitsconcentraties $< 1 \text{ Bqkg}^{-1}$ niet nauwkeurig te bepalen zijn. Voor activiteitsconcentraties $< 1 \text{ Bqkg}^{-1}$ is de bijdrage van de achtergrond te groot voor een correcte bepaling van de concentratie van de specifieke radionucliden.

4 Survey

De kartering is uitgevoerd van maandag 02-10-2000 tot en met vrijdag 06-10-2000 met de M.S. MITRA van Rijkswaterstaat, directie Noordzee.

Met de meetleider aan boord van de Mitra (Ben de Jong) is afgesproken dat getracht zal worden overdag sediment monsters te nemen en 's nachts met het MEDUSA systeem te varen.

Vrijdag 29-09-2000

Op vrijdag 29 september zijn de lier en pulley van het MEDUSA systeem op de Mitra geïnstalleerd. Aangezien beide systemen nog verplaatst moeten worden is besloten de installatie op maandag af te ronden.

Het rubber rond de boegschroef van de Mitra moet vervangen worden. Het werk hieraan duurt langer dan de geplande vrijdag en er wordt aangegeven dat er maandag niet voor het avondeten vertrokken wordt.

Maandag 02-10-2000

Maandagmiddag 2 oktober is de installatie van het MEDUSA systeem afgerond. Nadat het rubber van de boegschroef is vervangen kunnen om 18:00 uur de trossen worden losgegooid. Het belooft een rustige nacht te worden, windkracht 3, ZZW en wisselend bewolkt.

We stomen in zuidelijke richting naar de "Terheijde raai" voor de kust van Hoek van Holland. De Terheijde raai wordt zo dicht mogelijk onder de kust begonnen. Drie kilometer voor aanvang van de Terheijde raai wordt het MEDUSA systeem in het water gelegd. Het systeem functioneert goed alhoewel het geluidsniveau erg laag lijkt te zijn.

Om 21:20 uur wordt afgesproken dat we de Terheijde raai afmaken, om vervolgens met de detector "off-bottom", naar de zuidkant van de Noordwijk raai varen en daar doormeten tot 06:00 uur. Vanaf dat moment zullen door RWS monsters genomen worden. Hier denken zij 12 ½ uur voor nodig te hebben. Aansluitend zullen wij vanaf de noordkant de Noordwijk raai insteken met het MEDUSA systeem en het resterende stuk van de Noordwijk raai bevaren.

De MEDUSA metingen tussen de Terheijderaai en de Noordwijkraai kunnen worden gebruikt als achtergrondmeting.

Dinsdag 03-10-2000

Om 00:15 arriveren we bij het begin van de Noordwijkraai. De wind is wat toegenomen, ZZW, windkracht 5 en er staat een stevige golfslag.

De Noordwijk raai wordt uiteindelijk tot 30 km uit de kust in kaart gebracht. Nadat de detector uit het water gehaald is varen we terug naar de kust. Aansluitend worden de eerste monsters genomen door meetploeg van Rijkswaterstaat. Het is schitterend weer, windkracht 2, ZZW, licht bewolkt, met Noordwijk aan de horizon. Bij zonsondergang zijn tot op 70 km uit de kust op 10 locaties sediment monsters genomen. Het mooie weer is helaas ook voorbij en de wind is ondertussen aangetrokken windkracht 6 uit ZZW.

De MEDUSA apparatuur wordt weer overboord gezet en het resterende deel van de Noordwijk raai wordt in kaart gebracht.

Woensdag 04-09-2000

De Noordwijk raai is om ongeveer 01.30 klaar, MEDUSA wordt uit het water gehaald en er wordt opgestoomd naar het gebied bij Texel. Voor de kust van Texel is de wind is behoorlijk aangetrokken, windkracht 7, WZW, met behoorlijke golven en het lijkt er niet direct op dat het snel beter gaat worden. Bij het aanvaren van de geplande raai haaks op de kust wordt deze gemist. Aangezien het schip haaks op de golven staat wordt besloten een aantal raaien met de golven mee of er recht tegenin varen. Deze raaien liggen parallel met de vaargeul.

De golfslag is overdag te hoog om sedimentmonsters te kunnen nemen. Het MEDUSA systeem functioneert echter nog steeds prima en er wordt daarom besloten om overdag met MEDUSA door te meten tot donderdagochtend 8.00 uur.

Donderdag 05-10-2000

Het weer laat toe dat in de ochtend begonnen kan worden met het nemen van sedimentmonsters. Na zonsondergang zijn de meeste sedimentmonsters genomen en wordt koers gezet richting de Maaspoort.

In de nacht is er nog tijd over om met MEDUSA nog een paar raaien te varen. In samenspraak met de meetleider is besloten het gedeelte van de Noordwijkraai met de meeste variatie overnieuw te varen als controle van de reproduceerbaarheid van het meetsysteem.

Na de kartering van de Noordwijkraai zijn alle geplande metingen voor het project uitgevoerd. Het is echter nog vroeg in de avond en voor zonsopgang kunnen er geen sediment monsters genomen worden. Omdat een eerste analyse van de meetgegevens laat zien dat de meeste sediment erg zandig zijn en de activiteits concentraties van Cs en Co laag zijn, besluiten we een gebied met veel klei op te zoeken: nabij de Verdiepte Loswal.

Vrijdag 06-10-2000

Voor de kartering van de Verdiepte Loswal is een raaienpatroon uitgezet, evenwijdig aan de vaargeul van de Maaspoort, met een onderlinge tussenruimte van 500 meter. In totaal zijn 4 raaien gemeten.

Na zonsopgang is het plan om weer sediment monsters te gaan nemen. Door het weer is dat echter niet meer mogelijk en uiteindelijk wordt om 09:30 de haven van Scheveningen binnengevaren.

5 Resultaten

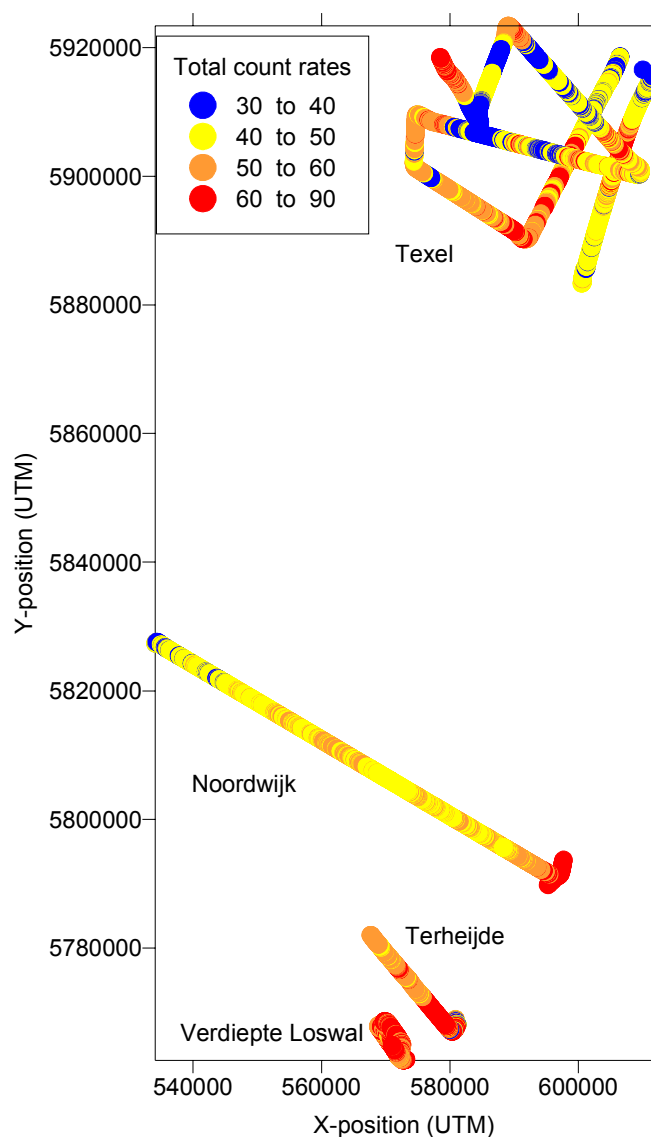
5.1 Kartering

Tijdens de kartering zijn vier gebieden in kaart gebracht (Figuur 7):

- a) Terheijde
- b) Noordwijk
- c) Texel
- d) Verdiepte Loswal

De total count rates gemeten met het MEDUSA systeem langs in deze vier gebieden zijn gepresenteerd in Figuur 7. De variaties in total count rates, (de totale som van de gemeten pulsen in het energiespectrum 0.4-3 MeV, gecorrigeerd voor de achtergrond bijdrage van de detector, zeewater en kosmische straling) kunnen worden toegeschreven aan veranderingen in sediment samenstelling. De resultaten laten zien dat in de kustdwarse trajecten, total count rates hoger zijn dicht bij de kust en afnemen in zeewaartse richting. In het gebied bij Texel is de variatie het grootst, in het zuiden en het midden van het gebied worden de laagste count rates aangetroffen. Het gebied bij de Verdiepte Loswal heeft hoge total count rates. Het lijkt erop dat langs de kustlijn een band met hoge total count rates gevormd wordt.

Voor de bepaling van de activiteitsconcentraties van K, U en Th is het gedeelte van het γ -ray spectrum >400 KeV gebruikt in de full spectrum analyse methode. Voor de analyse van de Cesium en Cobalt gehalten in het sediment is niet het gehele spectrum gebruikt, maar is geconcentreerd op het gebied van $200 \text{ KeV} < x < 1.6 \text{ MeV}$ om effecten van covariantie tussen Co, Cs en U en Th te reduceren. De gegevens zijn tijdens de kartering elke 5 seconden opgeslagen. Vanwege de grote statistische onzekerheden bij deze kleine teltijd (zie Figuur 5) is in de data analyse een running average gebruikt. Hiervoor zijn bij elk datapunt de spectra van 500 seconden opgeteld.



Figuur 7: Total count rates langs de gevaren trajecten.

Terheijde raai

De activiteitsconcentraties van de verschillende radionucliden langs de Terheijde raai zijn gepresenteerd in Figuur 9. De U, Th en K concentraties laten duidelijk de verandering van sedimentsamenstelling zien. Aan de randen van de Loswal Noord zijn verhoogde concentraties slib aanwezig (zie ook Figuur 30), terwijl meer zeewaarts het slibgehalte afneemt. De variatie in K concentratie in het gebied van $x=568000$ - 576000 m (in UTM coördinaten) is waarschijnlijk het resultaat van variatie in korrelgrootte van het zand.

Het Cesium gehalte in het sediment varieert tussen -1 en 4 BqKg^{-1} . De negatieve Cs waarden zijn het gevolg van onzekerheden in de data analyse procedure. De frequentie verdeling van Cs (Figuur 12) laat echter zien dat de gemiddelde Cs concentratie in het sediment 1.5 BqKg^{-1} is. Deze frequentieverdeling geeft een asymmetrische verdeling naar hogere activiteitsconcentraties. De Cs pieken in het gebied zijn niet gecorreleerd met variaties in de andere radionucliden, maar het

lijkt dat Cs concentraties voor $568000 < x < 574000$ m groter zijn dan voor het meer landwaarts gelegen gebied.

Het gemiddelde Co gehalte in de Terheijde raai is 1.9 BqKg^{-1} (Figuur 13). De variaties zijn niet groot, behalve voor $x=576000$ m waar de activiteitsconcentratie van Co tot boven 3 BqKg^{-1} oploopt.

Noordwijk raai

In de concentratieverdeling van de activiteitsconcentratie in de Noordwijk raai (Figuur 10) is een sterke piek te zien in de U en Th concentraties. Deze piek bevindt zich dicht bij de kust op een diepte van ~ 12 m en wordt gemarkeerd door relatief lage concentraties Kalium. Deze combinatie van activiteit concentraties duidt op verhoging in de zware mineraal fractie, op een diepte vergelijkbaar met metingen voor de kust van Ameland (Koomans, 2000).

Cesium heeft een gemiddelde concentratie van 1.5 BqKg^{-1} en vertoont weinig variatie in het gebied. De concentratie Co is gemiddeld 1.5 BqKg^{-1} , varieert tussen 1 en 2 BqKg^{-1} maar laat een verhoging tot 2.5 BqKg^{-1} zien dicht bij de kust in het gebied met verhoogde concentraties in U en Th.

Als validatie van de gegevens is een gedeelte van de Noordwijk raai twee keer gemeten (op 3 en 5 oktober). De activiteitsconcentraties van Cs en Co van deze twee metingen zijn vergeleken in Figuur 11. Voor de Cs concentratie zijn de “kleinschalige” variaties niet identiek, maar de grootschalige trend is gelijk. Voor Co laten beide lijnen gelijke structuren en een grootschalige trend zien. Deze resultaten laten zien dat de grootschalige variaties in Cs en Co niet het gevolg zijn van statistische variaties, maar ook werkelijk verschillen in sediment samenstelling aanduiden.

Texel

In het gebied bij Texel geeft de Cs concentratie een spreiding met een gemiddelde van ongeveer 1.5 BqKg^{-1} . De frequentieverdeling (Figuur 16) laat een asymmetrische uitloop zien naar Cs waarden tot ongeveer 6 BqKg^{-1} . De kaart met Cs waarden (Figuur 17) laat geen duidelijke patronen zien en duidt op een min of meer random Cs verdeling in het gebied.

De Co verdeling in het Texel gebied geeft een spreiding rondom een gemiddelde van 1.5 BqKg^{-1} . Net als bij Cs is er een asymmetrische uitloop naar hogere Co waarden met een maximum van ongeveer 3.5 BqKg^{-1} . De ruimtelijke spreiding van Co laat, vergeleken met Cs, meer patronen zien. In het noorden van het gebied worden lage Cs waarden gevonden. Op de kruising van twee lijnen bij $x=598000$ m en bij $x=606000$ m is de activiteitsconcentratie verhoogd.

Verdiepte Loswal

Het gebied rondom de verdiepte Loswal geeft een gemiddelde Cs concentratie van 1.5 BqKg^{-1} . Cesium in dit gebied is echter niet

normaal verdeeld (Figuur 23), maar geeft een asymmetrie naar negatieve Cesium concentraties. De negatieve Cesium concentraties zijn niet reëel maar zijn het gevolg van variatie in het (natuurlijke) achtergrond signaal. De ruimtelijke verdeling van de Cesium concentratie laat zien dat Cesium niet random door het gebied verspreid is. De cesium concentratie is lager in het zuidoosten van het survey gebied, in het noordwesten is de cesium concentratie verhoogd.

De Cobalt concentratie geeft min of meer een normale distributie met een gemiddelde van 2.2 BqKg^{-1} . De ruimtelijke variatie in het Co signaal geeft een patroon wat erg lijkt op de Cs verdeling (Figuur 26).

Om een indruk te geven van de variatie in sediment samenstelling in tijd, zijn de activiteitsconcentraties van de huidige survey gepresenteerd samen met metingen gedaan in het voorjaar van 2000 (Figuur 30). Deze resultaten laten zien dat, behalve in het vak van de verdiepte Loswal, de ruimtelijke verdeling van U en Th niet sterk verandert is.

5.2 Verdeling kunstmatige radionucliden langs de kust

Op basis van de frequentieverdelingen van de activiteitsconcentraties van Cs en Co kan worden vastgesteld dat (lage) concentraties van Cs en Co in het sediment gemeten kunnen worden. Van beide radionucliden laat Co in de Noordwijk raai, de Terheijde raai en bij Texel ruimtelijke samenhang zien; Cs lijkt meer random over het gebied te zijn verspreid. Alleen in het gebied rondom de Verdiepte Loswal kunnen in beide signalen patronen worden herkend.

De activiteitsconcentraties van Cs en Co gemiddeld per gebied zijn weergegeven in Tabel 2. Deze gegevens laten zien dat Cs homogeen over de vier gebieden verdeeld is. Voor Co lijkt er echter een trend te zijn waarbij de activiteitsconcentratie afneemt in noordelijke richting. Deze afname in noordelijke richting is ook zichtbaar in de gemiddelden van de “achtergrond” concentraties van K, U en Th.

De verhogingen van activiteitsconcentraties ^{60}Co gaan gepaard met een verhoging in ^{40}K , ^{238}U en ^{232}Th . De activiteitsconcentraties van ^{40}K , ^{238}U en ^{232}Th zijn een maat voor de concentratie van de fijne sediment fractie. De correlatie tussen deze parameters en de activiteitsconcentratie ^{60}Co kan het gevolg zijn van de adsorptie van ^{60}Co aan fijn sediment. De gevoeligheids analyse toont echter ook aan dat er een correlatie bestaat tussen ^{60}Co en K,U,Th als gevolg van covarianties geïnduceerd door de data analyse. De activiteitsconcentratie van Cs vertoont echter geen correlatie met de activiteitsconcentratie van Co terwijl de door de FSA geïnduceerde covariantie het sterkst is voor Co en Cs.

Of de gemeten verhoging in (de heel lage concentraties) ^{60}Co werkelijk optreedt zal moeten worden getoetst met behulp van sediment monsters.

Tabel 2: Gemiddelde activiteitsconcentraties en variantie (tussen haken) van Cs, Co, K, U en Th over de vier gebieden.

	Cs (BqKg ⁻¹)	Co (BqKg ⁻¹)	K (BqKg ⁻¹)	U (BqKg ⁻¹)	Th (BqKg ⁻¹)
Texel	1.3 (1.2)	1.5 (0.4)	240 (40)	7 (2)	8 (2)
Noordwijk	1.5 (1.2)	1.5 (0.4)	260 (17)	7 (2)	8 (3)
Terheijde	1.5 (1.2)	1.9 (0.4)	280 (40)	10 (4)	10 (2)
Verdiepte Loswal	1.5 (1.3)	2.2 (0.5)	310 (40)	11 (5)	10 (3)

5.3 Olieconcentraties in het sediment

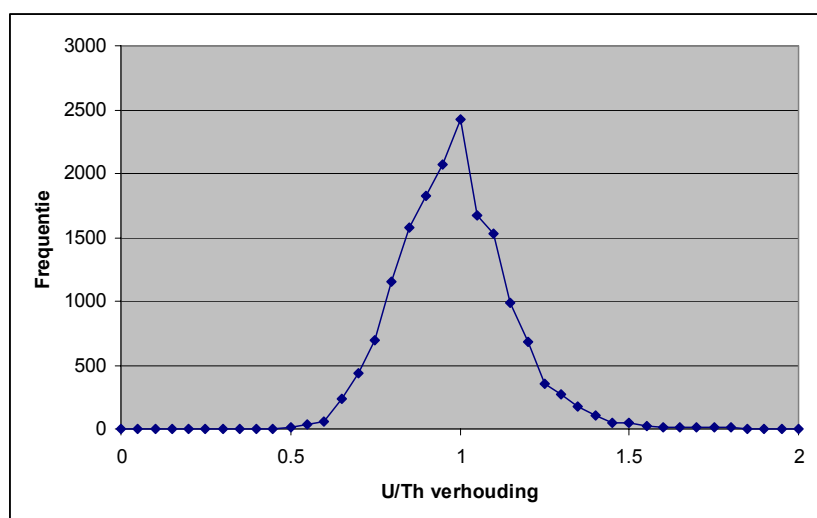
Een van de additionele doelstellingen van het project is om de verspreiding van olie te bepalen. Het is bekend dat Uranium selectief in organisch materiaal wordt opgenomen en over het algemeen is de concentratie Uranium in olie verhoogd ten opzichte van het omliggende sediment (zie bijvoorbeeld, Min *et al.*, 2000).

Een grote hoeveelheid metingen aan sediment op en rond de Nederlandse kustwateren (de Meijer, 1998; de Meijer and Donoghue, 1995; de Meijer and ten Have, 1999; Venema *et al.*, 1999b; Venema *et al.*, 1998) hebben aangetoond dat de elementen ²³²Th en ²³⁸U in natuurlijk sediment ongeveer in de verhouding 1:1 voorkomen. Deze relatie tezamen met de informatie dat ²³⁸U verhoogd zou kunnen zijn in olieresten zou het mogelijk moeten maken om grotere concentraties olie te lokaliseren door verstoringen in de ²³⁸U/²³²Th balans te monitoren.

De ²³⁸U/²³²Th balans van 1:1 is gevoelig voor variaties in sediment karakteristieken en het is niet uitgesloten dat in het studiegebied sedimenten voorkomen die een ²³⁸U/²³²Th balans hebben die afwijkt van de verhouding 1:1. Het is daarom belangrijk te weten of de sedimentkarakteristieken binnen een gebied veranderen. Hiervoor moeten sedimentmonsters worden geanalyseerd op korrelgrootteverdeling en radiometrische eigenschappen.

Om te testen of in het gebied überhaupt afwijkingen van de anomalie van ²³⁸U/²³²Th voorkomen, is de frequentieverdeling van de ²³⁸U/²³²Th verhouding in het gebied bij Texel bepaald. Figuur 8 geeft deze verdeling weer en laat zien dat de mediane verhouding van ²³⁸U/²³²Th rondom de 1 schommelt. De spreiding rondom dit gemiddelde is min of meer volgens een Gauss distributie en duidt op een statistische spreiding. De waarden groter en kleiner dan 1 zijn niet het gevolg van veranderingen in sediment samenstelling, maar een statistisch gevolg van de fitmethode.

Met de huidige meetresultaten is het niet mogelijk data of gebieden aan te wijzen waar mogelijke olievervuiling kan zijn opgetreden op basis van veranderingen in de U/Th verhouding.



Figuur 8: Frequentieverdeling van de U/Th ratio's in het gebied bij Texel.

5.4 Conclusies

Bepaling van kunstmatige radionucliden

De metingen langs de kust van Nederland hebben laten zien dat concentraties ^{137}Cs en ^{60}Co in het sediment erg laag zijn. Door over grote gebieden te integreren is het echter mogelijk om de activiteiten van Cs en Co te bepalen. De ruimtelijke variatie van beide signalen laat zien dat Cs min of meer homogeen verdeeld is over het sediment, terwijl de Co concentraties ruimtelijke samenhang vertonen.

De dubbele kartering van de Noordwijk raai geeft aan dat de metingen van activiteit concentraties van Cs en Co reproduceerbaar zijn.

De analyse van gemiddelde waarden per gebied geeft aan dat de Cs concentratie voor de Nederlandse kust ongeveer constant is. De activiteitsconcentratie van Co is het grootst in het gebied rondom de Verdiepte Loswal en neemt af in noordelijke richting.

Bepaling van olieconcentraties in het sediment

Of het principe om olieconcentraties in het sediment op te sporen op basis van anomalieën in de U/Th verhouding werkt is in deze studie niet aangetoond om dat de U/Th verhouding weinig varieert. Deze variaties kunnen worden toegeschreven aan onzekerheden in de fitmethode. Of dit negatieve resultaat komt doordat er geen olie in het gebied voorkomt, dat de concentraties olie te laag zijn of dat er geen relatie bestaat tussen de U concentratie en het oliegehalte in sediment is op basis van deze gegevens niet te zeggen.

6 Outlook

In de meetcampagne staat de bepaling van chemische parameters in de waterbodem centraal. In de offerteaanvraag wordt tot doel gesteld: (1) meer specifiek voor een aantal gebieden informatie te vergaren over de aanwezigheid van antropogene radionucliden in de waterbodem en (2) er moet worden onderzocht of er onder de hoofdvaarroutes sprake is van verhoogde olieconcentraties in de waterbodem.

6.1 Aanbevolen locaties voor monsternames

Om de *in situ* gemeten activiteitsconcentraties valideren moeten sediment monsters worden genomen op locaties gelijk aan de MEDUSA metingen om de gemeten waarden goed te kunnen vergelijken. In volgende tabel worden een aantal locaties aanbevolen. Deze locaties zijn gebaseerd op de meetresultaten.

Tabel 3: Aanbevolen locaties waar aanvullende sedimentmonsters kunnen worden genomen ter vergelijking met MEDUSA.

X (UTM; m)	Y (UTM; m)	Opmerkingen
576149	5771875	Verhoging Cs op Terheijde raai
570134	5778987	Piek in Co op Terheijde raai
592624	5793105	Lage concentratie Co langs Noordwijk raai
595970	5791166	Lage concentratie Co langs Noordwijk raai
568992	5767568	Verhoogde concentratie Co nabij verdiepte Loswal
572022	5763102	Lage concentratie Co nabij verdiepte Loswal

6.2 Correcties sediment samenstelling

De concentratie radionucliden in het sediment is een functie van de concentraties van deze nucliden in het water en de adsorptie eigenschappen van het sediment. Om de activiteitsconcentraties in het sediment te vertalen naar concentraties in het water, wordt vaak gecorrigeerd voor sediment samenstelling (klei en lutum gehalte) door middel van de sediment formule ((Jong and Swertz, 2000)). Als deze correctie moet worden uitgevoerd voor de *in situ* metingen met MEDUSA, moeten alsnog sediment monsters worden genomen om het klei en lutum gehalte te bepalen. Onderzoek echter heeft aangetoond dat U en Th ook adsorberen aan sediment. Deze adsorptie is groter voor klei en lutum (Assinder *et al.*, 1997; MacKenzie *et al.*, 1999; Venema *et al.*, 1999a). Door de relatie kleigehalte en U en Th concentraties is het mogelijk om het klei gehalte van het sediment te bepalen. Deze relatie zou kunnen worden gebruikt om de normalisatiefactor *in situ* te bepalen. Om dit goed te kunnen iken, is echter ook informatie over de samenstelling van het sediment nodig ("radiometrische vingerafdruk"). Hiervoor moeten sediment monsters gamma-spectrometrisch en op korrelgrootte worden geanalyseerd.

6.3 Olieconcentraties in het sediment

De meetgegevens tonen aan dat het afwijkingen in de U/Th anomalieën niet eenduidig tot olievoorkomens leiden. De relatie tussen de concentratie ^{238}U in sediment en het oliegehalte, is aannemelijk maar moet kwantitatief nog worden aangetoond. Hiervoor moeten sediment monsters worden geanalyseerd op de activiteitsconcentratie van ^{238}U en de concentratie PAK.

6.4 *In situ* spectrometrie

De γ -ray detector die gebruikt wordt in het MEDUSA systeem is specifiek gekozen voor de toepassing van het meten van lage concentraties van natuurlijk voorkomende radionucliden. Hiervoor is een scintillatie kristal gekozen dat zonder koeling gebruikt kan worden. De dichtheid en de Z (atoomnummer) van het Bismuth Germanate (BGO) zijn relatief groot en zorgen voor een grote efficiëntie van het systeem. Het nadeel van dit type scintillatie kristal is echter de lage resolutie. Als gevolg van deze lage resolutie zijn technieken als Full Spectrum Analyse nodig om de activiteitsconcentraties van de radionucliden te bepalen. De laatste jaren is een enorme vooruitgang geboekt met de ontwikkeling van nieuwe Scintillatie materialen als CdZnTe. Deze materialen combineren gebruiksgemak (ze zijn robuust en koeling is niet nodig) met een hoge resolutie. De efficiëntie van deze systemen is echter lager dan van een BGO scintillatie kristal.

Met de hoge resolutie van een CdZnTe systeem kan de aanwezigheid van specifieke nucliden met grotere nauwkeurigheid worden bepaald, maar meettijden worden langer vergeleken met het huidige systeem. Voor de toepassing bij MWTL hoeft dat echter geen probleem te zijn omdat plaatsresolutie niet van cruciaal belang is. De grotere nauwkeurigheid kan wel helpen bij de detectie van olieverontreiniging (uit evenwicht zijn van de U-reeks en de verhouding U/Th kan beter bepaald worden). Tevens kan in meer detail de verontreiniging van antropogene radionucliden bepaald worden. Aanbevolen wordt een haalbaarheidsstudie uit te voeren naar het gebruik van dit type detectie systemen voor toepassingen op de zeebodem en in de waterkolom.

7 Referenties

Assinder, D. J., Mudge, S. M. and Bourne, G. S. (1997) *Radiological assessment of the Ribbel Estuary-I. Distribution of radionuclides in surface sediments*. Journal of environmental radioactivity, **36**(1), pp. 1-19

de Meijer, R. J. (1998) *Heavy minerals: from 'Edelstein' to Einstein*. Journal of Geochemical Exploration, **62**(1-3), pp. 81-103

de Meijer, R. J. and Donoghue, J. F. (1995) *Radiometric fingerprinting of sediments on the Dutch, German and Danish coasts*. Quaternary International, **26**, pp. 43-47

de Meijer, R. J. and ten Have, R. (1999) *Radiometric characterisation of Rhine sediment*. NGD/KVI, Groningen; Report : Z-92.

Hendriks, P. H. G. M., Limburg, J. and de Meijer, R. J. (2000) *Full spectrum analysis of natural gamma ray spectra*. Journal of Environmental Radioactivity, **accepted**, pp.

Jones, D. G., Roberts, P. D., Limburg, J., Karl, H., Chin, J. L., Shanks, W. C., Hall, R. and Howard, D. (1999) *Measurement of seafloor radioactivity at the Farralon Islands Radioactive waste dump site, California*. BGS; Report : in preparation.

Jong, E. J. and Swertz, O. C. (2000) *Radioactieve stoffen in de zoute wateren*. RIKZ, Den Haag; Report : 2000.041.

Koomans, R. L. (2000) *Sand in motion: effects of density and grain size*. Phd thesis, RUG, Groningen, ISBN 90-367-1338-2.

MacKenzie, A. B., Cook, G. T. and McDonald, P. (1999) *Radionuclide distributions and particle size associations in Irish Sea surface sediments: implications for actinide dispersion*. Journal of environmental radioactivity, **44**, pp. 275-296

Min, M. Z., Meng, Z. W., Sheng, G. Y., Min, Y. S. and Liu, X. (2000) *Organic geochemistry of paleokarst-hosted uranium deposits, South China*. Journal of Geochemical Exploration, **68**, pp. 211-229

NEN5623. (1991) *Dutch Normative, Radioactivity measurements-Determination of the activity of gamma-ray emitting nuclides in a sample using semi-conductor spectrometry (in Dutch)*; Report : .

Torfs, H., Mitchener, H., Huysentruyt, H. and Toorman, E. (1996) *Settling and consolidation of mud/sand mixtures*. Coastal Engineering, **29**, pp. 27-45

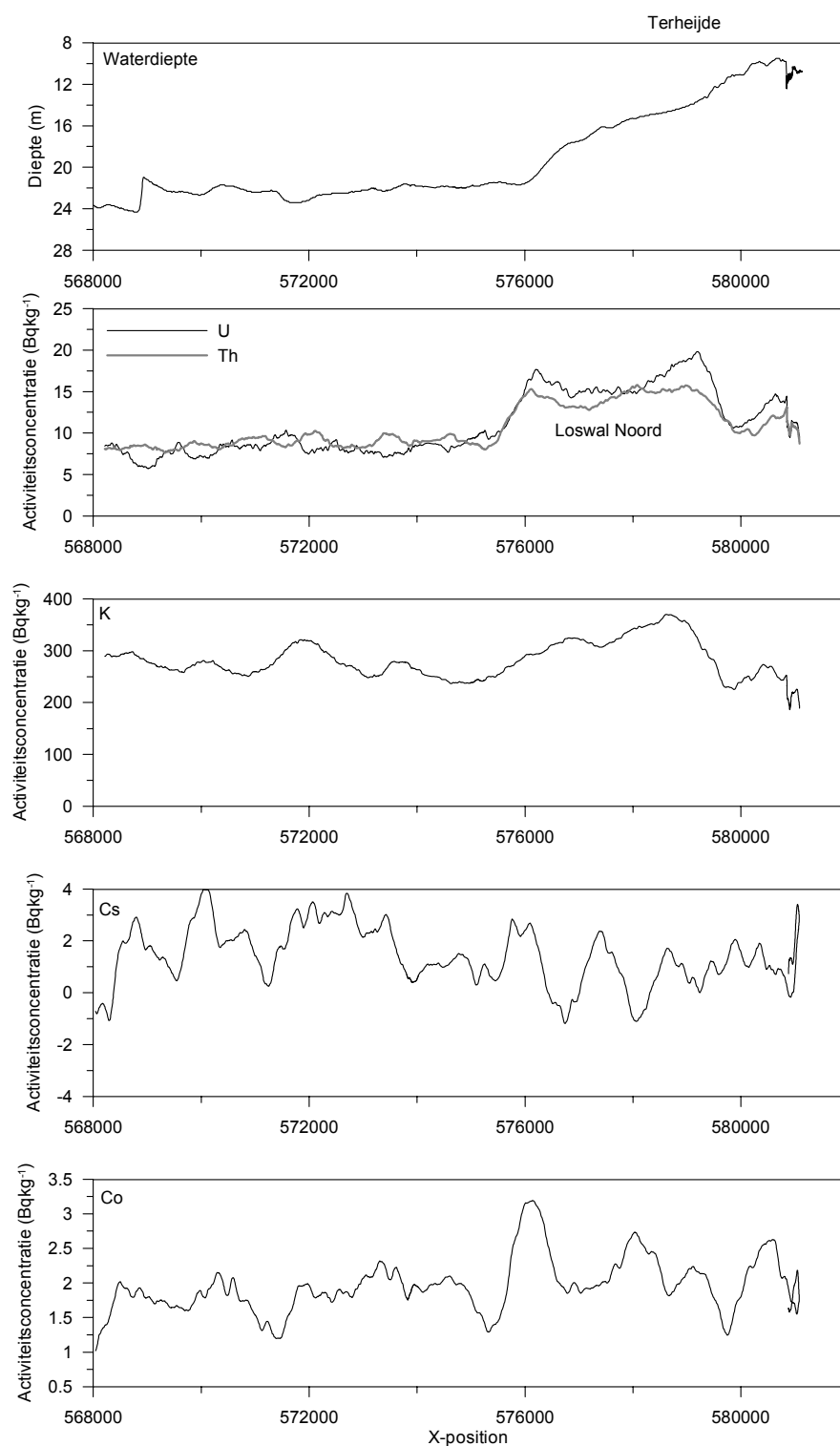
Venema, L. B., de Meijer, R. J., van Os, B. and Gieske, J. M. J. (1999a) *In-situ characterisation of coastal and river sediment*. In: COPEDEC 99, **1** (Ed. by G. P. Mocke), pp. 324-334, Cape Town, South Africa .

Venema, L. B., Groen, P., de Meijer, R. J., van Os, B., Gieske, J. M. J. and van Wijngaarden, M. (1999b) *Radiometric survey of "Hollands Diep". Part II: Mud-sand mapping*. NGD/KVI, Groningen; Report : Z-78.

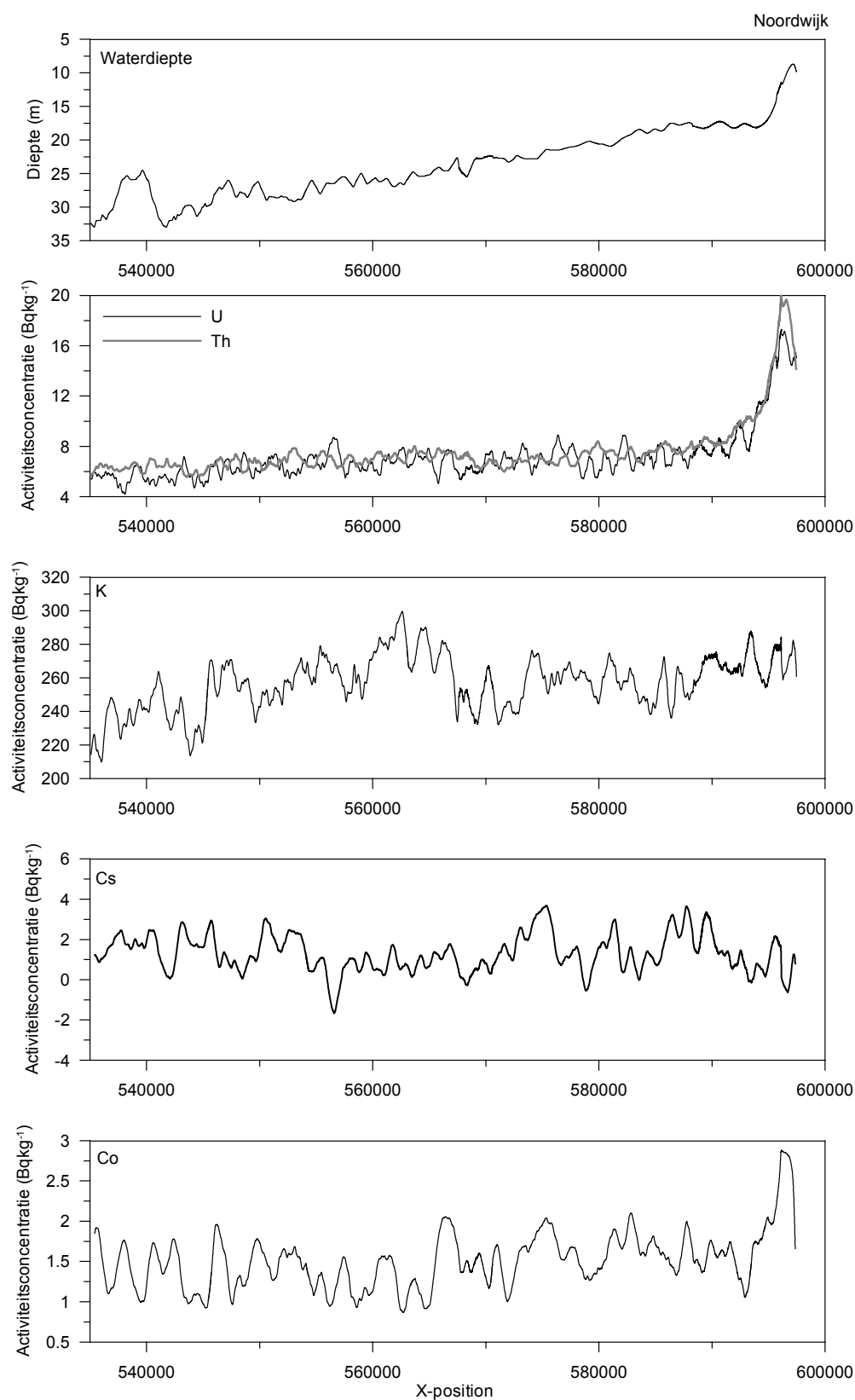
Venema, L. B., Koomans, R. L., Stapel, C., Zwanenburg-Nederlof, H. P. and De Meijer, R. J. (1998) *Sample analysis for "Loswal Noordwest" -t0-t1-survey Part II-*. KVI; Report : Z-59.

Venema, L. B., Limburg, J., de Meijer, R. J., van Os, B., Gieske, J. M. J. and van Wijngaarden, M. (2000) *Radiometric characterisation of 'Haringvliet' sediment*. NGD/KVI, Groningen; Report : Z-99.

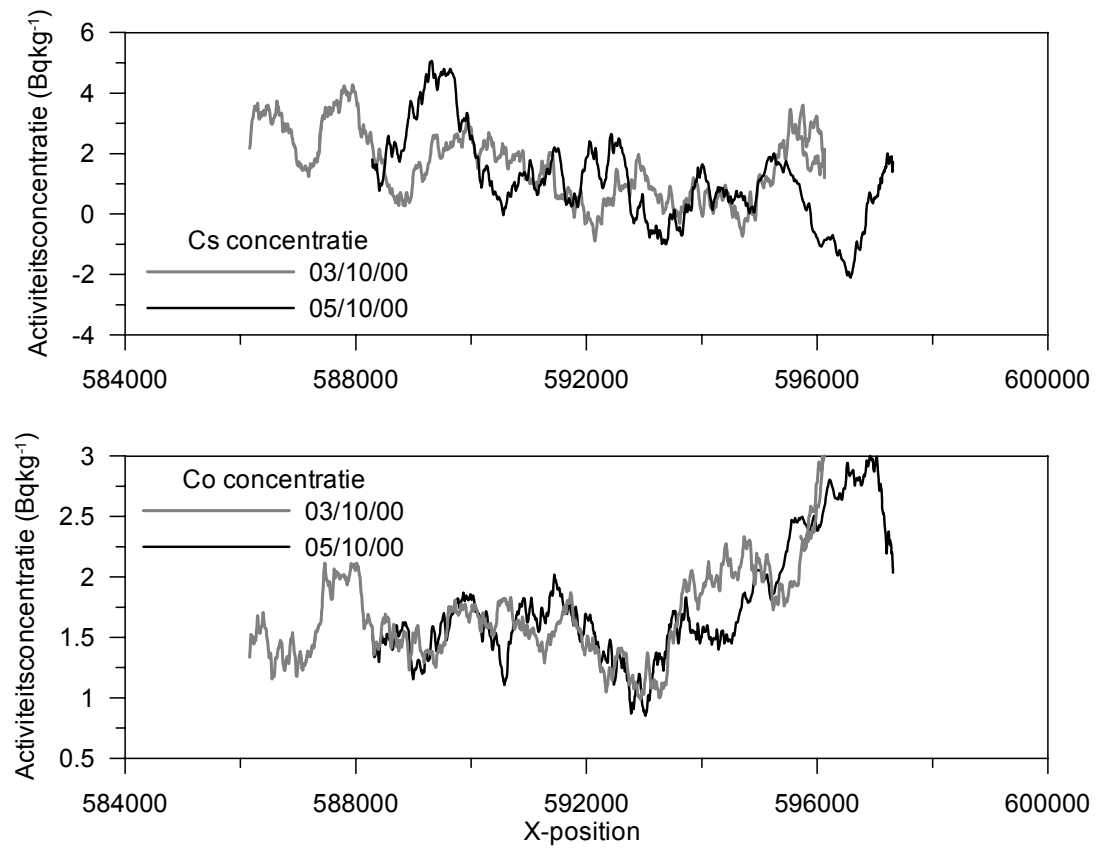
Appendix A Figuren



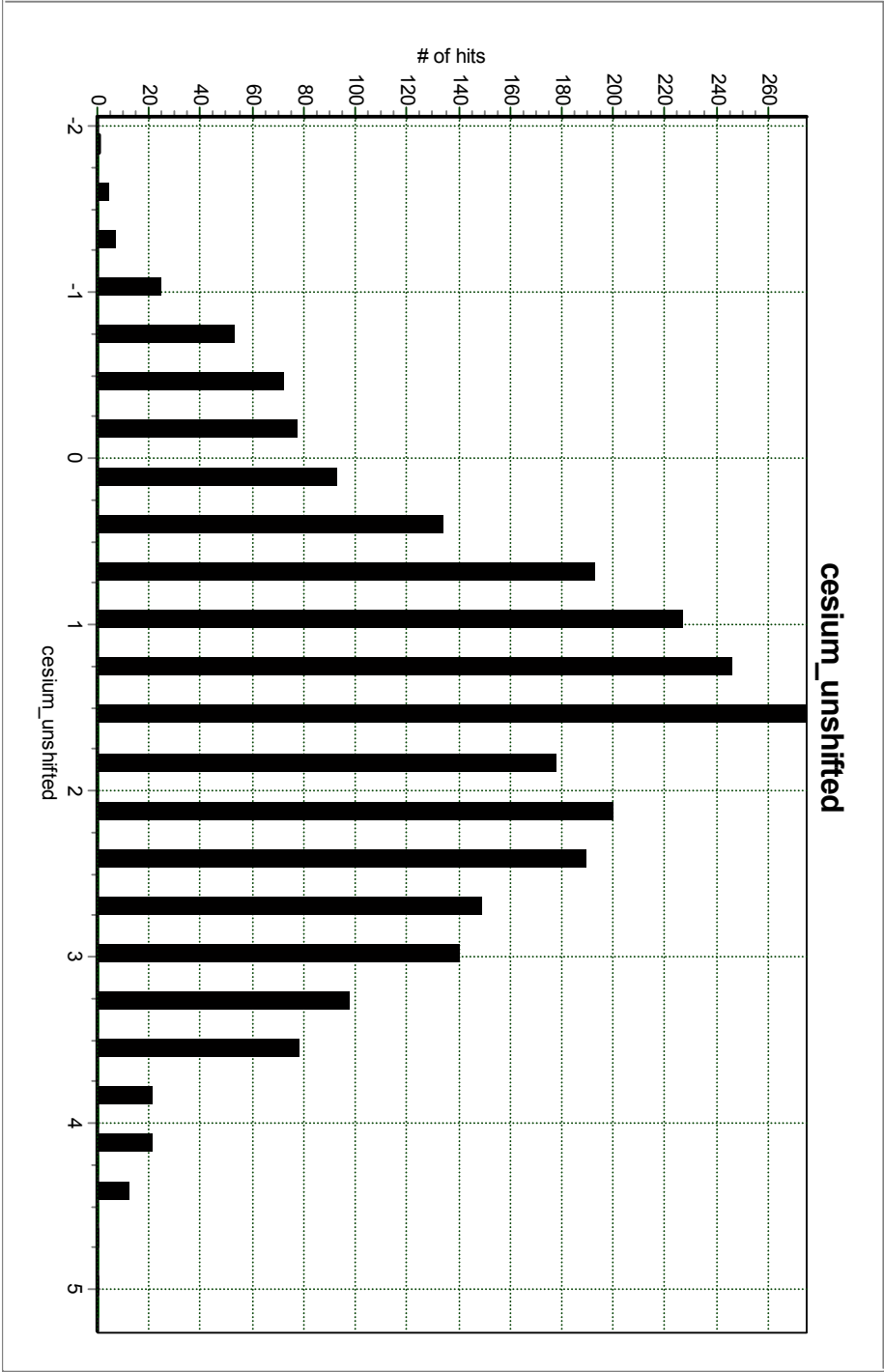
Figuur 9: Kustdwarse distributie van ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K , ^{137}Cs en ^{60}Co (de lijnen representeren een lopend gemiddelde van 101 datapunten) op de Terheijde raai.



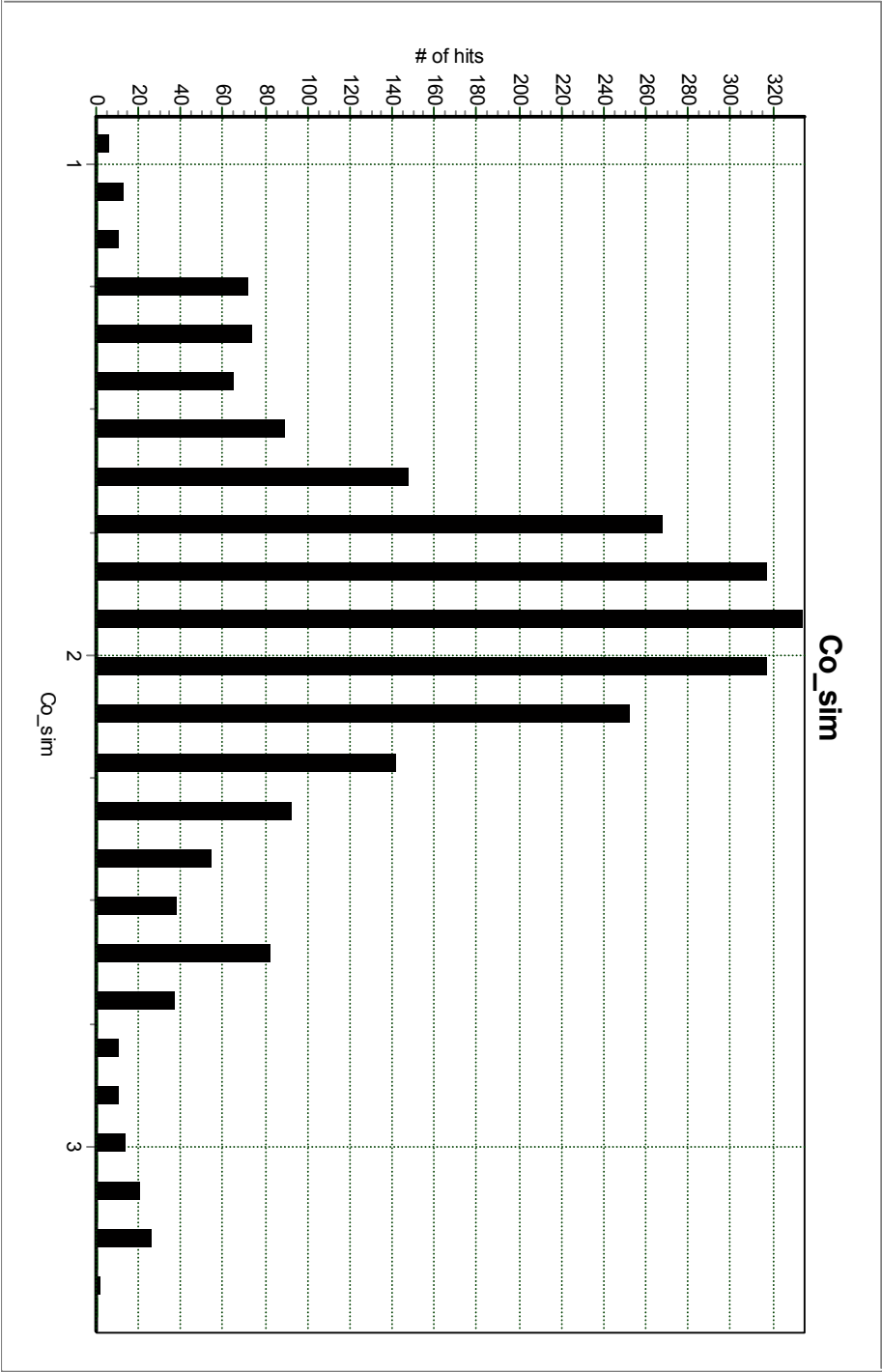
Figuur 10: Kustdwarse distributie van ^{232}Th , ^{238}U , ^{40}K , ^{137}Cs en ^{60}Co (de lijnen representeren een lopend gemiddelde van 101 datapunten) op de Noordwijkraai.



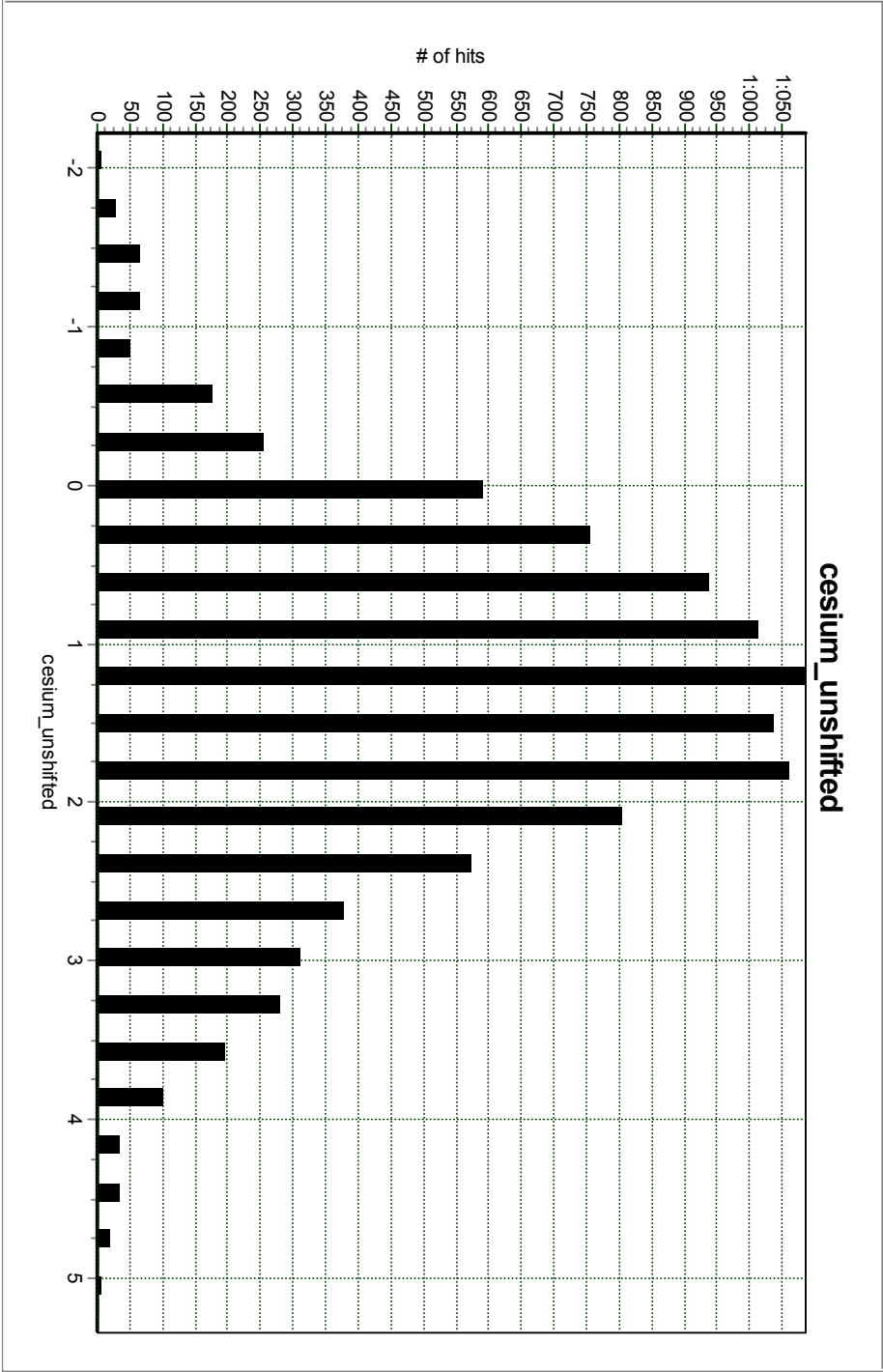
Figuur 11: Vergelijk van de ^{137}Cs en ^{60}Co concentraties (lopend gemiddelde van 100 datapunten) tijdens twee metingen langs de Noordwijk raai. De Grijze lijn geeft de metingen weer gemeten op dinsdag 3 oktober, de zwarte lijn geeft de gegevens gemeten op donderdag 5 oktober.



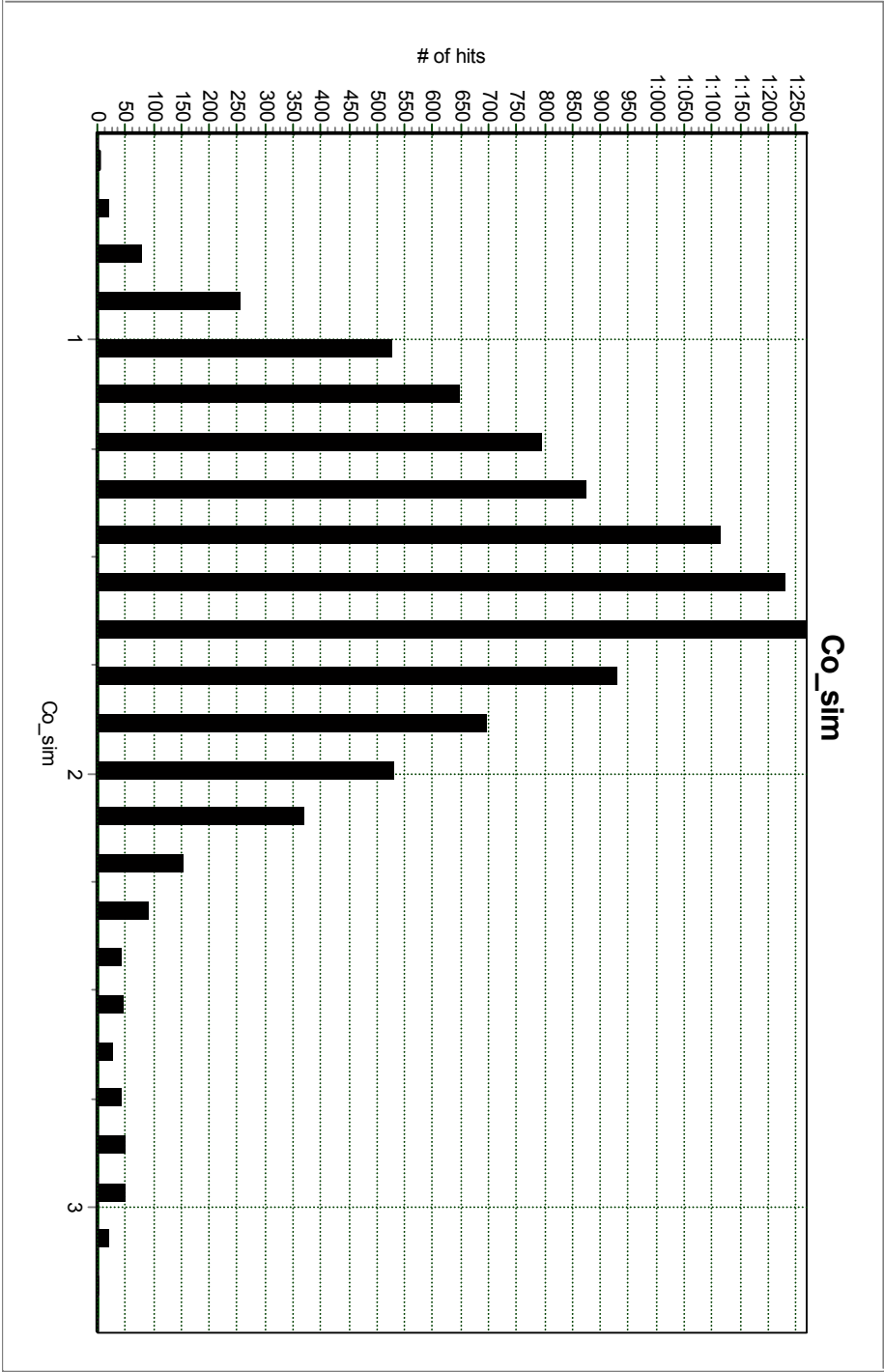
Figuur 12: ¹³⁷Cs distributie gevonden langs de Terneijde raai. De gemiddelde concentratie ligt rond 1.5 Bq/kg. Opvallend is de asymmetrie naar hogere ¹³⁷Cs waarden.



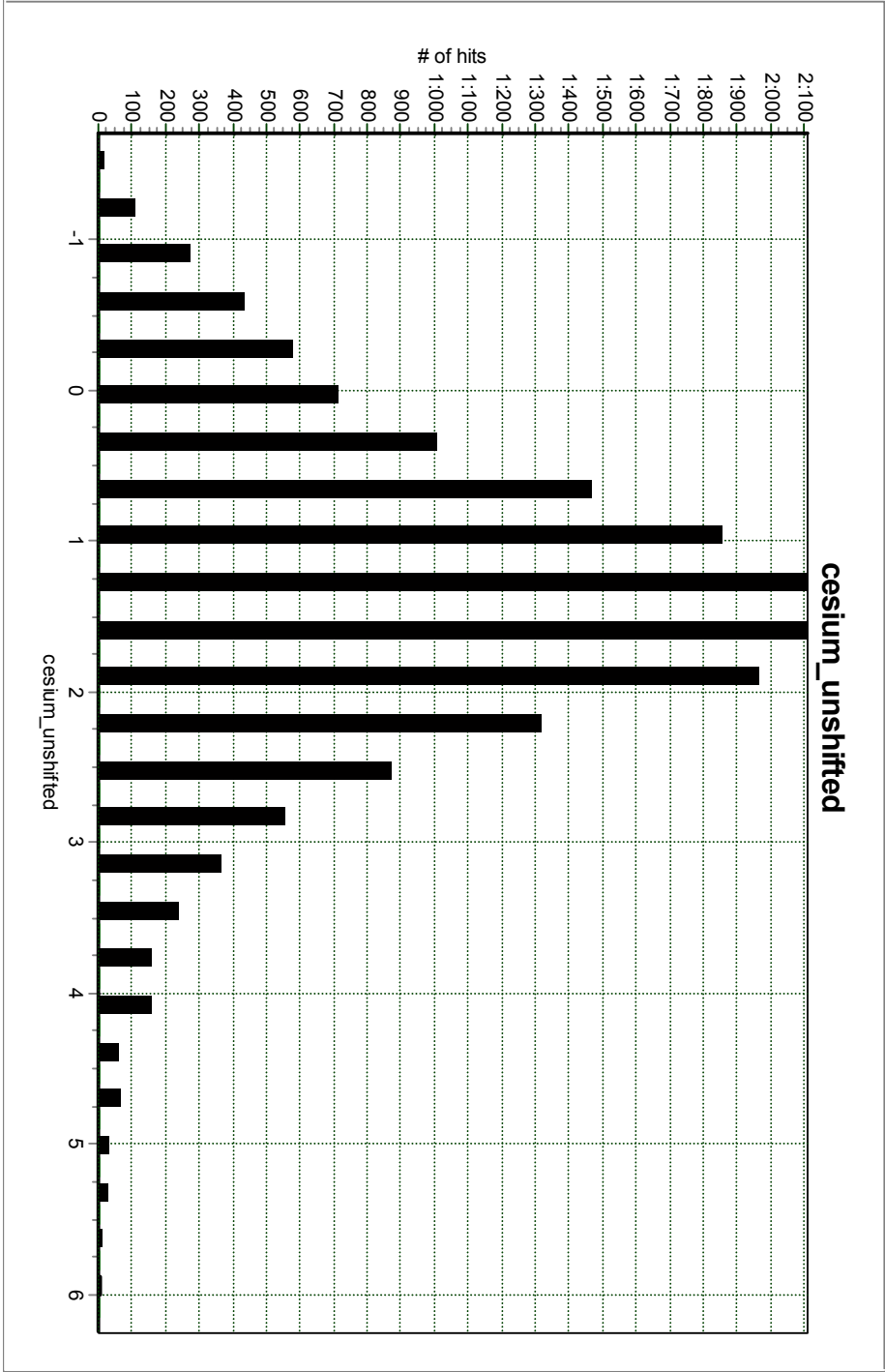
Figuur 13: ^{60}Co distributie gevonden langs de Terheijde raai. De gemiddelde concentratie ligt rond 1.9 Bq/kg, en is daarmee ietwat hoger dan in het Texel gebied. Opvallend zijn de assymetrieën, zowel naar lage als naar hogere ^{60}Co waarden



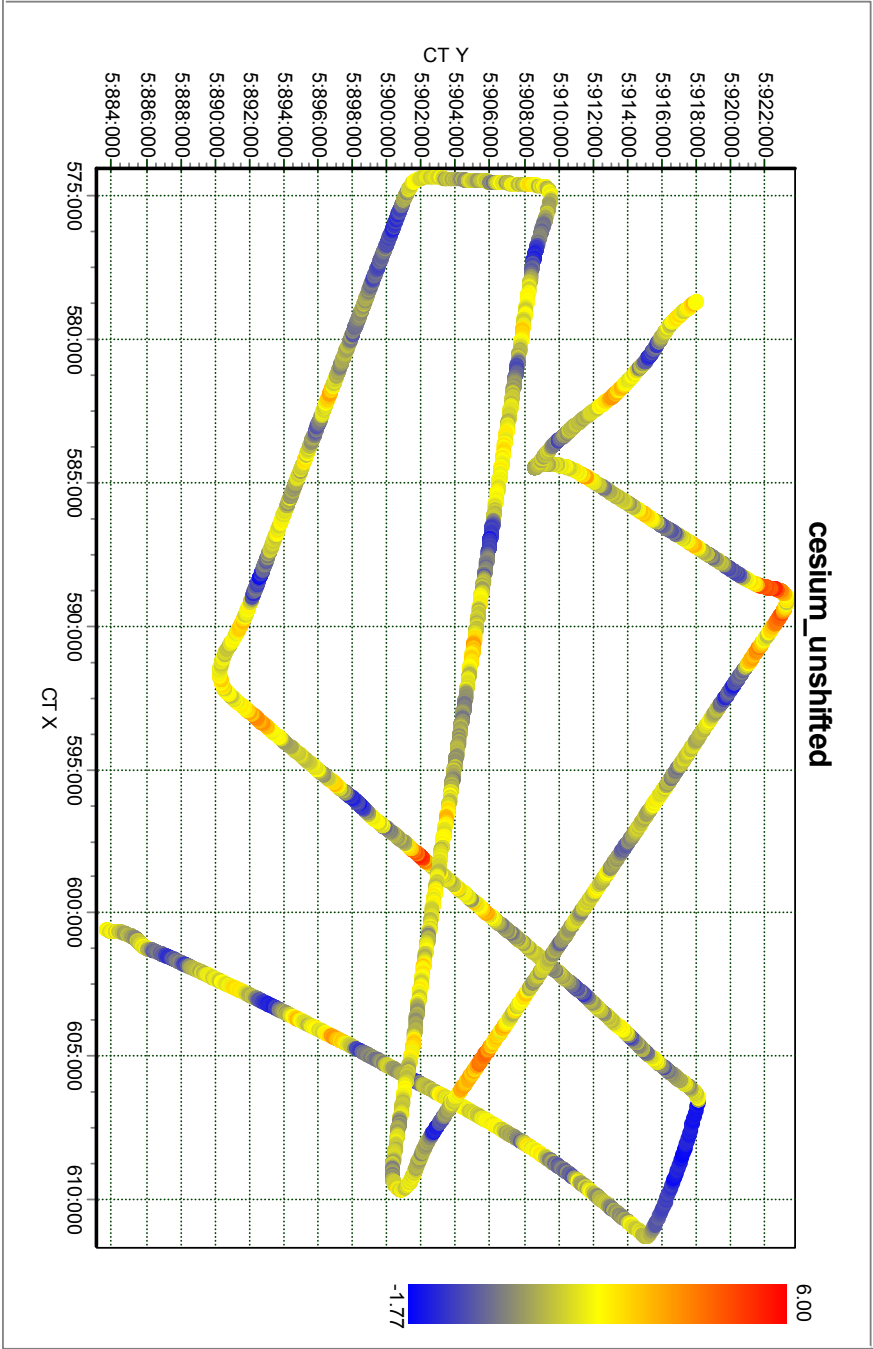
Figuur 14: ¹³⁷Cs distributie gevonden langs de Noordwijk raai. De gemiddelde concentratie ligt rond 1.5 Bq/kg.



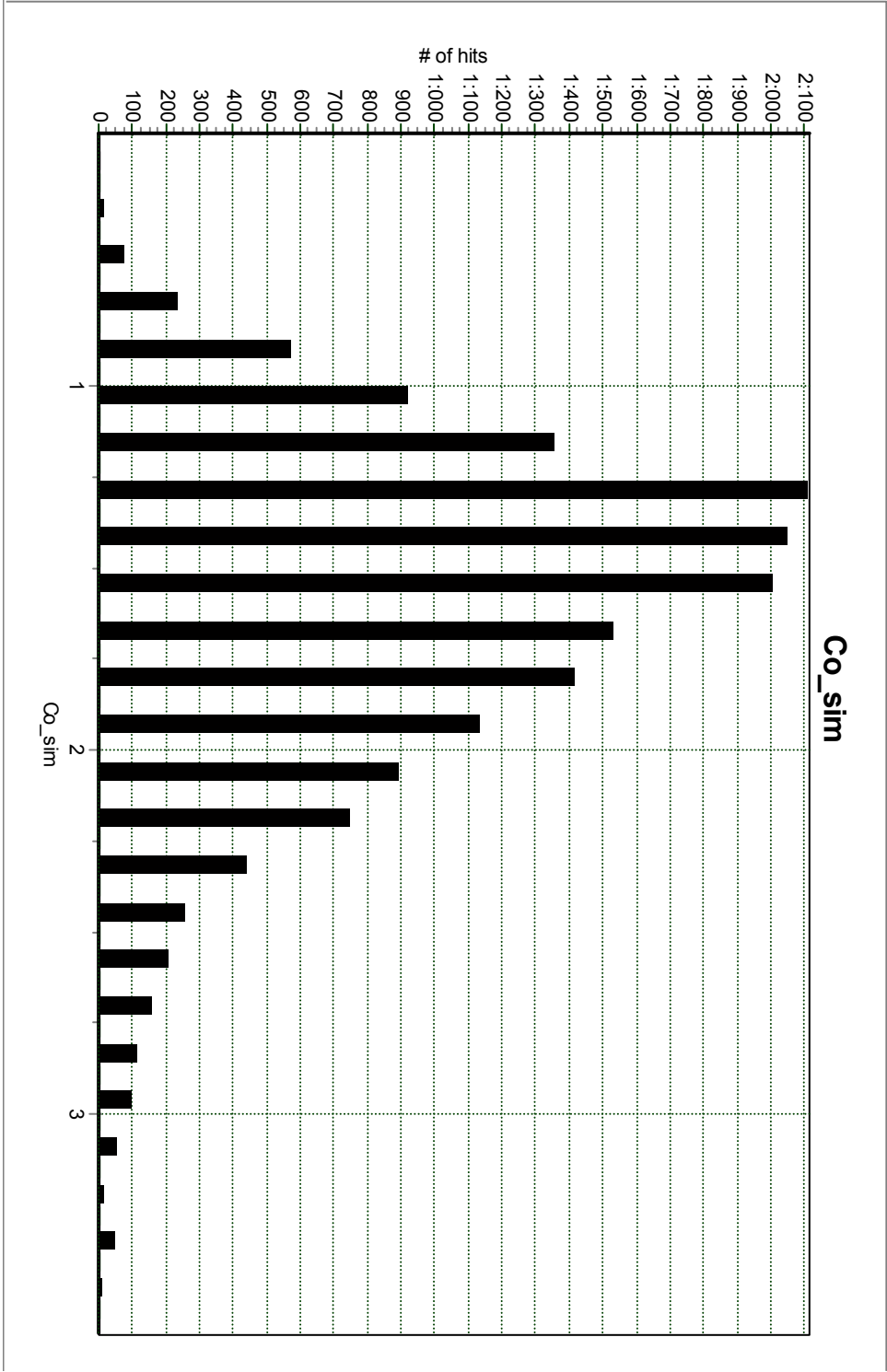
Figuur 15: ^{60}Co distributie gevonden langs de Noordwijk raai. De gemiddelde concentratie ligt rond 1.5 Bq/kg. Opvallend is de staart naar maximaal 3 Bq/kg⁻¹.



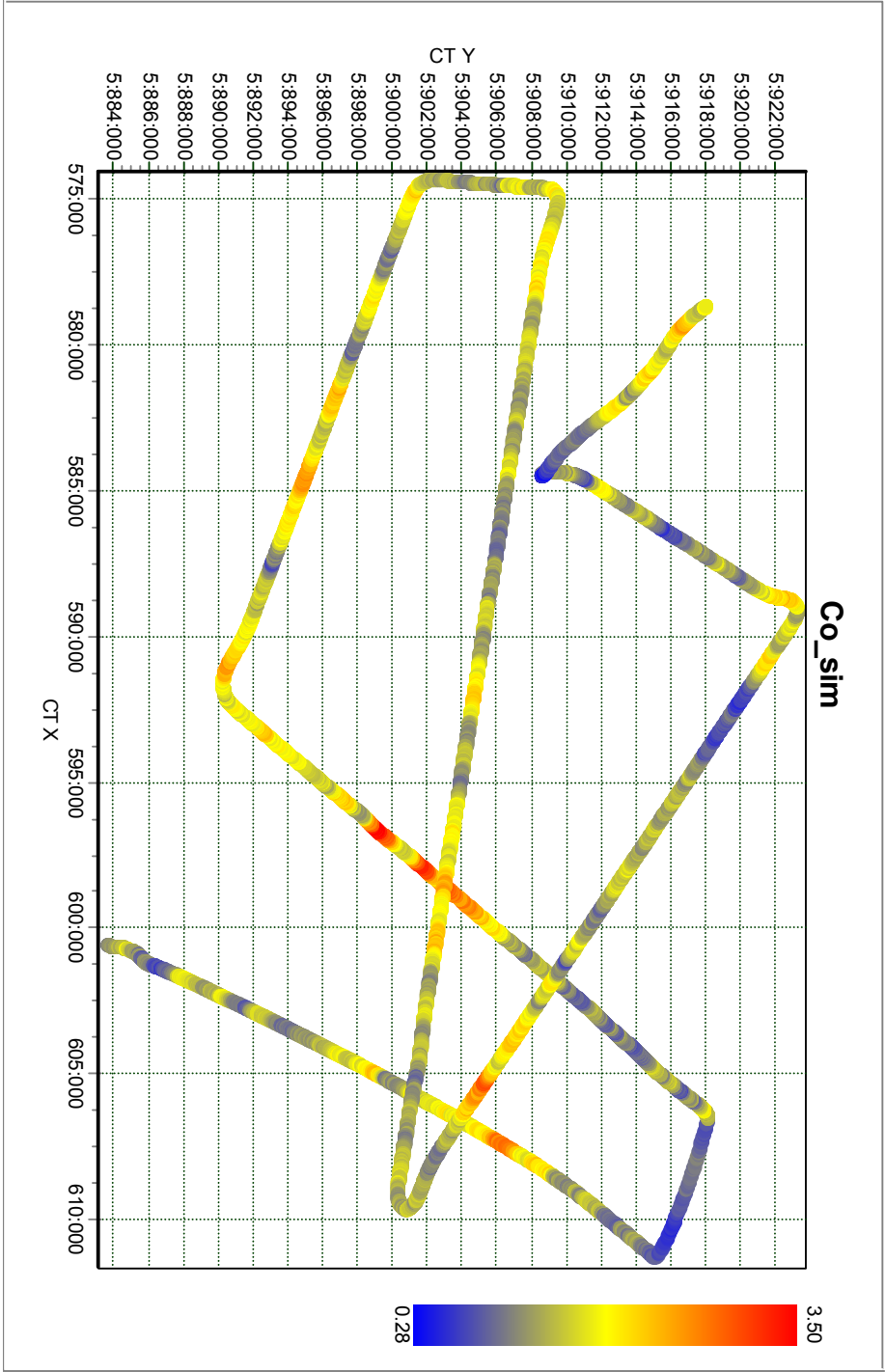
Figuur 16. ^{137}Cs verdeling gevonden in het Texel gebied. Te zien is dat de ^{137}Cs waarden gevonden in het gebied spreiden rondom een gemiddelde van ongeveer 1.5 Bq/kg, met een asymmetrische uitloop naar hogere ^{137}Cs waarden.



Figuur 17. ¹³⁷Cs distributie in het Texel gebied. De concentraties lopen van -1.77 tot 6 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwz: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde ¹³⁷Cs concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.



Figuur 18. ^{60}Co verdeling gevonden in het Texel gebied. Te zien is dat de ^{60}Co waarden gevonden in het gebied spreiden rondom een gemiddelde van ongeveer 1.5 Bq/kg, met, net als bij ^{137}Cs , een asymmetrische uitloop naar hogere ^{60}Co waarden.



Figuur 19. ^{60}Co distributie in het Texel gebied. De concentraties lopen van 0 tot 3.5 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. D.w.z.: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde ^{60}Co concentratie over een lijnstuk met een lengte van zo'n 1000 m.

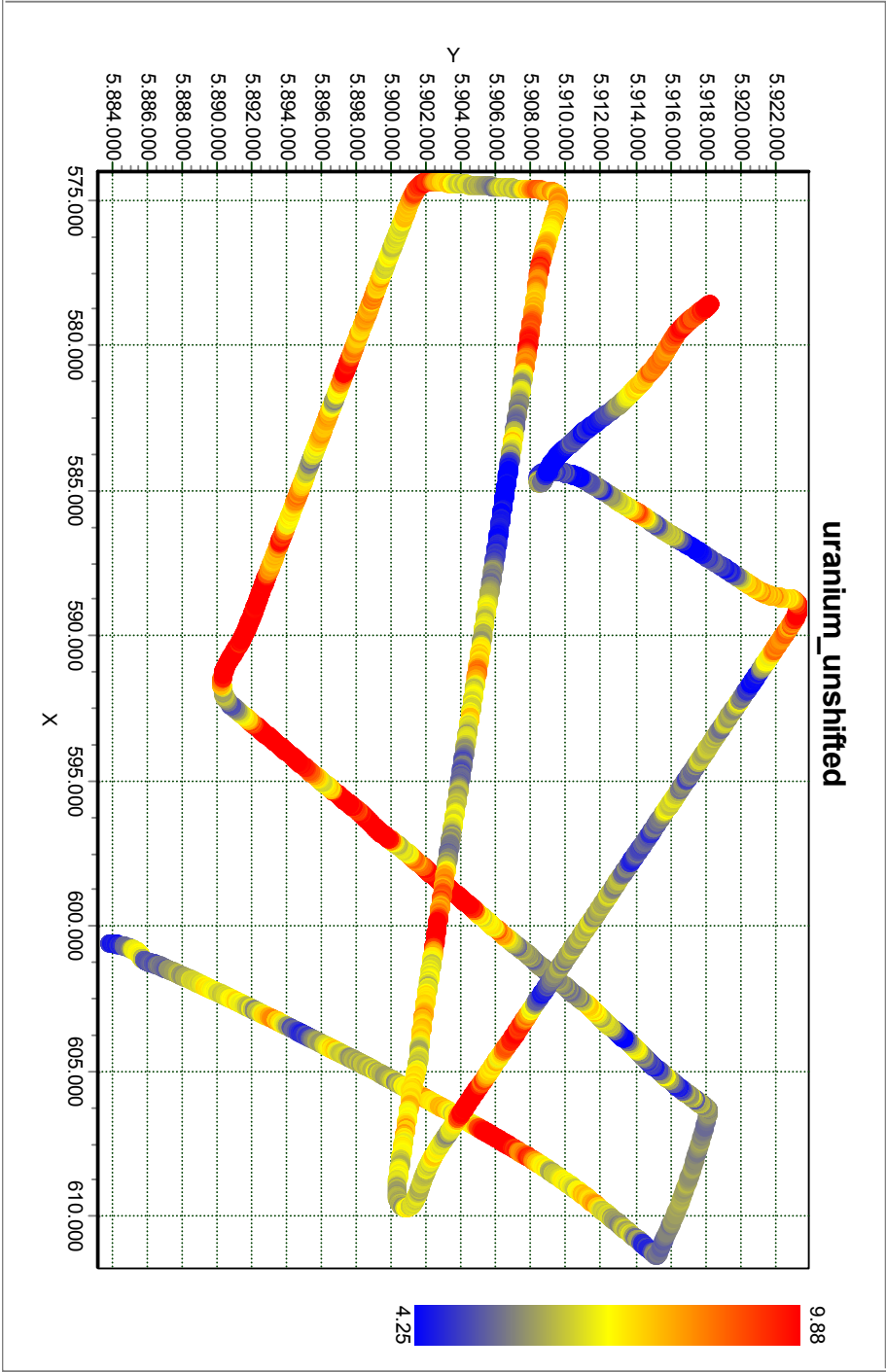


Figure 20: ^{238}U distributie in het Texel gebied. De concentraties lopen in een range van 36 van 4.25 tot 9.88 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwz: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.

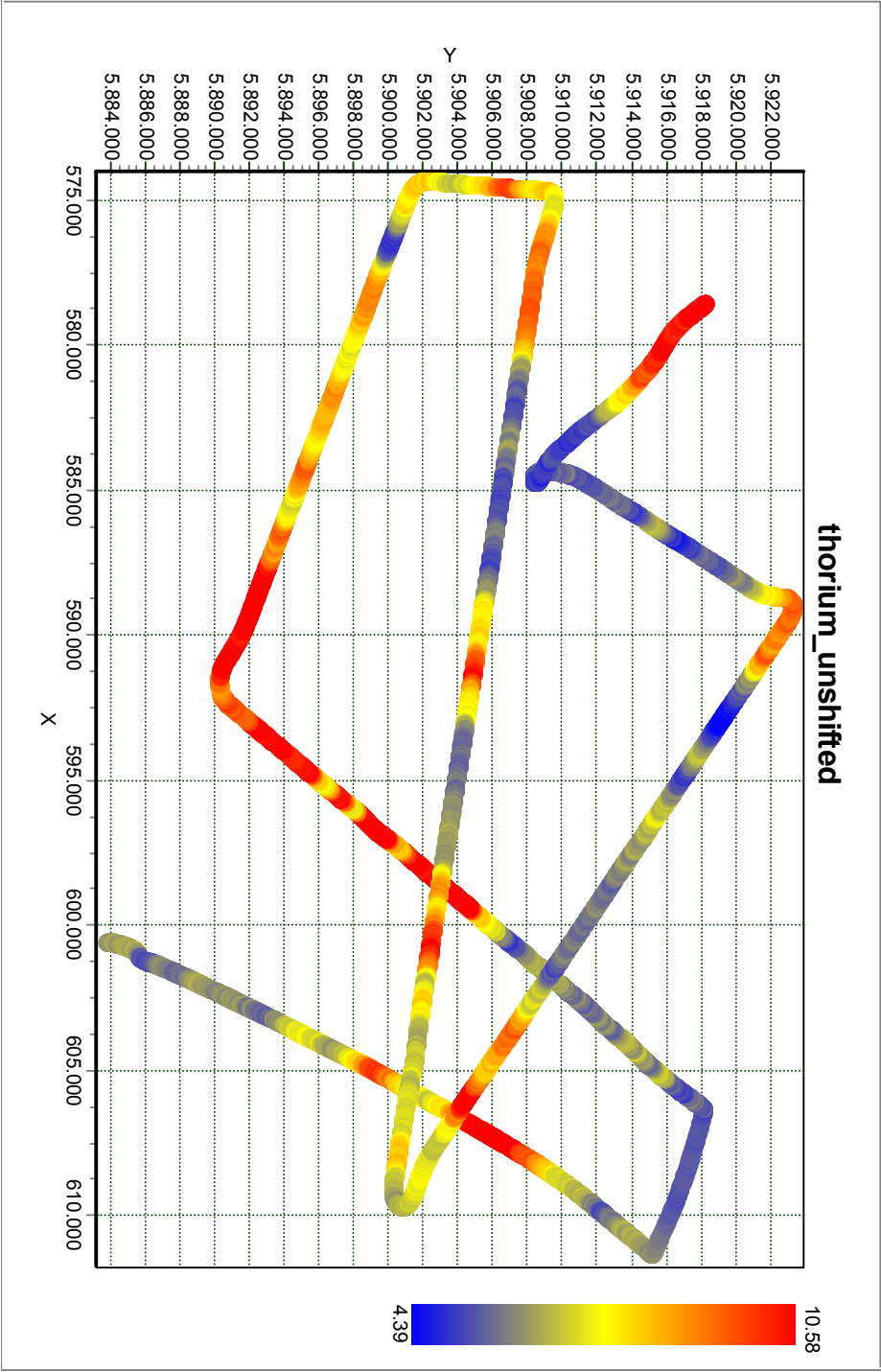
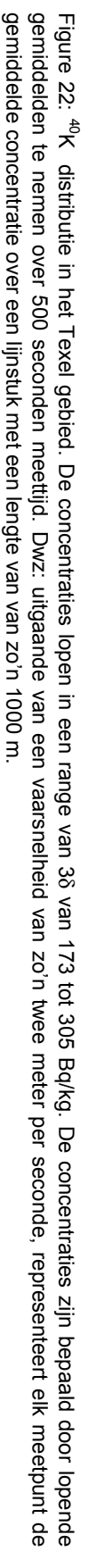
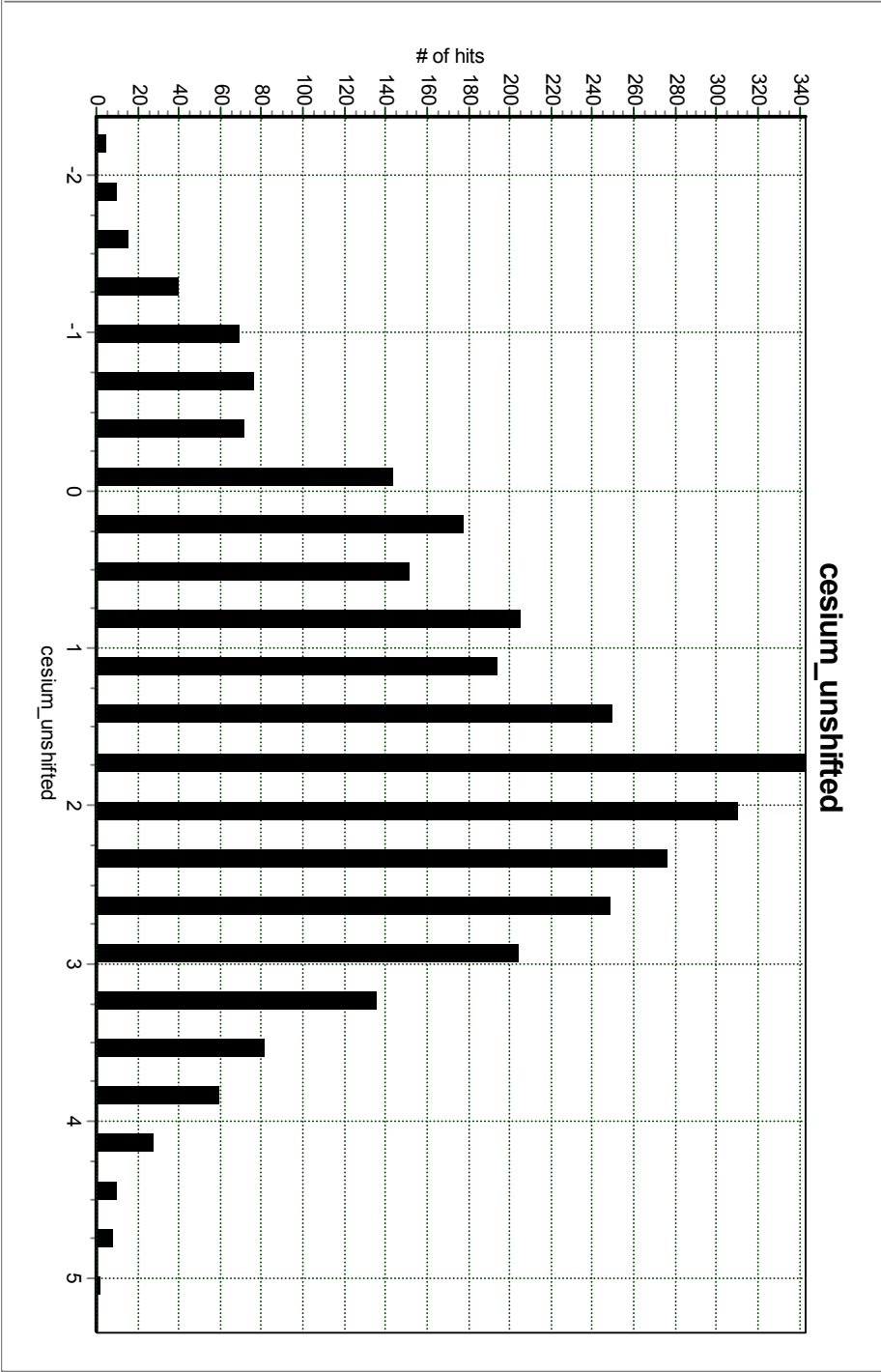
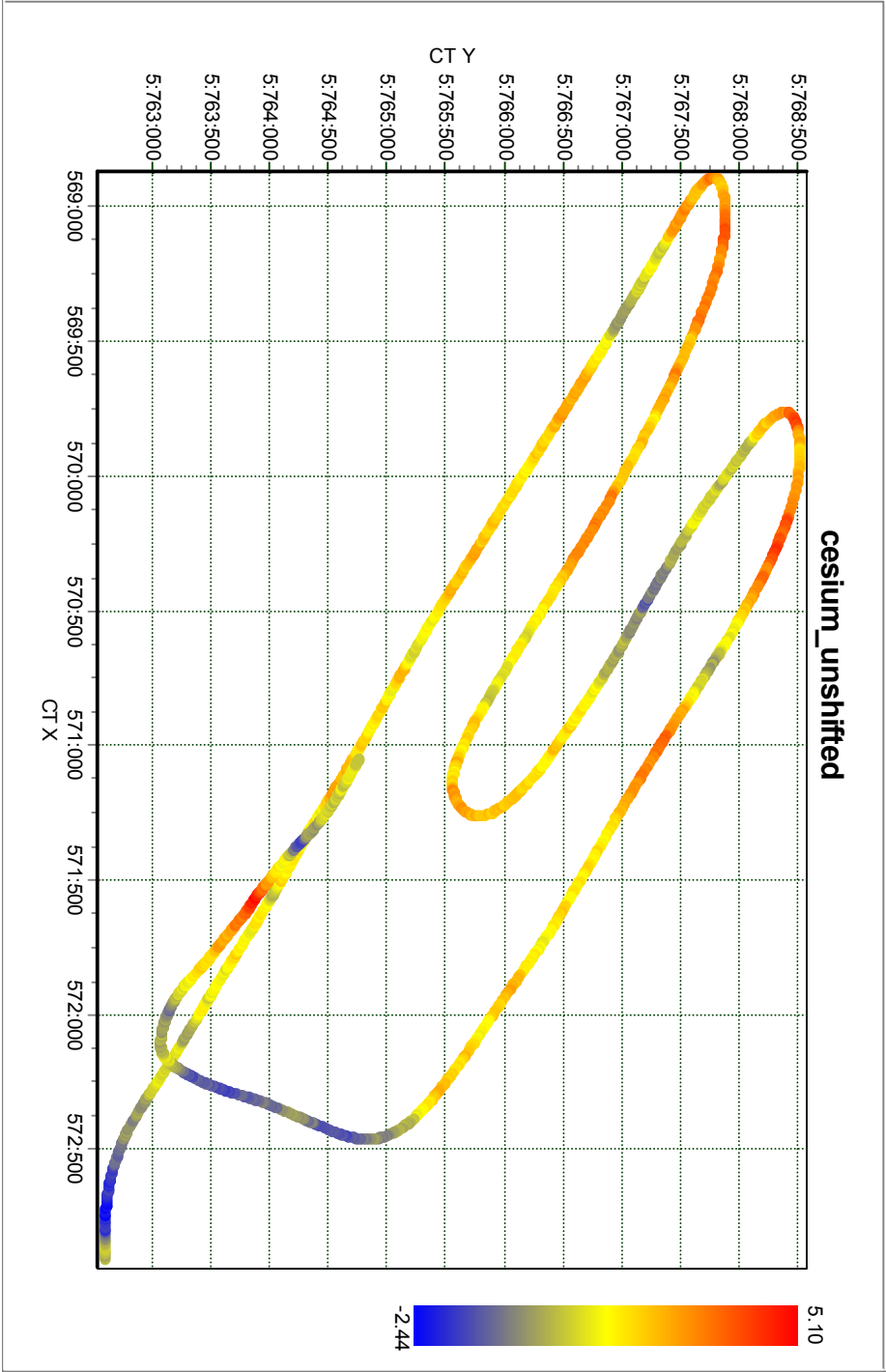


Figure 21: ²³²Th distributie in het Texel gebied. De concentraties lopen in een range van 36 van 4.39 tot 10.58 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwz: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.

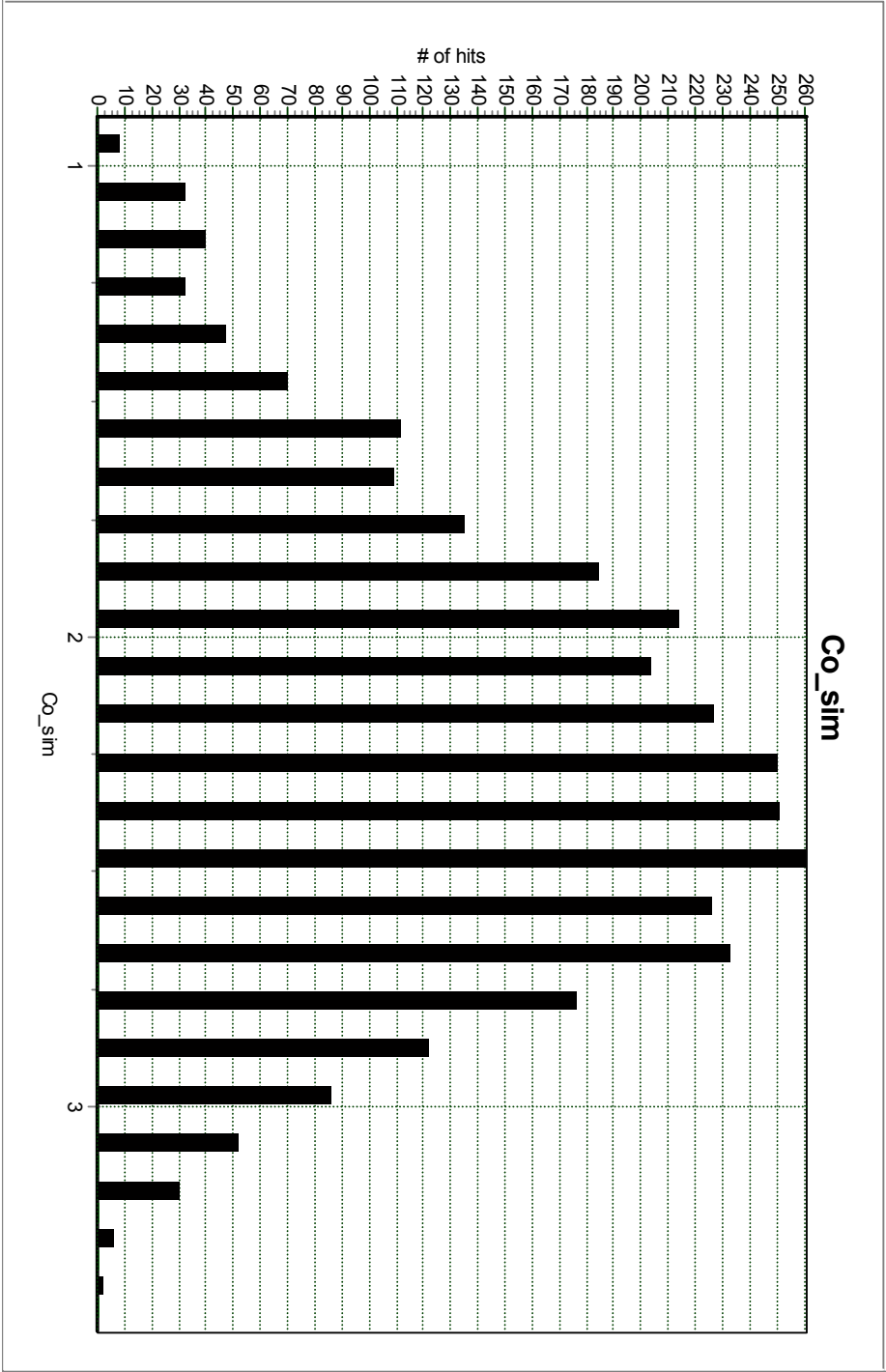




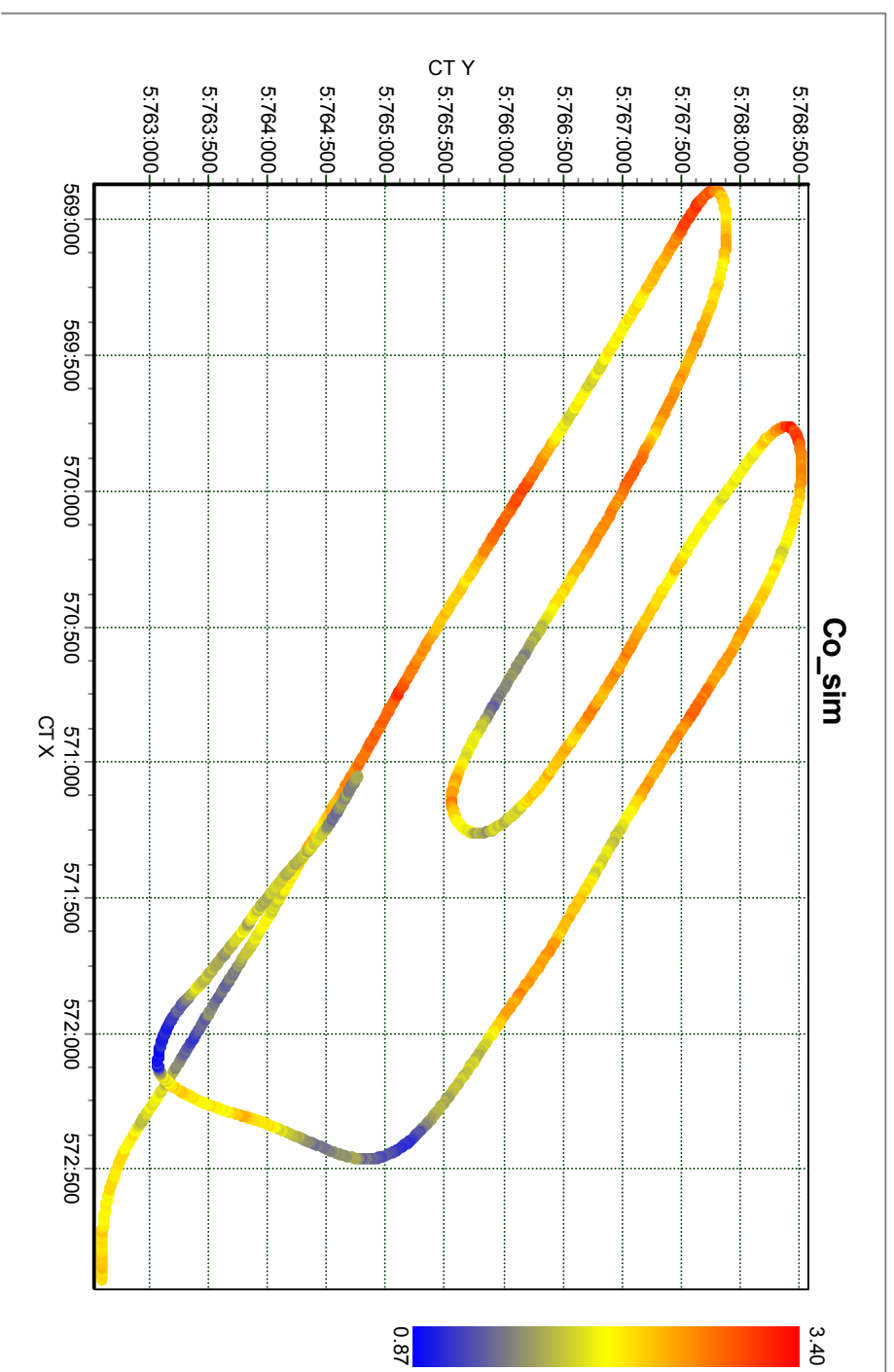
Figuur 23. ¹³⁷Cs verdeling in het gebied rondom de verdiepte Loswal. De gemiddelde activiteitsconcentratie is 1.5 BqKg⁻¹. Opvallend is de asymmetrische verdeling.



Figuur 24. Ruimtelijke verdeling van de Cs concentratie nabij de Verdiepte Loswal. De concentraties lopen van -2.44 tot 5.1 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwz: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde ⁶⁰Co concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.



Figuur 25. Co distributie rondom de Verdiepte Loswal. De gemiddelde Co concentratie is 2.2 BqKg^{-1} , de mediane activiteitsconcentratie van 2.5 BqKg^{-1} duidt op een asymmetrische verdeling.



Figuur 26. Ruimtelijke verdeling van de Co concentratie nabij de Verdiepte Loswal. De concentraties lopen van 0.87 tot 3.4 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwz. uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde ^{60}Co concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.

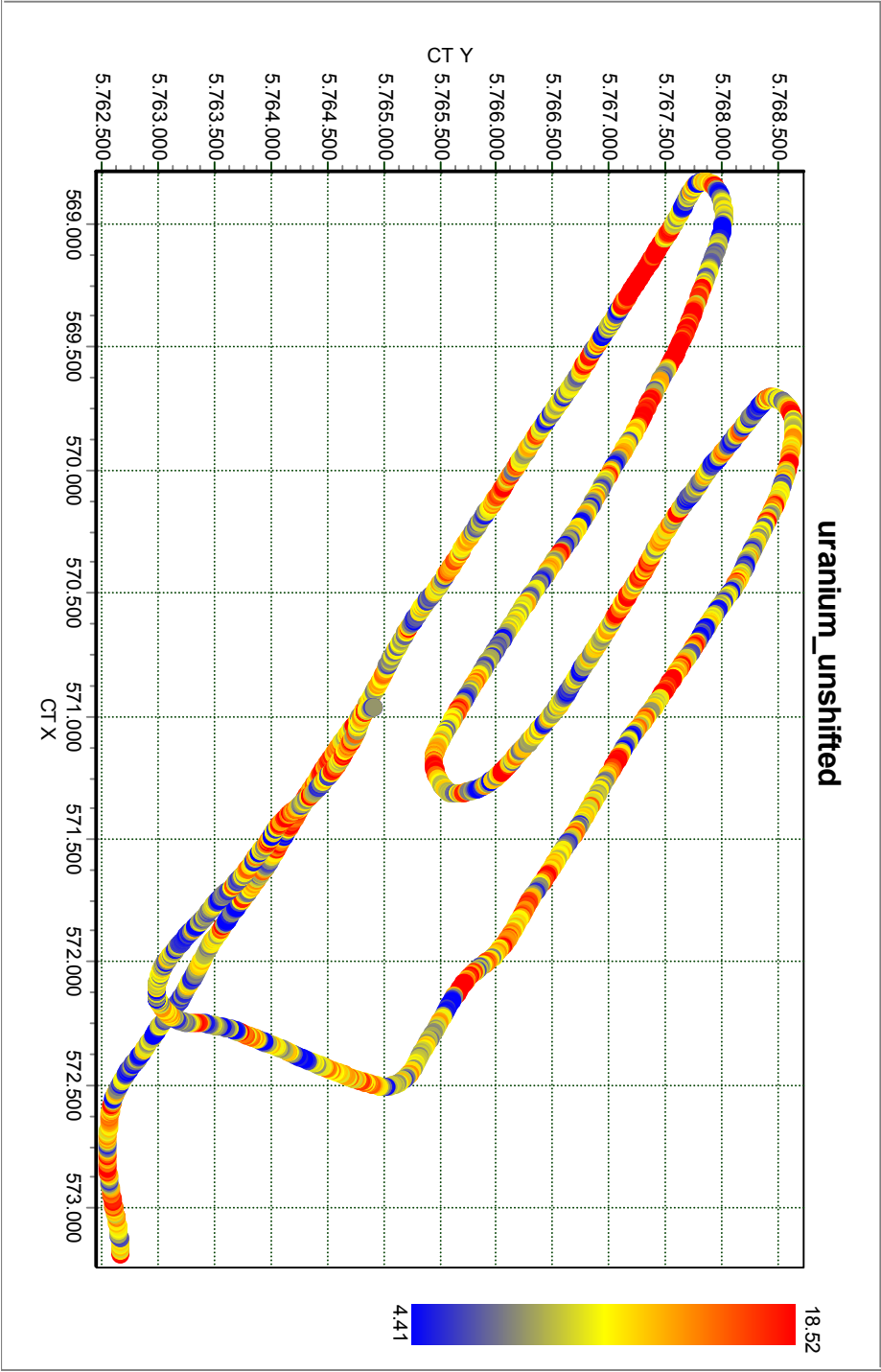


Figure 27: ^{238}U distributie in het gebied rondom de verdiepte loswal. De concentraties lopen in een range van 38 van 4 tot 18 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwg: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.

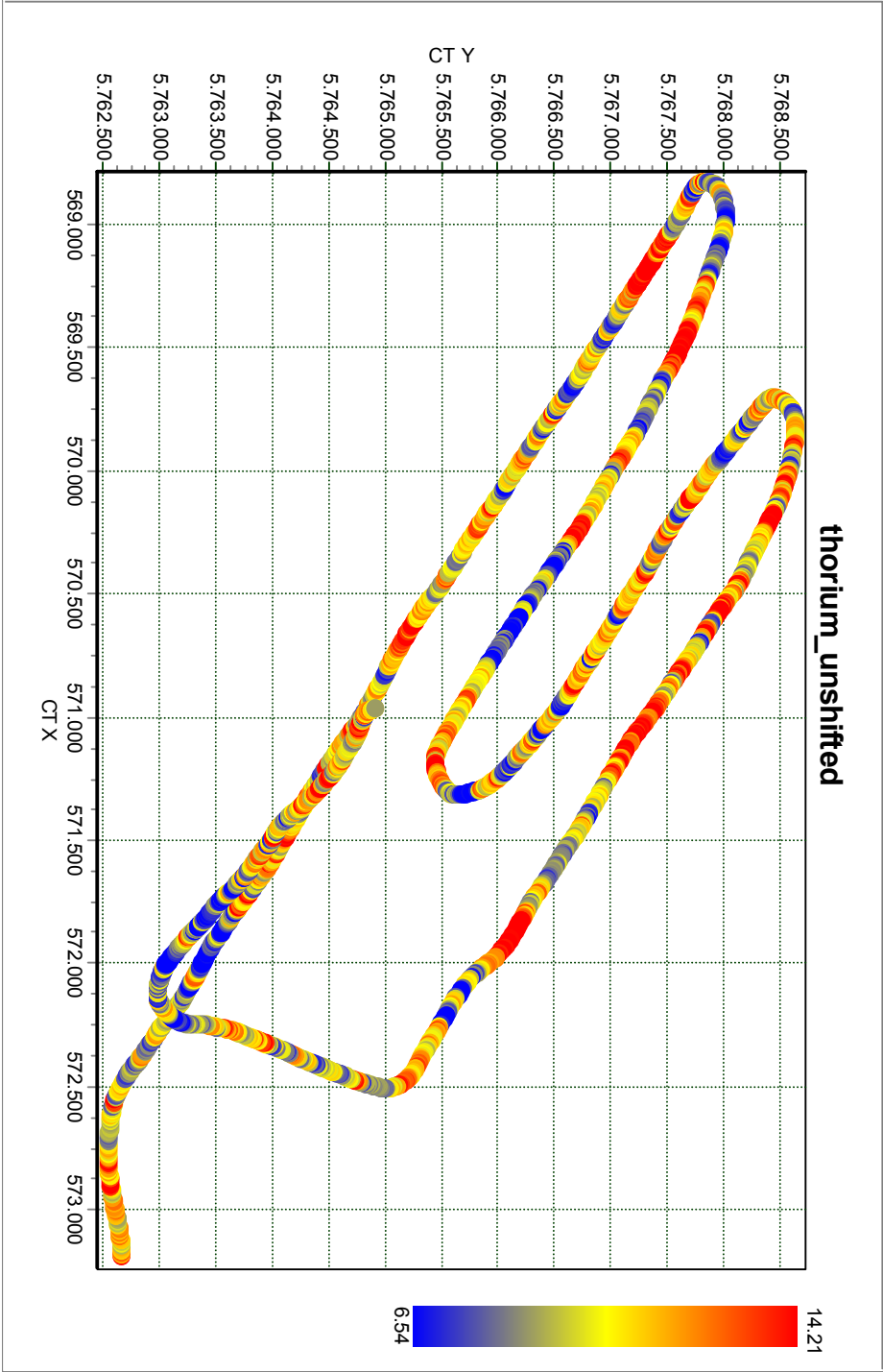


Figure 28: ^{232}Th distributie in het gebied rondom de verdiepte loswal. De concentraties lopen in een range van 38 van 6 tot 14 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwr: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.

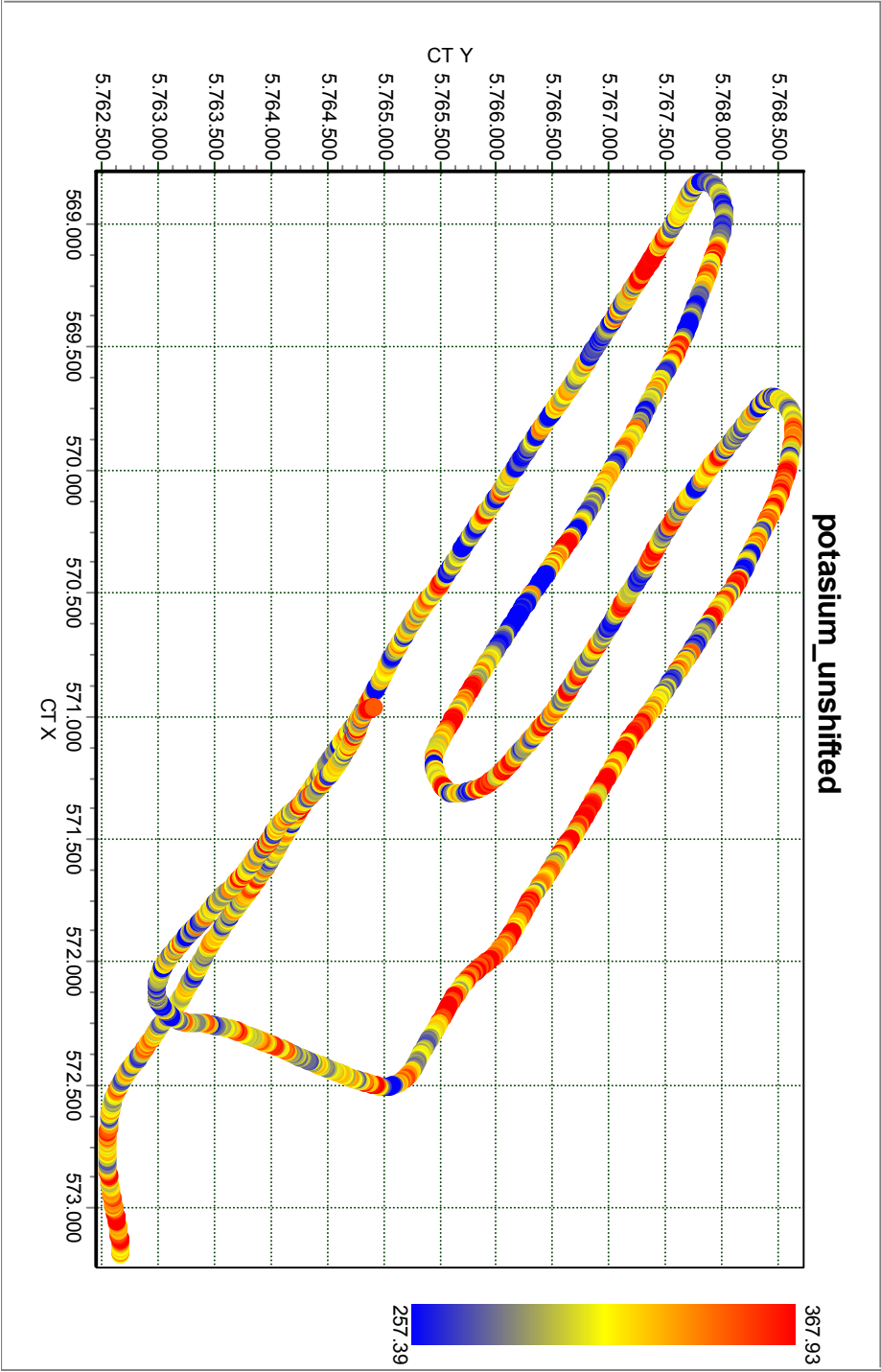
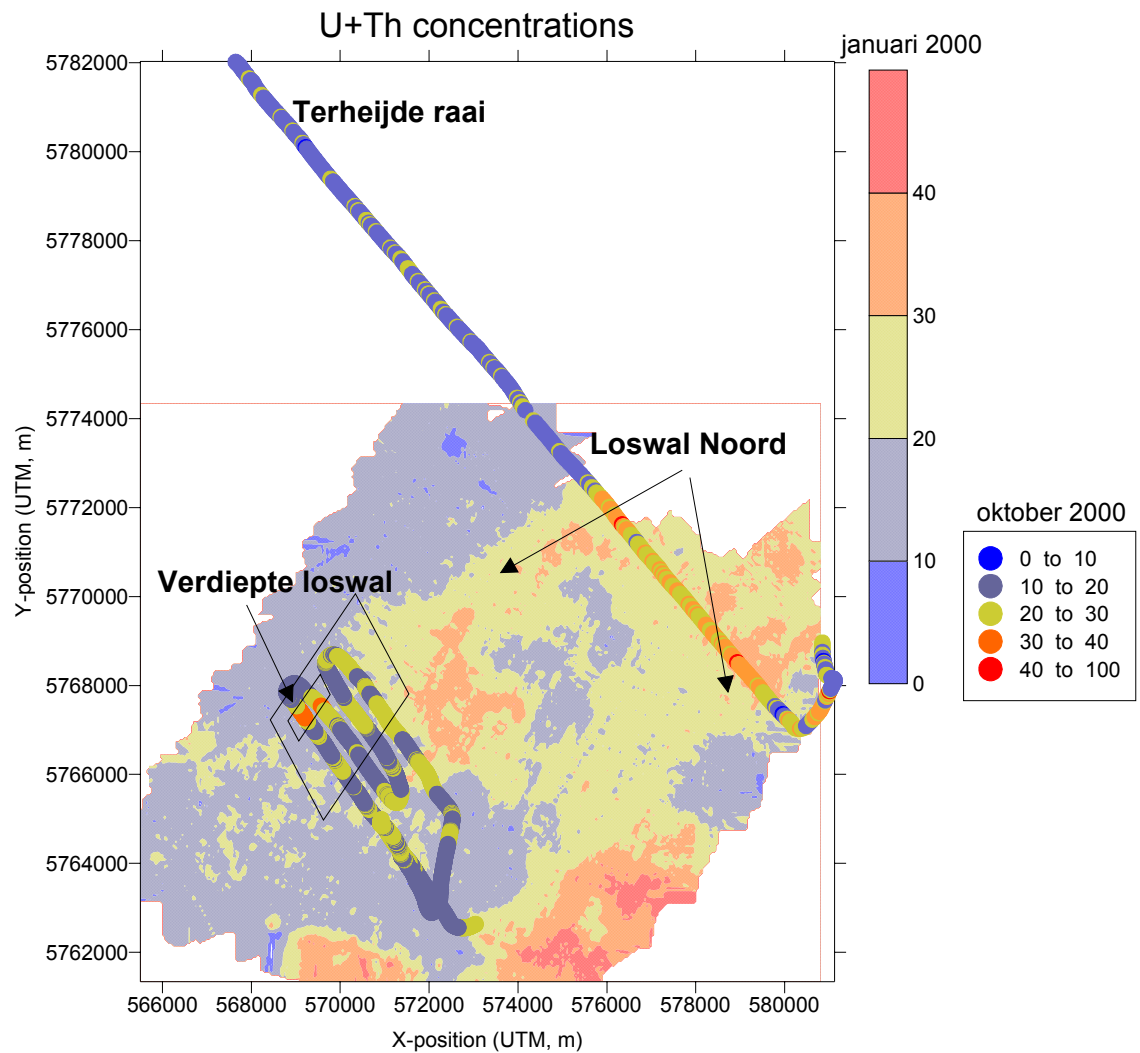


Figure 29: ^{40}K distributie in het gebied rondom de verdiepte loswal. De concentraties lopen in een range van 38 van 257 tot 367 Bq/kg. De concentraties zijn bepaald door lopende gemiddelden te nemen over 500 seconden meettijd. Dwr: uitgaande van een vaarsnelheid van zo'n twee meter per seconde, representeert elk meetpunt de gemiddelde concentratie over een lijnstuk met een lengte van van zo'n 1000 m.



Figuur 30: Overzichtskaart van de U+Th activiteitsconcentraties van de raai rondom de Verdiepte Loswal en de Terheijde Raai. De geïnterpoleerde achtergrondkaart geeft de U+Th concentraties weer gemeten tijdens een t_0 kartering rondom de Verdiepte Loswal (Venema *et al*, in prep.). De locaties van de verdiepte loswal en Loswal Noord zijn aangegeven.