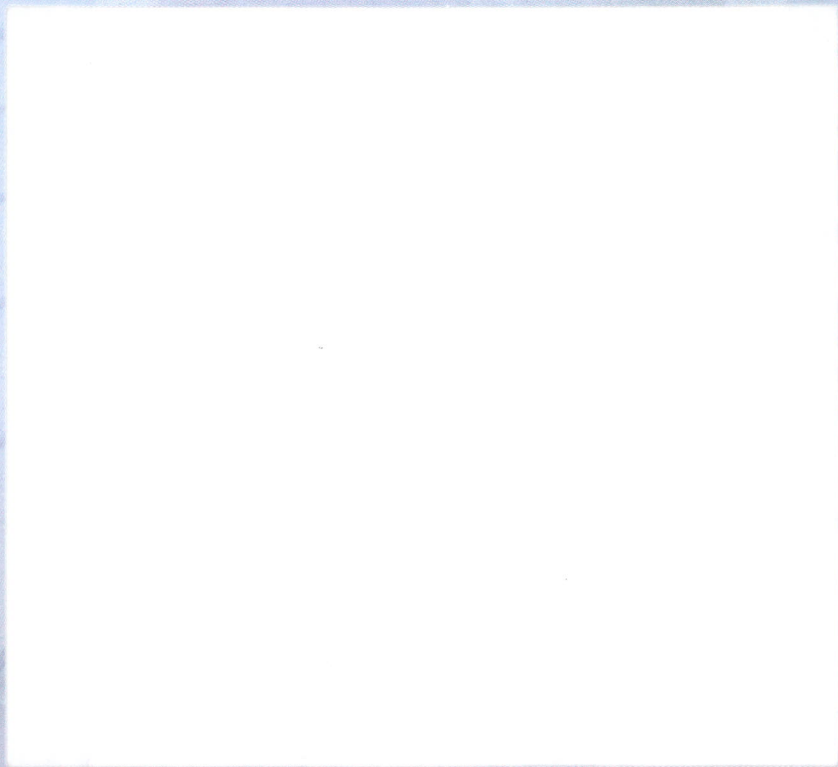


DI: 113347





HAI-RPT-980066

**LWI-rivieren**  
**Integraal monitoringsysteem voor**  
**3D geometrische informatie van**  
**de rivier met behulp van sonar en**  
**remote sensing**

**Deel 2**

® Stichting LWI

Niets uit dit bestek/drukwerk mag worden veelevoudigd en/of openbaar worden gemaakt door middel van drukwerk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van een van de deelnemende partijen, noch mag het zonder een dergelijke toestemming worden gebruikt voor enig ander doel dan waarvoor het is vervaardigd.





**LWI-rivieren**  
**Integraal monitoringsysteem voor**  
**3D geometrische informatie van**  
**de rivier met behulp van sonar en**  
**remote sensing**

**Deel 2**

Dr. ir. G. Blacquière (TNO-TPD)

Dr. ir. N.A. Kinneging (Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst)

Dr. ir. E.J. de Min (Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst)

Ir. Y. Platschorre (Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst)

Ing. M.J. Ringelberg (Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst)

Ing. R.S.W. Wardenier (Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst)

status	: eindconcept
versie	: 1
archieffnummer	: HAI-RPT-980066
datum	: februari 1999
opsteller	: G. Blacquière



## **DEELNEMENDE PARTIJEN**

TNO-Technisch Fysische Dienst (projectleiding)

Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst

Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland

Rijkswaterstaat Directie Limburg

Vereniging van Waterbouwers in Bagger-, Kust- en Oeverwerken (VBKO)

Sichting LWI (Land Water Milieu en Informatie Technologie)



## VOORWOORD

Zaken als natuurontwikkeling langs de rivier, het gebruik van de uiterwaarden, dijkverhoging, verdieping cq. verbreding van de rivier (bijv. Maas, Schelde), enz. worden steeds meer geïntegreerd aangepakt. Een dergelijke aanpak vereist dat er kwalitatief goede geometrische informatie beschikbaar is met betrekking tot de bestaande situatie, op basis waarvan de gevolgen van veranderingen voorspeld kunnen worden. Ook is betrouwbare geometrische informatie belangrijk bij saneringen (Ketelmeer) en voor modellen die de waterstand voorspellen. Onder geometrische informatie verstaat men zaken als de diepte van de rivier, de hoogte van de dijken, het 'volume' van de uiterwaarden, de ligging van kribben, enz.

In het kader van de LWI Projectgroep B 'Rivieren' is een onderzoek uitgevoerd met de titel: 'integraal monitoringsysteem voor 3D geometrische informatie van de rivier met behulp van sonar en remote sensing'. Dit project staat ook bekend onder de naam POP1 (Produkt OntwikkelingsProject 1).

In het verleden werden de meetgegevens vaak verzameld langs lijnen, de zogenaamde 'raaien'. Tegenwoordige wenst men veelal een volledige bedekking: vandaar de term 3D informatie. De term 3D heeft betrekking op de drie spatiële richtingen x, y en z.

In het eerste deel van dit onderzoek (1996) is een haalbaarheidsstudie uitgevoerd.

Tevens is er toen een uitgebreide inventarisatie gemaakt van de beschikbare meetmethodes. Op basis van de aanbevelingen is een vervolgproject gestart waarvan de resultaten in dit rapport zijn beschreven. Dit tweede deel van het project heeft tot doel het analyseren van de *kwaliteit* van de meetgegevens. De aandacht is vooral gericht op:

- kalibratie(procedures) van bestaande meetsystemen (multibeam echosounding, laser altimetrie),
- de verwerking van de meetgegevens en in het bijzonder het kwantificeren van de precisie van het eindresultaat: een DTM (digitaal terrein model),
- mogelijke nieuwe meetsystemen (voor een betere efficiency, of hogere nauwkeurigheid).

Het onderzoek is uitgevoerd door TNO-TPD en Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst. De projectleider was Dr.ir. G. Blacquièrre van TNO-TPD met als mede-uitvoerders Ing. M.J. Ringelberg, Dr.ir. E.J. de Min, Dr.ir. N.A. Kinneging en mevr. Ir. Y. Platschorre, allen van Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst.

Adviezen en informatie werden gegeven en verzameld door Ing. J.H.L. Tacke van Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland en Ir. H.J.M. Bijnsdorp van de VBKO.

Het onderzoek werd mogelijk gemaakt door financiële bijdragen van de stichting LWI, de VBKO, Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland, Rijkswaterstaat Directie Limburg, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst en TNO-TPD.

februari 1999



# INHOUDSOPGAVE

	Blz.
<b>VOORWOORD</b>	7
<b>1 INLEIDING</b>	15
1.1 Doelstelling	17
1.2 Indeling	18
<b>2 KWALITEIT VAN DIGITALE TERREIN MODELLEN (DTM'S)</b>	19
2.1 Van meetprecisie naar DTM-precisie	24
2.2 Blunderdetectie	35
2.3 Validatie van een DTM	36
2.4 Data-integratie	40
<b>3 PROCEDURES EN PRECISIE VAN MULTIBEAM GEGEVENS</b>	43
3.1 Introductie multibeam	43
3.2 Fouten multibeam, overzicht	44
3.3 Fouten multibeam, beschrijving	45
3.4 Procedures multibeam	50
3.5 Precisie van Multibeam	59
<b>4 PROCEDURES EN PRECISIE VAN LASERALTOMETRIE GEGEVENS</b>	65
4.1 Principe Laseraltimetriemetingen	65
4.2 Procedures bij laseraltimetrie	67
4.3 Kwaliteitsbeschrijving van laserdata	72
4.4 Laserdataset	76
<b>5 DIGITALE TERREINMODELLEN MET KWALITEITSMATEN OPSLAAN IN EEN GIS</b>	85
5.1 Dataopslag in het GIS	85
5.2 Visualisatie van foutencovariantiefunctie	88
5.3 Modellerings covariantiefuncties	90
5.4 Implementatieaspecten in ArcView	97
<b>6 LASER SCANNING VANAF EEN SCHIP, VOORONDERZOEK</b>	99
6.1 Introductie	99
6.2 Onder water	100
6.3 Boven water	105
<b>7 LAND / WATER OVERGANG</b>	109
7.1 Introductie	109
7.2 Mogelijke oplossingen	110
7.3 Conclusies land-water overgang	114
<b>8 AANBEVELINGEN</b>	115
<b>9 REFERENTIES</b>	117

## SAMENVATTING

De interesse voor het inwinnen van geometrische informatie van rivier-systemen is sterk toegenomen sinds de extreme waterstanden midden jaren 90. Ook de grote projecten rond bijvoorbeeld de Maas, de Schelde en het Ketelmeer hebben hiertoe bijgedragen. Een zeer belangrijk aspect is de kwaliteit van de informatie: hoe betrouwbaar zijn de gegevens, wat is de precisie, kan de informatie dienen als basis voor financiële verrekeringen, kunnen goede voorspellingen gemaakt worden op basis van de meetgegevens?

De volgende onderwerpen spelen hierbij een grote rol:

- de verwerking van de meetgegevens (dataprocessing) en de integratie van de gegevens afkomstig van diverse meetsystemen,
- de kalibratie van de gebruikte meetsystemen.

Daarnaast kan men zich afvragen of de bestaande meetsystemen nog voldoen en of er mogelijk nieuwere, betere, meer efficiënte alternatieven bestaan.

Deze onderwerpen komen uitgebreid aan bod in het rapport. Een kort overzicht ervan volgt nu.

Alle meetgegevens bevatten fouten. Deze worden meestal verdeeld in twee categorieën: toevallige fouten en systematische fouten. Een dergelijke tweedeling is echter in het algemeen een onvolledige beschrijving van de realiteit bij geometrische metingen. De twee genoemde typen fouten zijn feitelijk uitersten op een glijdende schaal. Het verwaarlozen daarvan kan leiden tot grote afwijkingen bij het bepalen van de precisie van DTM's. De gevolgen daarvan komen vooral tot uiting wanneer op basis van de DTM's volumeberekeningen worden gemaakt. Praktijkvoorbeelden illustreren dit.

Het integreren van de gegevens van diverse meetsystemen leidt niet tot bijzondere problemen: hiervoor is wiskunde beschikbaar. Een goede beschrijving van de gegevens en vooral van hun precisie is hierbij echter een voorwaarde.

Binnen het project is prototype software ontwikkeld die aansluit op het GIS systeem ArcView (een geregistreerd handelsmerk van Environmental Systems Research Institute, Inc.) om de bovengenoemde kwaliteitskenmerken van de meetgegevens ook daadwerkelijk te kunnen opslaan. Het verdient aanbeveling om deze software in een vervolg verder te ontwikkelen zodat de theoretische foutenanalyse zoals hier ontwikkeld beschikbaar komt voor de praktijk.

Het op een juiste manier omgaan met de fouten is een goede zaak, maar vanzelfsprekend verdient het de voorkeur om te voorkomen dat er fouten gemaakt worden. Daartoe dient men zorgvuldige kalibratie-procedures te volgen. De volgorde waarin de verschillende onderdelen van dergelijke procedures worden uitgevoerd blijkt van belang te zijn. Het is zeer inzichtelijk om met simulaties de effecten van de verschillende kalibratiestappen zichtbaar te maken. Binnen het project is dan ook software ontwikkeld speciaal voor dit doel.

Nieuwe meetsystemen voor toepassing *onder water* gebaseerd op laserlicht vormen (nog?) geen goed alternatief voor de gevestigde meetsystemen gebaseerd op ultrageluid. Dit geldt zowel voor de systemen die vanuit een vliegtuig worden toegepast als voor de systemen aan boord van een schip.



## SUMMARY

### **Title: 'Integral monitoring system for obtaining 3D geometrical information of a river system with sonar and remote sensing, part 2**

Due to the high water levels in many Dutch rivers in the mid-nineties and some major projects around the rivers Maas and Schelde, the importance of having geometrical information about river systems has grown considerably.

A major aspect is the quality of this type of information: what is the reliability, what is the accuracy, can it serve as basis for financial transactions, how good are predictions based on the information, etc.

In this respect the following items are considered:

- data processing and the integration of data from different measurement systems,
- kalibration of the measuring systems.

Furthermore, one should always look around for new, better systems to replace the existing ones.

These subjects are discussed extensively in this report. A brief overview can be found next in this summary.

All data from measuring devices contain errors. It is common practice that the errors are classified in two categories: random errors and systematic errors. However, such a simple classification is generally not a sufficient description of reality. As a matter of fact, the two categories should be considered as the two extremes of a continuous scale. To neglect this may result in large deviations in one's estimates of the accuracy of DTM's, in particular when volume-computations are involved. This is illustrated with several examples.

To integrate the data from various measuring systems is not a particular problem: a good mathematical description exists for this purpose. However, a good characterization of the data and, even more important, the precision of the data, should be available.

Prototype software has been developed for storing the above mentioned data quality parameters in a GIS environment (ArcView, registered trademark of Environmental Systems Research Institute, Inc.). However, further effort is required to commercialise the package.

Obviously, to deal with the errors in a correct way is a good thing; however, errors should preferably not be allowed to be generated in the first place. One should therefore follow kalibration procedures. The order in which the several stages of such procedures are carried out turns out to be quite important. It is very helpful to visualise the effects of the various kalibration steps. Special software was developed for this purpose.

New measurement systems based on a laser equipment for *underwater* applications can not (yet?) replace the more traditional systems based on ultrasound. This is true for airborne systems as well as for underwater systems operated from ships.



# 1 INLEIDING

Bij het ontwerp, de uitvoering en het beheer van werken in het rivierengebied is er behoefte aan actuele, betrouwbare informatie over de bodemligging van waterlopen, de ligging en toestand van dijken, oevers, kribben, enzovoorts.

Behalve deze gegevens zijn ook de hoogtecijfers in de uiterwaardengebieden van groot belang als invoer voor de computermodellen die de waterstand voorspellen. Sinds de extreem hoge waterstanden van de afgelopen jaren is het belang van dergelijke modellen sterk toegenomen.

De term 'monitoring' in de projectnaam is gekozen boven 'meten' om aan te geven dat voor veel toepassingen eenmalig meten niet voldoet, maar dat er een zekere regelmaat nodig is.

In de huidige praktijk worden de benodigde gegevens met diverse meetsystemen bepaald, elk met eigen karakteristieken en beperkingen. Gebruikelijke technieken zijn onder meer:

- single- en multibeam echoloodsystemen;
- sonar;
- terrestrische landmeetkundige metingen:
  - laseraltimetrie;
  - fotogrammetrie;
  - thermografie (ter inspectie van de toestand van dijken);
  - en visuele inspectie (onder watercamera).

In veel gevallen levert meten met een enkelvoudige techniek voldoende betrouwbare resultaten op.

Echter, bij het meten en inspecteren van de rivierbodem, het meten van de land-waterovergang en het meten van de oevers/uiterwaarden levert een enkelvoudige techniek een onvolledig en onvoldoend nauwkeurig beeld op. De metingen zijn van verschillende kwaliteit en verwerking van de met diverse systemen opgenomen gegevens vergt extra conversieslagen. Integratie van de waarnemingen van verschillende meetsystemen kan in veel gevallen leiden tot een nauwkeuriger beeld van de bestaande situatie.

Integratie van waarnemingen in één systeem moet het mogelijk maken om op een efficiëntere wijze de relevante gegevens van het riviersysteem in te winnen, te verwerken en te presenteren. Dit kan enerzijds leiden tot kostenbesparing bij het vergaren van de gegevens, anderzijds tot de mogelijkheid om veranderingen in de loop der tijd nauwkeurig te volgen. Deze laatste mogelijkheid kan weer leiden tot besparingen bij het plagen van onderhoud, het op diepte houden van een vaarweg (alleen baggeren

wanneer en daar waar het nodig is), enzovoorts. Verder draagt 'monitoring' ook bij aan een verhoogde veiligheid: de waterhoogtes en afvoeren kunnen nauwkeuriger voorspeld worden, de diepte kan beter gegarandeerd worden, het meanderproces van een geul, dat een gevaar kan zijn voor een dijk, kan beter gevolgd worden zodat men op tijd kan ingrijpen, enzovoorts.

Als voorbeeld noemen we het inspecteren van een krib. Met behulp van een multibeam echo-sounder kan de ligging van het onder waterdeel bepaald worden. Deze techniek voldoet echter niet om het boven water deel te bepalen. Door twee of meer technieken te combineren en daarbij de metingen waar nodig gelijktijdig uit te voeren, ontstaat een volledig beeld van de situatie van de betreffende krib. Dit beeld wordt vervolgens gepresenteerd op een wijze die voor de eindgebruiker begrijpelijk is. Door vergelijking met een ideaal beeld of een vorige situatie kan worden vastgesteld of reparatie nodig is en zo ja, in welke mate.

Het beschikbaar komen van geavanceerde 'remote sensing' meetsystemen (o.a. multibeam echoloding en laser altimetrie) maakt het mogelijk om op een efficiënte wijze 3D informatie te vergaren. Met 3D wordt hier bedoeld: geometrische metingen (x, y, z) over een oppervlak (en niet langer langs een lijn, of 'raai', zoals dat het geval is met een singlebeam echo-sounder).

Naast geometrische informatie kan men ook thematische informatie inwinnen met remote sensing apparatuur. Hierbij kan men denken aan zaken als vegetatiesoort, bodemtype, enzovoorts.

Merk op dat de hier bedoelde meetmethoden in het algemeen niet of nauwelijks in de bodem penetreren en derhalve geen informatie verschaffen over structuren die zich *onder* de (water)bodem bevinden. Hiervoor wordt verwezen naar het overzicht van 'geofysische technieken voor grondonderzoek' dat te vinden is in het gelijknamige CUR rapport (1996).

Een uitgebreid overzicht van de meetmethoden is te vinden in het LWI-rapport 'LWI-Rivieren, Integraal monitoringsysteem voor 3D geometrische informatie van de rivier met behulp van sonar en remote sensing (juli 1996).

Van belang is dat van de meetgegevens bekend is wat de kwaliteit (= precisie en betrouwbaarheid) is. Vandaar dat naast de actuele meetgegevens ook informatie over de meetmethode en/of de karakteristiek van het meetinstrument moet worden opgeslagen. Verder moet deze informatie gebruikt worden in de dataverwerking en als *kwaliteitsparameter* tot uiting komen in de datapresentatie. Pas dan is duidelijk of de meetresultaten daadwerkelijk voldoen aan de eisen die voor de desbetreffende toepassing gelden.



## 1.1 Doelstelling

Doelstelling is het ontwikkelen van een systeem om 3D geometrische informatie van de rivierbodem, dijken, uiterwaarden en oeverbescherming (zowel onder als boven water) efficiënt in te winnen, te verwerken, te presenteren en te valideren.

Thematische informatie wordt hierbij meegenomen voor zover zij tegelijkertijd ingewonnen kan worden met dezelfde apparatuur.

Het inwinnen van de gegevens zal zoveel mogelijk geschieden met bestaande apparatuur.

Essentieel in het systeem is de *integratie* van gegevens afkomstig van de diverse bronnen (positiegegevens, sonargegevens, laser-altimetrie gegevens, enz.). Door integratie ontstaan een hogere precisie en een hogere betrouwbaarheid dan met een enkelvoudig systeem mogelijk is.

Verder is ook het aantal meetpunten per oppervlakte-eenheid een belangrijke factor. Sommige meetsystemen leveren meer meetpunten per oppervlakte-eenheid op dan nodig is. In dat geval kan in de dataverwerking de *hoeveelheid* meetpunten worden uitgewisseld tegen een *verhoogde precisie*. Dit betekent ook dat meetmethoden met een te lage precisie per meetpunt eventueel toch kunnen worden ingezet, namelijk door het aantal meetpunten per oppervlakte-eenheid te verhogen totdat de gewenste precisie bereikt is.

Als voorbeeld noemen we het opmeten van dijken: hierbij wordt centimeter precisie gevraagd, terwijl bijvoorbeeld slechts één profiel per honderd meter nodig is. In dat geval zou misschien laser-altimetrie toegepast kunnen worden, hoewel deze methode per meetpunt decimeter precisie oplevert.

Het zal duidelijk zijn dat dergelijke overwegingen kunnen leiden tot kostenbesparing.

In dit rapport wordt deel 2 van dit project beschreven. Deze fase betreft een onderzoek naar diverse aspecten rond de verwerking van de gegevens:

- de precisie van de meetgegevens en de doorwerking daarvan in het eindresultaat,
- het implementeren van software om de precisie van de meetgegevens ook daadwerkelijk te kunnen opslaan en gebruiken in een GIS systeem,
- het integreren van de meetgegevens afkomstig van diverse bronnen.

Daarnaast zijn de kalibratieprocedures van de twee voornaamste inwintechnieken onder de loep genomen:

- multibeam echosounding,
- laseraltimetrie.

Een onderzoek naar nieuwe inwinmethodes gebaseerd op lasertechnieken heeft niet geleid tot nieuwe inzichten. Dergelijke methodes staan nog teveel in de kinderschoenen.

## 1.2 Indeling

De indeling van het rapport is als volgt.

In Hoofdstuk 2 wordt de kwaliteit van Digitale Terrein Modellen besproken. In het bijzonder wordt de mathematische achtergrond voor een grondige foutenanalyse gepresenteerd. Hierin ligt ook de data-integratie besloten.

Hoofdstuk 3 heeft de multibeam echosounder tot onderwerp. Hier kan men een beschrijving vinden van de mogelijke fouten en de manier waarop deze middels een goede kalibratie kunnen worden geminimaliseerd.

Hoofdstuk 4 is een soortgelijk hoofdstuk met dien verstande dat hier de laser-altimetrie in het middelpunt staat.

In Hoofdstuk 5 wordt beschreven hoe de resultaten van de foutenanalyse van Hoofdstuk 2 zijn omgezet in een software-tool die vervolgens is geïntegreerd in een bestaande GIS-omgeving. Hiermee is het mogelijk geworden om kwaliteitsparameters te koppelen aan meetgegevens in een GIS, zodat deze later meegenomen kunnen worden in de gegevensverwerking.

In Hoofdstuk 6 worden de resultaten van een onderzoek naar nieuwere meetmethodes gepresenteerd. Het betreft hier apparatuur gebaseerd op de laser.

In Hoofdstuk 7 wordt kort ingegaan op een specifiek probleem rond het meten in riviergebieden: de zogenaamde land-waterovergang. Dit is het gedeelte van de rivier dat te ondiep is voor een regulier meetvaartuig.

In Hoofdstuk 8 worden tenslotte een aantal aanbevelingen geformuleerd.



## 2 KWALITEIT VAN DIGITALE TERREIN MODELLEN (DTM'S)

In dit hoofdstuk wordt gekeken naar hoe de precisie van een DTM kan worden beschreven. Hierbij spelen een aantal lastige zaken een rol, die voor veel lezers vermoedelijk nieuw zijn. Daarom is besloten om de nodige intermezzo's en voorbeelden toe te voegen, zodat ook de lezer die (nog) niet bekend is met deze materie, de gehele boodschap kan oppikken. We moeten daarbij door een hoop taaie materie, maar de kennis en begrip die dit oplevert zal ruimschoots de moeite waard blijken. Om de gevorderde lezer niet te veel te storen met bekende informatie, zijn deze intermezzo's en voorbeelden in aparte, grijze vakken geplaatst, zodat ze eenvoudig herkend en eventueel overgeslagen kunnen worden.

In de praktijk van Rijkswaterstaat (RWS) wordt veel gebruik gemaakt van Digitale Terrein Modellen (DTM's) en Digitale Hoogte Modellen (DHM). Het verschil tussen beide is dat een DTM informatie bevat in de vorm van punten, lijnen en vlakken (met soms ook nog kernmerken daaraan gekoppeld), terwijl een DHM bestaat uit louter puntcoördinaten (X, Y en H). De resultaten van dit project zijn zowel van toepassing voor DTM's als DHM's. Voor de eenvoud zullen we in dit rapport verder alleen nog maar spreken over DTM's. Zo'n DTM bestaat vaak uit een regelmatig grid in RD X-Y, waarvoor NAP-hoogten H zijn gegeven. Belangrijke toepassingen ervan zijn het berekenen van volumes, als basis voor (digitale) dieptekaarten en hoogtekarten, etc.

Naast de hoogtewaarden in een DTM is ook de kwaliteit van de DTM's voor de gebruikers van belang. Je moet weten wat een product waard is. Onder kwaliteit verstaan we in dit rapport met name de geometrische kwaliteit, en dan ook nog met name de kwaliteit van de hoogtewaarden.

In het algemeen kunnen 5 belangrijke stappen worden onderscheiden om te komen tot een zo goed mogelijk DTM en bijbehorende kwaliteitsbeschrijving. Dit zijn:

- Kalibratie van de meetsystemen.
- Beschrijving van de meetfouten van een gemeten dataset. Dit zal over het algemeen niet alleen een puntruïst zijn, maar er zullen ook systematische effecten voorkomen, dus fouten die voor een aantal meetpunten gecorreleerd zijn. Theoretisch het meest correct is het om de fouten van punten en hun correlaties te beschrijven met de fouten-covariantiematrix. Ter vereenvoudiging beschrijven we hier in het algemeen de meetfouten door de foutencovariantiefunctie  $D(s)$ , de fout wordt dus (alleen) afhankelijk gedacht van de afstand tussen punten. Alle punten krijgen dezelfde standaardafwijking ( $\sigma=D(0)^{1/2}$ ).
- Blunderdetectie binnen het metingenbestand.
- Berekenen van de precisie van DTM-punten of DTM-vlakken. In de wiskundige formule hiervoor zien we terugkomen het effect van de gebruikte interpolatiemethode, de puntdichtheid van de metingen, de terreinvarianties en de meetruïst  $D(s)$ .
- Kwaliteitscontrole (=validatie) van het DTM met onafhankelijke, externe hoogtegegevens.

De opzet van dit hoofdstuk is volgens deze indeling, maar wel in een andere volgorde. In paragraaf 1 wordt ingegaan op het 4<sup>e</sup> punt, de beschrijving van de DTM-precisie. De blunderdetectie (punt 3) wordt in dit rapport kort behandeld in paragraaf 2. Dit betreft methoden die vrij algemeen bekend zijn en worden toegepast. In paragraaf 3 wordt beschreven hoe het DTM kan worden gevalideerd.

Na de validatie van het DTM wordt voor twee meettechnieken, namelijk vliegtuig-laseraltimetrie en multibeam echosounding, beschreven welke kalibraties moeten worden uitgevoerd alvorens aan de metingen kan/mag worden begonnen. Van beide meettechnieken wordt vervolgens beschreven hoe de meetprecisie van de metingen eruit ziet in de vorm van een foutencovariantiefunctie  $D(s)$ . Dit gebeurt voor multibeam echosounding in hoofdstuk 2 en voor laser altimetrie in hoofdstuk 3.

Alvorens de kern van het betoog kan beginnen worden eerst de definities van enkele kwaliteitsbegrippen gegeven, en wordt een verdere toelichting op het belangrijke begrip "precisie" gegeven.

<i>Intermezzo:</i>	<b>Definities van kwaliteitsbegrippen</b>
<i>Precisie</i>	<i>Spreiding ten opzichte van de werkelijke waarde als gevolg van toevallige fouten. Een maat voor de precisie van een enkele grootheid is de standaardafwijking <math>\sigma</math>. De precisie van een puntenset wordt beschreven door de foutencovariantiematrix of foutenfunctie.</i>
<i>Puntruï</i>	<i>Dat deel van de standaardafwijking dat per punt onafhankelijk is.</i>
<i>Systematische fout</i>	<i>Dat deel van de standaardafwijking (fout) dat gecorreleerd is met fouten in andere punten (bijvoorbeeld een constante afwijking voor alle punten door een meetfout in de afstand tussen GPS-antenne en multibeam-sensor).</i>
<i>Meetruï</i>	<i>Fouten in meetwaarden (zowel puntruï als systematiek)</i>
<i>Puntdichtheid</i>	<i>Aantal punten per eenheid (hier meestal in <math>m^2</math>)</i>
<i>Interpoleren</i>	<i>Berekenen van waarden tussen gegeven punten of meetpunten in.</i>



**Intermezzo: Hoe beschrijven we de (meet)precisie?**

De precisie geeft aan (zie de definitie) wat voor spreiding ten opzichte van de werkelijke waarde kan voorkomen. De precisie van een aantal punten wordt beschreven met een foutencovariantiematrix. Bij geodetische puntsbepaling komt deze matrix automatisch uit de berekeningen. De mogelijke afwijking van de uit de metingen berekende waarde heeft meestal een normale verdeling. De grootste kans is dat de berekende waarde gelijk is aan de echte waarde, maar er is 33% kans dat de berekende waarde meer dan  $1\sigma$  van de echte waarde afwijkt, en 5% kans dat die meer dan  $2\sigma$  van de echte waarde afwijkt, en 0,3% kans dat die zelfs meer dan  $3\sigma$  van de echte waarde afwijkt. Op de diagonaal van de foutencovariantiematrix staat per punt de standaardafwijking in het kwadraat ( $\sigma^2$ ) die we variantie noemen.

Buiten de diagonaal staan de covariantiewaarden, die de correlatie tussen fouten in 2 verschillende punten beschrijven. Als de fouten tussen verschillende punten helemaal niet gecorreleerd zijn, dan zijn alle niet-diagonaal elementen van de foutencovariantiematrix nul.

Als we uit 2 punten het verschil willen berekenen doen we dat via  $\Delta H = H_2 - H_1$ . Als de foutencovariantiematrix van de 2 punten  $Q_{HH}$  is kan die

er bijvoorbeeld als volgt uitzien:  $Q_{HH} = \begin{pmatrix} 2^2 & 3 \\ 3 & 3^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 & 3 \\ 3 & 9 \end{pmatrix}$ .

Dus de standaardafwijking van  $H_1$  is 2 cm, de standaardafwijking van  $H_2$  is 3 cm, en de covariantie is  $3 \text{ cm}^2$ . De standaardafwijking van het verschil  $\Delta H$  is  $\sigma_{\Delta H}^2 = \sigma_{H_1}^2 + \sigma_{H_2}^2 - 2\sigma_{H_1 H_2}$ . Dit is de voortplantingswet van varianties.

Als we dat invullen vinden we dat de standaardafwijking van het verschil  $(4+9-2*3)^{1/2}=2,64 \text{ cm}$  is. Als er nu geen correlaties waren, en de niet-diagonaalelementen nul waren, dan was de standaardafwijking van het verschil  $(4+9-2*0)^{1/2}=3,6 \text{ cm}$  geweest. De correlatie tussen de fouten in  $H_1$  en  $H_2$  heeft een gunstige uitwerking op het verschil. Dat is ook logisch, want een positieve correlatie betekent dat een deel van de fout in  $H_1$  ook in  $H_2$  voorkomt. En in het verschil van die twee heeft de overeenkomstige fout geen invloed meer!

De absolute hoogten van de punten 1 en 2 (ten opzichte van NAP bijvoorbeeld) hebben een standaardafwijking van respectievelijk 2 en 3 cm. De relatieve hoogte (dat is het onderlinge hoogteverschil heeft een



standaardafwijking van 2,6 cm, wat al minder is dan de absolute standaardafwijking van punt 2.

### **De praktijk**

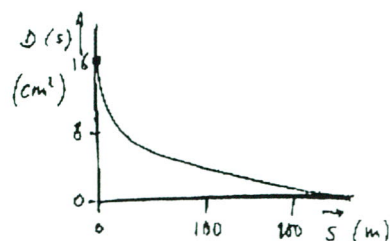
Als we hele grote puntensets hebben, met vele honderden of zelfs duizenden puntwaarden, dan is het praktisch gezien niet haalbaar om van al die punten de afzonderlijke standaardafwijkingen en al hun onderlinge correlaties op te slaan of daar mee te gaan rekenen. Let wel, voor  $n$  punten heb je  $n \cdot n / 2$  (co)variantiewaarden (gedeeld door 2 want de matrix is symmetrisch rond de diagonaal). Dus voor 1000 puntwaarden heeft de covariantiematrix 500000 elementen.

In de praktijk wordt daarom vaak alleen maar de standaardafwijking van elk punt bewaard. Alle correlatie-informatie wordt weggegooid. Vaak wordt zelfs niet per punt de standaardafwijking bewaard, maar wordt een gemiddelde waarde bepaald die wordt gebruikt voor de hele dataset. De precisiebeschrijving van een hele dataset wordt dan gedaan met één enkele  $\sigma$  waarde.

### **Iets nieuws**

Het zal duidelijk zijn dat de standaardafwijking van afgeleide grootheden, zoals verschillen of volumes, niet erg realistisch zal zijn als alle correlaties worden weggegooid. We willen daarom een andere manier introduceren, waarbij wel een gemiddelde precisie-beschrijving voor de hele dataset wordt gedaan (en dus niet per punt), maar waarbij wel de bestaande correlaties tussen punten uit de dataset wordt bewaard. We noemen deze vorm de foutencovariantiefunctie (of foutenfunctie) en geven hem aan met  $D(s)$ .

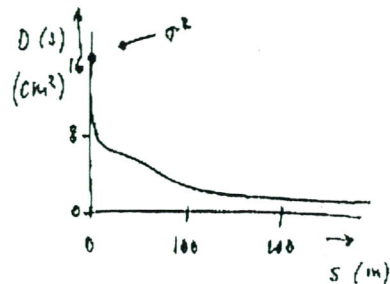
De foutencovariantiefunctie geeft de gemiddelde standaardafwijking van een puntenset en de gemiddelde covariantie (correlatie) tussen 2 punten aan, waarbij de covariantie alleen afhangt van de afstand  $s$  tussen de 2 punten. Een voorbeeld hiervan is:



De standaardafwijking van een los punt uit de dataset is  $\sigma = D(0)^{1/2}$ . In dit geval dus 4 cm. Punten die op 100 meter afstand van elkaar liggen zijn

nog zo'n 25% gecorreleerd, fouten in punten die meer dan 200 meter van elkaar liggen zijn niet meer gecorreleerd.

Een tweede voorbeeld bevat ook een fout die voor alle punten, ongeacht hun afstand, gelijk is.



We zien wederom dat de standaardafwijking van een losse of enkele puntwaarde 4 cm is. Voor langere afstanden blijft nu een foutencovariantie van zo'n  $4 \text{ cm}^2 (= (2 \text{ cm})^2)$  aanwezig. Dit betekent dus dat er een systematische, constante fout van 2 cm kan voorkomen in de hele dataset.

De puntruis in dit laatste voorbeeld is het deel van de fout in  $s = 0 \text{ m}$  dat geen correlaties heeft met andere punten. In dit voorbeeld is dat dus  $16 - 9 = 7 \text{ cm}^2 = (2,6 \text{ cm})^2$ , terwijl de (totale) standaardafwijking van een enkele puntwaarde 4 cm is.

Zoals al in de definities aangegeven, is "alles behalve de puntruis" systematische fouten. Dus niet alleen de constante fout van 2 cm, maar ook alle correlaties in fouten tot 100 meter afstand.

De foutenfunctie  $D(s)$  die is geïntroduceerd zal in eerste instantie worden bepaald voor een bepaalde meettechniek. Wanneer een meetapparaat (bijvoorbeeld een multibeam systeem) in een schip is geplaatst, goed is gekalibreerd en vervolgens wordt gebruikt onder toegelaten meetomstandigheden (bijv. voor wat betreft windsnelheid en golfhoogtes), dan heeft zo'n meetsysteem een bepaalde kwaliteit. Zolang er niets verandert aan de configuratie of het functioneren van sensoren is dit de kwaliteit die voor de metingen met dit meetsysteem geldt. Deze foutenfunctie is nodig om te kunnen uitrekenen hoe de meetfouten doorwerken in producten die we willen afleiden uit de metingen, zoals een complete topografiebeschrijving via een grid, of het berekenen van een volume onder het desbetreffende maaiveld.

Echter, zo'n foutenfunctie kan ook weer worden bepaald voor die afgeleide producten. Twee gridpunten die naast elkaar liggen, zullen vaak een sterk gecorreleerde fout hebben, omdat ze beide zijn berekend op basis van (grotendeels) dezelfde meetpunten. Dus ook voor de gridwaarden geldt dat niet alleen een standaardafwijking  $\sigma$  de precisie beschrijft, maar dat de correlaties ook moeten worden beschreven.

Een deel van de mogelijke fouten die tijdens het meten (de inwinning) kunnen optreden, kan worden bepaald en gecorrigeerd op basis van kalibraties. Met name instrumenteffecten die voor alle metingen eenzelfde fout geven zijn heel belangrijk om vóór het verrichten van de metingen te vinden en te corrigeren met kalibratieprocedures. Nu de precisiebeschrijving van metingen bekend is kan worden begonnen met de precisiebeschrijving van DTM's uit die gemeten punten.

## 2.1 Van meetprecisie naar DTM-precisie

Mensen die zich wel eens hebben bezig gehouden met de precisiebeschrijving van DTM's zullen weten dat deze afhangt dan van:

- de precisie van de meetpunten,
- de punt dichtheid (afstand tussen meetpunten) in relatie tot de terreinvariaties,
- de interpolatiemethode en het aantal steunpunten die worden gebruikt om DTM te bepalen.

Deze factoren tezamen bepalen de precisie van een willekeurig DTM-punt en daarmee van het totale DTM. Het is mogelijk om deze factoren in formulevorm te beschrijven, om zodoende daadwerkelijk te kunnen gaan rekenen met die formule. In deze paragraaf zal worden getoond hoe dit in zijn werk gaat, waarbij de nodige voorbeelden als hulp voor meer begrip zullen worden gegeven.

In het meest algemene geval kan een bepaalde waarde op een punt worden bepaald uit gemeten punten in de buurt volgens de formule:

$$(2.1) \quad h_p = \sum_{i=1}^n \alpha_i h_i .$$

Hierin is  $h_p$  de te berekenen hoogte in het punt  $p$ ,  $h_i$  zijn de bekende gemeten hoogtewaarden op de plaatsen  $i$  waarvan er  $n$  worden gebruikt. Tot slot zijn de gewichten die bij de interpolatie worden gebruikt beschreven als  $\alpha_i$ . De interpolatiemethode die wordt gebruikt is bepalend voor hoe de gewichten  $\alpha_i$  eruit zien. Men kan bijvoorbeeld gebruik maken van het gemiddelde van de 10 dichtstbij gelegen meetpunten, alle gewichten zijn dan gelijk aan  $1/10$ . Maar men kan ook inverse afstand gewichten nemen tot een bepaalde macht ( $1/d$ ), of bijvoorbeeld kriging of kleinste-kwadraten predictie die normaal gesproken beter interpoleren. Sommige interpolatiemethoden, zoals splines of Fourier technieken, kunnen niet of moeilijk in de vorm van (2.1) worden geschreven.



Als we een DTM willen berekenen met elke 5x5 m<sup>2</sup> een gridwaarde, kunnen we dus bijvoorbeeld voor elk punt van dat grid  $h_p$  het gemiddelde van de 10 dichtstbij gelegen punten nemen (elk met  $\alpha_i = 0.10$ ) of de waarde van het dichtstbij gelegen punt (dus met  $\alpha_i = 1.0$ ). Als we iets met inverse afstand doen krijgen meetpunten die dichterbij het te berekenen punt liggen meer gewicht dan meetpunten die verder weg liggen. Gebruiken we kriging of kleinste-kwadraten predictie, dan houden we ook nog rekening dat twee meetpunten die dicht bij elkaar liggen ongeveer evenveel gewicht krijgen als een meetpunt dat geïsoleerd ligt.

De precisie van het geïnterpoleerde punt, uitgedrukt in de standaardafwijking  $\sigma_{h_p}$ , wordt dan berekend via:

$$(2.2) \quad \sigma_{h_p}^2 = C(0) - 2 \sum_{i=1}^n \alpha_i C(s_{p_i}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j C(s_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j D(s_{ij}) .$$

We zien hierin ook de signaalcovariantiefunctie  $C(s)$  verschijnen. Deze functie geeft aan welke variaties in het signaal (in ons geval hier de hoogten) voorkomen. We komen er later nog op terug hoe je deze functie kunt berekenen. In formule (2.2) zien we alle elementen terugkomen die een rol spelen bij de kwaliteit van de interpolatie, en dus bij de precisie van willekeurige punten in een DTM. Dit zijn:

- de interpolatiemethode (via de gewichten  $\alpha_i$ );
- de precisie van de meetpunten (in  $D(s)$ );
- de puntdichtheid van de metingen (via de afstanden  $s_{p_i}$  tussen meetpunten en berekeningspunt en  $s_{ij}$  tussen de meetpunten zelf);
- de terreinvariaties die voorkomen (in de signaalcovariantiefunctie  $C(s)$ ).

We kunnen in (2.2) onderscheid maken naar meetruis-effecten (de laatste term aan de rechter kant) en interpolatie-fout (de overige termen samen).

**Intermezzo: Bepalen van de signaalcovariantiefunctie  $C(s)$ .**

*De covariantiefunctie kan worden bepaald uit gegeven hoogten in een gebied. Dit kan het gebied zelf zijn, of een representatief proefgebied. De gemiddelde waarde van het gebied wordt eerst verwijderd uit de gegevens. Als er een sterke trend in de gegevens voorkomt, is het het beste die ook eerst te verwijderen.*

*Vervolgens kan voor elke afstand  $s$  worden bepaald wat de gemiddelde correlatie of samenhang is. Dit kan op verschillende manieren gebeuren. We zullen hier de manier volgens het variogram beschrijven.*

*Voor afstand  $s=0$  geldt:  $C(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i^2$ . Dit is dus gelijk aan de  $RMS^2$ .*

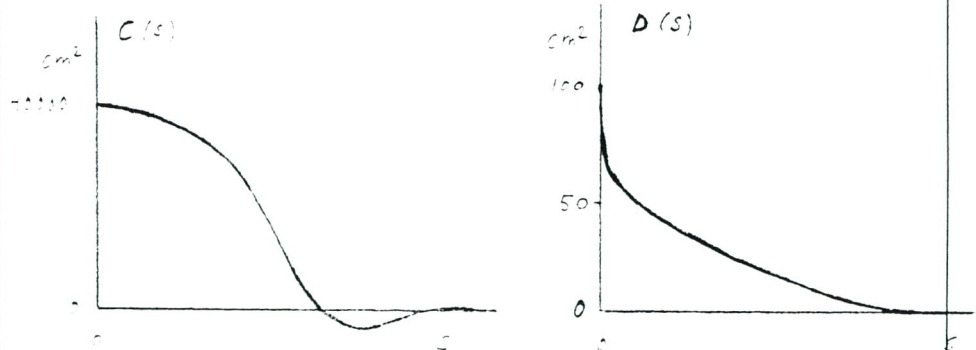
Voor elke andere willekeurige afstand  $s$  geldt:

$$C(s) = C(0) - \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_{i1} - h_{i2})^2$$
, waarbij er in het berekeningsgebied dus  $m$  paren zijn van 2 hoogtepunten ( $h_{i1}$  en  $h_{i2}$ ) die op een afstand  $s$  van elkaar liggen.

Er zijn nog iets afwijkende methoden mogelijk om de covariantiefunctie te berekenen. De genoemde is het meest geschikt voor lokale interpolatiedoeleinden, wat bij DTM's gebeurt.

### De foutencovariantiefunctie

De fouten-covariantiefunctie  $D(s)$  kan met dezelfde formules als  $C(s)$  worden bepaald. In plaats van de hoogtewaarden zelf gebruiken we dan verschillen tussen bijvoorbeeld hoogten die zijn gemeten met laseraltimetrie en bekende hoogten op dezelfde punten. De verschillen zullen meestal een veel kleinere amplitude hebben (bijvoorbeeld cm's) dan de hoogten zelf (meters). Ook de vorm van de signaalcovariantiefunctie  $C(s)$  en die van de foutencovariantiefunctie  $D(s)$  verschillen meestal. De hoogten zelf veranderen meestal niet veel over korte afstanden, terwijl bij de fouten vaak een groot deel van de fout uit puntruis bestaat en de foutencovariantiefunctie dan vaak een piek voor afstand nul heeft. Twee voorbeelden staan hieronder gegeven.



De hoogten zelf hebben hier dus een standaardafwijking van  $200 \text{ cm} = 2 \text{ meter}$  ( $=40000^{1/2} \text{ cm}$ ) en punten die dicht bij elkaar liggen verschillen gemiddeld weinig van elkaar. De fout van de hoogtemetingen (rechterfiguur) heeft een totale amplitude van  $10 \text{ cm}$  ( $=100^{1/2} \text{ cm}$ ). Daarvan is zo'n  $6 \text{ cm}$  ( $=36^{1/2}$ ) puntruis en zo'n  $8 \text{ cm}$  ( $=64^{1/2}$ ) heeft een systemisch karakter. Dit voorbeeld is puur fictief. In de volgende hoofdstukken komen we terug op het bepalen van realistische foutenfuncties  $D(s)$  voor laseraltimetrie en voor multibeam.



De covarianties (correlaties) tussen de fouten in individuele DTM-punten spelen vaak een rol, bijvoorbeeld bij het berekenen van de precisie van een volume onder een DTM. Als we weten dat bepaalde fouten systematisch zijn voor een aantal DTM-punten bij elkaar dan heeft dat een ander (groter) effect op de volume-precisie dan als die fouten volledig onafhankelijk zijn en dus een gunstige middeling kan plaats vinden. Systematische fouten middelen vaak niet weg!

**Intermezzo: Voorbeeld van de precisie van een DTM-punt ten gevolge van fouten in de meetwaarden en ten gevolge van interpolatiefouten**

**DTM-precisie: het gevolg van puntruis in de meetwaarden**

*Situatie 1. Stel dat we 4 meetpunten beschikbaar hebben rondom een nieuw te berekenen (interpoleren) DTM-punt. Alle 4 de punten liggen even ver weg. Elk van de 4 punten krijgt een gewicht  $\alpha_i=0.25$ . Alle 4 de meetpunten hebben een puntruis van 10 cm, er is geen systematische ruis en de hoogtes variëren niet, dus het oppervlak is horizontaal.*

*De berekening. We kunnen de standaardafwijking van het DTM-punt  $p$  als gevolg van de meetruis in de 4 meetpunten als volgt berekenen.*

*Uitgaande van formule (2.2) stellen we vast dat de termen waarin de signaalcovariantiefunctie  $C(s)$  voorkomt alle nul zijn: er wordt in de hoogtes geen variatie verondersteld. Slechts de laatste term blijft dus over. Verder is er geen systematische ruis in de meetpunten. Dit betekent dat alle termen  $D(s_{ij})$  met  $s_{ij} \neq 0$  gelijk aan 0 zijn en de termen  $D(s_{ii}) = D(0) = 100 (= 10^2)$ , immers, de puntruis is 10 cm. Dit reduceert formule (2.2) tot:*

$$\sigma_{h_p}^2 = \sum_{i=1}^n (\alpha_i)^2 D(s_{ii}) = \sum_{i=1}^4 (0,25)^2 100 = 25 \text{ ofwel } \sigma_{h_p} = 5 \text{ cm}$$

*Conclusie: de precisie van het geïnterpoleerde punt is een factor 2 beter dan de precisie van elk van de 4 meetpunten. Merk op dat dit voorbeeld dus een illustratie is van de zg. 'wortel N' wet, die zegt dat de puntruis van het gemiddelde van N meetwaarden een factor 'wortel N' kleiner is dan de puntruis van de individuele meetwaarden. In dit voorbeeld kwam het interpoleren neer op het berekenen van het gemiddelde! Deze 'wortel N' wet geldt alleen voor onafhankelijke ruis, zoals in dit voorbeeld de puntruis.*



### **DTM-precisie: het gevolg van een systematische fout in de meetwaarden**

*Situatie 2. De 4 meetpunten hebben nu geen puntruis van 10 cm, maar alleen een systematische fout met een standaardafwijking van 7 cm. Verder is deze situatie gelijk aan de vorige.*

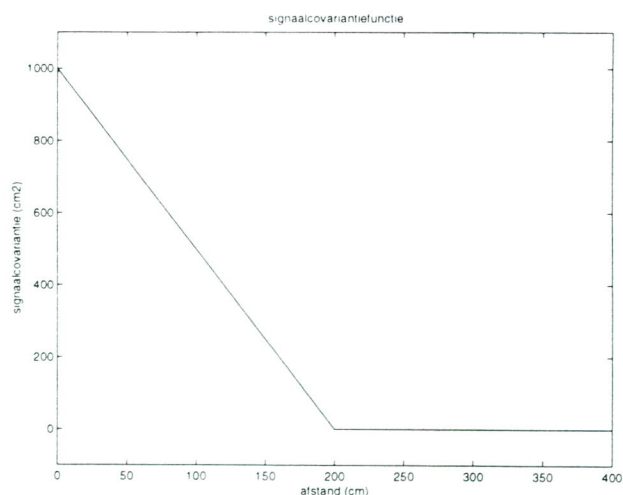
*De berekening. Ook in dit geval is de signaalcovariantiefunctie  $C(s)$  gelijk aan 0 en vervallen alle termen in formule (2.2) waarin deze voorkomt. Omdat de meetpunten nu alleen een systematische fout met een standaardafwijking van 7 cm hebben, zijn alle termen  $D(s_{ij})$  gelijk aan 49 ( $= 7^2$ ), overeenkomend met een systematische fout van 7 cm. Met deze gegevens reduceert formule (2.2) tot:*

$$\sigma_{h_p}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \alpha_i \alpha_j D(s_{ij}) = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^4 (0,25)(0,25)49 = 49 \text{ ofwel } \sigma_{h_p} = 7 \text{ cm}$$

*Conclusie: dit voorbeeld illustreert dat een systematische fout die voor alle meetpunten geldt onveranderd in het interpolatie-resultaat doorwerkt.*

### **DTM-precisie: het gevolg van interpolatie**

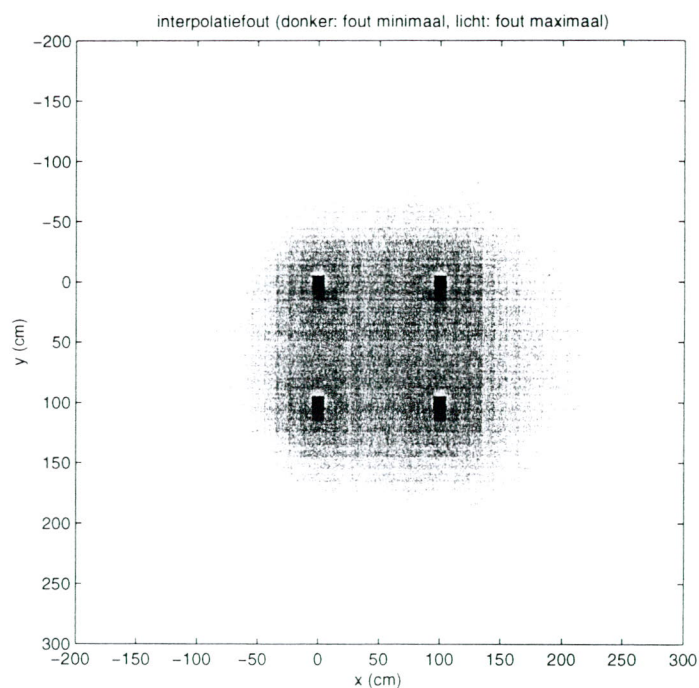
*Situatie 3. We nemen nu een voorbeeld waarbij de metingen foutloos zijn verondersteld. Er is dus geen meetruis. Er zijn weer 4 meetpunten. Deze bevinden zich op de hoeken van een vierkant met ribben van 100 cm. De signaalcovariantiefunctie (dus van de bodem) wordt gegeven door  $C(s) = 1000 - 5s$  voor  $0 \leq s \leq 200$  en  $C(s) = 0$  voor  $s > 200$ , waarbij  $s$  de afstand (cm) tussen twee bodemlocaties is. Deze functie, die overigens willekeurig gekozen is, is weergegeven in de figuur. De bodem heeft dus een zodanige vorm dat er sprake is van correlaties tot afstanden van 2 m.*



De interpolatiemethode is gebaseerd op gebruik maken van alle 4 de meetpunten waarbij de weegfactoren evenredig zijn met de inverse afstand tot het te interpoleren punt. De som van de weegfactoren is 1.

De berekening. In dit voorbeeld zijn de meetwaarden foutloos, dus de laatste term van formule (2.2) vervalt. De overige 3 termen dienen in de berekening te worden meegenomen. De standaardafwijking van het interpolatieresultaat hangt af van de locatie van het te interpoleren punt. Vanzelfsprekend zal deze het kleinst zijn voor de locaties dicht bij de meetpunten en het grootst voor de locaties die daar ver van zijn verwijderd. Voor afstanden groter dan de maximale correlatieafstand van 2 m geldt dat de covariantiefunctie in dit voorbeeld gelijk is aan  $C(0)$ , de enige term in formule (2.2) die dan nog een waarde ongelijk aan nul heeft. De 4 beschikbare meetpunten bevatten immers geen enkele informatie meer over DTM-locaties die verder weg liggen dan de correlatieafstand.

De standaardafwijking van het interpolatieresultaat voor een heel oppervlak rondom de meetwaarden is in de computer berekend met formule (2.2) en het resultaat is weergegeven in de onderstaande figuur. Hierin zijn duidelijk de posities van de 4 meetpunten te herkennen: rond deze locaties is het interpolatieresultaat het best.



Tenslotte wordt opgemerkt dat in het echt een geïnterpoleerde waarde beide foutsoorten zal bevatten: voortgeplante meetruis en interpolatiefouten. Zie formule (2.2).

Als we voor een tweede DTM-punt Q de hoogtewaarde bepalen volgens

$$(2.3) \quad h_q = \sum_{j=1}^m \beta_j h_j,$$

dan wordt de foutencovariantie tussen de 2 berekende DTM-punten P en Q

$$(2.4) \quad \sigma_{h_p h_q} = C(s_{pq}) - \sum_{i=1}^n \alpha_i C(s_{qi}) - \sum_{j=1}^m \beta_j C(s_{pj}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i \beta_j C(s_{ij}) + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \alpha_i \beta_j D(s_{ij}).$$

Hiermee kan de precisie van en hoogteverschil in het DTM, of een volume onder een stuk DTM netjes worden berekend.

### Berekenen van een volume

Als in een gebied een regelmatig grid met hoogtepunten  $h_i$  is gegeven met puntafstand  $dx$  en daarmee bij elk punt een oppervlak  $\Delta$  hoort (gebiedje van  $\Delta = dx^2$ ), dan kan het volume worden uitgerekend met:

$$(2.5) \quad \text{volume} = \sum_{p=1}^n h_p \Delta = \Delta \sum_{p=1}^n h_p = (n\Delta) \left( \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n h_p \right) = \text{opp} \overline{h_p}$$

De laatste stap wordt vaak gebruikt in de praktijk. De gemiddelde hoogte van het gebied wordt bepaald, dit wordt met de totale oppervlakte vermenigvuldigd om het onderliggende volume te berekenen.

De precisie van het volume wordt bepaald via:

$$(2.6) \quad \sigma_{\text{volume}} = \left( \Delta^2 \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n \sigma_{h_p h_q} \right)^{1/2} = \Delta \left( \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n \sigma_{h_p h_q} \right)^{1/2}$$

Het is belangrijk op te merken dat alle correlaties tussen de ruis in alle punten  $p$  en  $q$  hierin worden meegenomen. Als ze zouden worden verwaarloosd en alleen de standaardafwijking per punt wordt gebruikt dan zou (2.6) veranderen in:

$$(2.7) \quad \sigma_{\text{volume}} = \Delta \left( \sum_{p=1}^n \sigma_{h_p}^2 \right)^{1/2}$$

Zou zelfs voor alle punten dezelfde standaardafwijking worden gebruikt dan krijgen we:

$$(2.8) \quad \sigma_{\text{volume}} = \Delta \sqrt{n} \sigma_{h_p}.$$

#### **Voorbeeld 1: Precisie van een DTM-volume als gevolg van interpolatiefouten:**

*Dit voorbeeld laat zien wat de gevolgen van interpoleren zijn voor de precisie van een DTM-volume. We veronderstellen hierbij dan ook dat de meetwaarden zelf geen fout bevatten. We gaan uit van dezelfde situatie als in het voorbeeld 'DTM-precisie: het gevolg van interpolatie' in het vorige Intermezzo. Er zijn 4 meetpunten. Deze bevinden zich op de hoeken van een vierkant met ribben van 100 cm. De signaalcovariantiefunctie (dus van de bodem) wordt gegeven door  $C(s) = 1000 - 5s$  voor  $0 \leq s \leq 200$  en  $C(s) = 0$  voor  $s > 200$ , waarbij  $s$  de afstand (cm) tussen twee bodemlocaties is, zie de figuur in het vorige intermezzo. De*



interpolatiemethode is weer gebaseerd op gebruik maken van alle 4 de meetpunten waarbij de weegfactoren evenredig zijn met de inverse afstand tot het te interpoleren punt. De som van de weegfactoren is 1.

De precisie van het geïnterpoleerde punt hangt af van z'n afstand tot de 4 meetpunten. Vandaar de we de precisie voor een gebiedje rondom de 4 meetpunten berekenen, namelijk voor 10 bij 10 DTM-locaties op een grid van 50 cm bij 50 cm. Op basis hiervan kan dan vervolgens de precisie van het volume van dit kleine DTM, dat dus afmetingen van 5 m bij 5 m heeft, berekend worden.

Samengevat: we berekenen dus de precisie van een klein DTM van 5 m bij 5 m dat bestaat uit 10 bij 10 gridpunten welke zijn verkregen uit interpolatie van 4 foutloze meetpunten gelegen op de hoeken van een vierkant van  $1 \text{ m}^2$  ongeveer in het midden van dit gebied.

De berekening. We passen formule (2.4) toe om de foutencovariantie tussen elke combinatie van 2 DTM-punten te bepalen. Omdat in dit voorbeeld de meetwaarden foutloos zijn geldt:  $D(s) = 0$ ; hiermee vervalt de laatste term van formule (2.4). De overige 4 termen worden in de berekening meegenomen. Omdat het totaal aantal DTM-locaties in dit voorbeeld 100 is, moeten er  $100^2$  combinaties van 2 punten berekend worden (eigenlijk slechts de helft hiervan aangezien de combinatie p-q dezelfde covariantie oplevert als de combinatie q-p). Wanneer de foutencovarianties  $s_{h_p h_q}$  bekend zijn voor alle mogelijke combinaties van twee DTM-punten kan het resultaat, de precisie van het volume, bepaald worden via somming volgens formule (2.6).

Het in de computer berekende resultaat voor dit voorbeeld is een precisie van  $4.08 \text{ m}^3$  (bij een oppervlakte van 5 m bij 5 m).

Als we alleen de standaardafwijking per DTM-punt hadden meegenomen in de berekening, en dus de correlatie tussen de verschillende DTM-punten hadden verwaarloosd, zou de precisie volgens formule (2.7) gelijk zijn aan  $0,85 \text{ m}^3$ .

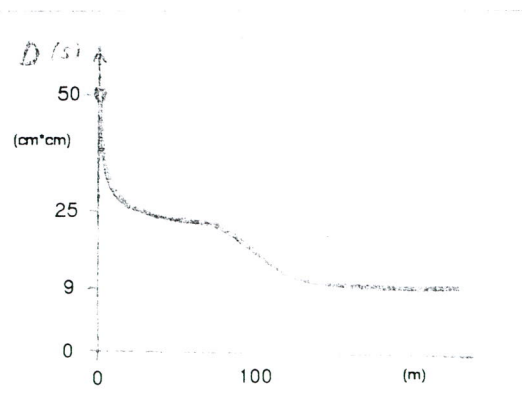
Het grote verschil tussen de beide methodes laat duidelijk zien hoe belangrijk het meenemen van de covarianties kan zijn. De systematische effecten (die beschreven worden via de covariantiefunctie) zullen namelijk niet 'uitmiddelen', waardoor hun invloed groot kan zijn.

In het algemeen zien we dus dat correlaties in fouten (dus dat een deel van de fouten systematisch van karakter is) een negatieve invloed heeft op de berekening van volumes (er vindt geen wegmiddeling plaats), terwijl het voor verschillen een gunstig effect heeft (een deel van de fout is voor beide punten gelijk, en heeft dus geen invloed op het verschil).

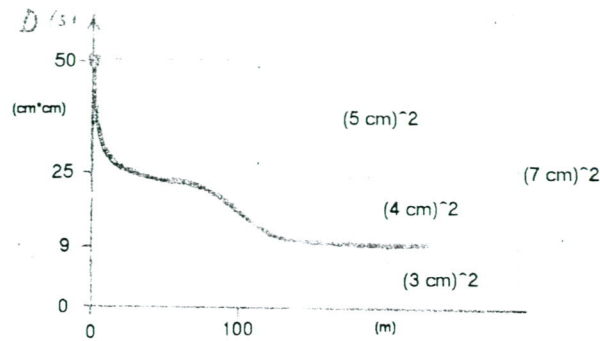
**Voorbeeld 2: Precisie van een DTM-volume als gevolg van meetfouten:**

Dit voorbeeld laat zien hoe belangrijk de rol van de  $D(s)$ -functie kan zijn bij het berekenen van de precisie van een volume als gevolg van de meetfouten in de gemeten punten die worden gebruikt om het volume te berekenen.

We maken gebruik van het fictieve voorbeeld in onderstaand plaatje.



We zien hier dat er een puntruis (onafhankelijk van andere punten) is van  $25 \text{ cm}^2$  (dus  $(5 \text{ cm})^2$ ). Er is een constante fout met een standaardafwijking van  $3 \text{ cm}$  ( $9 \text{ cm}^2$  is dus  $(3 \text{ cm})^2$ ), en tot slot nog een systematisch fout die tot ongeveer 100 meter afstand gecorreleerd is en die een standaardafwijking (amplitude) van  $4 \text{ cm}$  ( $16 \text{ cm}^2$ ) heeft. De precisie (totale standaardafwijking) van een enkele hoogtemeting is dan dus  $(25+16+9)^{1/2} \text{ cm} = 7 \text{ cm}$ . Het onderstaande plaatje laat de 3 delen nog eens duidelijk zien.



*Dit voorbeeld zou bij een laseraltimetrie dataset kunnen passen. De puntruis wordt veroorzaakt door de meting van het laserapparaat, de systematische fout per gebiedje van 100 meter kan door GPS worden veroorzaakt (want er is 1 GPS-meting per seconde, en in 1 seconde vliegt het vliegtuig ongeveer 100 meter), en de constante fout voor het hele gebied kan worden veroorzaakt door onzekerheid in de hoogte van het NAP-aansluitpunt. (In het echt gelden andere amplitudes, dit blijft een fictief voorbeeld!).*

*We nemen nu een gebied van  $500 \times 500 \text{ m}^2$ , met elke 10 meter een gemeten punt (dus  $50 \times 50 = 2500$  punten. Het volume kan worden uitgerekend volgens (2.6) waarin  $\Delta = 10^2$ . Als we niet gewoon de formule toepassen maar proberen te begrijpen hoe de precisie van het volume wordt bepaald zien we dat er 3 onderdelen zijn:*

- puntruis fout: de fout per los meetpunt heeft een standaardafwijking van 5 cm. We nemen het gemiddelde van 2500 onafhankelijke punten, dus (volgens de wet van voortplanting van varianties) delen we de amplitude door de wortel van het aantal punten (=50) zodat het effect op het uiteindelijke volume is:  $5 \text{ cm} / 50 = 0,1 \text{ cm}$*
- 100 m fout: deze fout die constant is per gebiedje van  $100 \times 100 \text{ m}^2$  heeft een amplitude van 4 cm. Het totale gebied omvat 25 van zulke  $100 \times 100 \text{ m}^2$  gebiedjes die elk een onafhankelijke fout hebben die binnen dat gebiedje min of meer constant is, zodat we de amplitude moeten delen door wortel 25. Het effect op de precisie van het volume van deze systematische meetfouten is dan:  $4 \text{ cm} / 5 = 0,8 \text{ cm}$*
- constante fout: de metingen in het gebied hebben allemaal dezelfde fout met een standaardafwijking van 3 cm. Deze fout middelt niet weg, zodat deze onzekerheid rechtstreeks doorwerkt in de precisie van het volume:  $3 \text{ cm} / 1 = 3 \text{ cm}$*



De totale precisie wordt nu bepaald via

$$\sigma_{\text{volume}} = (0,1^2 + 0,8^2 + 3^2)^{1/2} \times \text{oppervlak} = 3,1 \text{ cm} \times \text{oppervlak} = \\ = 100 \times 2500 \times 0,031 \text{ m}^3 = 7750 \text{ m}^3$$

**Tweede deel van het voorbeeld:**

We hebben nog steeds hetzelfde gebied met oppervlak =  $500 \times 500 \text{ m}^2$ , en elke 10 meter een punt. We hebben nu echter een betere kalibratie uitgevoerd, waardoor de systematische fout van 3 cm goed wordt bepaald, nu met een precisie van 0,3 cm.

Na deze kalibratie (dus met een kleinere onzekerheid van de constante fout) wordt de precisie van het volume :

- puntruis:  $5 \text{ cm} / 50 = 0,1 \text{ cm}$
- 100 m :  $4 \text{ cm} / 5 = 0,8 \text{ cm}$
- constante:  $0,3 \text{ cm} / 1 = 0,3 \text{ cm}$

De totale precisie wordt nu bepaald via

$$\sigma_{\text{volume}} = (0,1^2 + 0,8^2 + 0,3^2)^{1/2} \times \text{oppervlak} = 0,86 \text{ cm} \times \text{oppervlak} = \\ = 100 \times 2500 \times 0,0086 \text{ m}^3 = 2150 \text{ m}^3 .$$

De (systematische) constante fout met een standaardafwijking van 3 cm had de kleinste amplitude van de 3 foutensoorten (puntruis, 100 meter fout en constante fout). Maar door zijn karakter (constant voor het totale gebied) kan er geen wegmiddeling plaats vinden en heeft die fout een zeer grote doorwerking op de volumeprecisie.

**Derde deel van het voorbeeld:**

Als de D(s) functie niet wordt gebruikt, maar er wordt (impliciet) verondersteld dat de totale fout geheel bestaat uit puntruis (met amplitude  $(5^2 + 4^2)^{1/2} = 6,4 \text{ cm}$ ), dan wordt de precisie van het volume berekend als:

$$6,4 \text{ cm} / 50 = 0,13 \text{ cm} \times \text{oppervlak} = 325 \text{ m}^2 .$$

Een deel van de fout die systematisch is en dus niet zo heel veel wegmiddelt wordt niet correct in rekening genomen. De schatting van de precisie is dan veel te optimistisch. In dit voorbeeld met een factor 7.

Het is dus uitermate belangrijk om met een realistische D(s)-functie te rekenen om realistische resultaten te verkrijgen.

## Nog een stapje moeilijker

Tot nu toe is voor zowel de signaal-covariantie als de fouten-covariantie verondersteld dat die alleen afhangt van de afstand tussen twee punten. De beide functies worden daarom aangegeven door  $C(s)$  en  $D(s)$ . In de praktijk zal het betreffende signaal (hier dus met name hoogten van het maaiveld) verschillend gecorreleerd zijn in verschillende richtingen. Bijvoorbeeld in een gebied waar een dijk loopt, zal de correlatie in de richting van de dijk veel groter zijn dan in de richting dwars op de dijk. Daar zal over een korte afstand al weinig meer zijn te zeggen over de hoogte(verandering). Binnen de kriging-theorie is hiervoor een variant gemaakt, waarbij de signaal-covariantiefunctie niet afhangt van de onderlinge afstand tussen 2 punten, maar van het coördinaatverschil, dus we krijgen  $C(\Delta x, \Delta y)$ . De berekening van gewichten voor kriging-interpolatie wordt dan anders, maar ook met name de precisie-berekening volgens vergelijking (2.2) verandert. Deze uitbreiding moet ook toe te passen zijn op collocatie, alhoewel daarover in de literatuur niets bekend is.

Ook de foutenfunctie  $D(s)$  van allerlei soorten metingen is misschien richtingsafhankelijk. Zowel multibeam-metingen als laseraltimetrie-metingen worden in stroken ingewonnen, waardoor verschillende foutcorrelaties in langsrichting en dwarsrichting mogen worden verwacht. Voor beide soorten metingen zal dit later ook nog worden bestudeerd.

In deze eerste paragraaf hebben we uitgelegd hoe de precisie van DTM-punten in een regelmatig grid kan worden uitgerekend en er zijn voorbeelden gegeven hoe met deze kwaliteitsinformatie weer de precisie van afgeleide producten zoals volumes kan worden bepaald. De algemene kern van het verhaal is daarmee beschreven. We gaan nu verder met het beschrijven van de andere aspecten van kwaliteit van DTM's en het verder uitdiepen van deze materie voor multibeam-metingen en laseraltimetrie-metingen.

## 2.2 Blunderdetectie

Bij vrijwel elke meetmethode komen 'blunders' voor: meetresultaten die plotseling volledig afwijken van de voorgaande en erop volgende metingen. Er kunnen vele oorzaken voor zijn. Bij multibeam-metingen kan men denken aan een voorbijzwemmende vis, of aan meervoudige echo's, of aan een slechte signaal/ruis verhouding. Dergelijke blunders zouden het eindresultaat, het DTM, sterk kunnen beïnvloeden, juist vanwege hun grote afwijkingen. Om die reden moeten zij uit de data worden verwijderd alvorens men mag overgaan tot de reguliere dataverwerking. Voor het vinden van blunders in een metingenbestand kan gebruik worden gemaakt van de theorie uit de vorige paragraaf. De techniek die we willen toepassen heet Cross Validation (CV), hoewel cross-toetsing eigenlijk een betere naam is. Bij CV wordt gekeken of een bepaalde, individuele meetwaarde wel past bij de punten in zijn omgeving. Wat we doen is op de plaats van een meetpunt een waarde interpoleren uit de meetpunten in de buurt van het te toetsen meetpunt zonder dit punt zelf te gebruiken. Zie figuur 2.2.1. We doen dit met formule (2.1) (waarbij dus het meetpunt zelf niet mag meedoen) en we berekenen ook de precisie van de geïnterpoleerde waarde met (2.2).



De verschillen tussen de geïnterpoleerde waarden en de gemeten waarden hebben een normale verdeling. Het verschil op een punt moet kleiner zijn dan de standaardafwijking van het verschil maal een bepaalde criteriumwaarde  $k$ , bijvoorbeeld 2 of 3. Bij een normale verdeling gooien we bij  $k=2$  ongeveer 5% van de meetpunten (ten onrechte) weg, bij  $k=3$  is dat 0,3%. Afhankelijk van de gebruikte meettechniek en de praktijkervaring van het aantal meetfouten dat daarbij voorkomt, wordt de juiste criteriumwaarde gekozen.



*Figuur 2.2.1 Principe cross-validatie (plaatje uit "Resultaatanalyse" stageverslag RWS/MD, M.H.J. Lansbergen, 1997)*

De standaardafwijking van het verschil wordt bepaald door het samennemen van de precisie van de geïnterpoleerde waarde (uit (2.2) ) en de meetprecisie van de gemeten waarde. We gebruiken voor de meetprecisie van de gemeten waarde alleen de puntruus, omdat het systematische deel van de meetruis voor de directe buurpunten hetzelfde is en dus geen effect heeft op de geïnterpoleerde waarde.

Een vereenvoudiging van deze methode is bijvoorbeeld te kijken naar de RMS-waarde van de 10 dichtstbij gelegen meetwaarden en dan met  $k=2$  of  $k=3$  maal deze RMS te toetsen of een punt flink afwijkt van zijn burens. Dit is een wat crúe methode, maar kan voor meetbestanden met zeer veel en zeer dicht op elkaar gelegen punten (waar je wel een puntje kunt missen) goed en vooral snel werken. Voor dunnere bestanden is het risico op onterecht weggooien van meetwaarden groot.

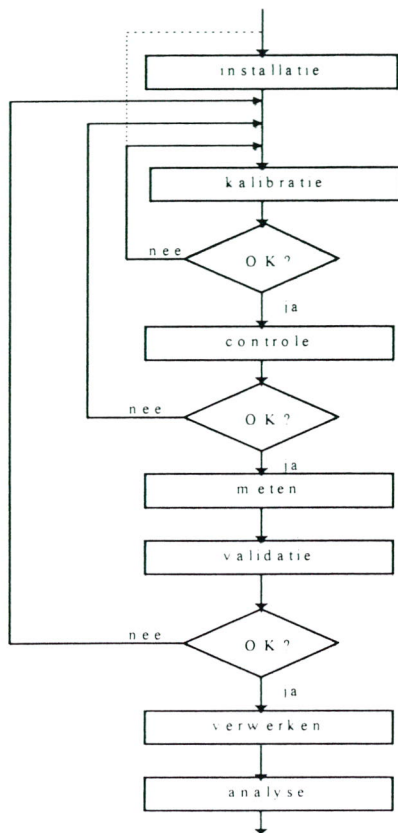
## 2.3 Validatie van een DTM

Binnen het proces van het uitvoeren van laseraltimetrie- en multibeammetingen kunnen een aantal fasen worden onderscheiden:

- kalibratie
- installatie
- controle
- meten
- validatie
- verwerking
- presentatie
- analyse



Ofschoon sommige fasen elkaar kunnen overlappen (b.v. controle en meten, validatie en verwerken, etc.) en er dus niet altijd van op zichzelf staande en opeenvolgende activiteiten sprake is, zullen we hier het begrip fase hanteren in de zin van sequentiële activiteit.



*Figuur 2.3.1*

Aan de hand van het stroomschema van figuur 2.3.1 zullen de relaties tussen de verschillende fasen worden verduidelijkt. Na de aanschaf van een systeem volgt de installatiefase. Hierbij worden de systeemdelen volgens de voorschriften gemonteerd en op werking gecontroleerd. Daarbij vindt zonodig een grofafregeling plaats, gevolgd door een globale systeemtest. Als de installatie is afgerond kan de kalibratie worden uitgevoerd.

Kalibratie wordt hier gedefinieerd als "het periodiek controleren en zo nodig (opnieuw) afregelen van de afzonderlijke systeemdelen en van het totaalsysteem, zodanig dat de systematische meetfouten zo klein mogelijk worden". Kalibratie houdt derhalve in het controleren en zo nodig bijregelen van:

- de fijninstellingen van de systeemdelen van het meetsysteem
  - de nulpuntsinstellingen van de systeemdelen van het meetsysteem;
- gevolgd door een controle op de werking van het totaalsysteem.

Tijdens het uitvoeren van de metingen vindt er regelmatig controle plaats op de werking van het totaalsysteem en op de kalibratie-instellingen zelf. Bij dit laatste wordt nagegaan

of de instellingen nog aan bepaalde specificaties voldoen. Indien de controle daartoe aanleiding geeft, wordt er opnieuw gekalibreerd. Bij de controle zelf worden de kalibratie-instellingen overigens niet gewijzigd.

Vervolgens vinden in het kader van de metingen één of meer validatiemeting(en) plaats.

Het doel daarvan is tweeledig:

- a. de (onafhankelijke) controle van de kwaliteit van de metingen (of van de daarvan afgeleide DTM's);
- b. de eliminatie van de bodemvariabiliteit uit de foutencovariantiefunctie.

Bij het eerstgenoemde doel wordt als het ware een kwaliteitsstempel aan de metingen gehecht; daarmee wordt met een bepaalde zekerheid aangetoond, dat de kwaliteit van de metingen aan de eisen van de opdrachtgever voldoet (of niet voldoet). Als uit de validatie blijkt, dat de kwaliteit niet aan de verwachtingen voldoet, worden de meetresultaten niet door de opdrachtgever geaccepteerd. De oorzaak zal moeten worden opgespoord, waarbij zonodig opnieuw gekalibreerd moet worden. Eventueel zal een systeemdeel moeten worden vervangen, waardoor we dan opnieuw in de installatiefase belanden.

Het tweede doel beoogt de kwaliteitsbeschrijving van de data mogelijk te maken.

Aangezien de validatiemeting neerkomt op een verschilmeting, wordt de bodemvariabiliteit uit de foutencovariantiefunctie verwijderd, waardoor alleen de meetprecisie in de kwaliteitsmaat overblijft.

We zullen nu nader ingaan op het validatieproces zelf. De kwaliteit van boven water DTM's wordt doorgaans getoetst aan de hand van een aantal controleprofielen of -vlakken. Voor laseraltimetrie-DTM's maakt men daarbij meestal gebruik van terrestrisch nauwkeurig ingemeten referentieveldjes, zoals voetbalvelden of parkeerterreinen. Na verwijdering van eventuele uitschieters kan uit de verschillen tussen de referentiehoogten en de (geïnterpoleerde) DTM-hoogten een aantal statistische parameters worden berekend. Getoetst wordt of deze een zekere normwaarde niet te boven gaan.

Bij deze methodiek worden onder meer bepaalde eisen gesteld aan de punt dichtheid van het DTM, het aantal controlepunten per oppervlakte-eenheid en de vlakheid van het referentiegebied. In de normwaarde is onder meer verdisconteerd de meetnauwkeurigheid van de controlepunten en het DTM en de interpolatienauwkeurigheid.

Voor wat betreft de grootte en het aantal van de referentieterreinen wordt pragmatisch te werk gegaan: het inmeten van deze terreinen en het verwerken van de gegevens dient qua kosten in een bepaalde verhouding te blijven tot de kosten van het laseraltimetrieren (inclusief verwerking). Een kostenverhouding van enkele procenten wordt doorgaans acceptabel geacht.

Een andere mogelijke validatiemethode bij laseraltimetrie bestaat uit het "dubbel" opmeten van bepaalde gebieden. Dit kan via het vliegen van langsstroken (heen of retour) en/of van dwarsstroken. De eis van "onafhankelijkheid" laat men bij deze methodiek vallen. Verder is de kwaliteit (z, zowel als x,y) van de controlemetingen waarschijnlijk in dezelfde grootte-orde als die van de metingen zelf. Hierdoor is het slechts in beperkte mate mogelijk de kwaliteit van het DTM te bepalen. Wel kunnen



bepaalde systematische fouten worden ontdekt, bijvoorbeeld tiltfouten. Een voorbeeld van deze methodiek wordt gegeven in hoofdstuk 3.

### **2.3.1 Onder water DTM's**

Bij onder water-DTM's kan men in beginsel dezelfde methodiek als boven water volgen, maar probleem is, dat het niet altijd mogelijk is, om onder water relevante referentiegebieden met voldoende nauwkeurigheid in te meten. Ook laat de stabiliteit van veel onder watergebieden nogal eens te wensen over.

Bij multibeamwaarnemingen gebruikte validatiemethodieken zijn onder meer:

1. Aan het begin, tijdens of aan het eind van de metingen een nauwkeurig bekend onder waterterrein of -object (b.v. een sluisvloer, kalibratiehelling of onder waterplatform) met het systeem opmeten;
2. controlemetingen uitvoeren met een ander (onafhankelijk) meetsysteem, dit kan een singlebeam- of multibeamsysteem zijn;
3. met het opnamesysteem bepaalde gebieden "dubbel" opmeten, dit kan via het varen van langsstroken (heen of retour) en/of van dwarsstroken.

De eerstgenoemde methodiek komt het meest overeen met die bij laseraltimetrie wordt gebruikt, met dien verstande, dat bij het onder waterplatform of kalibratiehelling het oppervlak doorgaans relatief klein is, waardoor het aantal controlepunten veelal beperkt is. Verder kunnen bij een sluismeting de meetomstandigheden aanzienlijk verschillen van de operationele. Dit maakt het minder eenvoudig om betrouwbare uitspraken te doen over de kwaliteit van het DTM dan bij boven water waarnemingen het geval is.

Bij de tweede methodiek worden de (onafhankelijke) controlemetingen uitgevoerd met een systeem van vergelijkbare kwaliteit als van het meetsysteem, hetgeen beperkingen oplevert ten aanzien van de kwaliteitsbepaling. Eventueel kan, door meervoudig te meten, de precisie van de controlemetingen worden vergroot. Verder kunnen systematische fouten worden opgespoord. Deze methodiek wordt weinig toegepast, daar het de inzet van een tweede vaartuig vereist, hetgeen relatief duur is.

Bij methodiek 3 worden de controlemetingen uitgevoerd met het meetsysteem zelf.

Hierdoor is de kans op het vinden van bepaalde niet-ontdekte systematische fouten kleiner dan wanneer met een onafhankelijk systeem wordt gemeten (methodiek 2).

Ofschoon het dus bij onder waterwaarnemingen in het algemeen gesproken minder eenvoudig is om over goede referentievelden te kunnen beschikken dan boven water het geval is, verdient het aanbeveling om ook hier een adequate (ruimtelijke) statistische toetsingsmethode te ontwikkelen, die normen geeft ten aanzien van de grootte van de referentiegebieden (in relatie tot het aantal waarnemingen), van het aantal gebieden en de ruimtelijke spreiding ervan over het meetgebied, en van de representativiteit van de gebieden voor het gehele meetgebied.



## 2.4 Data-integratie

Doel van deze paragraaf is om concepten te bedenken voor de data-integratie; de implementatie-aspecten zullen hier verder niet aan de orde komen. Aangenomen wordt, dat de data-integratie wordt uitgevoerd in een GIS-omgeving en wel op het niveau van het DTM. Aangenomen wordt, dat het geïntegreerde DTM de bodem van het riviersysteem op adequate wijze - conform de gebruikerswensen - beschrijft.

Om het riviersysteem van bandijk tot bandijk geometrisch te beschrijven, wordt zoals we reeds zagen, van verschillende meetsystemen gebruik gemaakt. Metingen met meetsystemen voor droge gebieden (b.v. laseraltimetrie) worden aangevuld met metingen van ondiep water en voor diep water (b.v. multibeam). Daarbij kan overlap optreden maar er kunnen ook stukjes gebied ontbreken.

De puntenbestanden, die door de verschillende meetsystemen zijn ingewonnen, kunnen onderling in kwaliteit (precisie, dichtheid, etc.) verschillen. Doel van de integratie is om op DTM-niveau één mozaïek van (deel-)gebieden te genereren, waarbij een naadloze aansluiting wordt gerealiseerd. Hierbij moet bedacht worden, dat ook de van de puntbestanden afgeleide DTM's onderling in kwaliteit - beschreven door de foutencovariantiefunctie - kunnen verschillen. Daarnaast kan er verschil in vorm (regelmatig /onregelmatig) en in afmetingen (dichtheid) zijn.

NB: Ofschoon een puntenbestand soms ook als "DTM" wordt aangeduid (het zgn. "losse punten-model"), willen we het begrip DTM hier gebruiken voor een van het puntenbestand afgeleid model.

### Integratie-concepten

Bij de integratie maken we onderscheid tussen:

- a. Regelmatige DTM's. Deze ontstaan door vergridding van een puntenbestand, er ontstaat dan een rasterbestand. Bij de verschillende gebiedsdelen kunnen deze in grootte verschillen (dus een verschillende ribbe hebben). Aangenomen wordt, dat de grid-oriëntatie voor een bepaald gebied dezelfde is.
- b. Onregelmatige DTM's. Deze ontstaan door triangulatie van een puntenbestand. Dit DTM wordt doorgaans aangeduid met de benaming TIN (Triangulated Irregular Network) en het bestand is vector-geïoriënteerd.

Ook deze DTM's kunnen per gebiedsdeel in grootte-orde variëren.

Het zgn. spline-model of breuklijn-model (denk daarbij bijvoorbeeld aan de kruin van een dijk). wordt in dit verband opgevat als een onderdeel van het TIN, n.l. als één zijde van de driehoek.

Opgemerkt wordt, dat in veel gevallen er bij een DTM sprake zal zijn van een data-reductie ten opzichte van het oorspronkelijke puntenbestand.

Nu is het in het algemeen altijd mogelijk om van een regelmatig DTM een onregelmatig DTM te maken, n.l. via triangulatie. Bij ontbrekende grensgebieden kan daarom de strategie worden gevolgd deze gebiedjes "op te vullen" met TIN's. Daarbij worden geen extra punten aan het DTM-bestand toegevoegd. Deze methodiek zal vooral voldoen wanneer het ontbrekende gebiedje relatief klein is en de punt dichtheid voldoende groot

is. Bij grotere gebiedjes zal mogelijk (om aan de eisen van de gebruiker te voldoen) bij de triangulatie tevens een interpolatie moeten worden toegepast; hierbij worden wel extra punten toegevoegd en wordt een DTM met een grotere punt dichtheid verkregen. In het eerste geval zal er geen verandering optreden in de kwaliteitsbeschrijving (foutencovariantiefunctie), in het tweede geval zal voor het grensgebied een nieuwe foutencovariantiefunctie moeten worden berekend, waarin de interpolatiefouten zijn verdisconteerd.

Bij overlap van DTM's ontstaat in het overlapgebied een grotere punt dichtheid dan van de oorspronkelijke bestanden, van dit puntenbestand kan eventueel een nieuw (regelmatig of onregelmatig) DTM worden bepaald, maar dan met een hogere kwaliteit dan de oorspronkelijke DTM's. Dit laatste vindt zijn weerslag in de kwaliteitsbeschrijving c.q. foutencovariantiefunctie van het overlapgebied.

Een andere bewerking, die bij de integratie kan worden uitgevoerd, is het vereffenen van eventueel resterende hoogteverschillen (systematische fouten) tussen de deelgebieden. Voor de duidelijkheid volgt nog een overzicht van de zes situaties, die zich bij integratie kunnen voordoen, gevolgd door de te volgen integratie-methodiek:

1. Regelmatig DTM, "grenzend" aan onregelmatig DTM, zonder overlap,
2. Regelmatig DTM, "grenzend" aan onregelmatig DTM, deels overlappend,
3. Regelmatig DTM, "grenzend" aan ander regelmatig DTM, zonder overlap,
4. Regelmatig DTM, "grenzend" aan ander regelmatig DTM, deels overlappend,
5. Onregelmatig DTM, "grenzend" aan ander onregelmatig DTM, zonder overlap,
6. Onregelmatig DTM, "grenzend" aan ander onregelmatig DTM, deels overlappend.

Situatie 1: integratie door enkele aansluitende driehoeken toe te voegen (al of niet geïnterpoleerd).

Situatie 2: integratie door overlappende rechthoeken of driehoeken te verwijderen en te vervangen door nieuwe aansluitende rechthoeken of driehoeken.

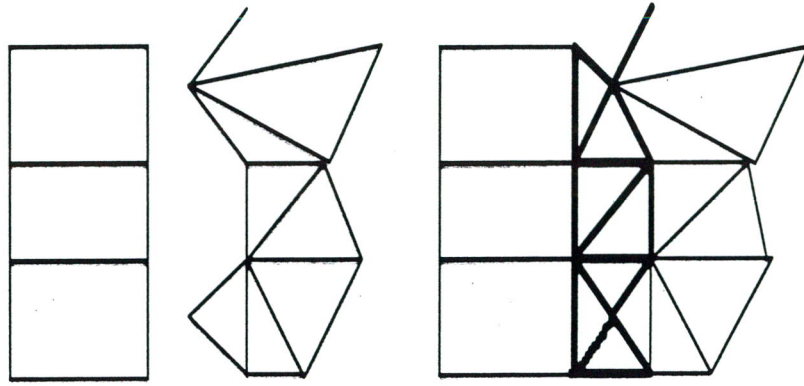
Situatie 3: integratie door zo mogelijk enkele rechthoeken toe te voegen (interpolatie) en de eventueel resterende ruimte op te vullen met aansluitende driehoeken (al of niet geïnterpoleerd).

Situatie 4: integratie door overlappende rechthoeken te vervangen door nieuwe aansluitende rechthoeken of driehoeken.

Situatie 5: integratie door enkele aansluitende driehoeken toe te voegen (al of niet geïnterpoleerd).

Situatie 6: integratie door overlappende driehoeken te vervangen door nieuwe aansluitende driehoeken.

Ter illustratie is in figuur 2.4.1 situatie 1 vóór en na de dataintegratie weergegeven.



*Figuur 2.4.1*



## 3 PROCEDURES EN PRECISIE VAN MULTIBEAM GEGEVENS

### 3.1 Introductie multibeam

Een multibeam echosounder wordt ingezet om de ligging van de waterbodem in een brede strook loodrecht op de vaarrichting te bemeten ('pad'). De breedte van deze strook ('padbreedte') kan tot zo'n zes maal de waterdiepte bedragen. De meeste multibeam echosounder systemen zenden een geluidspuls uit die breed is in de richting loodrecht op de vaarrichting (orde:  $150^\circ$ ) en smal in de vaarrichting (orde:  $1,5^\circ$ ). De toegepaste frequenties bevinden zich meestal in de band van 100 kHz tot 500 kHz. Bij ontvangst van de echosignalen worden *richting* (of *hoek*) en *looptijd* van de echo-signalen bepaald via bundelvorming en/of interferometrie. Verder moet de *geluidsnelheid* bekend zijn als functie van de diepte, het zogenaamde geluidsnelheidsprofiel, om de looptijd te kunnen omrekenen naar afstand en om de breking die het geluid ondergaat als de snelheid zich wijzigt (wet van Snellius) in rekening te kunnen brengen. Het meten van het geluidsnelheidsprofiel is vooral regelmatig nodig in getijde-gebieden waar door de zoet-zoutwater overgang de geluidsnelheid als functie van de diepte niet constant is en tevens verloopt als functie van de tijd. Uit de richting en de looptijd van de echo's en de geluidsnelheid in het water kunnen de echolocaties op de bodem worden berekend. Het aantal meetwaarden dat op deze manier verkregen wordt per uitgezonden geluidspuls varieert van zo'n vijftig tot meer dan duizend, afhankelijk van het meetprincipe en de signaalverwerking. Het aantal geluidspulsen dat per seconde wordt uitgezonden is ook weer afhankelijk van het systeem en varieert van vier tot meer dan tien. Een en ander heeft tot gevolg dat de dichtheid van de meetpunten enorm kan variëren. Bij het bepalen van richting, looptijd en geluidsnelheidsprofiel worden uiteraard fouten gemaakt. We komen daar later op terug.

De hierboven beschreven meetpunten worden in eerste instantie verkregen in het *stelsel van de akoestische transducent*. Deze transducent is bevestigd aan het schip, meestal aan de voorkant bij de kiel. Door de positie van de transducent goed in te meten t.o.v. het schip, kan men de meetpunten uitdrukken in het *scheepsstelsel*. De volgende stap is dan om de positie van het schip uit te drukken in *RD X-Y en NAP-hoogten H*, het stelsel waarin men de meetwaarden uiteindelijk wil verkrijgen. Hiertoe is het nodig dat men de positie en de stand (de drie translaties en drie rotaties) van het schip kent als functie van de tijd. Deze zijn variabel: het schip vaart met zekere snelheid, het schip beweegt in verticale richting onder invloed van golven, wind, voorbijvarende schepen, hoeveelheid mensen aan boord en getij, het schip kan ook in zijwaartse richting bewegen (verlijeren) en het kan roteren om zijn drie assen (rollen, stampen en gieren, Eng.: roll, pitch en yaw). Bij de huidige multibeam systemen wordt de positie van het schip (RD X-Y) bepaald met DGPS, wordt de hoogte van het schip in de regel bepaald via opgevraagde waterstanden of KART in combinatie met de gegevens van een heave sensor en worden roll en pitch

bepaald met een motion sensor. Meestal wordt aangenomen dat oriëntatie van het schip, de yaw, overeenkomt met de vaarrichting. Merk op dat de posities van de DGPS antenne en de heave en motion sensoren aan boord van het schip weer nauwkeurig moeten worden ingemeten.

Het zal duidelijk zijn dat bij dit inmeten en ook bij het bepalen van de positie en stand als functie van de tijd de nodige fouten kunnen worden gemaakt. Berucht zijn in dit verband de zogenaamde 'timing-errors'. Immers, bij alle bewegingen is het tijdsaspect bijzonder belangrijk. Het mag niet voorkomen dat sensoren werken met verschillende klokken: alle meetwaarden dienen voorzien te zijn van een betrouwbare 'time stamp'. Ook is het belangrijk dat het verwerken van de signalen van de diverse sensoren niet te lang duurt. Tenslotte worden de meetgegevens in het uiteindelijke stelsel door computer-programma's verwerkt tot het gewenste eindresultaat, een DTM. Behalve de fouten die inherent zijn aan het gekozen algoritme (zie ook het vorige hoofdstuk waarin o.m. interpolatie aan bod komt), kunnen er ook fouten aanwezig zijn in de implementatie van dat algoritme.

### 3.2 Fouten multibeam, overzicht

In deze sectie geven we eerst een opsomming van de fouten die mogelijk kunnen optreden in een multibeam echosounder systeem met vervolgens uitleg en commentaar over het karakter van de fouten. Dit voor elk van de genoemde stelsels:

- akoestische transducent stelsel,
- scheepsstelsel,
- RD X, Y en NAP H stelsel.

In de onderstaande tabel vindt men een overzicht van de basis-parameters die gemeten worden in elk van de stelsels. Tevens zijn opgenomen de parameters die van deze meetwaarden worden afgeleid.

stelsel	gemeten parameters						berekende parameters		
akoestische transducent	$c(z), t$	$T_{E,tr}, t$	$\alpha_{E,tr}, t$				$y_{E,tr}, t$	$z_{E,tr}, t$	
schip	$\alpha_{tr,s}$	$\beta_{tr,s}$	$\gamma_{tr,s}$	$x_{tr,s}$	$y_{tr,s}$	$z_{tr,s}$	$x_{E,s}$	$y_{E,s}, t$	$z_{E,s}, t$
RD X, Y , NAP H	$\alpha_{s,RD}(t)$	$\beta_{s,RD}(t)$	$\gamma_{s,RD}(t)$	$x_{s,RD}(t)$	$y_{s,RD}(t)$	$z_{s,RD}(t)$	$X_E$	$Y_E$	$H_E$

*akoestische transducent-stelsel*

gemeten parameters:

$c(z)$  geluidsnelheidsprofiel als functie van de diepte  $z$ ,  
(wordt vanaf schip gemeten via een sonde aan een lier),

$T_{E,tr}$  looptijd van een echo,



$\alpha_{E,tr}$  richting van een echo (oriëntatie: in het vlak van de transducent),  
 $t$  tijdstip behorende bij de meting.

uit meetresultaten berekende parameters:

$y_{E,tr}$  y-coördinaat van de echolocatie (loodrecht op vaarrichting),  
 $z_{E,tr}$  z-coördinaat van de echolocatie (diepte richting).

### *scheepsstelsel*

gemeten parameters:

$\alpha_{tr,s}$  hoek tussen transducent en de 'verticaal' in de roll richting,  
 $\beta_{tr,s}$  hoek tussen transducent en de 'verticaal' in de pitch richting,  
 $\gamma_{tr,s}$  hoek tussen transducent en scheepsoriëntatie, de yaw richting,  
 $x_{tr,s}$  x-coördinaat van de transducent in het scheepsstelsel (offset in vaarrichting),  
 $y_{tr,s}$  y-coördinaat van de transducent in het scheepsstelsel (offset loodrecht opvaarrichting),  
 $z_{tr,s}$  z-coördinaat van de transducent in het scheepsstelsel (offset diepte richting),  
uit meetresultaten berekende parameters:  
 $x_{E,s}$  x-coördinaat van de echolocatie in het scheepsstelsel (in vaarrichting),  
 $y_{E,s}$  y-coördinaat van de echolocatie in het scheepsstelsel (loodrecht op vaarrichting),  
 $z_{E,s}$  z-coördinaat van de echolocatie in het scheepsstelsel (diepte richting).

### *RD X, Y, NAP H stelsel (X, Y, H-stelsel)*

gemeten parameters:

$\alpha_{s,RD}(t)$  roll als functie van de tijd,  
 $\beta_{s,RD}(t)$  pitch als functie van de tijd,  
 $\gamma_{s,RD}(t)$  yaw als functie van de tijd,  
 $x_{s,RD}(t)$  x-coördinaat van het schip in het RD X, Y, NAP H stelsel als functie van de tijd,  
 $y_{s,RD}(t)$  y-coördinaat van het schip in het RD X, Y, NAP H stelsel als functie van de tijd,  
 $z_{s,RD}(t)$  z-coördinaat van het schip in het RD X, Y, NAP H stelsel als functie van de tijd.

uit meetresultaten berekende parameters (en tevens het beoogde resultaat):

$X_E$  x-coördinaat van de echolocatie in het RD X, Y, NAP H stelsel,  
 $Y_E$  y-coördinaat van de echolocatie in het RD X, Y, NAP H stelsel,  
 $H_E$  z-coördinaat van de echolocatie in het RD X, Y, NAP H stelsel.

## 3.3 Fouten multibeam, beschrijving

In dit hoofdstuk wordt de invloed van de hiervoor genoemde foutenbronnen beschreven. Bovendien wordt aandacht besteed aan het feit dat ook het niet-meten van bepaalde zaken aanleiding kan geven tot fouten.



*Fouten gerelateerd aan de akoestische transducent*

- Geluidsnelheid als functie van de diepte ter plaatse van het schip: geluidsnelheid, diepte,
- Akoestische signaal: looptijd, hoek.

De uit het akoestische signaal geëxtraheerde grootheden zijn looptijd  $T_{E,tr}$  en hoek  $\alpha_{E,tr}$  die bij deze meting behoort. Deze worden met hulp van het geluidsnelheidsprofiel omgerekend naar een echolocatie op de bodem (in het transducent stelsel):  $y_{E,tr}$ ,  $z_{E,tr}$ . Merk op dat de  $x_{E,tr}$  coördinaat in dit stelsel niet bestaat, ofwel gelijk gekozen wordt aan nul; deze dimensie komt er pas bij wanneer het schip vaart. Deze situatie komt later aan de orde.

$$(3.1) \quad \begin{aligned} y_{E,tr} &= c \cdot T_{E,tr} \cdot \sin(\alpha_{E,tr}) \\ z_{E,tr} &= -c \cdot T_{E,tr} \cdot \cos(\alpha_{E,tr}) \end{aligned}$$

De waarden  $y_{E,tr}$  en  $z_{E,tr}$  worden opgeslagen tijdens het meten. Het is belangrijk dat ook het tijdstip  $t$  waarop het signaal bij de ontvanger arriveerde wordt opgeslagen (dus niet de looptijd, maar de absolute tijd). Dit om in een later stadium de meetwaarden te kunnen corrigeren voor de scheepsstand en -positie van dat moment.

Een fout in de hoek en/of tijdmeting en/of geluidsnelheid resulteert in een foute waarneming volgens:

$$(3.2) \quad \begin{aligned} y_{E,tr} + \Delta y_{E,tr} &= (c + \Delta c) \cdot (T_{E,tr} + \Delta T_{E,tr}) \cdot \sin(\alpha_{E,tr} + \Delta \alpha_{E,tr}) \\ z_{E,tr} + \Delta z_{E,tr} &= -(c + \Delta c) \cdot (T_{E,tr} + \Delta T_{E,tr}) \cdot \cos(\alpha_{E,tr} + \Delta \alpha_{E,tr}) \end{aligned}$$

Merk op dat hier uitgegaan is van een geluidsnelheid die constant is als functie van de diepte. NB: deze versimpeling is in de praktijk niet altijd toegestaan, maar hier ingevoerd om het probleem simpel te houden.

De fout is het verschil tussen beide formules en deze wordt voor kleine  $\Delta c$ ,  $\Delta T_{E,tr}$  en  $\Delta \alpha_{E,tr}$  gegeven door:

$$(3.3) \quad \begin{aligned} \Delta y_{E,tr} &= \Delta c \cdot T_{E,tr} \cdot \sin(\alpha_{E,tr}) + c \cdot \Delta T_{E,tr} \cdot \sin(\alpha_{E,tr}) + c \cdot T_{E,tr} \cdot \Delta \alpha_{E,tr} \cos(\alpha_{E,tr}) \\ \Delta z_{E,tr} &= -\Delta c \cdot T_{E,tr} \cdot \cos(\alpha_{E,tr}) - c \cdot \Delta T_{E,tr} \cdot \cos(\alpha_{E,tr}) + c \cdot T_{E,tr} \cdot \Delta \alpha_{E,tr} \sin(\alpha_{E,tr}) \end{aligned}$$

Substitutie van (3.1) in bovenstaande vergelijking om de factor tijd ( $T$ ) te elimineren, resulteert in een formulering die gemakkelijker te interpreteren is:

$$(3.4) \quad \begin{aligned} \Delta y_{E,tr} &= \frac{\Delta c}{c} \cdot y_{E,tr} + c \cdot \Delta T_{E,tr} \cdot \sin(\alpha_{E,tr}) + \Delta \alpha_{E,tr} \cdot z_{E,tr} \\ \Delta z_{E,tr} &= -\frac{\Delta c}{c} \cdot z_{E,tr} - c \cdot \Delta T_{E,tr} \cdot \cos(\alpha_{E,tr}) + \Delta \alpha_{E,tr} \cdot y_{E,tr} \end{aligned}$$

Volgens formule (3.4) heeft een relatieve fout (%) in de *snelheid* een even grote relatieve fout in  $y_{E,tr}$  en  $z_{E,tr}$  tot gevolg. Als men uitgaat van een vlakke bodem (constante diepte), dan zal de dieptefout dus constant zijn. Aangezien de  $y_{E,tr}$  coördinaat uiteraard groter wordt bij een toenemende padbreedte, zal ook de fout in deze richting lineair toenemen met een toenemende padbreedte.

Een fout in de *looptijd* heeft volgens (3.4) een fout in  $y_{E,tr}$  tot gevolg die afhangt van  $\sin(\alpha_{E,tr})$ , en een fout in de diepte  $z_{E,tr}$  die evenredig is met  $\cos(\alpha_{E,tr})$ . Vanzelfsprekend ziet men in (3.4) de snelheid terugkomen als evenredigheidsconstante: deze 'transformeert' de looptijdfout naar een afstandfout.

De dieptefout is dus het grootst voor de kleine padbreedtes (rond  $\alpha_{E,tr}=0$ ) terwijl de laterale fout het grootst is voor de grote padbreedtes (grote  $\alpha_{E,tr}$ ).

Een fout in de *hoek* meting heeft voor een vlakke bodem ( $z_{E,tr}$  constant) tot gevolg dat de fout in  $y_{E,tr}$  constant is terwijl de fout in  $z_{E,tr}$  lineair toeneemt met de padbreedte.

De fouten in de looptijd en/of de hoek worden puur bepaald door het fysische meetprincipe en de uitvoering daarvan door de fabrikant. Systemen gebaseerd op beamforming zullen eerder een foutieve looptijd bepalen bij de juiste hoek, terwijl systemen gebaseerd op interferometrie eerder een foutieve hoek bepalen bij een juiste looptijd. De fout in de geluidssnelheid wordt bij wisselende omstandigheden behalve door de sensor ook bepaald door de frequentie waarmee de geluidssnelheid gemeten wordt. Dit laatste heeft men als gebruiker uiteraard zelf in de hand. Merk op dat bij een te lage meetfrequentie de fout een systematisch karakter krijgt: immers, alle metingen gedurende een bepaalde tijd zijn behept met die fout.

Wanneer looptijd en hoek van de echo zijn omgerekend naar de echolocatie op de bodem in het transducent stelsel, dan is de volgende stap het omrekenen naar het scheepsstelsel. Dit is het onderwerp van de volgende sectie.

*Fouten bij het inmeten van de positie en de oriëntatie van de akoestische transducent(en):*

- Akoestische transducent: positie en oriëntatie van de transducent(en) t.o.v. het scheepsstelsel.

Het uitgangspunt is dat de genoemde sensor(en) eenmalig gemonteerd worden op het schip en dat hun positie vervolgens onveranderd blijft als functie van de tijd. De bedoeling is dat de  $y_{E,tr}$ ,  $z_{E,tr}$  waarde die door de akoestische sensor wordt afgeleverd uitgedrukt wordt in een scheepsstelsel waarde  $x_{E,s}$ ,  $y_{E,s}$ ,  $z_{E,s}$ .

Tussen de coördinaten in het transducent stelsel en de coördinaten in het scheepsstelsel bestaat een eenvoudig verband bestaande uit 3 rotaties en 3 translaties:

$$(3.5) \quad \begin{bmatrix} x_{E,s} \\ y_{E,s} \\ z_{E,s} \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} 0 \\ y_{E,tr} \\ z_{E,tr} \end{bmatrix} + \mathbf{b} .$$

Hierbij representeert  $\mathbf{A}$  de juiste 3x3 rotatie matrix waarvan de 9 elementen zijn opgebouwd uit de 3 rotatie hoeken  $\alpha_{tr,s}$ ,  $\beta_{tr,s}$  en  $\gamma_{tr,x}$  en  $\mathbf{b}$  de juiste 3x1 translatie vector, die de 3 offsets  $x_{tr,s}$ ,  $y_{tr,s}$  en  $z_{tr,s}$  bevat. Voor een uitgebreide beschrijving van deze matrix en vector wordt verwezen naar Hare et al. (1995). Het onjuist inmeten van de sensor leidt tot systematische afwijkingen in de rotatie matrix en translatie vector:



$$(3.6) \quad \begin{bmatrix} x_{E,s} + \Delta x_{E,s} \\ y_{E,s} + \Delta y_{E,s} \\ z_{E,s} + \Delta z_{E,s} \end{bmatrix} = (\mathbf{A} + \Delta \mathbf{A}) \begin{bmatrix} 0 \\ y_{E,tr} \\ z_{E,tr} \end{bmatrix} + (\mathbf{b} + \Delta \mathbf{b}).$$

Hierin geeft het symbool  $\Delta$  de fout weer.

De fout in het eindresultaat wordt dus gegeven door:

$$(3.7) \quad \begin{bmatrix} \Delta x_{E,s} \\ \Delta y_{E,s} \\ \Delta z_{E,s} \end{bmatrix} = \Delta \mathbf{A} \begin{bmatrix} 0 \\ y_{E,tr} \\ z_{E,tr} \end{bmatrix} + \Delta \mathbf{b}.$$

Merk op dat hoewel de fout  $\Delta \mathbf{A}$  zelf constant is, de fouten  $\Delta x_{E,s}$ ,  $\Delta y_{E,s}$  en  $\Delta z_{E,s}$  niet constant zijn, maar afhankelijk zijn van de meetwaarden  $y_{E,tr}$  en  $z_{E,tr}$ . Hierbij moet bedacht worden dat in de regel de diepte  $z_{E,tr}$  weinig variaties vertoont (of geen bij een constante diepte) terwijl de  $y_{E,tr}$  wel varieert en groter wordt bij een toenemende padbreedte. Hierdoor zal in het algemeen gelden dat de fouten een bepaalde minimum waarde hebben loodrecht onder het schip, waar geldt dat  $y_{E,tr} = 0$  terwijl de fouten vervolgens lineair toenemen met een toenemende padbreedte. Bij een sterk gestructureerd bodemprofiel gaat deze redenering niet zonder meer op.

Het doel is om tijdens het inmeten en afregelen van het systeem (op het droge) de factoren  $\Delta \mathbf{A}$  en  $\Delta \mathbf{b}$  zo klein mogelijk te maken en om vervolgens in de kalibratieprocedure de nog resterende fouten aan te pakken via software instellingen van het echosounder systeem.

Ten slotte merken we op dat de fouten die in deze paragraaf besproken werden dus een systematisch karakter hebben. Het betreft hier het eenmalig inmeten van de positie en de oriëntatie van de akoestische transducent ten opzichte van het schip. Alle fouten die hierbij gemaakt worden resp. in het systeem blijven 'zitten' zullen 'eeuwig' hun invloed behouden.

De volgende sectie behandelt de volgende stap: de overgang van de coördinaten in het scheepsstelsel naar RD X, Y en NAP H coördinaten.

*Fouten in de sensor resultaten:*

- Heave sensor: positie, oriëntatie, timing,
- Roll, pitch en yaw: positie, oriëntatie, timing,
- DGPS antenne(s): positie, oriëntatie, timing.

De volgende stap is om de scheepscoördinaten om te rekenen naar RD X, Y en NAP H. Dit betekent dat de positie van het schip en zijn stand op het moment waarop de metingen verricht worden bekend moeten zijn. De bovengenoemde sensoren en antenne(s) hebben tot doel om deze gegevens te meten.

In principe betreft het omrekenen van  $x_{E,s}$ ,  $y_{E,s}$ ,  $z_{E,s}$  naar RD X, Y en NAP H weer rotaties om drie hoeken en translaties in drie richtingen. Dit keer betreft het echter geen vaste rotaties en translaties, zoals in het geval van de overgang van het transducent-stelsel



naar het scheepsstelsel, maar tijdsafhankelijke omdat het schip voortdurend in beweging is. Dit betekent dat er naast fouten in de rotaties en translaties nu ook fouten in de timing kunnen voorkomen.

De formules lijken sterk op (3.5), (3.6) en (3.7):

$$(3.8) \quad \begin{bmatrix} X_E \\ Y_E \\ H_E \end{bmatrix} = \mathbf{D}(t) \begin{bmatrix} x_{E,s} \\ y_{E,s} \\ z_{E,s} \end{bmatrix} + \mathbf{d}(t).$$

Hierin representeert  $\mathbf{D}(t)$  de juiste 3x3 rotatie matrix waarvan de 9 elementen zijn opgebouwd uit de 3 rotatie hoeken  $\alpha_{s,RD}(t)$ ,  $\beta_{s,RD}(t)$  en  $\gamma_{s,RD}(t)$  en  $\mathbf{d}(t)$  de juiste 3x1 translatie vector, die de 3 translaties  $x_{s,RD}(t)$ ,  $y_{s,RD}(t)$  en  $z_{s,RD}(t)$  bevat.

De fouten die in dit stadium een rol spelen zijn:

- fouten in de waarde die de sensoren afgeven,
- fouten door het onjuist inmeten van de positie en oriëntatie van de sensoren,
- fouten in de timing.

De resultaten inclusief de fouten kunnen worden beschreven door:

$$(3.9) \quad \begin{bmatrix} X_E + \Delta X_E \\ Y_E + \Delta Y_E \\ H_E + \Delta H_E \end{bmatrix} = (\mathbf{D}(t) + \Delta \mathbf{D}(t)) \begin{bmatrix} x_{E,s} \\ y_{E,s} \\ z_{E,s} \end{bmatrix} + (\mathbf{d}(t) + \Delta \mathbf{d}(t))$$

en de fouten worden dus gegeven door:

$$(3.10) \quad \begin{bmatrix} \Delta X_E \\ \Delta Y_E \\ \Delta H_E \end{bmatrix} = \Delta \mathbf{D}(t) \begin{bmatrix} x_{E,s} \\ y_{E,s} \\ z_{E,s} \end{bmatrix} + \Delta \mathbf{d}(t).$$

In dit geval is de fout  $\Delta \mathbf{D}(t)$  niet in zijn geheel constant (zoals  $\Delta \mathbf{A}$ ), maar gedeeltelijk afhankelijk van de tijd. De fouten  $\Delta x_E$ ,  $\Delta y_E$  en  $\Delta z_E$  zijn behalve van  $\Delta \mathbf{D}(t)$  ook nog afhankelijk van de meetwaarden  $x_{E,s}$ ,  $y_{E,s}$  en  $z_{E,s}$ . In de regel zal de diepte  $z_{E,s}$  weinig variaties vertonen (of geen bij een constante diepte) terwijl de  $y_{E,s}$  wel varieert en groter wordt bij een toenemende padbreedte. Hierdoor zal in het algemeen weer gelden dat de fouten relatief klein zijn loodrecht onder het schip, waar geldt dat  $y_{E,s} = 0$ , terwijl de fouten vervolgens lineair toenemen met een toenemende padbreedte. Bij een sterk gestructureerd bodemprofiel gaat deze redenatie niet zonder meer op.

Het doel is om tijdens het inmeten en afregelen van het systeem (op het droge) de factoren  $\Delta \mathbf{D}$  en  $\Delta \mathbf{d}$  zo klein mogelijk te maken, waar het de aspecten rond timing en positie van de sensoren betreft, en om daarna in de kalibratieprocedure de nog resterende fouten aan te pakken via software instellingen van het echosounder systeem. Merk op dat de fouten  $\Delta \mathbf{D}$  (voor zover zij constant zijn en dus tijdonafhankelijk) in de praktijk slechts moeizaam of niet te onderscheiden zijn van de fouten  $\Delta \mathbf{A}$  en dus tegelijkertijd gecorrigeerd zullen worden.

### *Fouten door niet meten*

Behalve fouten in de gemeten grootheden, zijn er ook fouten door niet-gemeten grootheden. Voorbeelden zijn:

- De geluidssnelheid als functie van de diepte op *andere* locaties langs het pad dan direct onder het schip.

De stand van het schip. Hier worden niet de relatief snelle variaties bedoeld - deze worden immers met de standsensor gemeten - maar de 'constante' factor hierin (denk aan watertanks, brandstoftanks, mensen aan boord, enz.) en de langzame variaties die niet met een sensor gemeten worden (een voorbijvarend schip wordt niet waargenomen door de heave sensor omdat de verandering te langzaam is; verlijeren: de stand van het schip komt niet overeen met de vaarrichting en wordt niet waargenomen door de yaw sensor als deze al aanwezig is). Dergelijke langzame fouten kunnen worden vermeden door standbepaling op basis van GPS.

- In het algemeen: men heeft vaak de meetwaarden nodig op tijden en plaatsen waarop men niet gemeten heeft. Denk hierbij bijvoorbeeld aan de heave sensor die bijvoorbeeld tien meetwaarden per seconde aflevert, maar waarschijnlijk niet op de tijden die men eigenlijk nodig heeft. Men past dan interpolatie toe om tot de gewenste waarden te komen: (real-time) interpolatie van meetwaarden in temporele en spatiële zin (in de acquisitie software).

### *Fouten door externe omstandigheden*

Enkele voorbeelden van dit type fout:

- Akoestisch signaal te slecht door weinig diffracterende bodem,
- Bodemstructuur (vorm, objecten, helling, etc.) niet geschikt voor meetprincipe van de echosounder,
- Weersomstandigheden (schuim rond de transducent, extreme waarden heave, roll, pitch, yaw, etc.),

### *Fouten in de verwerkingssoftware*

Zie Hoofdstuk 2 waarin onder meer de gevolgen van interpolatie en de doorwerking van meetfouten worden behandeld.

## **3.4 Procedures multibeam**

Men kan de volgende fasen onderscheiden in het totale proces van het meten met een multibeam echolodings-systeem:

- de afname van de apparatuur bij de fabrikant,
- de installatie van de apparatuur en de acquisitie software aan boord van het schip,
- het uitvoeren van de kalibratie-metingen,
- een controle op de installatie en instellingen,
- het uitvoeren van de lodingen,
- het verwerken van de gegevens tot een DTM met de processing software.



In alle stadia dient de kwaliteit van allerlei parameters die met het systeem te maken hebben bewaakt te worden. In het algemeen treden er in de loop van de tijd allerlei veranderingen op: ijkpunten kunnen verzakken, sensoren kunnen verlopen, etc. Dit betekent bijvoorbeeld dat ijkpunten opnieuw ingemeten moeten worden, dat sensoren regelmatig opnieuw geijkt moeten worden, dat de uitlijning gecontroleerd moet worden, etc.

De gedachte is nu dat alle mogelijke 'problemen' van te voren worden geïdentificeerd en dat er regels, procedures worden opgesteld om de invloed ervan zoveel mogelijk te beperken.

Binnen de Rijkswaterstaat organisatie is men hiermee al ver gevorderd. Ook de fabrikanten van de apparatuur hebben vaak een grote hoeveelheid procedures opgesteld. Het doel van dit hoofdstuk is dat men met de informatie die hier wordt aangereikt zelf in staat is om te beoordelen of de voorhanden zijnde procedures toereikend zijn.

#### *Afname van de apparatuur bij de fabrikant*

Alvorens een multibeam echosounder wordt afgenomen dient te worden geverifieerd of het systeem de juiste drie basismeetresultaten oplevert:

- looptijd van de echo,
- hoek van de echo,
- tijdstip van ontvangst van de echo.

De fabrikant zou de kwaliteit van het systeem moeten aantonen met meetresultaten die behaald zijn in een testomgeving. De huidige praktijk is dat men het bovenstaande zonder meer aanneemt.

#### *De installatie van de apparatuur en de acquisitiesoftware aan boord van het schip.*

Bij de installatie van de apparatuur aan boord komt het vooral neer op het juist inmeten van de locatie en de oriëntatie van de akoestische transducent en de overige sensoren (heave, roll, pitch) en DGPS antenne en het instellen van deze geometrische parameters in de acquisitiesoftware. Tevens dient de apparatuur zo te worden afgeregeld en de software zo te worden ingesteld dat de meettijdstippen van alle sensoren overeenstemmen.

Het is onvermijdelijk dat er een afwijking overblijft tussen de gemeten waardes bij en de werkelijke waardes van de posities en oriëntaties. Men dient zich te realiseren dat elke afwijking die overblijft voor onbeperkte tijd in het systeem blijft zitten.

#### *Het uitvoeren van de kalibratiemetingen*

De kalibratiemetingen hebben tot doel om de afwijkingen die overgebleven zijn na de installatie te detecteren en hiervoor via de data-acquisitie software te corrigeren.

Het betreft hier dus alle fouten in de gemeten grootheden (zie het overzicht in paragraaf 3.2) met een systematisch karakter. Helaas is het niet gemakkelijk om elke fout afzonderlijk goed te bepalen. Immers, elke fout ergens in het meetsysteem komt



uiteindelijk tot uiting in een fout in de x,y,z-waarde van de echo-locatie, terwijl het niet altijd mogelijk is om fouten in de x,y,z,-waardes te herleiden tot een fout in één of meerdere componenten van het meetsysteem. Enkele voorbeelden:

- Een systematische dieptefout kan zowel door het foutief inmeten van de positie van de akoestische transducent als door het foutief inmeten van de DGPS-antenne veroorzaakt worden. Het verschil komt pas tot uiting in het geval dat het schip roteert (roll, pitch), omdat de DGPS-antenne en de akoestische transducent zich op verschillende posities bevinden.
- Een fout in de pitch heeft voor gelijke meetdieptes hetzelfde effect als een fout in de geometrie in de scheepsrichting. De positiefout ten gevolge van een fout in de pitch wordt groter voor grotere waterdieptes in tegenstelling tot de positiefout ten gevolge van een geometriefout.

Dergelijke verschillende foutenbronnen met (bijna) dezelfde gevolgen zijn vaak lastig van elkaar te onderscheiden en te corrigeren.

Heeft men eenmaal een bepaalde afwijking geconstateerd, dan is het aanbrengen van de correctie vervolgens een eenvoudige actie: het veranderen van bepaalde instellingen in de software van het systeem.

De verschillende afwijkingen, die kunnen optreden, kunnen volgens afzonderlijke procedures worden vastgesteld. In het meest ideale geval wordt hierbij gebruik gemaakt van een bodem en/of object, waarvan de coördinaten zeer nauwkeurig bekend zijn, zoals een sluisvloer of een meetplatform. Als deze niet voorhanden zijn zal gebruik gemaakt moeten worden van de aanwezige bodem en de objecten daarop.

Hieronder zullen kort de kenmerken van de kalibratie worden beschreven en verder zal nader ingegaan worden op de volgorde van de verschillende stappen. Steeds wordt aangegeven hoe groot de gemeten afwijking is als functie van de afwijking in het meetsysteem. Hierbij wordt de volgende conventie aangehouden:

x	coördinaat in de vaarrichting,
y	coördinaat in de dwarsrichting,
$\alpha$	roll-hoek,
$\beta$	pitch-hoek,
$\gamma$	yaw-hoek,
t	tijd,
$\theta$	helling talud (vaarrichting),
$\varphi$	helling bodem (dwarsrichting),

Een kalibratieprocedure bestaat uit de volgende onderdelen:

1. Kalibratie van het delay tussen plaatsbepaling en standopnemer

Deze afwijking kan vastgesteld worden met behulp van de slingermast op de wal. Hiermee kunnen ook (eventuele) delays tussen de verschillende componenten (roll-pitch-yaw) van de standopnemer opgespoord worden.

2. Kalibratie van het delay tussen standopnemer en echolood

Deze afwijking wordt gemeten door het schip stilliggend te laten slingeren.

3a. Kalibratie van de verticale positie van het echolood

Met een ijkbalk kan de hoogte van het akoestische middelpunt van de transducent bepaald worden. Deze kalibratie vindt plaats ten opzichte van het scheepsstelsel.

3b. Kalibratie van de verticale positie van de DGPS-antenne

De verticale positie van de DGPS-antenne dient te worden gekalibreerd ten opzichte van een vast referentiepunt op de wal.

4. Kalibratie van de geluidssnelheid

Het geluidssnelheidsprofiel kan worden gemeten met een snelheidsprobe. Deze kan worden gekalibreerd door een vergelijking met metingen met het echolood aan een ijkbalk. Voor metingen in gebieden waar de geluidssnelheid snel kan variëren (sterke gelaagdheid van temperatuur of zoutgehalte) dient dit enkele malen tijdens een survey herhaald te worden.

Het geluidssnelheidsprofiel kan gecontroleerd worden aan de hand van een vlakke bodem. Wanneer een foutief profiel is ingesteld wordt een gekromd bodemprofiel waargenomen ("jantje lacht, jantje huilt"). Een constante afwijking van de geluidssnelheid kan echter niet in alle gevallen worden vastgesteld.

Deze metingen worden niet-varend uitgevoerd en kunnen het best als eerste worden uitgevoerd. Kalibratie van de verticale posities van DGPS-antenne en echolood kunnen ook samen worden uitgevoerd door meting boven een nauwkeurig bekende bodem, zoals een meetplatform of een sluisvloer.

5. Kalibratie van het delay tussen plaatsbepaling en echolood

De afwijking wordt gemeten door de positie van een talud in de vaarrichting te bepalen voor verschillende vaarsnelheden langs dezelfde raai.

$$\Delta x = (v_2 - v_1) \Delta t$$

In Figuur 3.4.1 is een voorbeeld gegeven van de "gemeten" dieptes bij de twee raaien van deze kalibratie. Hierin is de verschuiving van het talud goed te zien.

6. Kalibratie yaw (horizontale hoek)

De afwijking wordt gemeten door de verplaatsing van een object (of talud) in de vaarrichting te meten voor twee verschillende evenwijdige raaien met gelijke vaarsnelheid.

$$\Delta x = (y_2 - y_1) \tan(\Delta \gamma)$$

Figuur 3.4.2 geeft een gemodelleerd voorbeeld van de yaw-kalibratie weer.

In het algemeen kunnen de twee raaien aan weerszijden van het object liggen, maar voor sommige typen multibeam met afzonderlijke transducenten voor bak- en stuurboord kan dit niet en dient de kalibratie dubbel te worden uitgevoerd.

7a. Kalibratie van de pitch

Hierbij wordt het verschil in helling van een talud voor twee in tegengestelde richting



gevaren raaien bepaald.

$$\Delta\theta \approx 2\Delta\beta \tan^2(\theta)$$

7b. Kalibratie van de geometrie in de vaarrichting

Hierbij wordt het verschil in de positie van een talud voor twee in tegengestelde richting gevaren raaien bepaald.

$$\Delta x = 2\Delta x_{transd}$$

Deze metingen betreffen alle een verschil in positie (of helling) in de vaarrichting en kunnen elkaar daarom beïnvloeden. Hierop wordt hieronder nader ingegaan.

8. Kalibratie van de roll

De ligging van de bodem voor twee in tegengestelde richting gevaren raaien wordt bepaald.

$$\Delta\varphi = 2\Delta\alpha$$
$$\Delta y = \frac{2z\Delta\alpha}{\cos^2\alpha}$$

In Figuur 3.4.3 is de kalibratie van de roll geïllustreerd.

9. Kalibratie van de geometrie in de dwarsscheepse richting

De afwijking in dwarsscheepse richting van de positie van een object wordt gemeten voor twee in tegengestelde richting gevaren raaien.

$$\Delta y = 2\Delta y_{transd}$$

Deze metingen betreffen een afwijking in de dwarsrichting. Het blijkt dat de kalibratiemeting voor de roll tevens een verplaatsing van een object in de dwarsrichting veroorzaakt. Daarom dient deze kalibratie bij voorkeur het eerst uitgevoerd te worden. In het algemeen zullen de kalibraties 8 en 9 gelijktijdig uitgevoerd worden, omdat het hier om een zelfde soort meting gaat.

De stappen 5 tot en met 7 bepalen een verschil in positie van een object of talud in de vaarrichting. Deze kalibratiestappen kunnen elkaar dus beïnvloeden. Dit kan op de volgende manier gebeuren:

- Bij een delay tussen plaatsbepaling en diepte, zal in de yaw-kalibratie een afwijking gevonden worden als de vaarsnelheden voor de raaien niet gelijk zijn.
- Bij een geometrie-afwijking zal voor niet-evenwijdige raaien een afwijking gevonden worden die als yaw-fout kan worden geïnterpreteerd. Dit effect is echter zeer klein.
- Een yaw-afwijking zal de kalibratie van de delay tussen plaatsbepaling en diepte beïnvloeden als deze niet langs dezelfde raai wordt gevaren.
- De geometrie-afwijking heeft vrijwel geen invloed op de delay-kalibratie.
- Een yaw-afwijking kan als geometrie-afwijking geïnterpreteerd worden als niet recht onder het schip gemeten wordt.
- Een afwijking in de delay heeft een behoorlijk effect op de geometrie-kalibratie, omdat deze kan worden beschouwd als twee lodingen met een groot snelheidsverschil (tegengestelde snelheden).



- Voor de kalibratie in de stappen 6a en 6b wordt dezelfde procedure gebruikt. Het is daarom aan te bevelen om uit deze meting zowel de pitch als de geometrie-afwijking vast te stellen.

Hoewel onderlinge beïnvloeding niet valt uit te sluiten heeft de bovenstaande volgorde van kalibraties (5 t/m 7) de voorkeur.

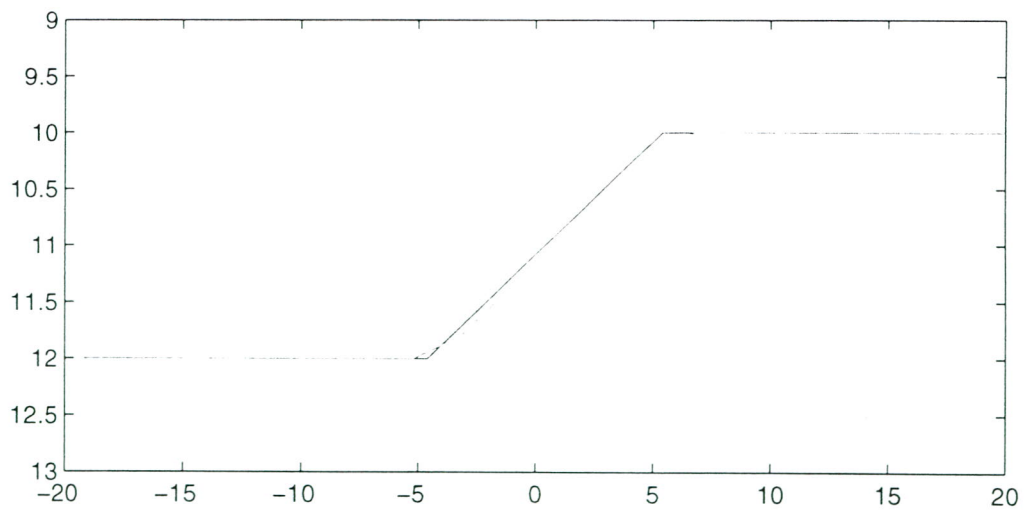
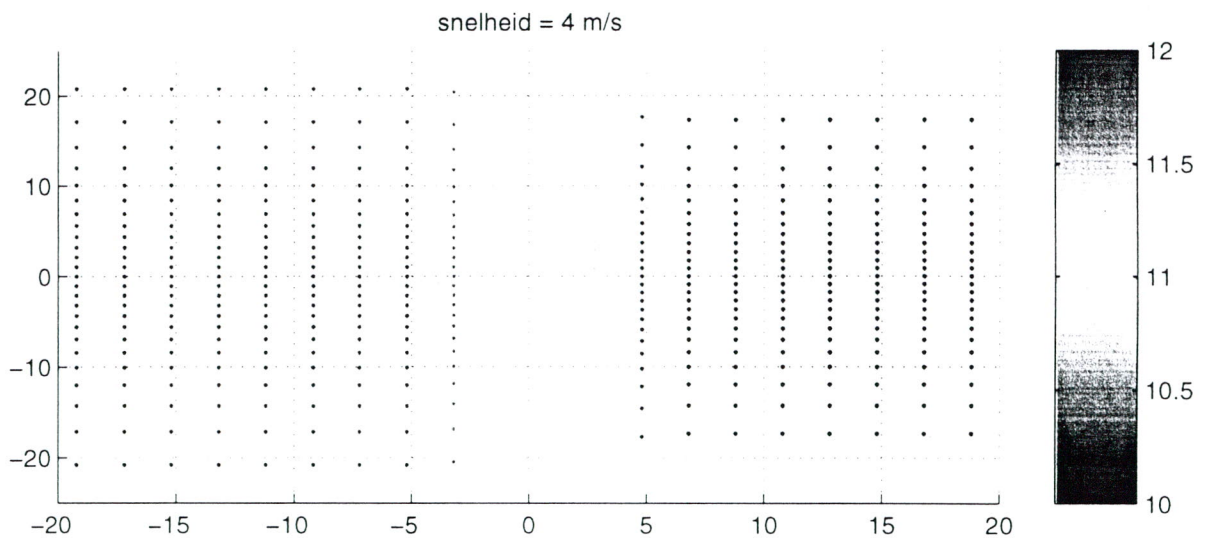
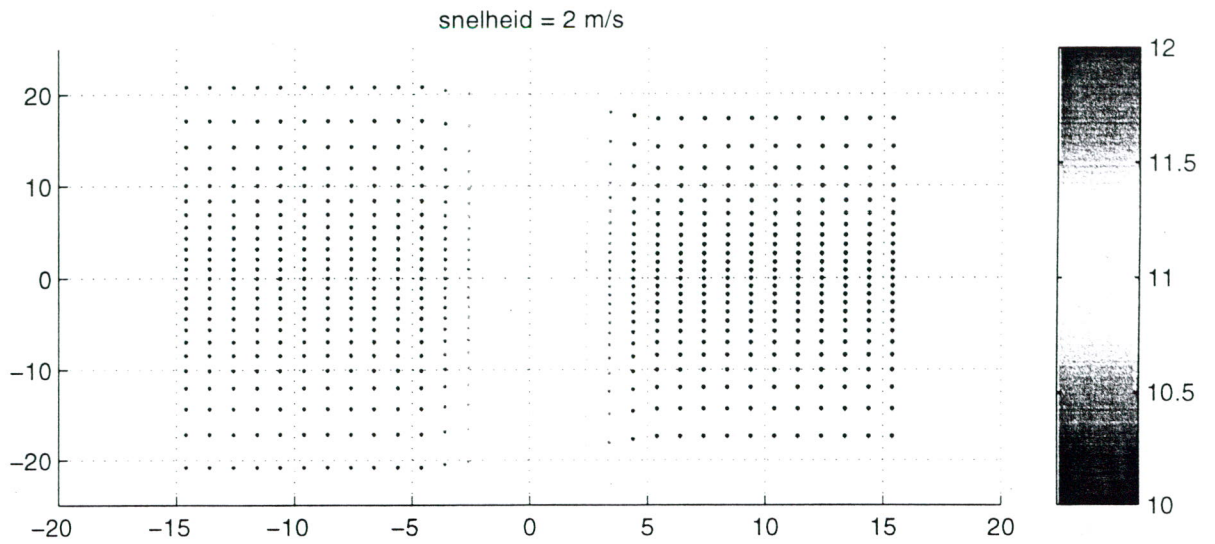
In onderstaande tabel zijn enkele realistische waarden voor de afwijkingen (na optimalisatie van de instellingen) ingevuld, die zijn ontleend aan Hare, Godin en Mayer (1995).

Afwijking in de instellingen	Gemeten afwijkingen bij kalibratie		
$\Delta t = 5 \text{ ms}$	5	delay plaatsbepaling- echolood	$\Delta x = 4 \text{ cm}$
$\Delta \alpha = 0,1^\circ$	6		$\Delta x = 2,5 \text{ cm}$
$\Delta \beta = 0,05^\circ$	7a	yaw	$\Delta \theta = 0,006^\circ$
$\Delta \gamma = 0,05^\circ$	7b	pitch	$\Delta x = 2 \text{ cm}$
$\Delta x_{\text{transd}} = 1 \text{ cm}$	8	geometrie vaarrichting	$\Delta \varphi = 0,2^\circ$
$\Delta y_{\text{transd}} = 1 \text{ cm}$		roll	$\Delta y = 3,5 \text{ cm}$
	9	geometrie dwarsscheeps	$\Delta y = 2 \text{ cm}$

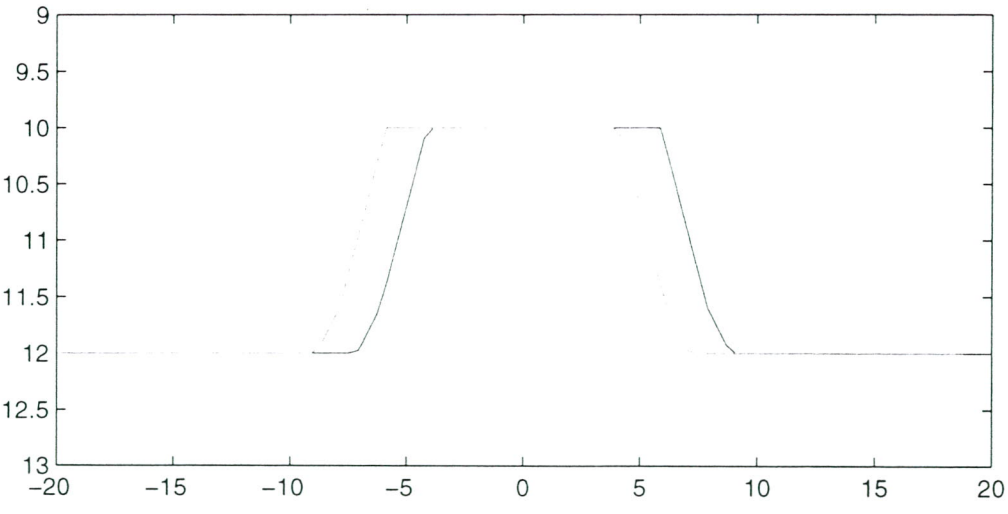
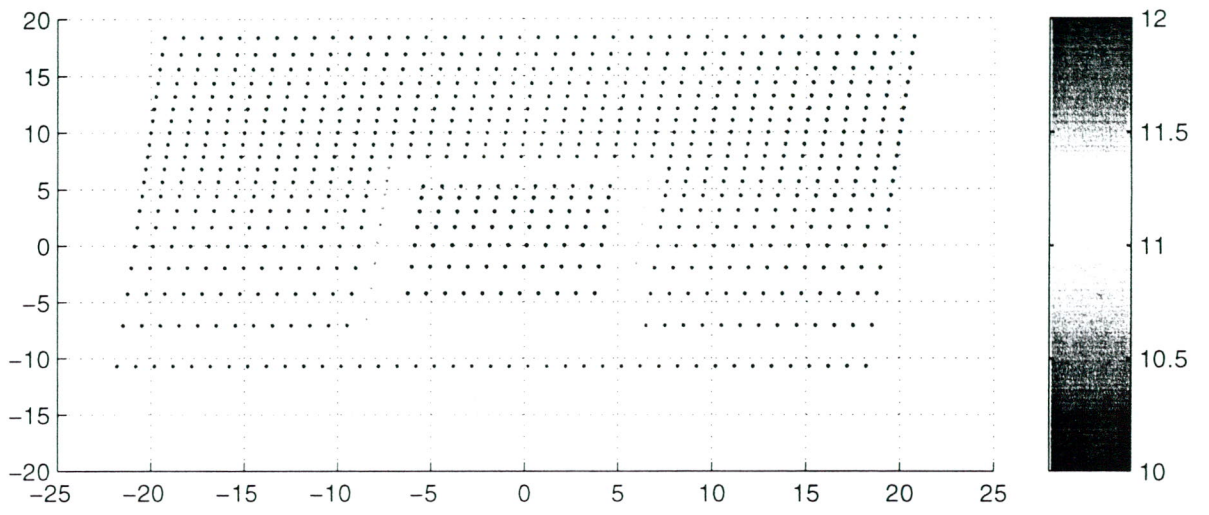
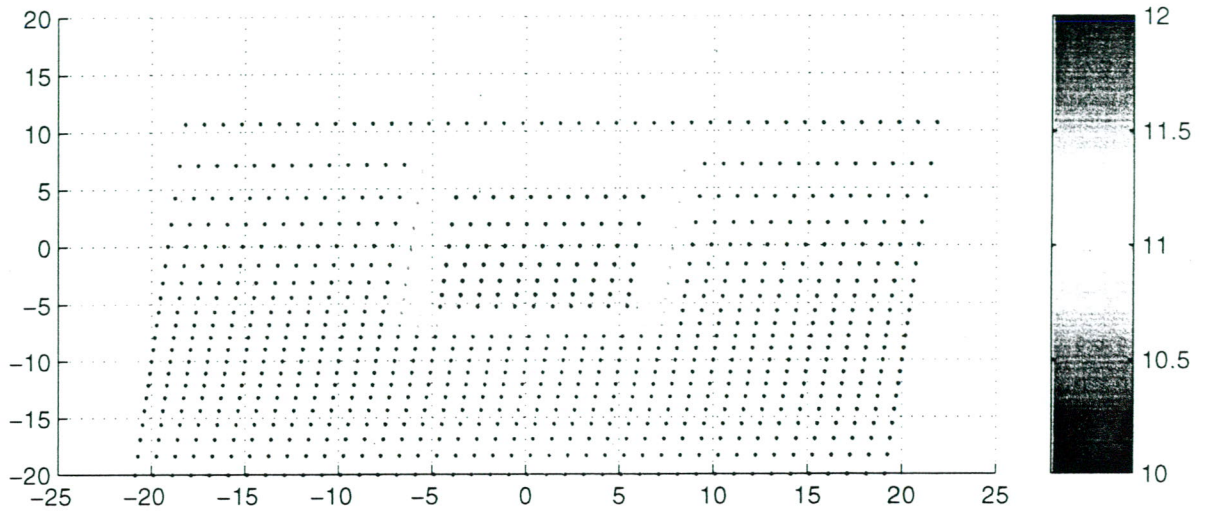
Het is in principe mogelijk de genoemde metingen onafhankelijk van elkaar uit te voeren, maar bij de toepassen van de correcties moet wel met het bovenstaande rekening gehouden worden. Door het iteratief toepassen van correcties kan altijd de juiste instelling verkregen worden.

Zoals uit de beschrijvingen van de kalibratieprocedures blijkt is het noodzakelijk dat de bodem aan bepaalde eisen voldoet. Zo is voor sommige kalibraties een vlakke bodem vereist en voor andere juist een talud.

Als de kalibratieomgeving niet voldoet kunnen bepaalde parameters niet of met minder nauwkeurigheid worden vastgesteld.

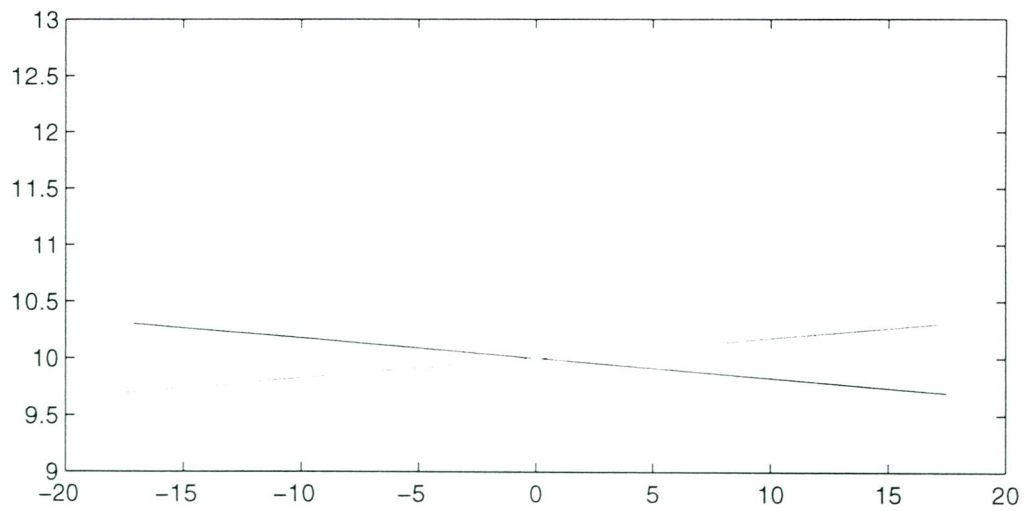
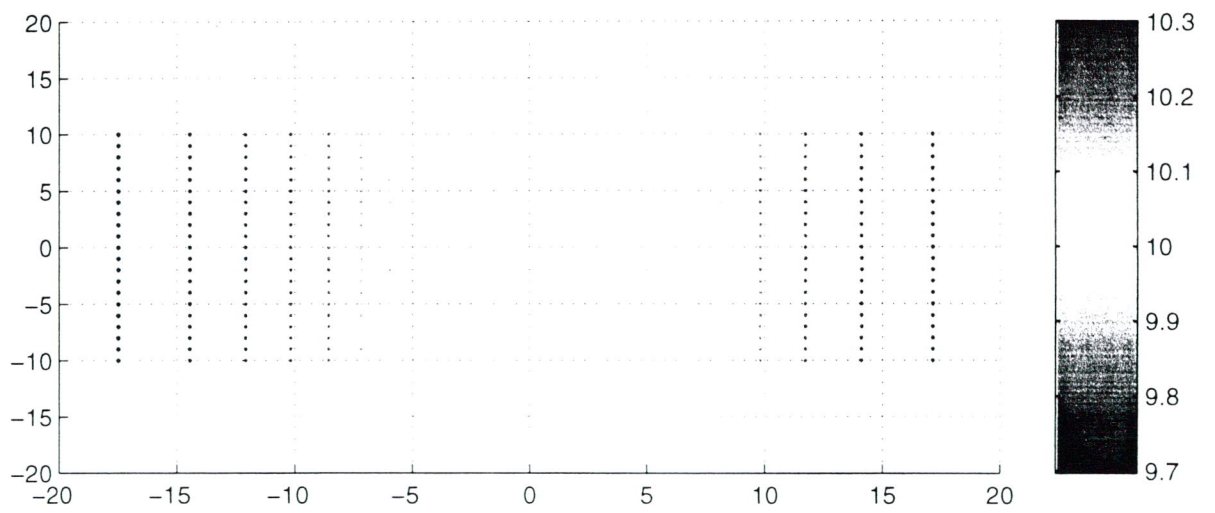
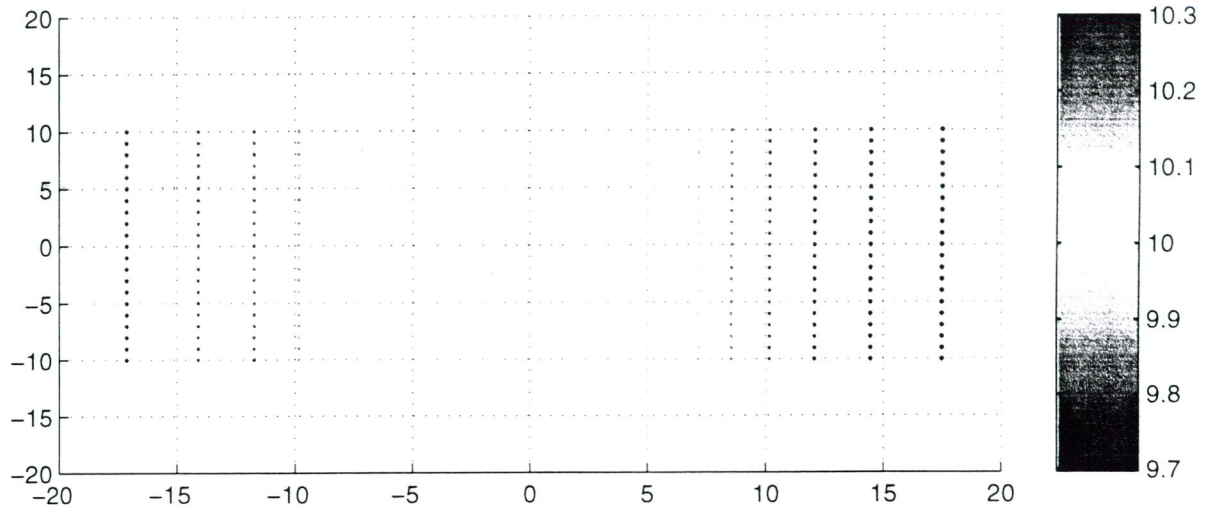


**Figuur 3.4.1: Modelling van kalibratiemeting voor delay tussen positie- en dieptemeting.**



**Figuur 3.4.2: Modelling van kalibratiemeting voor de afwijking in de yaw (horizontale hoek).**





**Figuur 3.4.3: Modelling van kalibratiemeting voor de afwijking in de roll.**

### *De controle op de installatie en de instellingen*

Een multibeam moet steeds gekalibreerd worden als de installatie wijzigt. Dit is bijvoorbeeld het geval bij montage van nieuwe sensoren of veranderingen in de stand van sensoren. Ook (belangrijke) wijzigingen in de acquisitie-software kunnen als een wijziging van de installatie beschouwd worden.

Voor de tussenliggende periodes wordt aangenomen dat de installatie van de multibeam niet verandert en dat de ingestelde parameters ongewijzigd zijn. Er moet echter wel regelmatig gecontroleerd worden of de instellingen nog steeds voldoen. Dit kan gebeuren door metingen te verrichten aan een bekende bodem. Hierbij mogen geen significante afwijkingen ten opzichte van voorgaande metingen gevonden worden.

Deze controlemetingen zijn geen kalibratie. Het is daarom niet gewenst om de instellingen steeds aan de hand van controlemetingen aan te passen. De controlemetingen zijn veel minder omslachtig dan kalibratiemetingen, maar daarom kunnen de instellingen ook niet zo nauwkeurig worden vastgesteld.

Als er afwijkingen gevonden worden die buiten vooraf vastgestelde criteria liggen, zal nagegaan moeten worden wat hiervan de oorzaak is (slecht functionerende sensoren, verloop van meetapparatuur, ...) en zal na het verhelpen van het probleem opnieuw een kalibratie gedaan moeten worden.

### *Het uitvoeren van de lodingen.*

Wanneer het systeem goed is ingemeten en gekalibreerd, kan begonnen worden met lodingen. Tijdens de lodingen dient men, afhankelijk van het gebied waarin men werkt, regelmatig een geluidssnelheidsprofiel op te nemen. Daarnaast dient men rekening te houden met zaken als:

- wordt een volledige bedekking bereikt,
- is de vaarsnelheid zodanig dat de benodigde meetdichtheid (aantal meetwaarden per m<sup>2</sup>) gehaald wordt,
- is er voldoende overlap tussen de tracks.

### *Het verwerken van de gegevens tot een DTM met de processing software.*

Zie voor meer informatie over dit stadium hetgeen hierover in Hoofdstuk 2 is vermeld.

## **3.5 Precisie van Multibeam**

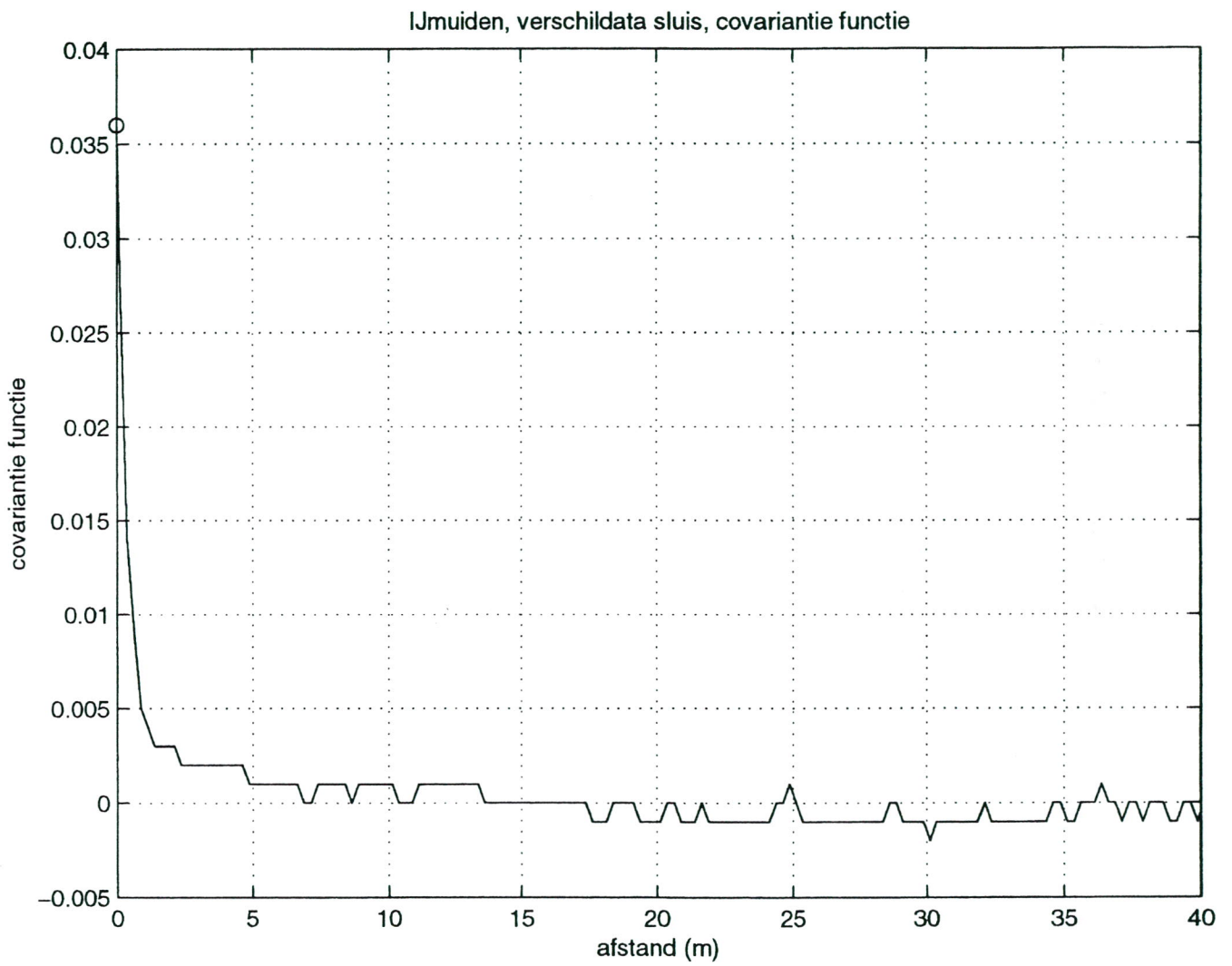
In Hoofdstuk 21 is het begrip precisie gedefinieerd. Om na te gaan wat de precisie van multibeam data is, is een multibeam dataset geëvalueerd. Het betreft hier meetresultaten die verkregen zijn met de Fansweep 20 echosounder van STN-Atlas. De data zijn afkomstig van opnamen in de sluis bij IJmuiden. Er is in deze sluis heen en weer gevaren en de evaluatie is uitgevoerd op de verschillen tussen de heen- en de terugweg.

De covariantiefunctie is bepaald volgens de beschrijving in Hoofdstuk 2. Het resultaat is afgebeeld in Figuur 3.5.1. De standaardafwijking (wortel uit de covariantie voor afstand 0) is  $\sqrt{0,036}=0,18$  m. Wanneer men bedenkt dat hier niet naar de fouten zelf gekeken wordt maar naar de verschillen van twee resultaten, dan mag men dit getal door  $\sqrt{2}$  delen om tot een schatting van de standaardafwijking van de fout te komen. Dit levert op:  $0,18/\sqrt{2}=0,13$  m. Voor grotere afstanden neem de covariantie zeer snel af tot 0,005 bij 1 m<sup>2</sup> en vervolgens tot onder de 0,001 bij een afstand vanaf 5 m of verder. De conclusie is dan ook dat de precisie van een multibeam echosounder redelijk 'ongecorreleerd' is en dus in het algemeen goed beschreven kan worden door de twee componenten puntruïsis en de systematische fout die geldt voor alle punten. Merk op dat deze laatste fout dus nooit naar voren komt in de verschillen zoals die gebruikt zijn voor de berekeningen in deze paragraaf.

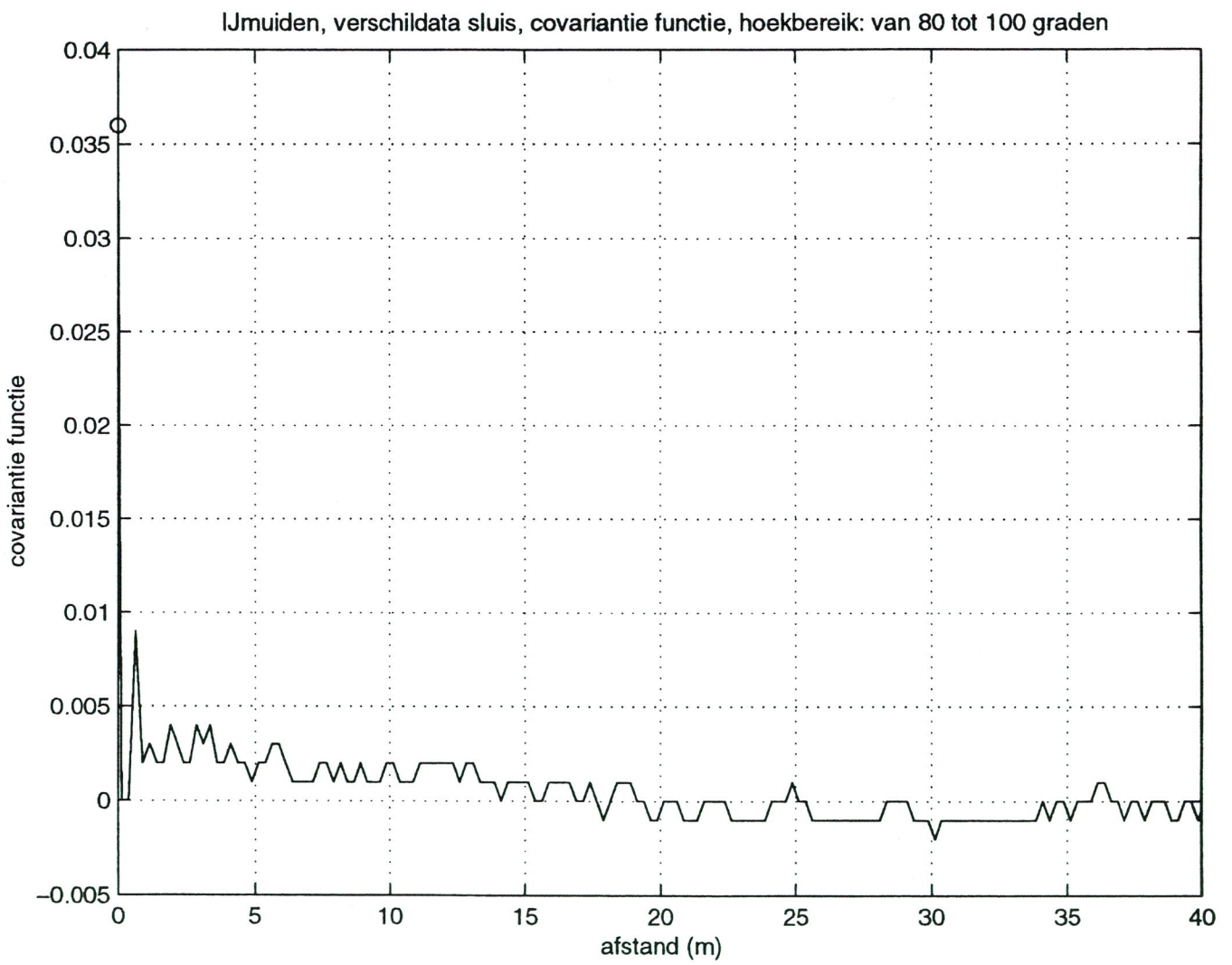
Men kan ook een richtingsafhankelijke covariantiefunctie berekenen. De verwachting is dat er bij een multibeam echosounder verschillen zullen optreden tussen de vaarrichting en de richting daar loodrecht op. Immers, in de vaarrichting zijn de meetresultaten telkens afkomstig van aparte 'fysische experimenten', terwijl de resultaten in de richting loodrecht op de vaarrichting afkomstig zijn van één ping. Men verwacht dus in deze laatste richting meer correlatie. Dat dit inderdaad zo is tonen de Figuren 3.5.2 (vaarrichting) en 3.5.3 (loodrecht op de vaarrichting). Figuur 3.5.2 vertoont grote overeenkomst met Figuur 3.5.1 waarin de covariantiefunctie voor de totale dataset is weergegeven. De covariantiefunctie voor de richting loodrecht op de vaarrichting wijkt echter duidelijk af. Hier is duidelijk sprake van correlatie tot op afstanden van zo'n 5 m.

De covariantiefunctie van de bodem speelt een rol in het interpoleren. De bodemstructuren die door multibeam systemen gemeten worden variëren enorm. Van een vlakke horizontale bodem tot de blokken van een blokkendam en steenbestortingen op een pijpleiding. Min of meer intuïtief past men automatisch de punt dichtheid van de metingen aan aan de resolutie die men wenst te behalen. Omdat de bodem in vrijwel alle gevallen met een hoge punt dichtheid bemeten wordt, en de DTM punten meestal een veel lagere dichtheid hebben, is de invloed van de bodemcovariantiefunctie in de praktijk gering.

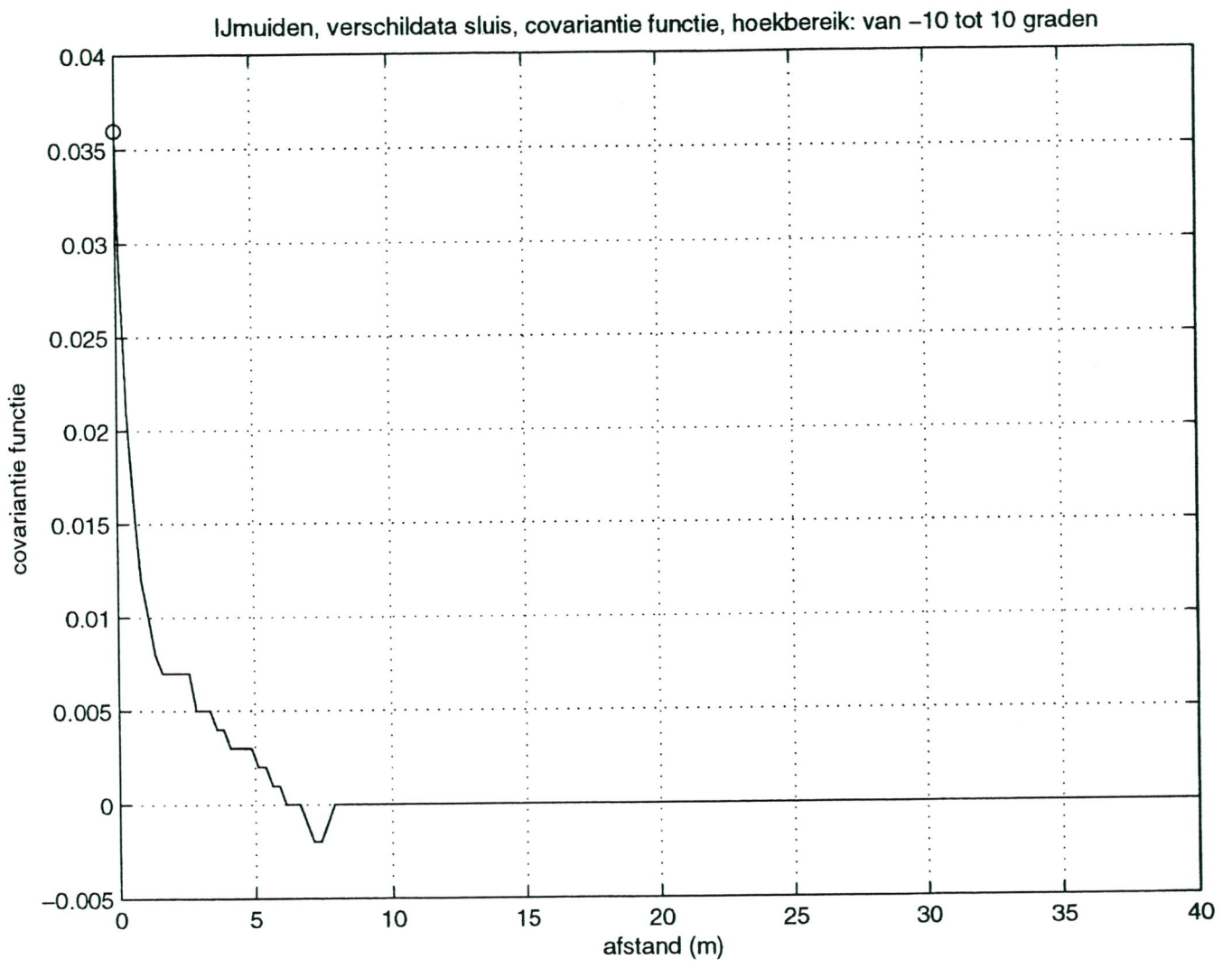




Figuur 3.5.1



Figuur 3.5.2



Figuur 3.5.3

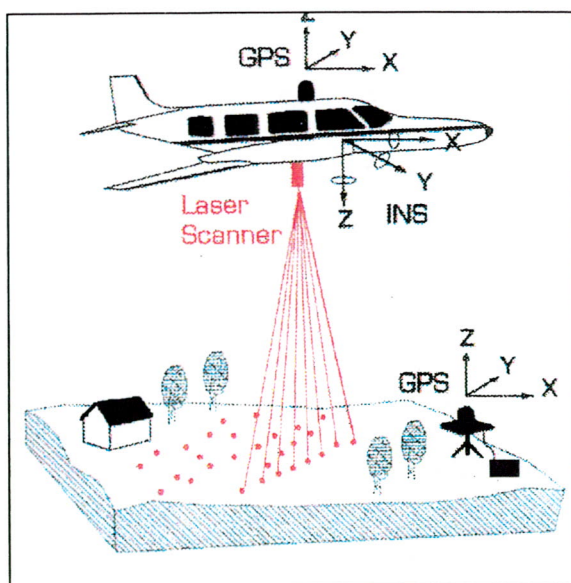


## 4 PROCEDURES EN PRECISIE VAN LASERALTIMETRIE GEGEVENS

Dit hoofdstuk beschrijft de handelingen die nodig zijn om laseraltimetrie gegevens in te winnen en te verwerken tot representatieve hoogtegegevens van het terrein. Om een goed inzicht te krijgen in de aspecten die de kwaliteit van laseraltimetriegegevens bepalen worden in paragraaf 4.1 allereerst de componenten beschreven waarop de laseraltimetriemetingen zijn gebaseerd. Vervolgens worden in paragraaf 4.2 de procedures beschreven die door de uitvoerende opdrachtnemer en de controlerende opdrachtgever worden toegepast om precieze en betrouwbare eindresultaten te bereiken bij het meten en valideren. In paragraaf 4.3 komt de precisiebeschrijving van de laserhoogtepunten aan de orde, gevolgd door een voorbeeld van de kwaliteitsbeschrijving van een laserdataset in paragraaf 4.4.

### 4.1 Principe Laseraltimetriemetingen

Bij laseraltimetrie worden aan boord van het platform (vliegtuig of helicopter) drie verschillende metingen verricht, namelijk plaatsbepaling (m.b.v. Global Positioning System), standsbepaling (m.b.v. Inertial Navigation System) en afstandsmeting tot het aardoppervlak met behulp van een laserscanner. Door meting van het tijdsverschil tussen uitgezonden en ontvangen laserpuls kan, wanneer stand en positie van het toestel nauwkeurig bekend zijn, de terreinhoogte worden berekend. Het principe van een dergelijk laser-altimetriesysteem is weergegeven in figuur 4.1.1.



*Figuur 4.1.1 Het principe van laseraltimetrie*

Laseraltimetrie vormt een multisensorsysteem: meerdere meetsystemen zijn nodig om de gewenste hoogtegegevens te leveren. Het totale meetsysteem aan boord van het vliegtuig kan opgesplitst worden in twee deelsystemen: de lasersensor en het plaatsbepalingssysteem. Deze zullen nu kort beschreven worden, zie ook Lemmens en Fortuin (1997).

#### 4.1.1 Lasersensor

De opbouw van de sensor kan gesplitst worden in twee componenten: de feitelijke sensor en de controle eenheid. De controle eenheid is fysiek gescheiden van de sensor aangebracht en kan vanuit de besturingscabine van het vliegtuig bediend worden. De sensor bestaat uit een gescheiden zend- en ontvangedeelte, waarvan de optische assen parallel uitgericht moeten zijn om de gehele gereflecteerde puls te kunnen detecteren.

**Zendcomponent:** Een laserdiode zendt met hoge frequentie (bijvoorbeeld 2000-10000 Hz) laserpulsen uit. Een spiegel gemonteerd voor de diode zorgt dat een strook loodrecht op de vliegrichting wordt bestreken. Bij heen en weer gaande spiegels wordt het terrein in zigzag-vormige stroken opgenomen. Wanneer de spiegel een volledige rotatiebeweging maakt wordt het terrein regelmatig bemonsterd.

**Ontvangstcomponent:** De ontvangstcomponent bestaat minimaal uit een optisch stelsel, een filter, een fotodiode en een tijdregistratie-eenheid. Het optisch stelsel heeft als taak om het ontvangen signaal te focuseren. De taak van het filter is om alleen licht door te laten met de door de laser gebruikte golflengte. De fotodiode zet de invallende lichtenergie om in een elektrisch signaal dat vervolgens door een versterker gaat. Alleen signalen waarvan de sterkte een gekozen drempelwaarde overschrijdt worden gebruikt voor verdere verwerking. Alles wat onder de drempelwaarde ligt wordt beschouwd als ruis. De looptijd wordt door tijdintervalmetingen bepaald. Om ervoor te zorgen dat de ondergrond wordt gemeten en niet het vegetatiedek wordt het laatste significante deel van de gereflecteerde puls geselecteerd.

#### 4.1.2 Plaatsbepalingssysteem

Het plaatsbepalingssysteem bestaat uit twee componenten: GPS om de positie van de sensor tijdens de opname te bepalen en INS om de stand te bepalen. Een integratie van beide systemen is ook mogelijk, maar wordt nog niet veel gebruikt.

**GPS:** Bij mobiele GPS ontvangers is wordt differentiële GPS-meting ten opzichte van bekende grondstations toegepast. De referentieontvangers staan opgesteld op in coördinaten bekende punten. Fouten ten gevolge van foutenbronnen als Selective Availability (SA), baanfouten van de GPS-satellieten en atmosferische invloeden kunnen bepaald worden voor het referentiestation. De waarnemingen van de mobiele ontvanger kunnen hiervoor gecorrigeerd worden.

**INS:** Inertial Navigation Systems bepalen de positie en stand van het vliegtuig in een coördinatenstelsel dat onafhankelijk is van het vliegtuig. Dit wordt gerealiseerd door



respectievelijk de versnellingsmeters die versnellingen meten langs drie onderling loodrechte assen en de gyro's die richtingen meten. Het is van groot belang dat de stand van de drie assen waarlangs de gyro's en versnellingsmeters zijn gemonteerd, constant gehouden wordt gedurende de waarnemingsperiode of dat de standsverandering gemeten wordt. Bovendien veroorzaken de rotatie en de zwaartekracht van de aarde versnellingen. Eén van de assen dient hiervoor in de noordrichting uitgelijnd te zijn.

## 4.2 Procedures bij laseraltimetrie

Deze paragraaf is geschreven vanuit de huidige RWS-praktijk. RWS is momenteel de grootste opdrachtgever in Nederland voor laseraltimetrie-inwinning. De uitvoering van de lasermetingen en de verwerking tot hoogtepunten ligt in de handen van een aannemer. In het contract van de opdrachtgever met de aannemer worden eisen gesteld met betrekking tot de precisie en puntdichtheid van de laserhoogtepunten. Om de laserhoogtepunten te kunnen valideren worden door de opdrachtgever op een aantal plaatsen referentiemetingen uitgevoerd. Het *Handboek Uitvoering Laseraltimetrieprojecten (1998)*, vormt een richtlijn voor zowel de aannemer als de opdrachtgever voor respectievelijk het uitvoeren en het valideren van laseraltimetriemetingen. Er zal nu eerst worden ingegaan op de procedures voor de aannemer en vervolgens op de procedures voor de opdrachtgever.

### 4.2.1 Procedures voor de aannemer

De aannemer voert de volgende stappen uit:

- Kalibratiemetingen,
- Referentiemetingen,
- Laseraltimetriemetingen,
- Verwerken van de metingen,
- Controleren van de metingen.

#### Kalibratiemetingen

Een deel van de mogelijke fouten die tijdens de inwinning optreden kan bepaald en gecorrigeerd worden op basis van kalibraties, zoals instrumenteffecten of atmosferische verstoringen. De kalibratie van lasersystemen wordt uitgevoerd door de aannemer waardoor een beschrijving van de kalibratiestappen vaak niet gemakkelijk beschikbaar komt. In grote lijnen echter is de kalibratie van het lasersysteem van gelijke opzet als de kalibratie van multibeamssystemen, zoals is beschreven in het vorige hoofdstuk. Het verschilt hierin dat bij laseraltimetrie de aannemer wel in RD/NAP bekende objecten (zoals gebouwen) als referentie kan gebruiken. De opdrachtgever controleert of het eindproduct voldoet aan de gestelde eisen en controleert niet op de wijze van kalibratie.

De kalibratie kan globaal worden opgedeeld in drie onderdelen. De meetssystemen worden allereerst zelfstandig in de fabriek gekalibreerd. Hiervan worden kalibratierapporten opgesteld en naar de aannemer gestuurd. De aannemer voert



vervolgens bij de inbouw van de systemen in het vliegtuig een kalibratie uit. Bij uitvoering van een nieuw project dient deze kalibratie minder dan 6 maanden geleden te zijn en na de laatste modificatie te zijn uitgevoerd. Rapporten van deze kalibratie worden op verzoek naar de opdrachtgever gestuurd. Bij deze kalibratie wordt er over velden gevlogen die gebouwen bevatten zodat de parameters ingesteld kunnen worden die zowel voor de planimetrie als voor de hoogte van belang zijn. De aannemer gebruikt hiervoor steeds dezelfde kalibratievelden. Effecten die gekalibreerd kunnen worden zijn: de *sensor-nulpuntsfout* welke ontstaat door een verschil tussen elektronisch en mechanisch nulpunt in de sensor, afwijkingen in de *schaalconstante* welke ontstaan door verandering in de brekingsindex en *pointing jitter* welke ontstaat door de miswijzing van de roterende spiegel. De derde kalibratiestap vindt tijdens het vliegen plaats met behulp van vluchten over vlakke gebieden die per projectgebied door de aannemer geselecteerd worden. Door iedere vluchtdag over deze gebieden te vliegen kan er gecorrigeerd worden voor een eventuele strooktilt, etc. De aannemer rapporteert over de uitgevoerde kalibraties aan de opdrachtgever. De opdrachtgever stelt geen eisen aan de hoeveelheid, ligging en type van de kalibratievelden.

### **Referentiemetingen**

Referentiemetingen worden uitgevoerd om de hoogte van de laserdata te kunnen valideren. Deze metingen worden tijdens de laseraltimetriemetingen gedaan en zijn gewoonlijk GPS metingen uitgevoerd op stabiele vlakke terreinen, zoals voetbalvelden en parkeerplaatsen. De referentiemetingen worden door de aannemer en de opdrachtgever onafhankelijk uitgevoerd voor de validatie van de laserdata. De aannemer rapporteert de ligging van de referentiegebieden en de resultaten van de validatie aan de opdrachtgever. De referentiemetingen worden uitgevoerd in het RD- en NAP-stelsel, waarbij voor de hoogtebepaling lokaal wordt aangesloten op nabijgelegen primaire en secundaire NAP-peilmerken.

### **Laseraltimetriemetingen**

Door de aannemer wordt een vliegplan opgesteld dat de geplande vliegstroken weergeeft en de inpassing van het netwerk van grondstations in het RD- en NAP-stelsel. Een netwerk van grondstations wordt ingericht waarvan de individuele punten deel uitmaken van het GPS-kernnet van de Rijksdriehoeksmeting of nauwkeurig ten opzichte van het GPS-kernnet zijn ingemeten. Deze moeten binnen een bepaalde afstand (ongeveer 20 km) van het vliegtuig liggen om de positie van het vliegtuig goed te kunnen bepalen. Aan de hand van het vliegplan kan de navigator in het vliegtuig de opnames sturen. Het vliegplan wordt ter goedkeuring voorgelegd aan de opdrachtgever. In het vliegplan moeten naast de geplande vliegstroken ook dwarsstroken aangegeven worden. Deze dwarsstroken worden gebruikt voor de controle door de aannemer. Over de eventuele correcties die worden uitgevoerd rapporteert de aannemer in de eindrapportage.

## **Verwerking**

Aangezien de GPS, INS en laserscanner niet gelijktijdig meten moet er een interpolatie uitgevoerd worden om de data te integreren. Posities die met GPS bepaald zijn, zijn gerelateerd aan het WGS84 coördinatenstelsel. De coördinaten worden getransformeerd van WGS84 naar het RD-stelsel. De transformatieparameters naar het RD-stelsel zijn landelijk geoptimaliseerd. Lokale transformatieparameters kan men schatten door gebruik te maken van paspunten in het RD-net. Voor de omrekening van gemeten hoogtes ten opzichte van WGS84 naar hoogtes ten opzichte van het NAP wordt gebruik gemaakt van het geoïdemodel van De Min (1996). Verdere verwerking kan bestaan uit de strookaansluiting (waar momenteel eerste ontwikkelingen plaats vinden) en filtering. De meetpunten die niet op de grond maar op de terreinelementen vallen moeten uit de dataset gefilterd worden. Hiervoor bestaan verschillende filterprocedures.

## **Controleren**

In de overlap van twee vliegstroken wordt de planimetrische ligging van beide stroken gecontroleerd. Dit kan bijvoorbeeld door hoogteprofielen van beide stroken te vergelijken. Tevens worden de dwarsstroken gebruikt voor de controle van de onderlinge ligging van de vliegstroken. Voor validatie van de hoogte worden de lasermetingen vergeleken met de metingen van de referentiegebieden. Vaak worden de referentiegebieden in de dwarsstroken gepland. Voor de vergelijking worden de laserpunten, die een hogere dichtheid hebben, geïnterpoleerd op de plaatsen van de referentiemetingen.

### **4.2.2 Procedures voor de opdrachtgever**

Bij de opdrachtgever worden de laserpunten van de aannemer gevalideerd. De laserpunten worden allereerst opgeslagen in het IDX-fileformat dat bij de Meetkundige Dienst ten behoeve van het AHN is ontwikkeld. De data wordt hierbij door middel van een quadtree-structuur op een efficiënte wijze opgeslagen. De validatie bestaat vervolgens uit twee stappen: een kwalitatieve stap (een visuele beoordeling van de laserdata) en een kwantitatieve stap (een statistische beoordeling m.b.v. referentiemetingen). De visuele controle van de hoogtepunten betreft inspectie op volledigheid van de data (volledig gebiedsdekkend zonder hiaten in de data), inspectie van mogelijke uitschieters en vergelijking met bestaande digitale bestanden i.v.m. mogelijke systematische afwijkingen van de lasergegevens. De statistische controle van de hoogtepunten heeft betrekking op punt dichtheid, systematische en willekeurige fouten in de gegevensverzameling. De controle stappen worden hieronder verder beschreven.

#### **Visuele controle**

De visuele controle van de hoogtegegevens wordt uitgevoerd door het afbeelden van de punten in het AHN-GIS, waarbij de hoogte in kleur of grijswaarde wordt gecodeerd. Er wordt gecontroleerd op de dichtheid, de no-data gebieden, de uitschieters en de filtering.



Een frequentiegrid wordt gegenereerd waarbij per cel van 10 bij 10 m<sup>2</sup> het aantal laserpunten bepaald wordt. Samen met de punt dichtheidseis (zie ook tabel 4.1) kunnen vervolgens de gebieden onderscheiden worden waar de punt dichtheid voldoende is en waar de punt dichtheid te laag is. Een lage punt dichtheid wordt geaccepteerd voor die gebieden waarvan de oppervlakten een lage reflectie van het lasersignaal vertonen (zoals wateroppervlakten), of voor die gebieden met bebouwing en ondoordringbare vegetatie waarvan de gegevens door middel van een filterprocedure zijn verwijderd uit het bestand. Hiaten of gaten in de gegevens worden niet geaccepteerd als ze ontstaan zijn als gevolg van niet aaneensluitende opnamestroken, veroorzaakt door navigatiefouten, verkeerde filtering (bijvoorbeeld het wegvallen van een dijklichaam), geen goede weersomstandigheden, hoogtij of andere omstandigheden die voorkomen hadden kunnen worden.

Uitschieters kunnen worden opgespoord door middel van visuele inspectie van zowel het puntenbestand van de aannemer als van het daaruit afgeleide DHM door de opdrachtgever. Uitschieters worden gedefinieerd als laserpunten die het terrein niet beschrijven zoals in redelijkheid kan worden aangenomen aan de hand van visuele inspectie en andere informatie die ter beschikking staat voor vergelijking.

Tenslotte kunnen de lasergegevens vergeleken worden met andere hoogtebestanden. Dit kan bijvoorbeeld door van beide bestanden profielen te genereren en deze vervolgens te vergelijken. Dit wordt onder andere bij dijklichamen gedaan. Als er geen twijfel bestaat over de juistheid en geldigheid van het tweede hoogtebestand dan kan bij duidelijke afwijking van de laserprofielen ten opzichte van de referentieprofielen dit een reden zijn om de lasergegevens af te keuren.

### **Statistische controle**

De laserpunten van de aannemer worden door RWS in AHN-GIS gevalideerd op basis van referentiemetingen van de opdrachtgever. De referentiemetingen worden uitgevoerd in het Nederlands nationaal referentiesysteem, de Rijksdriehoeksmeting (RD) en het Normaal Amsterdams Peil (NAP). De opstelpunten voor de referentiemetingen maken deel uit van hetzelfde netwerk van bekende en recentelijk gevalideerde punten dat ook gebruikt wordt door de aannemer voor de GPS referentiestations voor de laservlucht.

De vergelijking vindt puntsgewijs plaats. Door middel van interpolatie van de laserpunten zal de hoogte bepaald worden op de plaats van de referentiemetingen. Dit is de gangbare procedure aangezien het laserhoogtepuntenbestand over het algemeen een hogere punt dichtheid heeft dan de referentiemetingen. In geval er twijfel bestaat over de juistheid van deze procedure (bijvoorbeeld naar aanleiding van mogelijke interpolatiefouten) zullen de referentiemetingen geïnterpoleerd worden naar de overeenkomstige laserpunten. De laserpunten worden tevens onderling vergeleken in de langs- en dwarsoverlapgebieden. Deze vergelijking beperkt zich tot gebieden die voldoen aan bepaalde gladheidseisen aangezien anders in het verschil ook de interpolatiefout



een rol gaat spelen. De systematische fout wordt berekend door het mathematisch gemiddelde van de hoogteverschillen voor elk referentiepunt te nemen. Eventuele uitschieters worden bij de berekening uitgezonderd. Nadat de systematische fout is bepaald wordt deze afgetrokken van alle gemeten hoogteverschillen, resulterende in een verzameling van gecorrigeerde hoogteverschillen waarvan de RMS fout wordt berekend.

Bij de Meetkundige Dienst worden de volgende kwaliteitseisen aan de laserpunten gesteld, zie tabel 4.1. In de linker kolom zijn verschillende terreintypen weergegeven aangezien de kwaliteit van de lasergegevens afhankelijk is van het type en bedekking van het terrein dat wordt afgetast.

Terrein type	RMS fout	Systematische fout (=gemiddelde)	Punt dichtheid
Strand, duin en intergetijde gebied	0.15m	0.05m	1 per 4m <sup>2</sup>
Grasvelden, kort gras Harde, vlakke topografie	0.15m	0.05m	1 per 16m <sup>2</sup>
Helm vegetatie, natuurlijk grasland Gebieden met dichte struikvegetatie (zonder blad)	0.20m	0.20m	1 per 16m <sup>2</sup>
Kwelder met dichte vegetatie Gebieden met dichte struikvegetatie (in blad) Rietvegetatie Bouwland	0.20m	hoogte van de vegetatie	1 per 16m <sup>2</sup>
Bosgebieden	0.20m	+0.10m	1 per 36m <sup>2</sup>
Stedelijk gebied	n.v.t.	n.v.t.	1 per 16m <sup>2</sup>

Tabel 4.1 Eisen aan precisie en punt dichtheid

### 4.3 Kwaliteitsbeschrijving van laserdata

In deze paragraaf wordt een beschrijving gegeven van veel voorkomende meetfouten in de laserdata. Tevens wordt er een afchatting gegeven van de fouten en gekeken naar de foutenvoortplanting.

#### Kwaliteit

De kwaliteit van een product is samengesteld uit verschillende kenmerken, zoals precisie en betrouwbaarheid (zie ook *Het Kwaliteitsbegrippen handboek (1998)*). Vanwege het gebruik van referentievelden en het vliegen van dwarsstroken is de betrouwbaarheid van lasermetingen redelijk voor grote gebieden, maar zeer laag voor individuele puntmetingen. Elk punt wordt immers maar 1 keer gemeten. Blunders kunnen worden opgespoord door middel van vergelijking met buurpunten. De precisie van de lasermetingen is samengesteld uit de foutenbijdrage van meerdere foutenbronnen.

#### Precisie

De precisie van uiteindelijke laserdata hangt af van:

- De gebruikte meetsystemen, en de wijze van integratie;
- De gebruikte lasergolflengte, divergentie van de laserbundel, timingprecisie, registratieprecisie, signal-to-noise ratio van het ontvangen signaal;
- Bewegingen van het platform t.o.v. de bemonsteringsfrequentie van het INS en de gebruikte interpolatietechniek;
- Het meten vanuit de lucht: kijkrichting, platform positie, incidence hoek, invloed van de atmosfeer;
- Interactie van de laserpulsen met het aardoppervlak: de vorm van het terrein, het terreintype, de terreinhelling.

Door de vele bijdragen is het moeilijk een uniforme beschrijving van de precisie van de laserpunten te geven. Tevens is voor de evaluatie van de precisie van de laserdata een zorgvuldige selectie van referentiepunten vereist, bij voorkeur op stabiel terrein.

We kunnen aannemen dat de fouten in de uiteindelijke laserpunten als volgt kunnen worden ingedeeld:

- fouten van de individuele lasermeting zelf (aangeduid met  $\sigma_p$ ),
- constante fouten die voor laserpunten in een gebied gelijk zijn ( $\sigma_c$ ), bijvoorbeeld kalibratiefouten en
- fouten die voor groepen laserpunten gelijk zijn ( $\sigma_g$ ), bijvoorbeeld als gevolg van GPS-positiebepalingsfouten.

De totale fout van een enkel hoogtepunt in een laserdataset wordt dan beschreven door  $\sigma_{\text{tot}} = (\sigma_c^2 + \sigma_g^2 + \sigma_p^2)^{1/2}$ . Aan de hand van een voorbeeld van een laserdataset van

Groningen wordt in paragraaf 4.4 nader gekeken naar de verschillende karakters van de fouten die in een laserdataset voorkomen, en wordt ook een afschatting gedaan van de amplitudes van elk van de foutensoorten.

De Meetkundige Dienst stelt als eis voor een gebied van enkele ha, zie tabel 4.1, een systematische (gemiddelde) fout kleiner dan 5 cm (gelijk aan  $2(\sigma_c^2 + \sigma_g^2)^{1/2}$ ) en een RMS fout kleiner dan 15 cm (gelijk aan  $\sigma_p$ ).

Wat de verschillen betreft tussen lasermetingen en referentiemetingen blijkt in de praktijk dat ze gemiddeld een positieve afwijking hebben, m.n. door de invloed van de vegetatie. Voor de referentiemetingen worden de volgende aannamen gedaan: gemiddelde afwijking van 0 cm en een standaardafwijking van maximaal 5 cm. De betrouwbaarheid van de referentiemetingen is meestal goed omdat elk referentiepunt minstens twee keer wordt aangemeten. Voor de interpolatiefout tussen laser- en referentiepunten wordt een gemiddelde van 0 cm en een standaardafwijking van 5 cm aangenomen. De precisie van de interpolatie van lasermetingen is goed vanwege de grote dichtheid van de lasermetingen. De verschillen tussen de lasermetingen en de referentiemetingen komen dan maximaal op een gemiddelde van 5 cm en een standaard afwijking van  $(15^2 + 5^2 + 5^2)^{1/2} = 16,6$  cm. Bij een normale Gaussische verdeling komt 2x de standaardafwijking overeen met het 95% betrouwbaarheidsinterval: 95% van de gevonden verschillen is dus kleiner dan  $2 \times 16,6 = 33$  cm.

### **Precisie van de metingen**

Met de laserhoogtepunten wordt voor verder gebruik vaak een DTM gemaakt. Zoals in Hoofdstuk 2 is aangegeven hangt de precisie van het DTM af van een aantal aspecten, waaronder precisie van de meetpunten en de punt dichtheid in relatie tot de terreinvarianties. De fouten in de uiteindelijke meetpunten hebben de volgende oorzaken:

- fouten in de lasermetingen zelf,
- fouten in de standsbepaling,
- fouten in de positiebepaling,
- fouten in de integratie.

Elk van deze foutenbronnen zal nu kort worden toegelicht.

### **Fouten in lasermetingen**

De lasermetingen worden onder andere beïnvloed door:

- a) de precisie van de pulsdetectie;
  - b) pointing jitter.
- 
- a) De precisie van de pulsdetectie hangt af van de SNR (signaal-ruisverhouding), de variantie van de pulslengte en de variantie van de sampling frequentie:
    - Factoren die de SNR beïnvloeden zijn: Interne factoren van het lasersysteem zelf, zoals de puls intensiteit, grootte van de detector opening, divergentie van de bundel (deze beïnvloedt ook de grootte van de footprint) en de



gevoeligheid van de detector. Wanneer het zend- en ontvangend deel van de sensor niet parallel uitgericht zijn, zal de ontvanger slechts een gedeelte van de gereflecteerde energie detecteren. Dit leidt tot een geringere puntprecisie en een verlaging van de punt dichtheid. Externe factoren, zoals de doorlaatbaarheid van de atmosfeer, de reflectie eigenschappen van het terrein en de vlieghoogte (deze beïnvloedt ook de grootte van de footprint).

- De golflengte van de puls verandert gedurende de weg van het vliegtuig naar de grond. Hiervoor wordt afhankelijk van de atmosferische condities een bepaalde atmosferische correctie toegepast op de afstand.
- De sampling frequentie is de frequentie waarmee het signaal wordt lezen. Om een afstand op cm niveau te kunnen bepalen dient de tijd zeer precies bepaald te worden.

- b) De precisie van de planimetrische positiebepaling hangt voor een groot deel af van de positioneringprecisie van de scannende spiegel. De mechanische constructie van de spiegel in samenhang met vliegtuigbewegingen zorgt voor variaties in de snelheid waarmee de spiegel roteert. Instabiliteit van de spiegel veroorzaakt de pointing jitter. De invloed van de pointing jitter is afhankelijk van de terreinhelling. Het verschil tussen de mechanische componenten en de elektronische componenten wordt de nulpuntsfout genoemd, dus waar ligt de oorsprong van de afstandsmeting fysiek in de sensor.

### **Standsbepaling**

Fouten als gevolg van verkeerde oplijning en een (tijdsafhankelijke) gyrodrift van het INS systeem veroorzaken puntennauwkeurigheden die resulteren in relatief grote positionele fouten. Bij het oplijnen van het INS wordt het platform waterpas gezet (levelling) en wordt de x-as naar het noorden gericht of in een bekende relatie met het noorden gebracht (gyrocompassing).

Fouten kunnen ontstaan a.g.v. verkeerde oplijning van de INS (mis-alignment), een onzuivere versnellingsmeter, een schaalfactorfout in de versnellingsmeter, gyrodrift, meetruis in de versnellingsmeter en gyroscoop, niet-orthogonaliteit van de assen en modelleringsfouten van de zwaartekracht.

### **Positiebepaling**

De belangrijkste GPS foutenbronnen zijn baanfouten, ionosferische vertragingen, fase meerduidigheden en multipath. Troposferische fouten zijn voornamelijk het gevolg van verschillen in de afstand tussen vliegtuig en de grond. Baanfouten nemen lineair toe met de lengte van de basislijn. Bij de Meetkundige Dienst wordt momenteel een maximale afstand tot een basisstation gehanteerd van 20 km. Ionosferische vertraging kan fouten geven van dm's bij gebruik van 1 frequentie ontvangers. Fase meerduidigheden en multipath effecten zijn moeilijk te modelleren.

## Integratie

Integratie vindt plaats in tijd en in plaats. Indien de tijdregistraties niet goed gesynchroniseerd worden treedt er een systematische fout op. Voor de positionering moet de oorsprong en stand van de lasersensor, GPS ontvanger en INS onderling bekend zijn anders wordt de hoogtemeting beïnvloed. Ook vindt koppeling met het terreinstelsel plaats.

## Afschatting van de fouten

De fouten bestaan uit puntruïsbijdragen en systematische effecten (fouten die voor een aantal meetpunten gecorreleerd zijn). In tabellen 4.2 en 4.3 worden afschattingen gegeven voor de systematische en de stochastische fouten.

Foutenbron	systematisch effect
nulpuntsfout en schaalfout van de lasersensor	cm
looptijdvertraging van de laserpuls door de troposfeer	cm
fout tgv de padkromming	cm
fout tgv de terreinhelling	cm
fout tgv de aanwezigheid van de vegetatie	> 1 m, afh van de vegetatiehoogten en de filtermethode
positionerings en standfouten bij de integratie van de systemen	cm - 1 dm
synchronisatiefouten bij de integratie van de systemen	nagenoeg geen
fout in GPS positie door de ionosfeer bij 1 frequentie ontvangers en lengte van de basislijn	dm
fout in de GPS positie door het weglengteverschil in de troposfeer tussen signalen gemeten door de vliegtuig GPS ontvanger en die gemeten door het grondstation en de lengte van de basislijn	cm - 1 dm
tilt van het INS	dm- 1 m
gyrodrift van het INS	dm- 1 m

Tabel 4.2 Afschatting van foutenbronnen die systematische fouten in het uiteindelijke laserbestand veroorzaken.

Foutenbron	stochastisch effect
random fouten in de GPS metingen	cm
random fouten in de INS standbepalingen	?
pointing jitter	dm- 1 m, afhankelijk van de terreinhelling
terreinruwheid	cm- 1 dm
puls-detectie	dm
reflectiviteit van het terrein	cm- 1 dm
absorptie door de atmosfeer	cm- 1 dm, een zwakke reflectiviteit of sterke absorptie resulteert in een lage SNR en kunnen zelfs leiden tot geen waarneming.

*Tabel 4.3 Afschatting van foutenbronnen die stochastische fouten in het uiteindelijke laserbestand veroorzaken.*

#### 4.4 Precisie analyse van een laserdataset

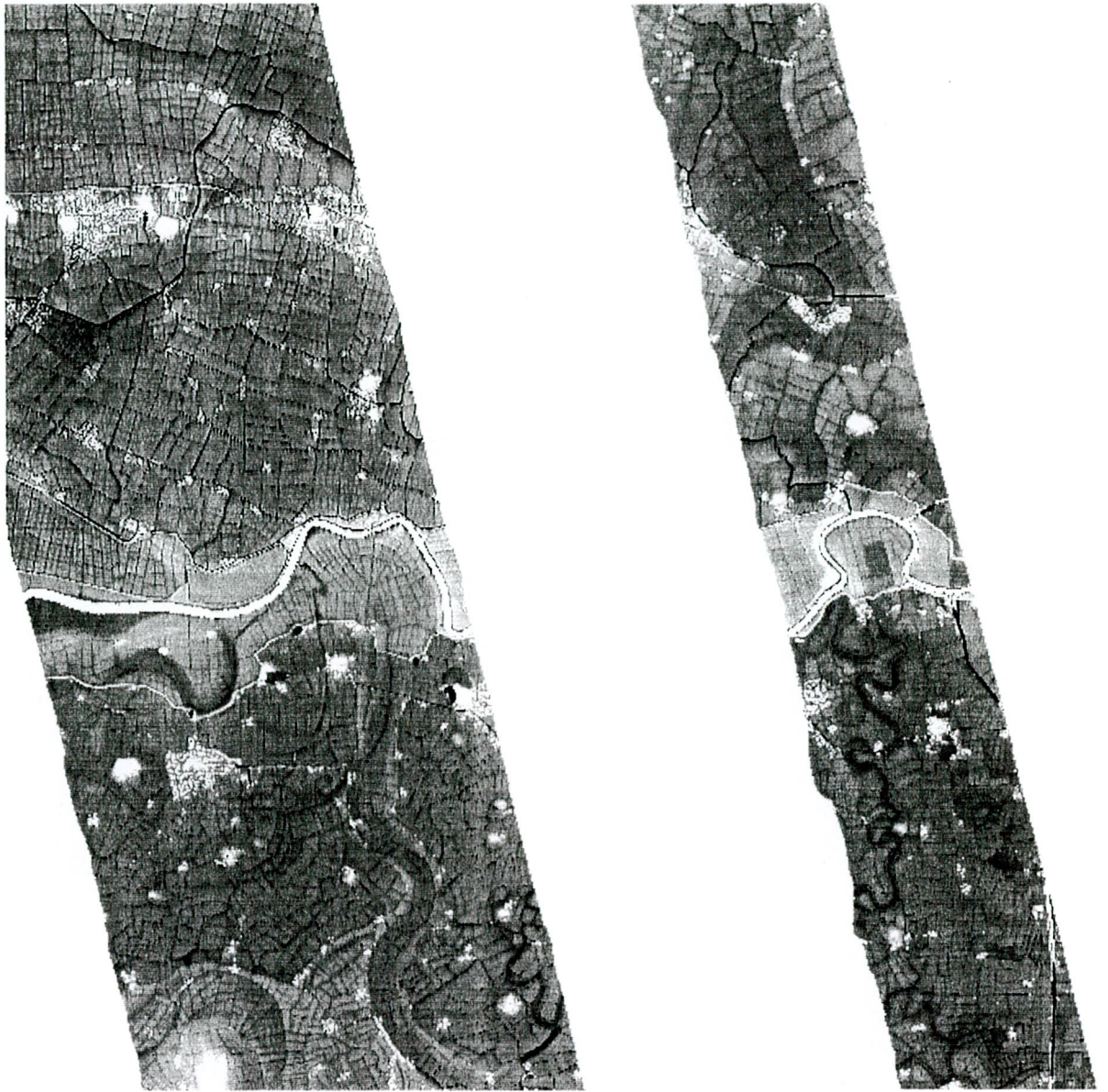
Tot op heden zijn er nog geen gedegen analyses gedaan van de fouten die voorkomen in laserhoogtepunten-datasets. Dit komt enerzijds doordat er geen grote gebieden zijn waar goede, onafhankelijk bepaalde referentiedata beschikbaar zijn, en anderzijds doordat de laserresultaten (nog) niet per aparte vliegstrook konden worden geleverd zodat er geen vergelijking van de verschillende hoogten in de overlap van twee stroken kon plaats vinden. Bij Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst lopen nu enkele projecten om voor grote gebieden wel zulke foutenanalyses te doen. Voor het LWI-project is op kleine schaal alvast een foutenanalyse op een dataset in Groningen uitgevoerd om een eerste indruk te krijgen van fouten over afstanden van enkele km's. Helaas is er geen externe referentiedataset aanwezig in de vorm van bijvoorbeeld clearcone-data. Om toch een bruikbare uitspraak over de fouten te kunnen doen zijn profielen geselecteerd in het overlapgebied van twee stroken waar de verschillen in hoogten van de ene en de andere strook kunnen worden bepaald. Deze profielen zijn ongeveer 2 km lang. Voor de profielanalyse is vervolgens het MD-programma PA (ProfielAnalyse) gebruikt.

##### Beschrijving dataset

De gebruikte dataset van Groningen bestaat uit twee deels overlappende stroken, zie figuur 4.4.1. Allereerst is het overlapgebied geselecteerd. Hierin is vervolgens het verschil bepaald van de hoogtes van beide stroken. Dit resulteerde in twee datasets: de punten van strook 2 zijn geïnterpoleerd naar die van strook 1 waarvan vervolgens het hoogteverschil is genomen ('verschil 1'), en de punten van strook 1 zijn geïnterpoleerd naar die van strook 2 waarvan het hoogteverschil is bepaald ('verschil 2'). De gebruikte interpolatie methode is nearest-neighbour interpolatie, zodat geen uitmiddeling van de puntruït optreedt. De profielen zijn 'geprikt' in het gebied van de verschildatasets. Uit



'verschil 1' zijn drie profielen geselecteerd en uit 'verschil 2' zijn twee profielen geselecteerd.



*Figuur 4.4.1* Overzicht van de gebruikte dataset van Groningen. De overlap van beide stroken resulteert in een smalle reep.

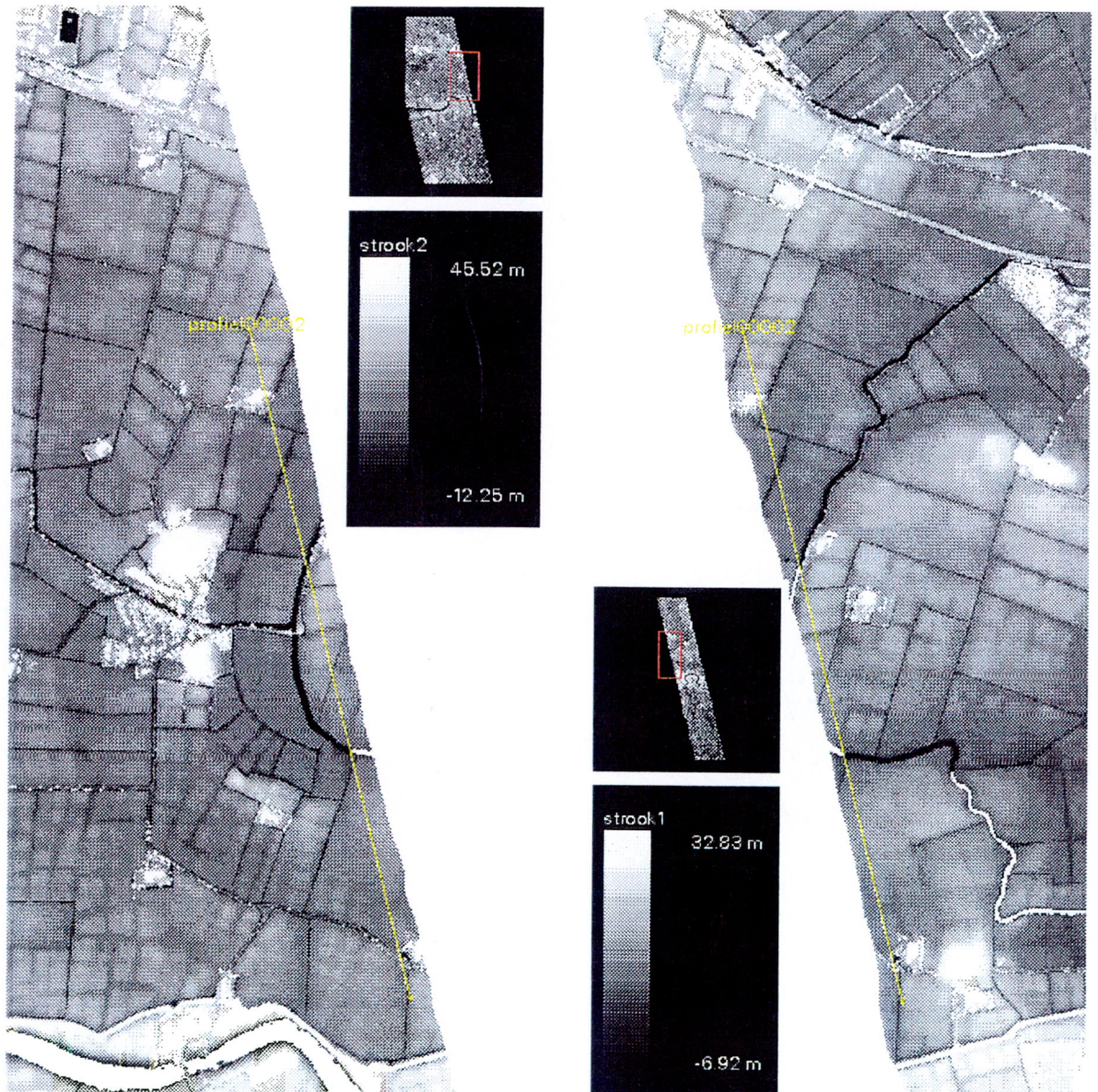
#### **Korte beschrijving PA-programma**

Files die in PA worden ingelezen bevatten een kolom met de afstand langs het profiel en een kolom met de hoogteverschillen langs het profiel. Vervolgens worden verschillende analyse stappen na elkaar uitgevoerd op de hoogteverschillen van het profiel zoals bijvoorbeeld een offsetbepaling, een tiltbepaling, een Fourier-analyse en het bepalen van een empirische covariantiefunctie van residuen langs het profiel.



## Beschrijving resultaten

Van de vijf profielen zijn de uitkomsten in tabel 4.4 weergegeven. Aangezien het een klein proefgebiedje betreft mogen deze uitkomsten alleen als indicatief worden gezien en zal er in de toekomst voor meerdere datasets zulke analyses worden gedaan. Van één profiel, afgebeeld in figuur 4.4.2, zijn de resultaten van de analyse stappen uitgebreider weergegeven wat te zien is in figuur 4.4.3 tot en met 4.4.6.



Figuur 4.4.2 Ligging van profiel 2 in beide stroken

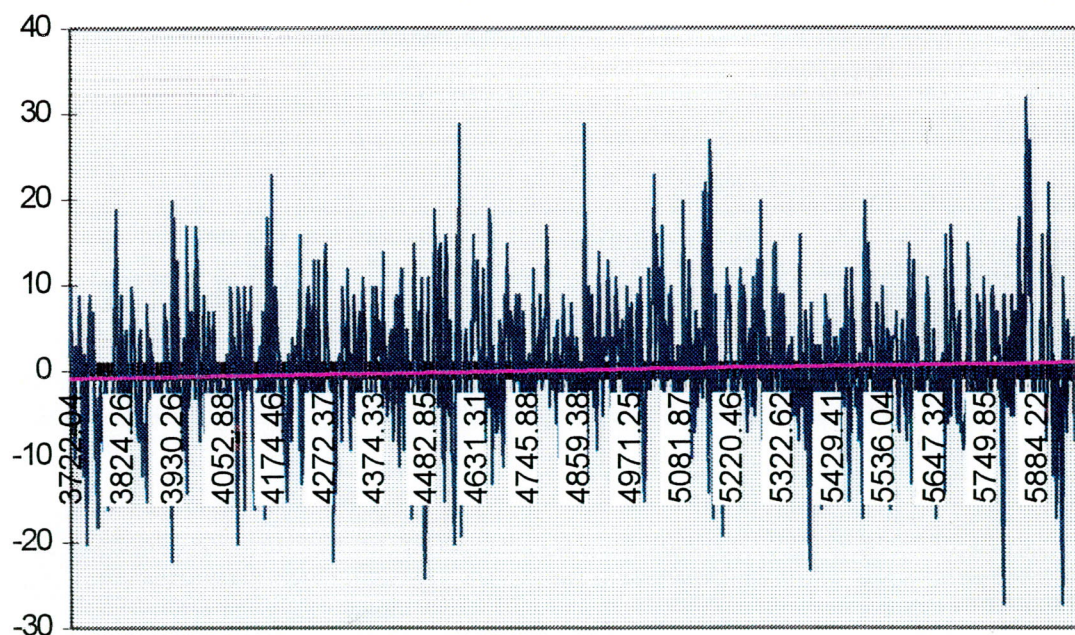
We zullen voor profiel 2 de foutenanalyse die is uitgevoerd beschrijven, met  $dh$  als hoogteverschil en  $x$  als afstand langs het profiel. Het profiel 2 bestaat uit 1000 punten, overeenkomend met een totale profiellengte van 2313 meter. We stellen vooraf de conditie dat  $-1.5 \text{ m} < dh < 1.5 \text{ m}$  om blunders te verwijderen, en daarmee vallen er 7 punten uit. Met de conditie dat de onderlinge afstand van punten in profielrichting  $> 0.4 \text{ m}$  moet zijn vallen er nog eens 35 punten uit. Er blijken nog een paar pieken (uitschieters)



in de verschilwaarden langs het profiel te zitten die met kruis-validatie zijn opgespoord. Uiteindelijk is de verdere profiel analyse met 918 punten uitgevoerd. De blunders die er tot nu toe zijn uitgehaald kunnen zijn ontstaan door de aanwezigheid van objecten en topografie. Dit maakt het mogelijk dat interpolatie van de data uit de ene strook naar punten in de andere strook niet goed kan plaats vinden en grote blunders veroorzaakt. De bestanden die we in Groningen beschikbaar hebben met de data per aparte vliegstrook waren niet gefilterd voor objecten zoals gebouwen e.d.

De analyse die nu wordt uitgevoerd heeft als doel te beschrijven uit welke soort karakteristieke onderdelen de verschilwaarden (en dus de fouten) langs het profiel zijn samengesteld. Om dit te bereiken zijn de volgende stappen gedaan:

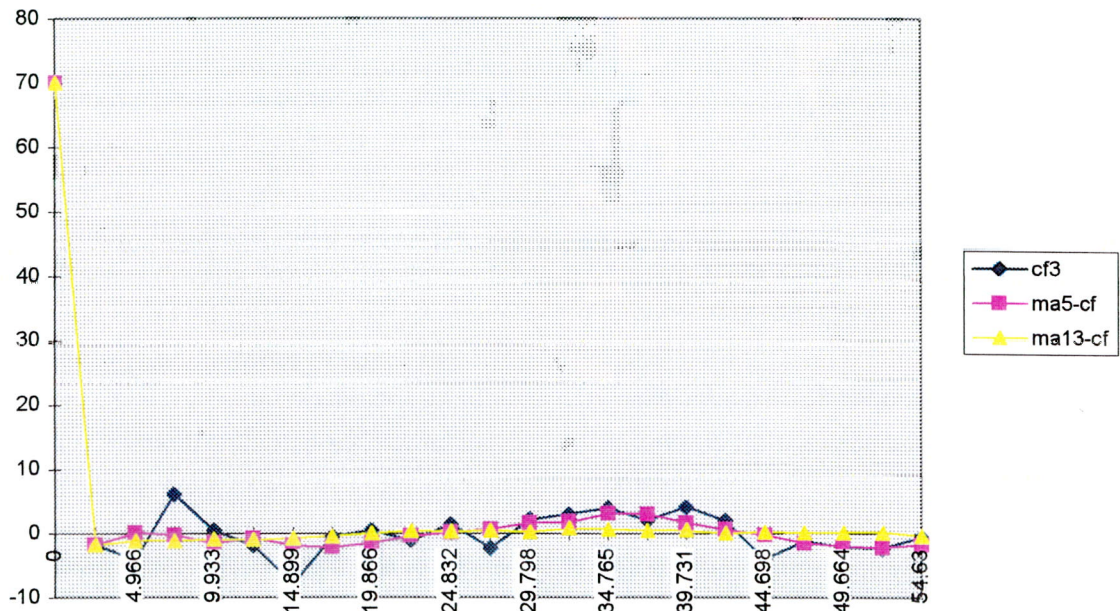
- Bepaling van het gemiddelde verschil (de offset). Per vliegstrook kan door de GPS-initialisatie een bepaalde fout worden verkregen die constant is voor de hele strook. Dit geeft een offset in de verschillen. Voor profiel 2 vinden we een gemiddeld verschil van 19,2 cm.
- Een tilt: Het INS-systeem heeft een kleine drift in de tijd en dus in vliegrichting. In de verschillen in hoogten in de strookrichting mag dus ook een tilt worden verwacht. De bepaalde tilt voor profiel 2 is 0,8 cm/km. Deze is verwijderd uit de hoogteverschillen in PA. Figuur 4.4.3 geeft de tilt weer en laat de residuen zien.
- De statistieken van de onderlinge puntafstanden langs het profiel zijn: minimale afstand van 0.4 m en maximale afstand van 36.11 m. De mediaanwaarde is 1.29 m en gemiddelde afstand tussen opeenvolgende punten is 2.48 m.
- De standaardafwijking van de residue hoogteverschillen  $d_h$  na verwijdering van het gemiddelde en de tilt 8.4 cm.



Figuur 4.4.3 Bepaling tilt met op de x-as de afstand en de y-as het hoogteverschil in cm.



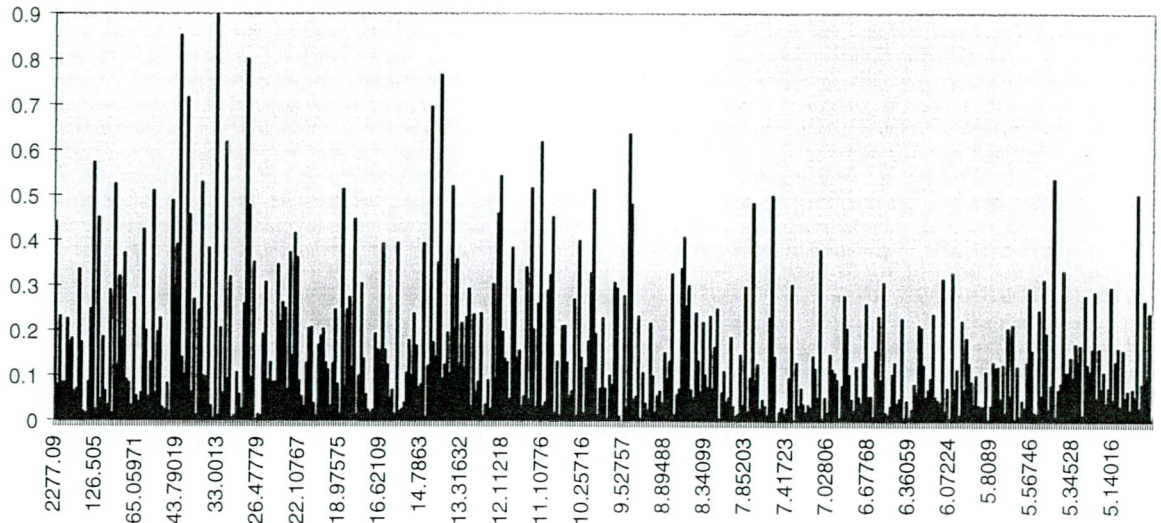
Van deze residuen is de empirische covariantiefunctie berekend. Zoals in Hoofdstuk 2 is uitgelegd laat de covariantiefunctie zien in welke mate signaalwaarden die op een bepaalde afstand van elkaar liggen gecorreleerd zijn. Van de residuen die we over hebben is het interessant om te bekijken of ze een puur random-gedrag hebben (puntruis), of dat de resterende verschillen nog met elkaar gecorreleerd zijn tot een bepaalde afstand. Van de covariantiefunctie die berekend is wordt het beginstuk voor korte afstanden afgebeeld in figuur 4.4.4.



*Figuur 4.4.4 Covariantiefunctie van de residuen, met de afstand in meter en de covariantiewaarden in  $\text{cm}^2$ .*

De figuur laat de berekeningsresultaten zien (onder cf3) en twee functies die een ge'smooth'te versie zijn daarvan, respectievelijk moving-average waarden over 5 en 13 (buur)punten. De variantiewaarde  $C(0)$  is  $70.07 \text{ cm}^2$ . De standaardafwijking is dus  $\sqrt{C(0)} = 8.37 \text{ cm}$ . Uit de moving-average functie voor afstanden tot zo'n 40 meter zien we covarianties van ongeveer  $(\sqrt{4} = 2 \text{ cm})^2$ . Deze systematiek kan worden veroorzaakt door de GPS-plaatsbepaling waarbij ongeveer elke 80 meter een nieuw meetpunt wordt ingewonnen. De resterende puntruis na aftrek van de systematiek is dan gelijk aan ongeveer 8 cm.

Als equivalent van de covariantiefunctie kunnen we ook een Fourier powerspectrum berekenen. Hierin kunnen frequenties worden herkend waarop meer dan gemiddeld signaal voorkomt. Het Fourier powerspectrum van de residuen is afgebeeld in figuur 4.4.5.

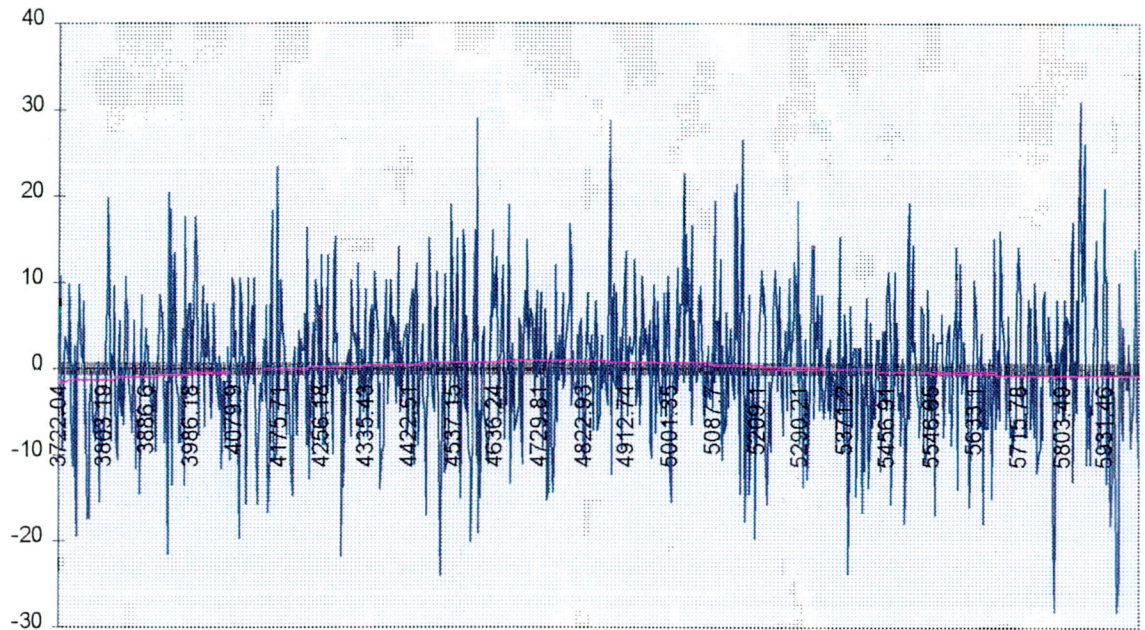


*Figuur 4.4.5 Fourier spectrum met op de x-as de golflengte in m en op de y-as de variantie in  $\text{cm}^2$ .*

Er is te zien dat er geen witte-ruis spectrum is, maar dat op een aantal frequenties extra signaal aanwezig is. Deze liggen verspreid van ongeveer 40 meter tot 5 meter golflengte. De puntruis van 8 cm geeft bij dit voorbeeld met 459 powerspectrumcoëfficiënten een witte-ruis nivo van ongeveer  $66/459 = 0.144 \text{ cm}^2$ . In het spectrum is te zien dat afwijkende pieken voorkomen op golflengten van 27 tot 42 meter en rond 14 meter.

Voor de langste golflengten die voorkomen bij dit profiel zien we een amplitude van ongeveer  $0.44 \text{ cm}^2$ , hetgeen aanmerkelijk meer is dan het witte-ruis nivo. Deze lange golflengten kunnen we uit het residu signaal verwijderen door bijvoorbeeld een  $4^{\text{e}}$  graadspolynoom te schatten, zie figuur 4.4.6.





Figuur 4.4.6 Bepaling van de langgolvlige effecten met een 4<sup>e</sup> orde polynoom.

De coëfficiënten van deze polynoomschatting zijn klein t.o.v. de standaardafwijkingen en zijn niet significant. Er zijn dus geen aantoonbare, langgolvlige resteffecten aanwezig.

Concluderend kan voor profiel 2 het volgende gezegd worden:

- Allereerst dienen de blunders en andere significante uitschieters uit de dataset verwijderd te worden om verstoring van de verdere resultaten te voorkomen.
- De offset is 19.2 cm.
- De tilt is 0.8 cm per km lengte.
- Verdere langgolvlige effecten zijn niet aantoonbaar aanwezig.
- $C(0)$  is  $69.62 \text{ cm}^2$  en dus  $\sigma = 8.34 \text{ cm}$ .
- Er is een systematische fout van ongeveer 2 cm voor afstanden tot 40 meter en de puntruis is ruim 8 cm.

In de volgende tabel zijn de resultaten voor alle 5 profielen weergegeven. De analyse heeft op dezelfde manier plaatsgevonden zoals voor profiel 2 is beschreven.

	Profiel 1	Profiel 2	Profiel 3	Profiel 4	Profiel 5
aantal punten origineel	1000	1000	1000	936	1058
aantal uitgedunde punten	792	918	918	867	968
afstand (m)	2005	2313	2422	2006	2302
min afstand (m)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
max afstand (m)	32.6	36.1	38.1	38.1	46.2
gemiddelde h (cm)	25.5	19.2	9.8	-26.0	-19.1
RMS (cm)	26.9	21.0	12.5	27.2	20.7
tilt (cm/km)	0.6	0.8	1.1	0.1	-0.4
C(0) (cm <sup>2</sup> )	73.8	70.1	58.7	64.8	61.7
rms (cm)	8.6	8.4	7.7	8.5	7.9
systematiek (tot 40 meter)	4.4	2.0	3.8	3.6	1.4
puntruï (cm)	7.4	8.1	6.7	7.2	7.7

Tabel 4.4: Resultaten van de profielanalyse van de vijf profielen.

De resultaten van de 5 profielen zijn ingedeeld in de profielen 1-3 en 4-5. De profielen 1-3 zijn berekend als het verschil van strook 1 minus strook 2 en hebben daardoor een tegengesteld teken bij het gemiddelde t.o.v. profiel 4-5 die van het verschil zijn van strook 2 minus strook 1. Aangezien de ligging van profiel 1 overeenkomt met 4 en de ligging van profiel 2 met 5 zullen de resultaten hiervan ook min of meer moeten overeenkomen. Het blijkt echter dat de resultaten van de profielen 4 en 5 net iets beter zijn dan van de profielen 1 en 2. Dit wordt vermoedelijk veroorzaakt doordat er een ander aantal punten is waarop een verschilwaarde is bepaald via interpolatie.

We zien verder uit de tabel dat er voor stukken strook van 2 km offset-fouten van enkele dm kunnen voorkomen en hellingen in vliegrichting van een cm per km. Wanneer deze worden verwijderd resteert nog een systematische fout voor gebieden in een strook van meerdere tientallen meters (tot zo'n 100 meter) en een puntruï van 7-8 cm. Wanneer we dit weer uitdrukken in de 3 componenten die eerder zijn geïntroduceerd wordt dat:

- fouten per hoogtepunt  $\sigma_p = 8$  cm;
- fouten die voor groepen laserpunten binnen 100 meter gelijk zijn  $\sigma_g = 2$  cm;
- constante fouten die voor laserpunten in een gebied/vliegstrook gelijk zijn  $\sigma_c = 10$  cm.

Het is duidelijk dat deze laatste fout een zeer grote invloed heeft op de precisie van bijvoorbeeld volumes, en dus zal moeten worden verbeterd. Dit zou misschien kunnen worden bereikt door verscherping van de kalibratieprocedures. Anderzijds kan door gebruik te maken van de overlap van verschillende vliegstroken de constante fout per strook worden bepaald en gecorrigeerd. Hieraan wordt door Rijkswaterstaat sinds kort onderzoek gedaan met veelbelovende eerste resultaten. Er moet echter ook worden vermeld dat de 5 voorbeeldprofielen in dit rapport slechts een eerste voorbeeld zijn van laseraltimetrie-foutenanalyse en dat met name de grote systematische fouten niet



representatief zijn voor laseraltimetriehetresultaten in het algemeen. De 2 cm systematiek binnen gebieden van 100 meter lijkt wel realistisch en past ook bij wat bekend is over GPS-precisie. En de puntruus van 7-8 cm is beter dan wat werd verwacht. De specificatie van de meeste leveranciers voor de puntruus is 15 cm.

## 5 DITALE TERRENMODELLEN MET KWALITEITSMATEN OPSLAAN IN EEN GIS

Binnen het project LWI-3D rivieren wordt gekeken naar het opslaan van DTM's en de daarbij behorende kwaliteitslabels in een GIS-omgeving. Als kwaliteitskenmerk dat in het GIS wordt opgeslagen wordt de in Hoofdstuk 2 beschreven foutencovariantiefunctie gebruikt. Voor de implementatie is gebruik gemaakt van het softwarepakket ArcView<sup>1</sup> op PC met het uitbreidingspakket SpatialAnalyst.

In paragraaf 5.1 is beschreven hoe de gegevens van het DTM en van de kwaliteitslabels in het GIS worden opgeslagen. Een belangrijk onderdeel van het toevoegen van kwaliteitslabels in een GIS is het visualiseren van deze gegevens. Hiervoor is geen standaard methode beschikbaar. Daarom is een tweetal methodes van visualisatie geïmplementeerd, die in paragraaf 5.2 worden beschreven. Dit zijn een directe grafiek van de covariantiefunctie als functie van de verschilafstand en een (ruis)realisatie die voldoet aan de opgeslagen covariantiefunctie. In paragraaf 5.3 wordt deze laatste methode theoretisch onderbouwd. In paragraaf 5.4 tenslotte worden enkele implementatieaspecten belicht.

### 5.1 Dataopslag in het GIS

Een DTM is in de meest algemene zin een digitaal bestand, waarin de hoogtes en/of dieptes als functie van de plaats voor een bepaald gebied zijn aangegeven. De meest algemene vorm van een DTM is een verzameling punten, waarvoor de XYZ-coördinaten zijn gegeven. Deze gegevens worden verkregen door metingen, zoals laseraltimetrie om terreinhoogtes te bepalen en echoloding om waterdieptes vast te stellen. Op deze metingen kunnen eventueel bewerkingen zijn uitgevoerd. Er kan dus een onderscheid worden gemaakt tussen verschillende soorten gegevensbestanden:

a. ruwe data

Op deze data zijn zo min mogelijk bewerkingen uitgevoerd. Er wordt wel van uitgegaan dat correcties voor de bewegingssensoren zijn uitgevoerd en tevens kunnen blunders uit de data zijn verwijderd (blunders zijn evident foutieve metingen). Ruwe data bevat meetpunten die onregelmatig verdeeld zijn over het oppervlak. Verder heeft de data een hoge dichtheid.

b. gereduceerde ruwe data

Deze data heeft een datareductie ten opzichte van de ruwe data ondergaan. Het doel van datareductie is vooral om de gegevens tot praktisch hanteerbare hoeveelheden terug te brengen. In het algemeen is het niet mogelijk om de ruwe data uit de gereduceerde data te reconstrueren, zodat de statistische eigenschappen van gereduceerde data anders zijn dan van de ruwe data. Binnen van tevoren vastgestelde nauwkeurigheden

---

<sup>1</sup> ArcView is een geregistreerd handelsmerk van Environmental Systems Research Institute, Inc.



moet de gereduceerde data het DTM kunnen beschrijven. Binnen dit rapport zal niet verder op het onderwerp datareductie worden ingegaan. Voor meer informatie over datareductie wordt verwezen naar Bottelier (1998).

c. gegridde data

Voor veel toepassingen is het nodig dat de Z-data beschikbaar is op een regelmatig rechthoekig XY-rooster. Voor dit type data is het in principe niet meer noodzakelijk om de XY-coördinaten te geven, maar kan volstaan worden met slechts enkele parameters van het rooster.

Figuur 5.1.1 illustreert een DTM van gegeridde data. Dit DTM bevat ruim 300,000 punten (gridafstand 0,5 x 0,5 m).

Het voordeel van een GIS-omgeving is de mogelijkheid om geografische informatie te visualiseren en om informatie van verschillende bronnen (bijv. echoloding en laseraltimetrie) bij elkaar te brengen. Over het algemeen heeft een GIS weinig functionaliteit om bewerkingen op de data uit te voeren. Wel is het mogelijk om door middel van toegevoegde functionaliteit zelf deze mogelijkheden te programmeren. In veel gevallen is het beter bewerkingen, zoals het genereren van een regelmatig grid en het bepalen van de covariantiefuncties buiten het GIS uit te voeren met softwarepakketten (of eigen software) die speciaal voor dit doel ontwikkeld zijn.

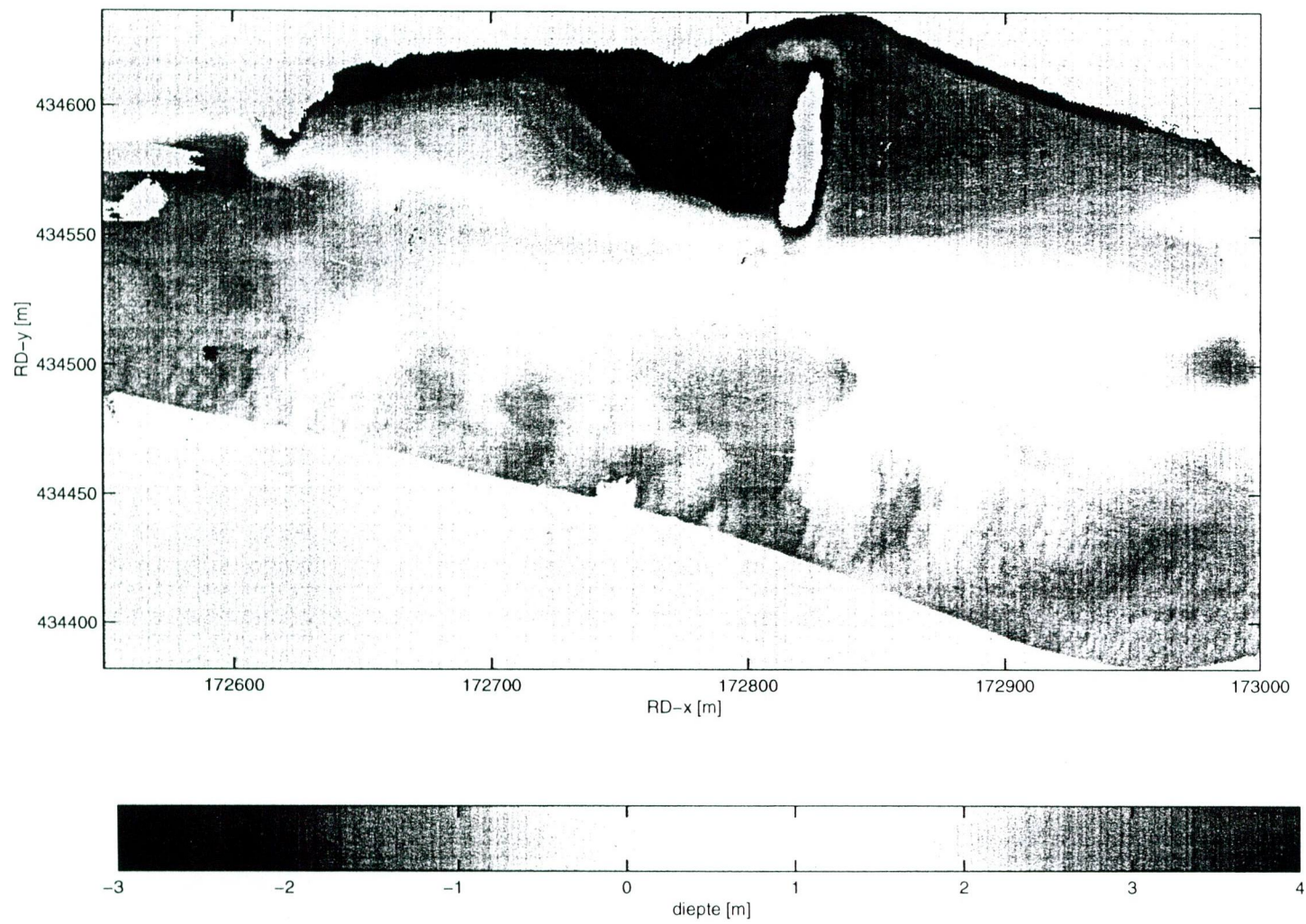
Het invoeren van ruwe databestanden (XYZ-waardes) in een GIS-omgeving is mogelijk, maar er zijn beperkingen, die vooral worden veroorzaakt door de hoeveelheid datapunten. De implementatie van onregelmatig verdeelde datapunten in het GIS is door van ieder punt een object in de GIS-omgeving te maken. Hierdoor wordt het systeem erg traag en verder worden bij een selectie tegelijk zeer veel punten geselecteerd.

Voor gegeridde data bestaat de mogelijkheid binnen ArcView een module toe te voegen, SpatialAnalyst, die manipulatie van grids toestaat. Grids kunnen eenvoudig als enkel object in het GIS behandeld worden zonder dat dit de werking van het systeem benadeelt. Bij de implementatie is daarom van deze extra functionaliteit gebruik gemaakt.

Indien alle ruwe datapunten in het GIS beschikbaar moeten zijn verdient het aanbeveling om als extra "laag" in het GIS ook een gegeridde dataset te plaatsen.

De foutencovariantiefunctie wordt in het GIS opgeslagen met de volgende kenmerken:

- een tabel die de functie beschrijft, bestaande uit twee kolommen met respectievelijk de verschilafstand en de waarde van de functie;
- een veelhoek die het gebied beschrijft waarin de covariantiefunctie geldig is. Het is zo mogelijk om het gebied op te delen in een aantal kleinere gebieden met verschillende covariantiefuncties.



*Figuur 5.1.1: Voorbeeld van een DTM van een Achterloopse krib bij Ochten. Dit DTM bevat gegridde data (bron: RWS Directie Oost Nederland).*



## 5.2 Visualisatie van foutencovariantiefunctie

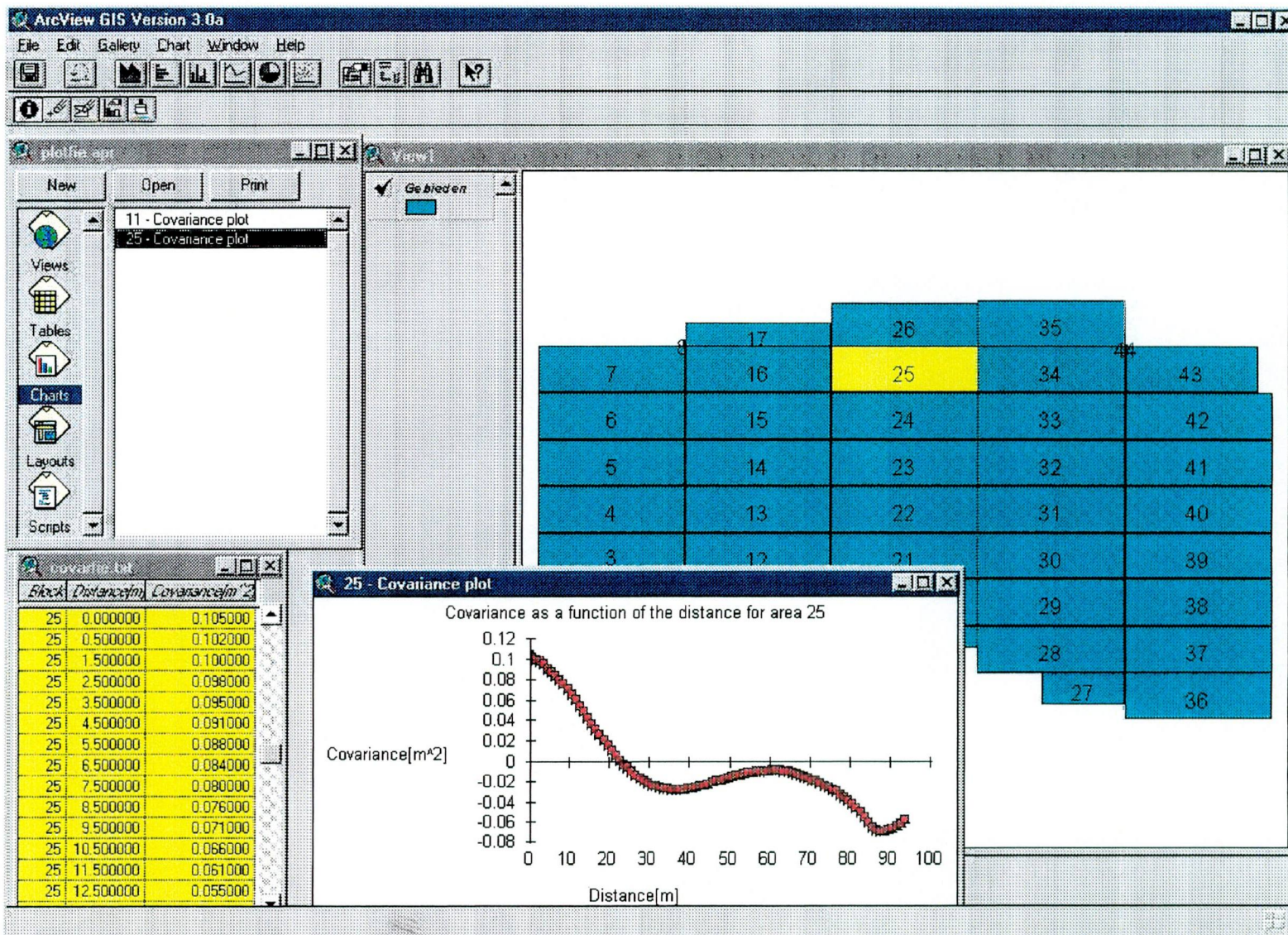
De foutencovariantiefuncties, die in het GIS zijn opgeslagen, kunnen op twee manieren worden gevisualiseerd. Ten eerste kan een grafiek van de foutencovariantiefunctie worden afgebeeld. Hierin staat langs de horizontale as de verschilafstand en langs de verticale as de waarde van de functie uit. Figuur 5.2.1 geeft een voorbeeld van het scherm van ArcView. Het gebied is opgedeeld in een aantal kleinere (rechthoekige) gebieden. Voor ieder van deze kleinere gebieden is een covariantiefunctie in een tabel in het GIS opgeslagen. Bij selectie van een gebiedje kan de covariantiefunctie zichtbaar gemaakt worden in een apart venster. In de figuur is dit venster voor gebiedje nummer 25 zichtbaar. Tevens worden de waardes van de covariantiefunctie die betrekking hebben op het gebiedje in de tabel geel gekleurd. In Hoofdstuk 2 wordt uitgebreid ingegaan op de betekenis van de covariantiefunctie, maar voor de meeste gebruikers is de covariantiefunctie in deze vorm moeilijk te interpreteren.

Een tweede visualisatie van de covariantiefunctie geeft voor een bepaald gebiedje een realisatie weer van ruis die voldoet aan de gegeven covariantiefunctie. Dit betekent dat indien van de ruis die gemodelleerd wordt de covariantiefunctie bepaald zou worden deze gelijk zal zijn aan de functie die is opgeslagen in het GIS. In paragraaf 5.3 is een theoretische beschrijving gegeven van het algoritme dat wordt gebruikt om de realisatie te berekenen. In figuur 5.2.2 is een afbeelding van het scherm van ArcView weergegeven, waarin voor het gebiedje waarvoor de realisatie is berekend.

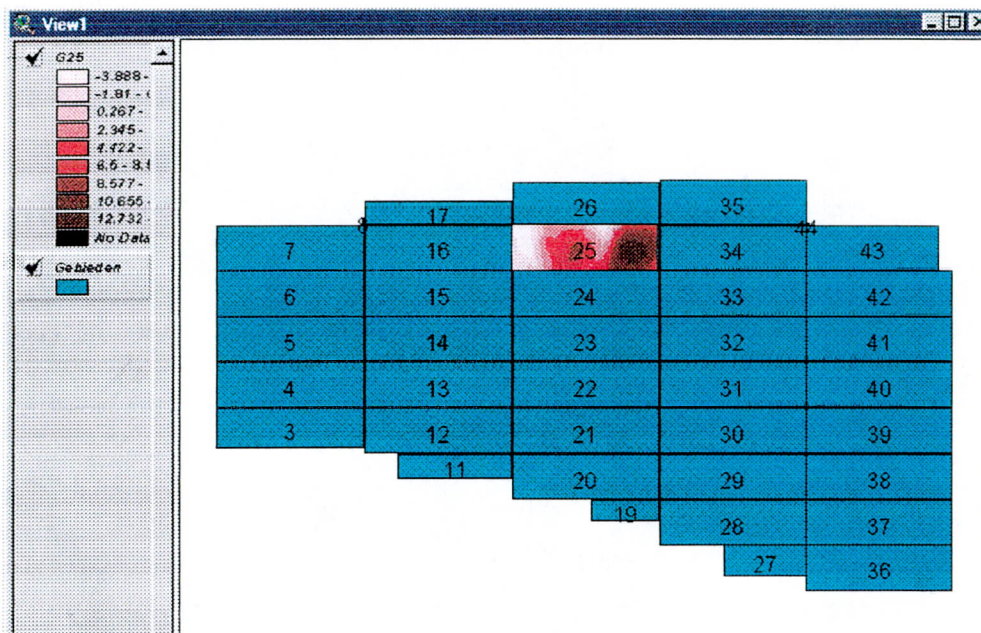
Men zou op deze manier bijvoorbeeld tien verschillende realisaties kunnen bekijken (en hun verschillen). Dat geeft dan een goede indruk van wat binnen de (meet)precisie de mogelijke verschillen tussen echte bodem en metingen kunnen zijn. Zo krijgt de gebruiker een goed idee van wat zijn GIS-kaart werkelijk voor waarde heeft.



Figuur 5.2.1: Voorbeeld van opslag van covariantiefunctie in het GIS. De functie behorend bij gebiedje nummer 25 is afgebeeld.







Figuur 5.2.2: Voorbeeld van realisatie van covariantiefunctie in het GIS.

### 5.3 Modelling covariantiefuncties

De covariantiefunctie  $D(s)$  wordt gebruikt om de ruimtelijke correlatie van de meetfouten te beschrijven. Om de interpretatie van de covariantiefunctie te vereenvoudigen is een algoritme ontwikkeld om voor een gegeven  $D(s)$ -functie één of meerdere realisaties van de ruis te genereren, die aan deze covariantiefunctie voldoen. Het algoritme kan gezien worden als een zeer specifieke ruisgenerator. Een tweede toepassing is gelegen in het genereren van gegevens om andere (nog te ontwikkelen) procedures te testen.

In dit hoofdstuk wordt het principe van het algoritme nader toegelicht. Allereerst zal het principe worden uitgelegd aan de hand van de één-dimensionale covariantiefunctie, waarna de uitbreiding naar de twee-dimensionale covariantiefunctie wordt besproken.

Eerste zullen enkele eigenschappen van de covariantiefunctie in het algemeen  $c(s)$  worden afgeleid, waarna dieper ingegaan wordt op het modelleren volgens een gegeven ruiscovariantiefunctie  $D(s)$ .

De covariantiefunctie  $c(s)$  van een signaal  $z(x)$  kan gedefinieerd worden als:

$$(5.1) \quad c(s) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - \bar{z}][z(x_i + s) - \bar{z}]$$

waarin  $s$  de verschilafstand,  
 $\bar{z}$  de gemiddelde functiewaarde

Deze formulering van de covariantiefunctie komt bij een groot aantal punten overeen met de definitie die in Hoofdstuk 2 is geïntroduceerd. Voor het afleiden van het modelleringsalgoritme is de bovenstaande definitie echter beter geschikt. Ten behoeve

van een eenvoudiger notatie gaan we er in het vervolg van uit dat de gemiddelde functiewaarde nul is of dat daarvoor al gecorrigeerd is.

Het signaal  $z(x)$  duidt op een bodemdiepte, zodat  $c(s)$  de signaalcovariantiefunctie is.

Indien als signaal de meetfout wordt gebruikt, wordt in formule 5.1 de foutencovariantiefunctie gegeven.

Deze schatter komt overeen met een autocorrelatie van het signaal  $z(x)$ . Derhalve mag in het frequentiedomein de covariantiefunctie geschreven worden als

$$(5.2) \quad C(k_x) = Z(k_x)Z^*(k_x) = |Z(k_x)|^2$$

met 
$$Z(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x)e^{ik_x x} dx \quad (\text{de spatiële Fourier transformatie}).$$

In het intermezzo op pagina 96 worden enkele eigenschappen van de Fouriertransformatie in relatie tot convolutie en correlatie gegeven.

Het doel van de modellering is om een signaal te vinden dat als covariantiefunctie een voorgeschreven functie  $D(s)$  heeft. Dit kan worden bereikt door normaal verdeelde witte ruis (met standaard afwijking 1),  $n(x)$ , in het frequentiedomein te vermenigvuldigen volgens,

$$(5.3) \quad \hat{N}(k_x) = \sqrt{D(k_x)} \cdot N(k_x)$$

waarbij, 
$$D(k_x) = \int_{-\infty}^{\infty} D(s)e^{ik_x s} ds$$

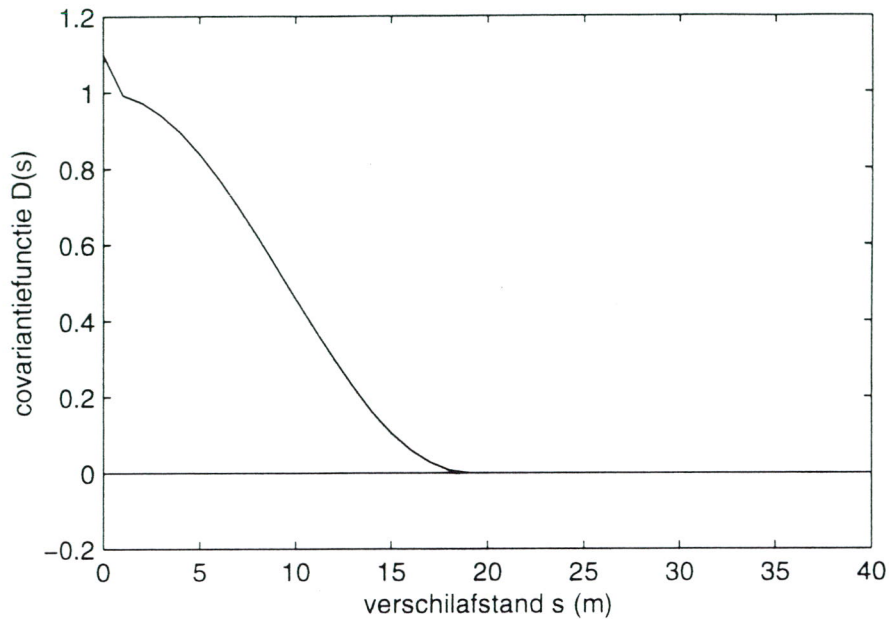
Formule 5.3 kan alleen worden uitgerekend als  $D(k_x)$  positief en reëel is. Dit komt overeen met de eis dat de covariantiefunctie positief definitief is.

Het signaal  $\hat{n}(x)$  heeft na terugtransformatie de gewenste eigenschappen zoals blijkt bij invulling in formule 5.2. Door gebruik te maken van de eigenschappen van de convolutie, formule (I.4) zie het intermezzo op pagina 96, kan 5.3 geïmplementeerd worden als een convolutie van normaal verdeelde witte ruis met de filterfunctie,

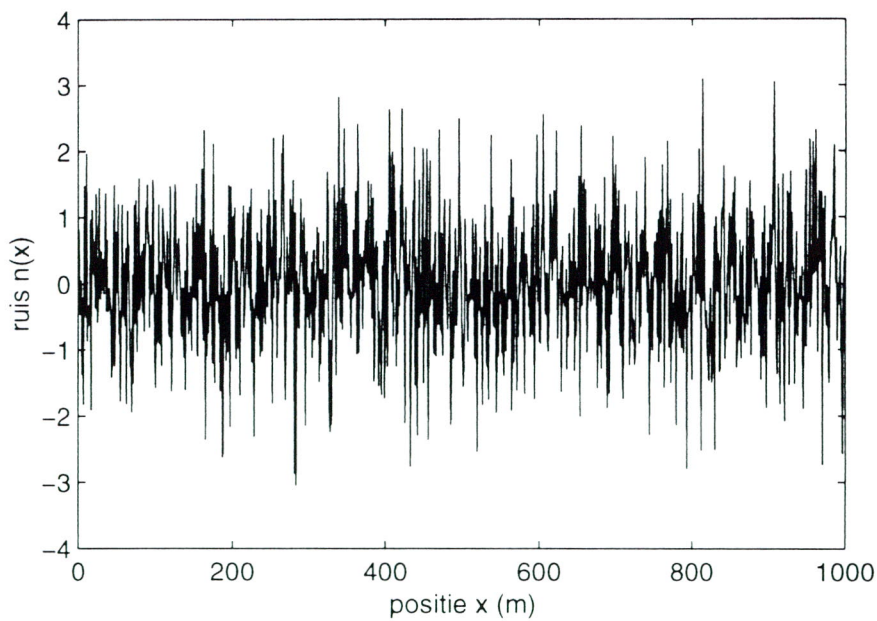
$$(5.4) \quad d_{1/2}(x) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sqrt{D(k_x)} \right\}$$

Ter illustratie wordt ruis gegenereerd voor de covariantiefunctie die is afgebeeld in figuur 5.3.1. In deze covariantiefunctie is duidelijk de bijdrage van de puntruis te zien.



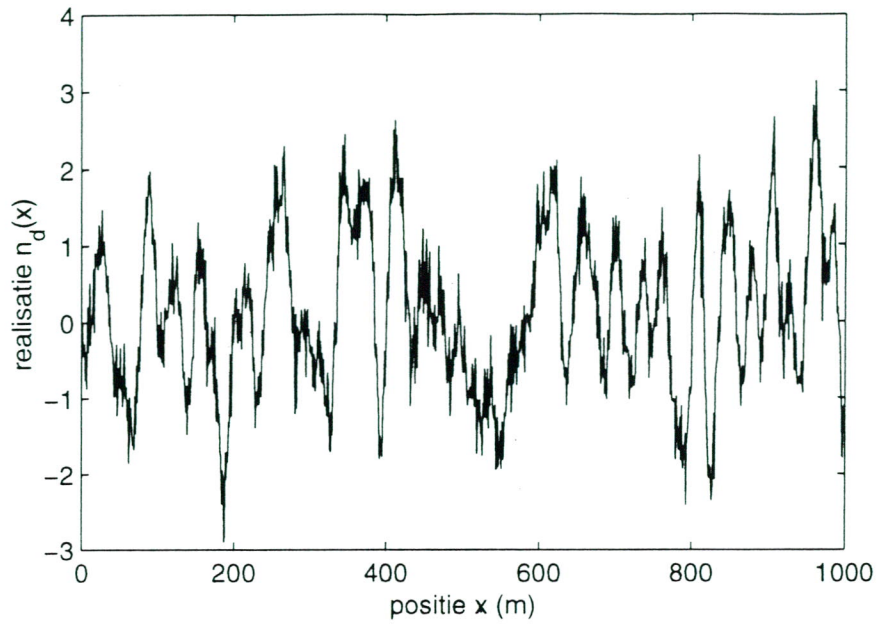


Figuur 5.3.1: Gewenste covariantiefunctie.

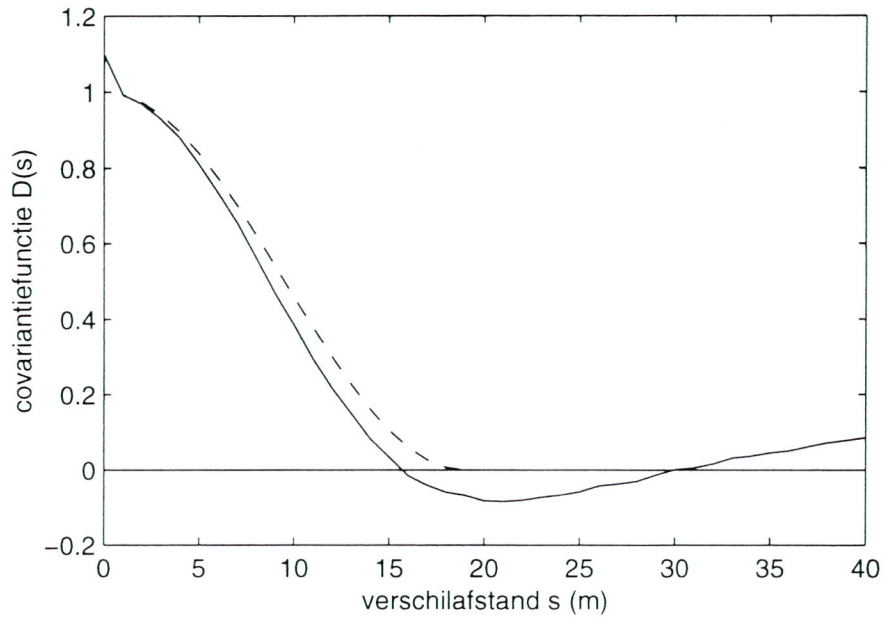


Figuur 5.3.2: Witte-ruis-realizatie die gebruikt is voor de modellering.

In de figuur 5.3.2 is de witte ruis weergegeven, waarmee geconvolueerd is om de gewenste ruis-realizatie te verkrijgen. Dit resultaat is weergegeven in figuur 5.3.3. De gewenste en de berekende covariantiefuncties zijn weergegeven in figuur 5.3.4.



Figuur 5.3.3: Gemodelleerde ruis met behulp van het beschreven algoritme.



Figuur 5.3.4: De berekende covariantiefunctie uit de data van figuur 5.3.3 (getrokken lijn) vergeleken met de gewenste covariantiefunctie (gestreepte lijn).



Voor twee dimensies wordt globaal dezelfde benadering gekozen. De covariantiefunctie van een signaal  $z(x,y)$  is gedefinieerd als:

$$(5.5) \quad c(s_x, s_y) = c(s = \sqrt{s_x^2 + s_y^2}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z(x_i, y_i) z(x_i + s_x, y_i + s_y)$$

Hierin is de covariantiefunctie alleen afhankelijk van de onderlinge afstand tussen twee punten en niet van de richting. Dit betekent dat de covariantiefunctie in het  $xy$ -vlak cirkelsymmetrisch is.

De covariantiefunctie komt voor regelmatig gesampelde data overeen met een autocorrelatie van het signaal  $z(x,y)$ . Derhalve mag in het frequentiedomein de covariantiefunctie geschreven worden als,

$$(5.6) \quad C(k_x, k_y) = Z(k_x, k_y) Z^*(k_x, k_y) = |Z(k_x, k_y)|^2$$

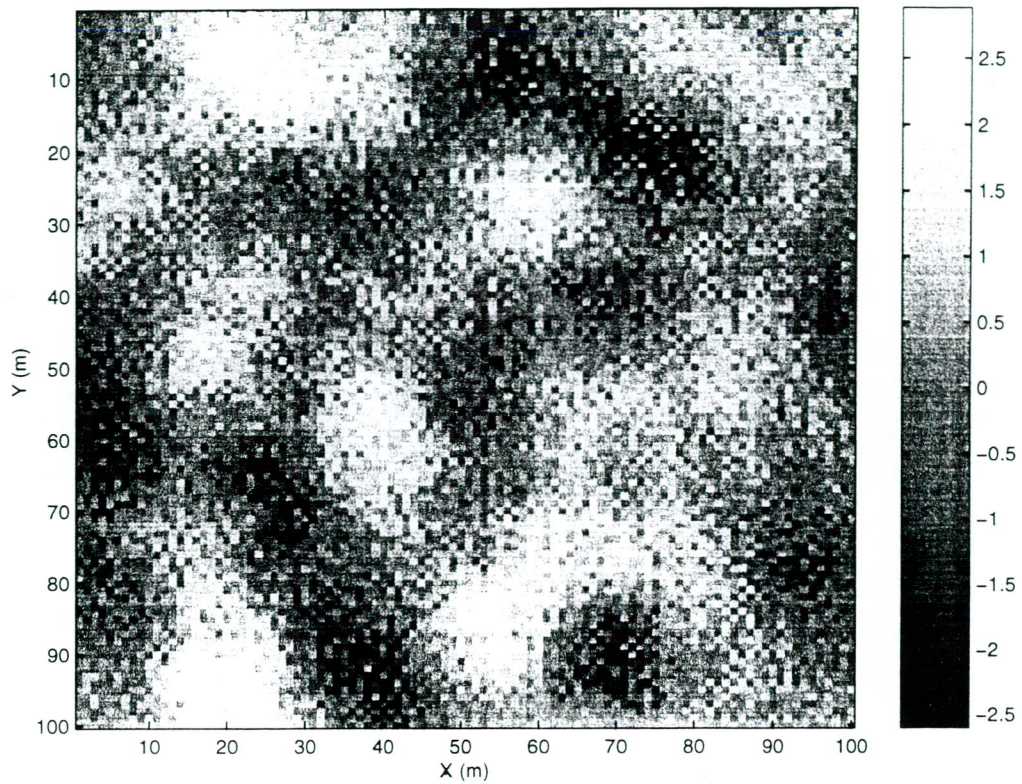
Het doel van de modellering is om een signaal te vinden dat als covariantiefunctie een voorgeschreven functie  $D(s)$  heeft. Dit kan worden bereikt door normaal verdeelde witte ruis,  $n(x,y)$ , in het frequentiedomein te vermenigvuldigen volgens,

$$(5.7) \quad \hat{N}(k_x, k_y) = \sqrt{D(k_x, k_y)} \cdot N(k_x, k_y)$$

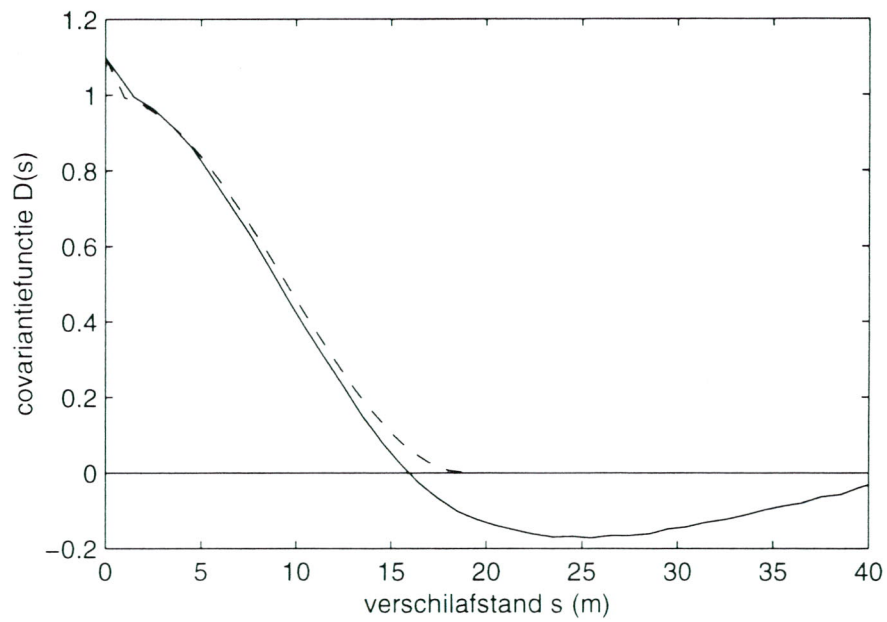
Het signaal  $\hat{n}(x,y)$  heeft na terugtransformatie de gewenste eigenschappen. De modellering kan geïmplementeerd worden als een convolutie van normaal verdeelde witte ruis met de filterfunctie,

$$(5.8) \quad d_{1/2}(x,y) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \sqrt{D(k_x, k_y)} \right\}$$

Voor dezelfde covariantiefunctie als in het bovengenoemde één-dimensionale voorbeeld (figuur 5.3.1) is ook voor de twee-dimensionale situatie gemodelleerd. Het resultaat van deze modellering staat afgebeeld in figuur 5.3.5. Wanneer hieruit vervolgens een covariantie-functie wordt berekend komt deze goed overeen met de gewenste functie (zie hiervoor figuur 5.3.6).



Figuur 5.3.5: Ruis realisatie in twee dimensies.



Figuur 5.3.6: De berekende covariantiefunctie uit de data van figuur 5.8 (getrokken lijn) vergeleken met de gewenste covariantiefunctie (gestreepte lijn).



Intermezzo: **Voorwaartse en inverse Fourier transformatie.**

De voorwaartse Fouriertransformatie is gedefinieerd als,

$$S(f) = \mathcal{F}\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (1.1)$$

De inverse Fouriertransformatie is gedefinieerd als,

$$S(f) = \mathcal{F}^{-1}\{s(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{i2\pi ft} df \quad (1.2)$$

Eigenschappen van de convolutie.

De convolutie van twee signalen  $w(t)$  en  $s(t)$  is gedefinieerd als,

$$s_w(t) = w(t) * s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau)w(t - \tau)d\tau \quad (1.3)$$

In het frequentiedomein kan de convolutie geschreven worden als een vermenigvuldiging,

$$S_w(f) = W(f)S(f) \quad (1.4)$$

Eigenschappen van de correlatie.

De correlatie van twee signalen  $s_1(t)$  en  $s_2(t)$  is gedefinieerd als,

$$r_{12}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(\tau)s_2(t + \tau)d\tau \quad (1.5)$$

In het frequentiedomein kan een correlatie geschreven worden als,

$$R_{12}(f) = S_1^*(f)S_2(f) \quad (1.6)$$

waarin de \* de complex geconjugeerde aangeeft.

## 5.4 Implementatie-aspecten in ArcView

Met behulp van externe software worden de covariantiefuncties bepaald. Deze worden aangeleverd in de vorm van een tabel met de waarden van de covariantie als functie van de verschilafstand in bepaalde gedefinieerde gebieden (block). De tabel heeft de vorm: "*Block, Distance[m], Covariance[m<sup>2</sup>]*".

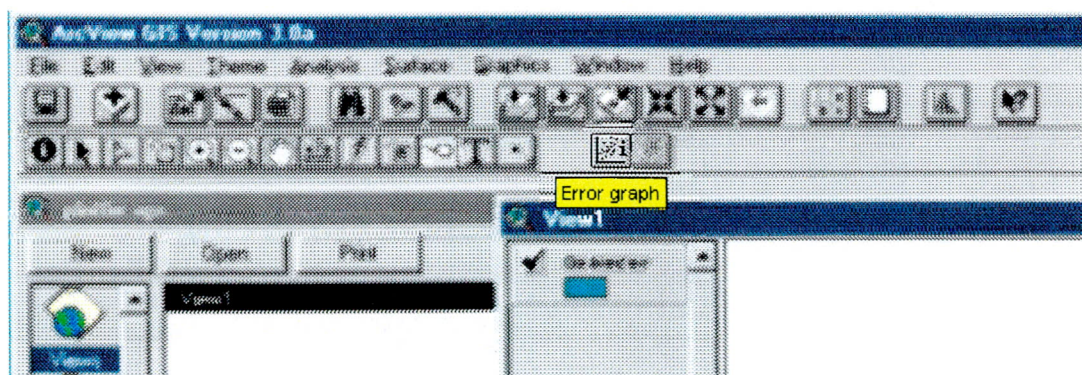
Ieder gebied wordt beschreven door een polygoon, zie figuur 5.4.1.

		17	26	35	
7	8	16	25	34	44
6		15	24	33	42
5		14	23	32	41
4		13	22	31	40
3		12	21	30	39
		11	20	29	38
			19	28	37
				27	36

Figuur 5.4.1: De gebiedjes met elk een eigen afstand/covariantiefunctie.

### Gebruik

Met het thema 'Gebieden' als actief thema kan de gebruiker in de View op een van de gebieden klikken via de speciaal gemaakte tool "Error graph". Zie ook figuur 5.4.2.

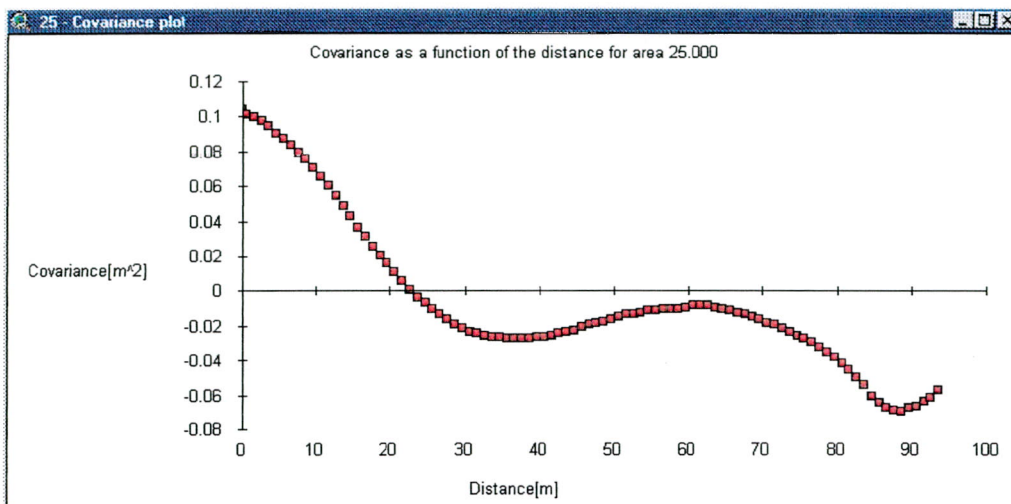


Figuur 5.4.2: De speciale toolbutton in de View DocGUI genaamd 'Error graph'

Het bijbehorende script doet een identify om het ID van het aangeklikte gebiedje te bepalen. Dit ID wordt vervolgens gebruikt om via een query op het veld 'Block' alle records in de tabel te selecteren die horen bij dat gebied.



Vervolgens maakt het script een XY scatterplot aan en toont die aan de gebruiker, zie figuur 5.4.3.

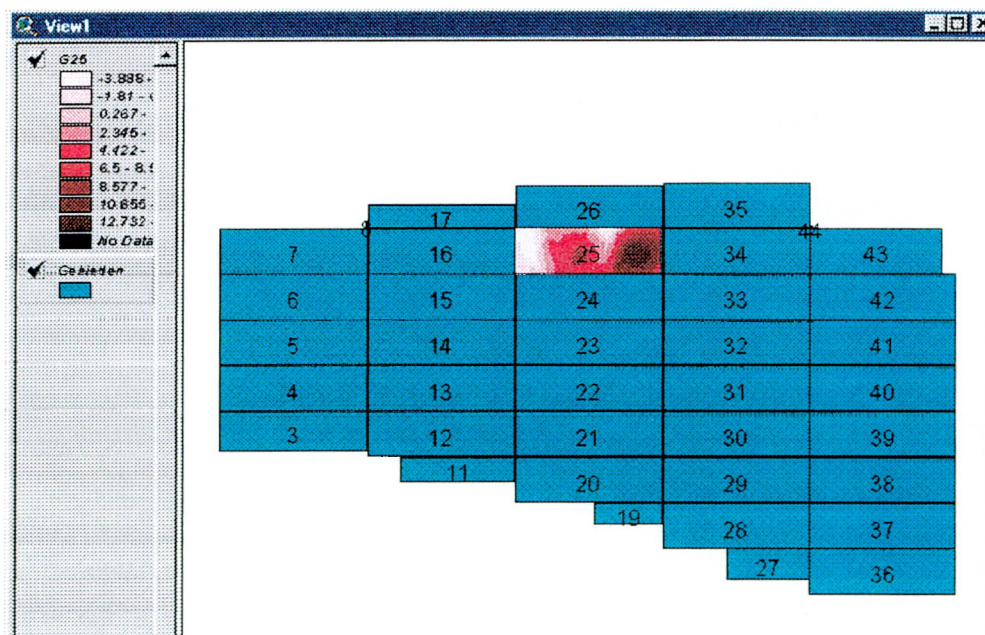


*Figuur 5.4.3: De grafiek met de covariantie als functie van de afstand tot een meetpunt voor gebiedje 25*

De grafiek laat het verloop van de covariantiefunctie zien binnen het aangeklikte gebied. Hierna worden alle geselecteerde records uit de tabel als ASCII bestand weggeschreven.

Dit bestand dient vervolgens als invoer voor een apart DOS programma dat als uitvoer een foutengrid als ASCII raster bestand genereert. Dit DOS programma wordt door het script aangeroepen.

Het gegenereerde rasterbestand wordt nu door het script ingelezen en omgezet in een ArcView grid thema wat ook aan de View wordt toegevoegd (zie figuur 5.4.4).



*Figuur 5.4.4: Het gegenereerde grid is toegevoegd aan de View*

## 6 LASERSCANNING VANAF EEN SCHIP, VOORONDERZOEK

### 6.1 Introductie

Er zijn diverse ontwikkelingen gaande op het gebied van laser apparatuur voor afstandmetingen. Zo is er momenteel een kleine laserscanner voor *boven water* beschikbaar voor afstanden tot maximaal zo'n 200 m, die mogelijk in de mast van een schip kan worden gemonteerd. Een dergelijk systeem zou toegepast kunnen worden om zaken op te nemen als:

- kribben
- oevers
- het boven water gedeelte van de blokken van een blokkendam.

Een tweede ontwikkeling is de toepassing van laserscanning *onder water*. Men kan deze technologie het beste vergelijken met multibeam echosounding, maar dan met laserlicht. Een prototype van dit apparaat zou in staat zijn om enkele meters (orde 5 m) door 'troebel' water heen te kijken. In helder water is deze afstand veel groter, tot enkele tientallen meters. Deze technologie zou eventueel geschikt zijn voor het in beeld brengen van de land-water overgang.

Daarnaast is er ook laserapparatuur in deze categorie voor hydrografische toepassingen *vanuit een vliegtuig*.

Gezien de 'nieuwheid' van de genoemde typen apparatuur, lijkt het verstandig om een keuze te maken voor hetzij de 'boven water' laser, hetzij de 'onder water' laser alvorens te besluiten tot het uitvoeren van proefnemingen. Om deze keuze te kunnen maken is een vooronderzoek uitgevoerd, waarin in eerste instantie de volgende zaken in kaart gebracht zijn:

- een inventarisatie van de specificaties zoals opgegeven door de fabrikant,
- het beoordelen van deze specificaties op de bruikbaarheid voor een mogelijke toepassing in Nederland.

Bij een positief resultaat zijn ook de volgende aspecten onderzocht:

- de beschikbaarheid van de apparatuur,
- de aanwezigheid van een vertegenwoordiger, bij voorkeur in Nederland, als aanspreekpunt bij mogelijke problemen,
- de prijs; bij de begroting is ervan uitgegaan dat de apparatuur voor de periode van de proeven door de leverancier ter beschikking wordt gesteld als bijdrage aan het project 'in natura'.
- de voorkeur van de eindgebruiker.

De resultaten van dit vooronderzoek zullen in de volgende paragrafen aan de orde komen.



## 6.2 Onder water

### 6.2.1 Algemeen

Het meetprincipe komt verder vrijwel geheel overeen met dat van de multibeam echosounder: uit de looptijd van het golfverschijnsel -in dit geval licht-, de snelheid ervan en de hoek wordt de reflectie-locatie berekend. De hoek wordt in het algemeen gevarieerd door het laserlicht te laten invallen op een roterende spiegel.

Systemen die voor toepassing onder water ontworpen zijn, maken gebruik van een zogenaamde 'groene laser' (bijvoorbeeld een Argon Ionen Gas Laser). Het blijkt dat licht van deze kleur, waarbij de golflengte in de orde van 0,488 - 0.533 nm is, het beste doordringt in het water.

Bij toepassing vanuit een vliegtuig maakt men gebruik van twee verschillende kleuren lasers: de genoemde 'groene' en een 'infrarode' met een golflengte van 1.06 mm). De infrarode wordt gebruikt om het wateroppervlak te bemeten terwijl de groene wordt gebruikt voor de bodemligging. De diepte volgt dan uit het verschil tussen deze beide.

Het grote probleem van laserapparatuur die gebruikt wordt voor onder watertoepassingen is het diepte-bereik.

Dit hangt af van zaken als:

- troebelheid van het water,
- reflectie-eigenschappen van de bodem,
- bodemstructuur,
- uitgezonden vermogen.

*Intermezzo: Troebelheid*

Met name de troebelheid is in Nederland een belangrijke factor. De parameter die gebruikt wordt om de troebelheid te meten is de diffuse verzwakkingscoëfficiënt  $K$ . Deze coëfficiënt geeft aan hoe snel het daglicht onder water exponentieel wordt verzwakt als functie van de diepte. In formulevorm:

$$E(z) = E(0)\exp(-Kz).$$

De betekenis van de gebruikte symbolen is:

$E(z)$  intensiteit van het licht op diepte  $z$ ,

$z$  diepte (m),

$K$  diffuse verzwakkingscoëfficiënt ( $m^{-1}$ ).

In praktijk varieert de  $K$  voor kustwateren van  $0,1 m^{-1}$  tot  $0,3 m^{-1}$ , terwijl de coëfficiënt voor schoon oceaانwater meestal kleiner is dan  $0,1 m^{-1}$ . Voor rivieren kan deze waarde gemakkelijk oplopen tot zo'n  $10 m^{-1}$ .

Het criterium voor detectie is:

$$Kz_{max} = 4, \text{ overdag,}$$

$$Kz_{max} = 5, \text{ 's nachts.}$$

Hierin is  $z_{max}$  het maximale dieptebereik dat met de apparatuur gehaald kan worden.

Bij een  $K$  waarde van  $0,3 m^{-1}$  vindt men dus een maximum dieptebereik in de orde van zo'n 15 m en bij een waarde van  $10 m^{-1}$  is dit bereik gereduceerd tot 0,5 m.

Als vuistregel hanteert men wel: het maximale dieptebereik is in de orde van twee- à driemaal de Secchi diepte. De Secchi diepte is de diepte waarop een witte schijf (of een schijf met een zwart-wit patroon) niet langer meer met het oog zichtbaar is, ofwel: de maximale diepte die men met eigen ogen waarneemt.



## 6.2.2 Vanuit een vliegtuig / helikopter

Er zijn ons twee bedrijven bekend die zich bezig houden met de toepassing van laserhydrografie vanuit de lucht. De gegevens zijn:

Bedrijf 1. Optech, <http://www.optech.on.ca>

Systemen:

- Shoals (Scanning Hydrographic Operational Airborne Laser Survey system)
- Hawk Eye, airborne laser surveying systems

Maximum diepte:	25 m (in uitzonderlijk helder water tot 40 m)
Minimum diepte:	1 m
Precisie:	+/- 15 cm
Positie precisie:	+/- 3 m
Dichtheid van de 'soundings':	0,0625 m <sup>-2</sup> (ofwel 1 meetpunt per 16 m <sup>2</sup> )
Vliegtuig:	Bell 212 helikopter
Hoogte:	200 - 800 m
Max. padbreedte:	0,8 x vlieghoogte (45°)
Snelheid:	~10 - 50 m/s

Bedrijf 2. Lads Corporation, <http://www.vsl.com.au>

Systemen:

- RAN LADS, ouder systeem, de gegevens zijn afkomstig van:
- LADS MkII

Maximum diepte:	70 m
Minimum diepte:	0,5 m
Precisie:	S44 IHO Standard for Hydrographic Surveys - 4 <sup>th</sup> Draft, Dec 95, Order 2
Positie precisie:	+/- 5 m (2 sigma)
Dichtheid van de 'soundings':	0,04 - 0.11 m <sup>-2</sup> (ofwel 1 meetpunt per 9 m <sup>2</sup> -25 m <sup>2</sup> )
Vliegtuig:	de Havilland Dash 8-200 (geen helikopter, maar 'fixed wing')
Hoogte:	500 m of 366 m
Padbreedte:	240 m
Snelheid:	90 m/s

Van de genoemde systemen zijn er slechts enkele gemaakt. De eerste dateren uit de jaren '80. De techniek is afkomstig uit de militaire hoek.

Het principe is als volgt. Een laser van het type Nd:YAG (Neo dymium: yttrium alluminum garnet) zendt lichtpulsen uit. De pulsduur is in de orde van 5 ns à 10 ns, en de golflengte is 1.06 mm ('infrarood'). Via een frequentieverdubelaar, een kristal waarbij men van bepaalde niet-lineaire effecten gebruik maakt waarbij twee fotonen worden getransformeerd in één foton met de dubbele energie, kan men ook de halve golflengte uitzenden: 0,532 mm, 'groen/blauw'. Beide kleuren worden apart behandeld. De rode puls wordt verticaal omlaag gericht. Rood licht heeft de eigenschap dat het snel in het

water geabsorbeerd wordt. Het zal de bodem dus niet (of bijna niet) bereiken. Blauw licht daarentegen dringt veel dieper in het water door en kan dus ook de bodem bereiken. De blauwe puls wordt via een roterende spiegel gebruikt voor het scannen. De reflecties van de beide kleuren worden ontvangen en omgezet in een elektrisch signaal. Beide signalen worden gemixt en gedigitaliseerd. Vervolgens wordt het looptijdverschil tussen de beide signalen bepaald. Met hulp van de voortplantingssnelheid van het licht in het water (in de orde van  $2 \cdot 10^8$  m/s) kan vervolgens de diepte worden vastgesteld. De laserstraal wordt heen en weer bewogen via een spiegel die aangedreven wordt door een scanmechanisme. Op deze manier wordt een pad ter breedte van zo'n 0,5 tot 1 maal de vlieghoogte bestreken.

Tijdens de pulsduur van 5 à 10 ns legt het licht onder water een afstand af van 1 à 2 m. Deze pulslengte zal dus een beperkende factor zijn voor de minimale diepte die bemeaten kan worden, immers, de twee pulsen (afkomstig van de rode resp. blauwe reflectie) dienen gescheiden te worden waargenomen om het looptijdverschil tussen beide te kunnen vaststellen. In de systeemspecificaties vindt men dan ook minimum dieptes in de orde van 0,5 m tot 2 m. De pulsduur van de laser komt overeen met een pulsduur van rond de 700 ms à 1,4 ms van een echolood: de afgelegde afstand is dan in beide gevallen hetzelfde. Een echolood of multibeam echosounder heeft echter in het algemeen een kortere pulsduur van rond de 200 ms, overeenkomend met een afgelegde weg van 30 cm. Bovendien heeft een echolood het voordeel dat het moment van uitzenden bepalend is als nul-referentie: de diepte wordt hier niet berekend uit een verschil.

Een ander nadeel van een airborne laser bathymetriesysteem is de relatief lage horizontale precisie. Deze ligt in de orde van 3 m tot 6 m. De voornaamste redenen hiervoor zijn de vlieghoogte van enkele honderden meters, de precisie van de standbepaling (orde 0.03 graden), de openingshoek van de laserbundel (orde van 0.03 graden), de 'beam pointing' stabiliteit (orde 0.02 graden), de precisie van het scanmechanisme en de precisie van de plaatsbepaling.

De diepteprecisie is beperkt vanwege de relatief lange pulslengte.

De specificaties van het systeem zijn onvoldoende voor de beoogde toepassing: het systeem is te 'grof' voor het fijne werk in de rivier. Zo is de minimum diepte te groot en de verticale precisie van +/- 15 cm 'krap', vooral als men bedenkt dat de techniek juist inzetbaar zou moeten zijn voor ondiep water! Ook de horizontale nauwkeurigheid van +/- 3m en de dichtheid van de meetpunten met één meetpunt per 16 m<sup>2</sup> zijn laag, alhoewel met dit laatste waarschijnlijk te leven valt.

De toepassing vanuit een heli-copter of 'fixed wing' vliegtuig maakt het systeem dermate duur dat het regelmatig toepassen ervan in het rivierengebied uitsluitend voor het monitoren van de land-water overgang niet reëel is.

De conclusie luidt dus dat een proefneming met 'airborne' laser hydrografie niet zinvol is.



### 6.2.3 Vanuit een gesleepte vis

De informatie over het systeem in deze paragraaf is onder meer verkregen via de VBKO (HAM). Ook binnen Rijkswaterstaat 'circuleert' al enkele jaren de informatie dat er een alternatief voor de multibeam echosounder zou bestaan, maar dan gebaseerd op laserlicht. In de praktijk blijkt nu dat het hier gaat om een soort onder water videocamera, zoals duidelijk wordt in het nu volgende gedeelte.

Bedrijf: gemeenschappelijke ontwikkeling van SAIC, <http://www.saic.com> en Westinghouse, <http://www.westinghouse.com>, inmiddels Northrup-Grumman, <http://sensor.northgrum.com>.

Systeem: SM2000 Underwater Laser Line Scan System (LLSS)

Maximum diepte bereik:	40 m (boven de bodem, echter metingen tot 2000m diepte)
Minimum diepte:	2 m
Nauwkeurigheid:	n.v.t.
Positie nauwkeurigheid:	n.v.t.
Resolutie:	~ 1 cm bij 30 m diepte
Max. padbreedte:	1,4 x waterdiepte (70°), ~ 50 m
Snelheid:	~0,25 - 3 m/s

Het SM2000 systeem is niet bedoeld voor bathymetrie toepassingen, maar als alternatief voor een onder water videocamera. Er wordt geen looptijd van het licht gemeten, maar alleen de intensiteit van de reflectie. Het resultaat is dan ook een videobeeld. Het voordeel van dit systeem is dat het een factor drie verder 'kijkt' dan een normale camera.

Het systeem kan anderzijds ook beschouwd worden als een alternatief voor de side-scan sonar. In dat geval is het voordeel de veel hogere resolutie. Uiteraard staat daar het veel grotere bereik van de side-scan sonar tegenover.

De toepassingen van het systeem zijn onder meer: zoekacties, het afbeelden van pijpleidingen, onder water inspectie, archeologie, sediment-identificatie (bodemclassificatie), etc.

Conclusie: dit systeem is niet geschikt voor het bepalen van de bodemligging en een proefneming ermee heeft dan ook geen zin.

### 6.2.4 Conclusie laser apparatuur onder water

In het Nederlandse rivierengebied is er voor de onder water lasersystemen geen praktische toepassing. Dit geldt zowel voor het 'airborne' bathymetrie systeem als voor het Laser Line Scan System dat slechts videobeelden produceert.

Om deze reden heeft een proefneming met dit type apparatuur geen zin.

### 6.3 Boven water

Systemen die voor toepassing boven water ontworpen zijn, zijn vaak gebaseerd op een laser die licht uitzendt in het (nabije infra-) rode deel van het spectrum. De golflengtes zijn in de orde van 0,7 mm tot 1 mm.

De meeste apparatuur wordt aangeduid met de naam Laser Range Finder. Er zijn systemen waarbij de gebruiker zelf de laserstraal moet richten, bijvoorbeeld voor gebruik door de politie bij het vaststellen van snelheidsovertredingen. Er bestaan ook systemen die van een scanning mechanisme zijn voorzien en op die manier een breed pad kunnen bestrijken (1D, d.w.z. afstandsmetingen langs een lijn waardoor 2D beelden ontstaan) of zelfs een gebied kunnen aftasten (2D, d.w.z. afstandsmetingen langs een 2D vlak waardoor 3D beelden ontstaan). De meest toegepaste uitvoering van een dergelijk systeem, zij het in miniatuur, komt men tegen bij de kassa van de supermarkt als barcode-lezer. Op een heel andere schaal zijn er systemen die volgens dit principe de afstand tot satellieten bepalen.

De systemen die in deel I van het project zijn beschreven onder de naam laseraltimetrie worden door Rijkswaterstaat gebruikt om de ligging van het land (kustzone, uiterwaarden) te bepalen. Het zijn dure en omvangrijke systemen. Er zijn echter recentelijk kleinere systemen op de markt gekomen die mogelijk toegepast kunnen worden vanaf een schip. Merk op dat met deze systemen dus uitsluitend objecten die zich boven water bevinden kunnen worden bemeaten, dus bijvoorbeeld:

- het inspecteren van blokkendammen boven water,
- het inspecteren van kribben boven water,
- het bemeaten van dijken vanaf het water.

Wanneer men tegelijkertijd ook onder water meet, bijvoorbeeld met een multibeam echosounder, dan kan men de boven water gegevens gebruiken om de koppeling met de overige 'land'gegevens (bijvoorbeeld die welke verkregen zijn via laser altimetrie) tot stand te brengen cq. te vergemakkelijken.

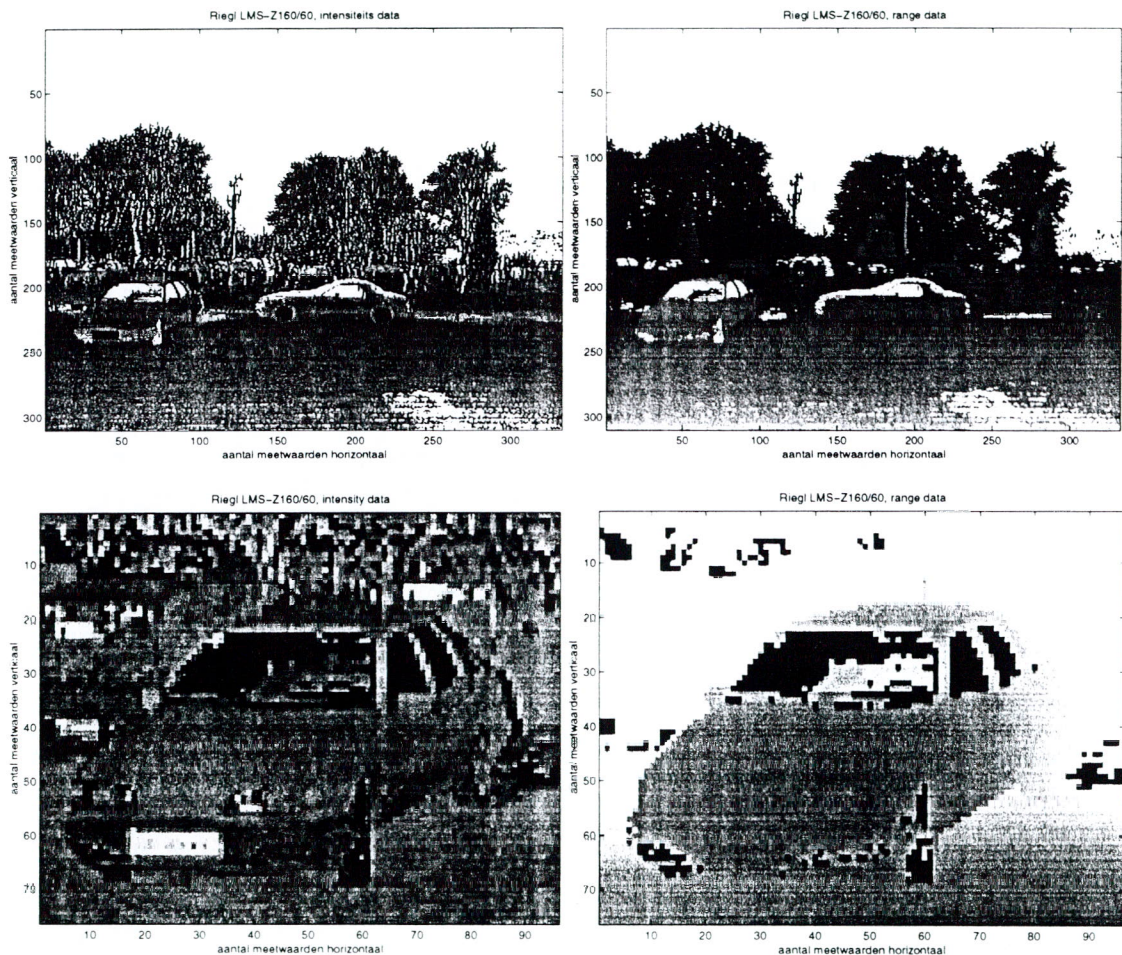
#### *Apparatuur van Riegl*

Bedrijf:	Riegl, <a href="http://www.riegl.co.at">http://www.riegl.co.at</a>
Systeem:	LMS-Q140 (1D), LMS-Z160/60 (2D)
Maximum afstand bereik:	orde 100 m (reflectie 20%) tot > 200 m (reflectie 80%) bij zonnig weer minder, bij bewolkt weer en 's nachts meer
Minimum afstand:	2 m
Precisie:	van 2,5 cm tot 10 cm afhankelijk van afstand en reflectiesterkte ( $1\sigma$ )
Positie precisie:	geen opgave
Resolutie:	1 cm
Max. 'padbreedte':	60° voor de Q-140 resp. 60° x 60° voor de Z160/60
Scansnelheid:	6 lijnen per seconde voor de Q-140 0.2 tot 2 beelden per seconde voor de Z160/60



Afmetingen sensor: ~ 15 cm x 30 cm  
Gewicht sensor: 6 kg

Via de internet site van RiegI zijn testdata verkrijgbaar van het LMS-Z160/60 systeem. De range en intensiteit meetwaarden van deze test zijn te zien in de volgende figuren: links de intensiteit van de reflectie, rechts de afstand, boven het overzichtsbeeld, onder een detail uit dit beeld.



De afmetingen van de apparatuur zijn zodanig dat montage op een schip geen probleem is. De Nederlandse vertegenwoordiger van RiegI is Bennex-Holland. De prijs van de laserscanner LMS-Q140 is in de orde van 75kf terwijl de LMS-Z160/60 ongeveer 150 kf kost.

Bennex-Holland zou zorg kunnen dragen voor het tijdelijk ter beschikking stellen van de apparatuur.

De mogelijke toepassingen zouden zijn:

- het inspecteren van blokkendammen boven water,
- het inspecteren van kribben boven water,
- het bemeten van dijken vanaf het water.

Wanneer men tegelijkertijd ook onder water meet, bijvoorbeeld met een multibeam echosounder, dan kan men de boven water gegevens gebruiken om de koppeling met de

overige 'land'gegevens (bijvoorbeeld die welke verkregen zijn via laseraltimetrie) tot stand te brengen cq. te vergemakkelijken.

#### *Apparatuur van MDL*

Bedrijf:	Measurement Devices Ltd. (MDL), <a href="http://www.mdl.co.uk">http://www.mdl.co.uk</a>
Systeem:	FANBEAM™ MKIII, laser radar system
Maximum afstand bereik:	tot > 2000 m afhankelijk van het weer
Minimum afstand:	geen opgave
Precisie:	orde 10 cm / 20 cm in afstand
Positie precisie:	geen opgave
Resolutie:	geen opgave
Max. 'padbreedte':	360° (rotatie mechanisme)
Scansnelheid:	50° per seconde
Afmetingen sensor:	~ 20 x 30 x 32 cm <sup>3</sup>
Gewicht sensor:	6 kg

De bundel is klein in horizontale vlak (0.06°) maar breed in het horizontale vlak (20°).

Dit apparaat scant de horizon af over 360°. Het kan nauwkeurig de afstand bepalen tot objecten, maar het maakt daarbij weinig onderscheid in het verticale vlak. In die zin is het systeem dus te vergelijken met een radar. Om deze reden is het systeem, hoewel de specificaties verder goed zijn, niet voor ons doel geschikt.

#### *Apparatuur van SICK Optic-Electronic*

Bedrijf:	SICK Optic-Electronic, <a href="http://www.sickoptic.com">http://www.sickoptic.com</a>
Systeem:	PLS (proximity laser scanner)
Maximum afstand bereik:	tot > 80 m afhankelijk van de reflectie eigenschappen van het object
Minimum afstand:	4 cm
Precisie:	5 cm
Positie precisie:	geen opgave
Resolutie:	0,5°
Max. 'padbreedte':	180°
Scansnelheid:	25 scans van 180° per seconde
Afmetingen sensor:	~ 18 x 16 x 16 cm <sup>3</sup>
Gewicht sensor:	4,5 kg

De bundel is klein in horizontale vlak maar waarschijnlijk breed in het horizontale vlak, omdat het doel het detecteren van objecten is.

Dit apparaat scant de horizon af over 180°. Het kan nauwkeurig de afstand bepalen tot objecten, maar het maakt daarbij weinig onderscheid in het verticale vlak. In die zin is het systeem dus te vergelijken met een radar. Om deze reden is het systeem, hoewel de specificaties verder goed zijn, niet voor ons doel geschikt. Het apparaat is vooral bedoeld



voor beveiliging (stationaire toepassing) ter voorkoming van botsingen bij autonome voertuigen (mobiele toepassing).

Conclusie: met de in dit hoofdstuk genoemde apparatuur van de firma Riegl zou een proefneming uitgevoerd kunnen worden.

## 7 LAND / WATER OVERGANG

### 7.1 Introductie

#### *De relatie met LWI*

De problematiek van de land-water overgang heeft altijd een rol gespeeld in het LWI project '3D monitoring van de rivier'. Voor een enkele opdrachtgever (RWS Directie Oost Nederland) was het zelfs het hoofdmotief om deel te nemen aan het project. Vandaar dat er in de huidige fase een speciaal werkpakket was gedefinieerd voor het uitvoeren van een proef in het land-water gebied. Het was binnen LWI namelijk niet de bedoeling om zelf een nieuwe meettechniek uit te vinden. De uitgangspunt was het toepassen van bestaande (combinaties van) meetmethoden, waarbij de toepassing voor de land-water problematiek wèl nieuw zou zijn.

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de land-water problematiek. In de introductie komen de achtergronden aan de orde. Verder zijn er in dit project een aantal mogelijkheden onderzocht voor het uitvoeren van een proef op basis van bestaande apparatuur. De resultaten ervan worden in de volgende hoofdstukken besproken. Echter, we merken nu reeds op dat een geschikte, toepasbare methode niet is gevonden. Om die reden heeft een proef geen doorgang gevonden.

#### *Waarom meten in ondiep water*

Om de diepte van de rivier te meten worden (multibeam) echosounders gebruikt. Dit zijn sonar apparaten die gebaseerd zijn op echo-akoestiek. Dergelijke apparaten worden gemonteerd op meetvaartuigen. Hoewel deze in het algemeen niet erg groot zijn, is de diepgang toch al snel meer dan één à anderhalve meter. Dit betekent dat men op plaatsen waar het ondieper is niet meer kan meten. Op de rivieren zijn vooral de kribvakken, de gebieden tussen de kribben, ondiep. Toch zijn dergelijke ondiepe delen belangrijk voor het goed begrijpen van het stromingsgedrag en de manier waarop zand en slib worden afgezet, de sedimenthuishouding. Bovendien is het gewenst om ook op het land door te gaan met metingen, zodat de dieptemetingen kunnen worden aangesloten op de hoogtemetingen. Het is dus belangrijk dat er 'van bandijk tot bandijk' gemeten wordt. Aangezien stroming en afzetting dynamische processen zijn, is het niet voldoende om eenmalig te meten, maar dient er geregeld gemeten te worden. In de toekomst zal de meetfrequentie alleen nog maar hoger worden in verband met het thema 'ruimte voor de rivier' en het daarmee gepaard gaande monitoren van de effecten van de diverse maatregelen zoals kribvakerosie. Het is niet alleen belangrijk dat er regelmatig gemeten wordt, maar ook dat de metingen snel worden uitgevoerd zodat de meetresultaten alle onder min of meer dezelfde condities kunnen worden uitgevoerd. Verder moeten de metingen ook op elke gewenst tijdstip kunnen worden uitgevoerd. Men wil niet wachten op mooier weer of op een hogere waterstand.



### *Hoe worden de metingen nu uitgevoerd*

Nu worden de 'ondiepe metingen' enkele malen (~ vier maal) per jaar uitgevoerd. Eén zo'n reeks metingen, die dan betrekking heeft op 12 à 20 kribvakken, wordt uitgevoerd door zo'n 6 man personeel en duurt ongeveer een week. De werkwijze is als volgt. Het meetvaartuig wordt gefixeerd (via een 'paal' die men vastklemt op de bodem) op een plaats langs de meetraai die nog net diep genoeg is. Vervolgens transporteert men met een roeiboot een staaldraad naar de oever en spant deze tussen meetvaartuig en de oever in de richting van de raai. De staaldraad wordt vastgezet met een soort 'schroef' die in de oever gedraaid wordt. De roeiboot wordt vervolgens langs de draad bewogen (men houdt de draad met de hand vast!) tussen het meetvaartuig en de oever en de dieptemetingen worden verricht met een peilstok. De uitkomsten worden genoteerd op papier en aan boord ingevoerd in de computer. De raaien liggen 20 à 25 meter uit elkaar, loodrecht op de as van de rivier, en langs de raai wordt er om de 5 m een meting verricht. De lengte van de kribvakken (vak krib tot krib) is in de orde van 100 m tot 200 m. Men blijft een beetje uit de buurt van de kribben zelf, omdat de stroming daar te onregelmatig is. In de meeste kribvakken meet men langs drie raaien: één in het midden van het kribvak en twee aan weerszijden op 20 m à 25 m afstand. De lengte van de kribben zelf is in de orde van enkele tientallen meters. Dit betekent dat de diepte zeer geleidelijk afneemt.

Bij de metingen is het van belang dat deze voor een deel, bijvoorbeeld 5 m, overlappen met de hoogtemetingen op het droge om een 'naadloze' aansluiting te krijgen.

### *Welke nauwkeurigheid wordt geëist*

De dieptemetingen worden gevraagd in dm t.o.v. NAP, terwijl de aansluitende hoogtemetingen worden gevraagd in cm t.o.v. NAP. Merk op dat dit verschil - dm's tegenover cm's - meer wordt ingegeven door de bestaande mogelijkheden dan door de feitelijke eisen.

### *Wat zijn de meetomstandigheden*

De bodem van de kribvakken kan een zandbodem (licht van kleur) of slibbodem (donker van kleur) zijn. De stroming kan sterk zijn. Er kunnen draaikolken voorkomen tussen de kribben. De scheepvaart (zesbaks duwvaart) veroorzaakt sterke stuw wat aanzienlijke golven (tot zo'n 0,5 m amplitude) tot gevolg kan hebben.

De helderheid van het water is variabel. Het zoutgehalte is minder dan 5 ‰.

## **7.2 Mogelijke oplossingen**

### *Korte samenvatting van de problematiek*

Het probleem is niet zozeer dat er in de kribvakken niet gemeten kan worden, maar veeleer dat de meetmethode te omslachtig is en daardoor te langzaam en vooral te duur. Er moet dus gezocht worden naar een oplossing die sneller en goedkoper is. Het

kernprobleem is de *moeilijke bereikbaarheid* van het kribvak: er kan geen regulier meetvaartuig komen vanwege de ondiepte.

De mogelijke oplossingen zullen zich dus vooral richten op de bereikbaarheid. Hiervoor bestaan er drie mogelijkheden:

- metingen uitvoeren vanuit de lucht (vliegtuig, helikopter),
- metingen uitvoeren vanaf het water met een aangepast vaartuig (hovercraft, 'spin', speciaal ondiep bootje),
- metingen vanaf de oever of vanaf een schip dat zich in het diepere gedeelte bevindt.

De mogelijkheden zullen nu achtereenvolgens worden besproken.

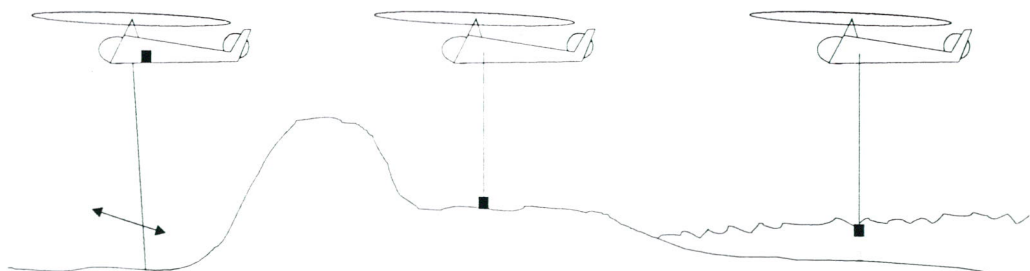
### *Metingen vanuit de lucht*

De bereikbaarheid is voor metingen vanuit de lucht geen enkel probleem. Vandaar dat de aandacht direct gericht kan worden op de meetmethode die dan toegepast zou kunnen worden.

In eerste instantie zal men een keuze uit de volgende twee mogelijkheden moeten maken:

1. een methode waarbij men het meetinstrument vanuit het vliegtuig laat neerdalen tot in het water, of
2. een 'remote' methode, waarbij het meetinstrument zich in het vliegtuig bevindt.

Voor wat betreft de eerste methode: men zou peilingen kunnen verrichten door met een lier een 'lood' aan een kabel te laten neerdalen vanuit een helikopter. De vlieghoogte, tezamen met de lengte van de kabel bepaalt de diepte. Deze methode is praktisch goed uitvoerbaar en zou zonder veel onderzoek verwezenlijkt kunnen worden. In plaats van een echt 'lood' zou men ook een echolood kunnen toepassen. Men zou op deze manier de gehele raai kunnen bemeten, ook de diepere gedeeltes. Op het land zou het echolood als echt 'lood' gebruikt kunnen worden, waardoor men gewoon boven water kan doormeten. Als de heli ook nog voorzien is van een laser-altimeter, dan kunnen ook de verdere landmetingen tegelijkertijd worden uitgevoerd, zie ook de onderstaande figuur. Of deze methode economisch haalbaar is, is niet onderzocht. Dit valt buiten het kader van het huidige onderzoek.



Het zal duidelijk zijn dat de tweede categorie in principe de voorkeur verdient in verband met de efficiency. Men zou dan al vliegend de metingen kunnen verrichten, zonder telkens stil te blijven hangen boven een bepaalde locatie. Behalve helikopters zouden ook 'fixed wing' toestellen in aanmerking komen.



De mogelijkheden om de dieptemetingen te verrichten zijn nu:

- laserlicht,
- radar.

De mogelijkheden van de *laser* zijn apart beschreven in hoofdstuk 4, omdat deze methode veelbelovend leek. De voornaamste conclusie is echter dat de systemen die op de markt zijn voor laser-bathymetrie niet geschikt zijn voor de beoogde ondiepe toepassing. De nauwkeurigheid is van dezelfde orde van grootte als de te meten diepte. Een van de oorzaken hiervoor is dat de lengte van de uitgezonden laserpuls te lang is.

De huidige apparatuur is dus niet geschikt voor het uitvoeren van een proefneming.

Een tweede mogelijkheid is de *radar*. In dit geval zou men met een radar het golvenpatroon van het water in het kribvak willen waarnemen. Dit golvenpatroon is mede afhankelijk van de stroming ter plaatse, die op zijn beurt weer afhangt van de diepte. Dergelijke radarmetingen zijn met succes toegepast in het Waddengebied. Om de metingen te interpreteren is een model nodig dat de relatie tussen de diepte, de stroming, de windsnelheid en de golven beschrijft. Dit model is niet volmaakt, vandaar dat er altijd ijkpunten beschikbaar dienen te zijn. De methode is dus nooit te gebruiken als enige: er zullen altijd extra metingen (op de 'ouderwetse manier') nodig zijn, zij het minder.

Na een kort onderzoek waarin diverse deskundigen zijn geraadpleegd - Argoss, BCRS, NLR, TNO-FEL, RWS-MD - kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- het golvenpatroon op het water wordt in de kribvakken niet alleen bepaald door de stroming en de diepte, maar ook door de wind en windschaduw door dijken / bomen / gebouwen,
- de stroming rond de kribben is ingewikkeld; deze is niet te vergelijken met de veel eenvoudigere patronen op zee, waarvoor ééndimensionale modellen worden aangenomen,
- de stroomsnelheid is in de kribvakken op veel plaatsen mogelijk te klein,
- er zijn problemen te verwachten met het radarbeeld, in het bijzonder de 'doorwerking' van het sterke landsignaal in het zwakke watersignaal.

In bestaande opnamen zijn de beelden van het water in het algemeen erg 'zwart', d.w.z. dat men er geen structuur in kan waarnemen, maar dit zou aan de data processing kunnen liggen.

In een onderzoek uit 1990, waarvan de resultaten beschreven zijn in het BCRS rapport 'Explorative measurements on the possibilities to observe river bottom topography with SLAR' (NLR Research Note for Netherlands Remote Sensing Board (BCRS), BCRS report no. 90-23, BCRS project no. OP-1.24, November 1990, pp. 5 + fig1.) is de conclusie dat radar voor bathymetrie van rivierbeddingen vermoedelijk van beperkte waarde zal zijn. Er was wel wat modulatie in het water te zien, maar deze werd sterk beïnvloed door het heersende windklimaat (windrichting, windschaduw). Als men de bathymetrie van de rivierbedding al zo moeilijk kan waarnemen, dan is de verwachting

dat men nog meer moeite zal hebben om enige informatie over de bodemligging binnen de kribvakken te extraheren uit de gegevens.

De conclusie is dus dat op voorhand niet geheel uit te sluiten valt dat men zinvolle informatie uit radarbeelden zou kunnen achterhalen, maar de kans hierop is niet groot. Een diepgaand onderzoek naar de mogelijkheden van radar-bathymetrie in kribvakken zou een meer bevredigend antwoord kunnen opleveren. Echter, de huidige onderzoekers van TNO-TPD en RWS-MD achten zich niet in staat tot het uitvoeren van een dergelijk onderzoek.

#### *Metingen vanaf het water met een aangepast vaar- cq voertuig*

Ter oplossing van de bereikbaarheid van de kribvakken zou men kunnen denken aan speciale vaar- of voertuigen die zich kenmerken hetzij door hun geringe diepgang hetzij door het feit dat zij over de bodem rijden. Hieronder vallen bijvoorbeeld:

- hovercraft,
- een op de 'wesp' gebaseerd voertuig ('wesp': het meetvoertuig voor de ondiepe kuststrook van RWS Directie Noord-Holland),
- DAART, een op afstand bestuurd, onzinkbaar meetvaartuigje.

In alle gevallen zou een echosounder gemonteerd worden voor het bepalen van de diepte, in combinatie met een plaatsbepalingssysteem. Merk op dat het vanwege de ondiepte geen zin heeft om een multibeam echosounder toe te passen. Het gebruik van een multi-channel echosounder, waarbij meerdere echosounders gemonteerd worden op zij-armen, behoort tot de mogelijkheden, hoewel deze oplossing kwetsbaarder is en minder wendbaar en meer vraagt van het data-acquisitie systeem.

Aangezien de 'wesp' over de bodem rijdt, kan in dit geval de diepte worden afgeleid uit de positie en de stand van het voertuig.

Hoewel de oplossingen uit deze categorie naar onze mening een goede kans van slagen hebben, ontmoeten wij bij de opdrachtgevers weinig positieve respons. Diverse mogelijkheden uit deze categorie zijn reeds getest en leverden teleurstellende resultaten.

Bovendien gaat het in de meeste gevallen om een totaal nieuwe ontwikkeling. Om deze redenen wordt er vanaf gezien om een proefneming in deze richting uit te werken.

#### *Metingen vanaf de oever of vanaf een schip dat zich in het diepere gedeelte bevindt*

Bij metingen vanaf de oever of vanaf een schip dat zich in het diepere gedeelte bevindt is bereikbaarheidsprobleem opgelost, maar daar komt direct een nieuw probleem bij: welke meettechniek-op-afstand is beschikbaar voor het meten.

Radarmetingen vergen, net als hiervoor is beargumenteerd bij 'metingen vanuit de lucht', meer onderzoek en ook lasermetingen worden weer verworpen op basis van de reeds eerder genoemde argumenten (waarbij overigens nu ook de sterk niet-loodrechte inval voor grote problemen zou zorgen).



De enige mogelijkheid is dus om bijvoorbeeld een lange 'hengel' te ontwerpen waarmee de lodingen kunnen worden uitgevoerd. Eventueel kan zich aan het einde van de hengel een drijvend gedeelte bevinden, waarin zich de lodingapparatuur bevindt. De 'hengel' dient dan voor de besturing. Merk op dat men hiermee weer terug is bij de vorige categorie. Ook hiervoor is een geheel nieuwe ontwikkeling nodig. Er is geen bestaande methode voorhanden om een proefneming mee uit te voeren.

### **7.3 Conclusies land-water overgang**

De twee meettechnieken die bij aanvang van het project nog als veelbelovend waren geclassificeerd voor de land-water overgang waren laser-altimetrie en radar. Beide zouden efficiënt vanuit de lucht kunnen worden toegepast. We kunnen na het onderzoek concluderen dat voor beide technieken geldt dat zij niet ver genoeg zijn ontwikkeld om te worden toegepast. Bovendien is het vanwege principiële fysische beperkingen maar zeer de vraag of het ooit zover zal komen.

Voor de overige methoden geldt dat zijn in principe door verdere ontwikkeling geschikt zijn te maken voor het doel. Dit geldt in het bijzonder voor:

- een lodingshelikopter, die immers een vrij rechtstreekse vertaling is van de huidige manier van werken, maar dan met andere, meer moderne hulpmiddelen, en
- het ontwikkelen cq. toepassen van een speciaal vaartuig met een veel geringere diepgang, op afstand bestuurd of aan een soort 'hengel', of een speciaal voertuig dat over de bodem rijdt (vergelijkbaar met de 'wesp' in Noord-Holland).

Het ontwikkelen van een nieuwe techniek valt buiten het kader van de huidige fase van het project.

## 8 AANBEVELINGEN

Op grond van het voorgaande worden de volgende aanbevelingen geformuleerd:

1. In dit project is een beschrijving gegeven van het gebruik van fouten-covariantiefuncties bij het beschrijven van de kwaliteit van meetsystemen. Deze aanpak is geïllustreerd aan de hand van een voorbeeld van laseraltimetrie. Om de methode in te voeren in het verwerkingsproces van veldmetingen zoals multibeam echolodgingen is het noodzakelijk dat van verschillende meetsystemen meer bekend wordt over de fouten-covariantiefunctie. Daartoe zullen metingen moeten worden uitgevoerd die gericht zijn op het bepalen van deze functie. Het is hierbij nodig om hetzij over een bekende bodem te meten of om een onbekende bodem een aantal malen te meten. Uit een analyse van de verschillen tussen de metingen (analoog aan analyse van de strookoverlap bij laseraltimetrie) kunnen vervolgens uitspraken gedaan worden over de kwaliteit van het meetsysteem.

2. Een belangrijke aanbeveling van dit onderzoek is om tijdens de gehele procesgang, van inwinning tot en met verwerking en presentatie, de kwaliteitsaspecten mee te nemen. Er is een aanzet gegeven om de kwaliteitskenmerken in het GIS op te nemen en daarin te visualiseren. Om de kwaliteitsgegevens ook in volgende stappen van de verwerking mee te nemen, moet de foutdoorwerking in de verschillende tussenproducten meegenomen worden volgens de aanpak die in dit rapport is beschreven.

3. In dit project is een analyse gemaakt van de kalibratieprocedures die nodig zijn voor een betrouwbare kalibratie van meetsystemen, zoals de multibeam en de laseraltimetrie. Op grond van deze analyse is het mogelijk om een standaardmeetcyclus te definiëren, waarmee een betrouwbare kalibratie van het systeem kan worden uitgevoerd. Deze cyclus zal afhankelijk zijn van de meetomstandigheden die in een bepaald gebied verwacht mogen worden. Bovendien moeten er eisen gesteld worden aan de proefgebied waar de kalibratie wordt uitgevoerd.

In principe is het mogelijk de diverse parameters van het meetsysteem (semi-) automatisch te kalibreren. Hierdoor kan de afhankelijkheid van een menselijke operator op de resultaten van de kalibratie verminderd worden. Tevens is het dan mogelijk op grond van de kalibratie uitspraken te doen over de mogelijke systematische fouten die nog in het meetsysteem aanwezig zijn.

Om dit te realiseren is nog een aanzienlijke onderzoeksinspanning vereist.



4. Uit de verkennende studie over laserscan-systemen voor het meten van de bodemligging in ondiepe gebieden bleek dat de problemen bij het meten in ondiep water zeer gevarieerd zijn. Denk hierbij aan de zeer verschillende omstandigheden in de gebieden van de Rijkswaterstaatsdirecties Oost Nederland en Limburg. De eisen aan een systeem verschillen en ook de toepassingsmogelijkheden van systemen zijn verschillend. Daarom zal in de toekomst meer gericht naar een oplossing moeten worden gezocht voor specifieke toepassingen en gebieden. Hierbij zal het accent meer moeten liggen op methodes om het ondiepe gebied te bereiken met de meetinstrumenten dan op de instrumenten zelf.

## Referenties

Hare, R., Godin, A. and Mayer, H., 1995, Accuracy estimation of Canadian Swath (multibeam) and Sweep (multi-transducer) sounding systems, University New Brunswick, Ocean Mapping Group, <http://www.omg.unb.ca/omg/>

Min, E.J. de, 1996, *De geoïde voor Nederland* Proefschrift Technische Universiteit Delft

Lemmens, M.J.P.M., Fortuin, E.H.W., 1997, *Fouten-Analyse van Vliegtuig-Laser-altimetrie*, Faculteit der Geodesie, Technische Universiteit Delft

MacDonald, I. R., Reilly II, J. F. Chu, J. and Olivier, D. 1997, Submarine NR-1 makes first deep-ocean use of the SM2000 laser line scanner. *Sea Technology*, v. 38, p. 59-64.

Steinvall, O., Banic, J., Alfredsson, M., 1997, Airborne Laser Hydrography 'A Vital part of future coastal mapping', *Hydro International*, Volume I, Number 3.

*Handboek Uitvoering Laseraltimetrieprojecten*, 1998, Meetkundige Dienst, Rijkswaterstaat

*Kwaliteitsbegrippen handboek*, 1998, Meetkundige Dienst, Rijkswaterstaat