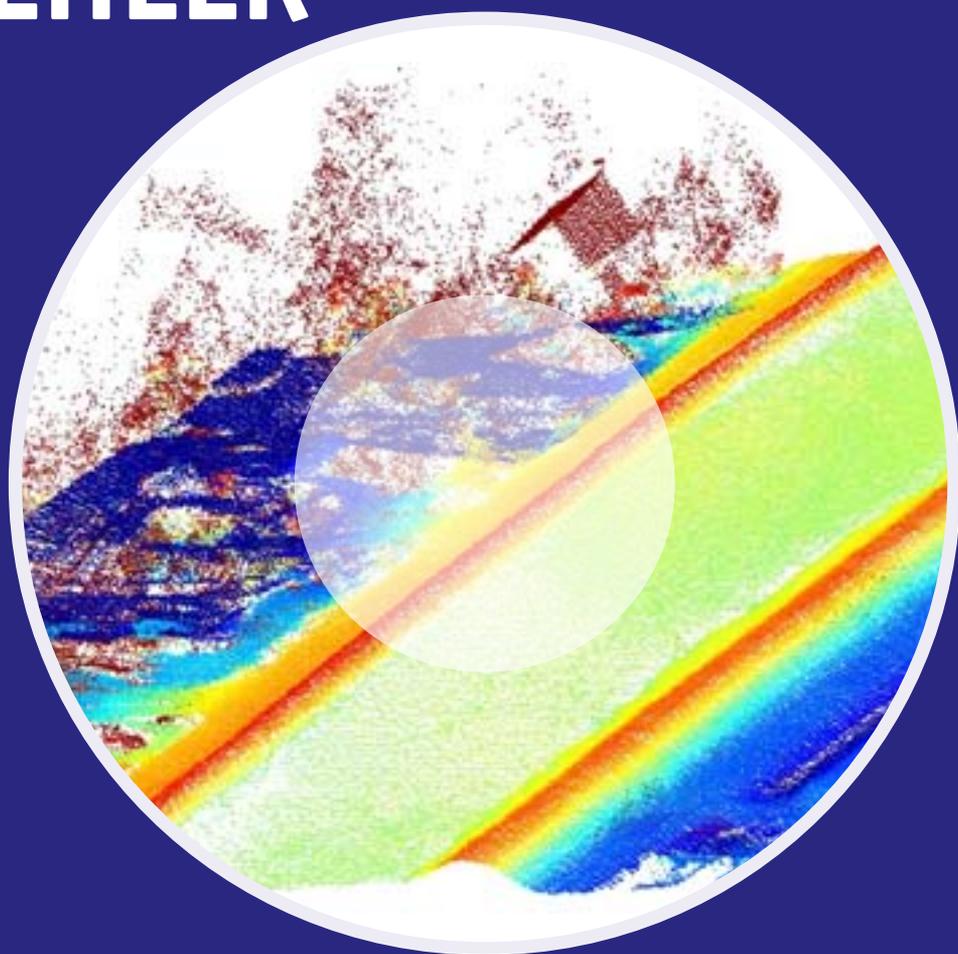


LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERING- BEHEER



ONTWIKKELINGEN, GEWENSTE SPECIFICATIES,
PROCESBESCHRIJVING EN EVALUATIE AHN-2-PROEF

VIW 2008 06
RWS WD 2008 012



LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER

ONTWIKKELINGEN, GEWENSTE SPECIFICATIES,
PROCESBESCHRIJVING EN EVALUATIE AHN-2-PROEF

VIW

2008

06

2008

012

RWS WD

ISBN 978.90.5773.395.6



COLOFON

UITGAVE STOWA, Utrecht 2008

AUTEURS L.M.Th. (Rens) Swart (Swartvast)
S.J. (Stefan) Flos (SJF Projects & Support)
W.S. (Wouter) Zomer (BZ Innovatiemanagement)

WERKGROEP Wijbren Epema (Epema Advies), voorzitter
Wouter Zomer (BZ Innovatiemanagement), secretaris
Rens Swart (Swartvast), adviseur
Thijs Trompetter (Waterschap Rivierenland)
Marten Westerink (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)
Hans Knotter (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden)
Dick Vastenhoud (Wetterskip Fryslân)
Marc Bruins Slot (Wetterskip Fryslân)
Etienne Faassen (Hoogheemraadschap van Rijnland)
Frans Veerman (Hoogheemraadschap van Schieland en de Krimpenerwaard)
Kees Zeijler (Waterschap Zeeuws-Vlaanderen)
Kier van Gijssel (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)

De rechten van de afbeeldingen berusten, voor zover niet anders vermeld, bij Swartvast en de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie

FIGUUR VOORPAGINA

Een vogelvluchtaanzicht van 630.000 naar hoogte gekleurde laserpunten van de kade van de polder Beetskoog in de buurt van Hoorn, met ongeveer 20 punten per vierkante meter.

DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau

STOWA STOWA 2008-06
RWS WD 2008-012
ISBN 978.90.5773.395.6

VOORWOORD

Laseraltimetrie is een van de meest vruchtbare technieken voor de inwinning van informatie ten behoeve van het beheer van waterkeringen en wordt steeds meer toegepast. Het stroomlijnen van de uitvoering van laseraltimetrieprojecten sluit dan ook nauw aan bij de verschillende initiatieven die genomen zijn om inspectie van waterkeringen te verbeteren. Laseraltimetrie is een krachtige aanvulling op het momenteel nog hoofdzakelijk op visuele inspectie gebaseerd beheer.

STOWA heeft in 2006 de Werkgroep Grootschalig Uitvoeringsproject Laseraltimetrie (WGL) opgericht, bestaande uit waterkeringbeheerders met ervaring met laseraltimetrie en externe deskundigen. Zowel de techniek van hoogtemeting met laseraltimetrie als de toepassing en organisatie daarvan maken een sterke ontwikkeling door, die door de Werkgroep in het voorliggende rapport is toegelicht. Het rapport heeft tot doel een naslagwerk te zijn voor mensen bij waterschappen die werkzaam zijn of worden op het gebied van waterkeringbeheer en laseraltimetrie. Door het beredeneerd stellen van specificaties wordt het fundament gelegd voor een succesvolle en toepassingsgerichte uitbesteding van laseraltimetrie ten behoeve van het waterkeringbeheer, onder meer in het kader van de toetsing op veiligheid. Ook is in het rapport een procesbeschrijving op hoofdlijnen voor de uitbesteding opgenomen.

De eigenschappen en specificaties van laserdata zijn geïllustreerd door nauwgezette analyses van laserdata van de proef van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), waarmee de WGL tot een vruchtbare samenwerking is gekomen. Ook wordt het gebruik van laserdata voor stabiliteitsberekeningen getoond. Het voorliggende rapport is daarmee een belangrijke bron van kennis en is bovendien geschikt om bestuur en management te informeren.

STOWA verwacht dat met dit rapport de grote potentie van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer verder zal kunnen worden benut, in nauwe aansluiting op de praktijk van de beheerder. Ondersteund door een ruim draagvlak binnen de waterschappen, zal de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie in 2008 voortgaan met de opstelling van standaarddocumenten voor uitbesteding en een nadere studie maken van invloeden op lasermetingen en vergelijkbaarheid met landmeetkundige metingen. Daarnaast wordt aangetakt bij IRIS en AHN en samengewerkt met het Waterschapshuis.

J.M.J. Leenen

Directeur STOWA
februari 2008

SAMENVATTING

Er zijn verschillende initiatieven genomen die moeten leiden tot verbetering van inspecties van waterkeringen. Deze inspecties zijn momenteel nog hoofdzakelijk gebaseerd op visuele waarnemingen. In aanvulling daarop kunnen technische hulpmiddelen inspectie verbeteren.

In het kader van Water Innovatiebron (WINN) werd onderzocht op welke manier aanvullende technieken snel zouden kunnen bijdragen tot het verbeteren van de operationale praktijk van het waterkeringbeheer. Omdat het naar verwachting nog enige jaren zou duren alvorens de lopende studies naar optimalisering van dijkinspecties tot een eindoordeel komen, werd aanbevolen de inspanning te richten op de meest kansrijke hulptechnieken. Deze aanbeveling uit wat men fase 1 zou kunnen noemen heeft geleid tot fase 2, waarin laseraltimetrie, als een van de meest kansrijke inwinningstechnieken, werd onderzocht op zijn operationele inzet in de waterkeringbeheerpraktijk. De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA) heeft hiervoor in 2006 de Werkgroep Grootchalig Uitvoeringsproject Laseraltimetrie (WGL) opgericht, bestaande uit waterkeringbeheerders met ervaring met laseraltimetrie en externe deskundigen.

De uitvoering van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer vindt in het algemeen nog versnipperd plaats. Kennis en ervaring zijn niet centraal aanwezig of geborgd en aanbestedingen en verwerking vinden niet gestroomlijnd plaats. De WGL stelt zich onder andere tot doel deze stroomlijning tot stand te brengen en waterkeringbeheerders te ondersteunen bij de verwerving van een volledig op de werkpraktijk afgestemd laseraltimetrie product.

De WGL heeft in dit rapport veel kennis gebundeld, die als basis kan dienen voor de uitvoering van laseraltimetrie projecten, die verdieping en overdracht eenvoudiger maakt en bovendien geschikt is om bestuur en management te informeren. Zowel de techniek van hoogtemeting met laseraltimetrie als de toepassing en organisatie daarvan maken een sterke ontwikkeling door, die in dit rapport is toegelicht. Omdat bij de toetsing van waterkeringen intensief gebruik gemaakt wordt van laserhoogtebestanden, zijn uit het daarbij gebruikte Voorschrift Toetsen op Veiligheid criteria afgeleid die aan het gebruik van laseraltimetrie te stellen zijn. Daarnaast zijn de criteria geanalyseerd zoals deze zijn opgenomen in de door de WGL-leden opgestelde bestekken en het bestek voor de proef ten behoeve van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN). Bij alle aspecten en criteria met betrekking tot laseraltimetrie is, mede op basis van een toelichting bij geostatistische en andere begrippen in de bijlage, een uitgebreide analyse opgenomen. Uiteindelijk heeft dit, na uitvoerige discussie met de deelnemers, geleid tot een onderbouwde lijst met specificaties.

Omdat de Stuurgroep AHN met de proef die begin 2007 met Waterschap Zeeuwse Eilanden (WZE) werd uitgevoerd een product nastreefde dat, naast voor waterbeheer, ook voor waterkeringbeheer geschikt zou moeten zijn, is er een samenwerking totstandgekomen tussen AHN en WGL. Daarbij werden de gewenste specificaties naast elkaar gelegd.

De WGL heeft laserdata uit de proef AHN-WZE, gecombineerd met terrestrische profielen die het waterschap ter beschikking stelde, geanalyseerd om deze op zijn geschiktheid voor waterkeringbeheer te beoordelen. Daarnaast is ook data gebruikt die het Hoogheemraadschap

Hollands Noorderkwartier van een 'kleine' kade ter beschikking stelde. De rastergrootte van 50 cm blijkt ruim voldoende, behalve voor kleine regionale keringen van minder dan een meter, naar schatting nauwelijks 20% oftewel 3.400 van de in totaal 17.000 km regionale keringen in Nederland. De homogeniteit van de verdeling van de laserpunten, de puntdichtheid en de precisie in ligging waren punten van aandacht. Voor 'kleine' regionale keringen met een hoogte van minder dan een meter ten opzichte van het achterland en/of een kruinbreedte van minder dan een meter is een rastergrootte van 25 cm gewenst. De puntdichtheid moet daartoe minimaal 30/m² zijn.

Laserdata, zelfs als deze naar een raster is gemiddeld, beschrijft het terrein veel beter dan terrestrische meetpunten, al komen significante verschillen voor die lastig zijn te verklaren. Zonder op hetzelfde moment gemaakte luchtfoto's is laserdata soms moeilijk te interpreteren. Een landmeter meet gegarandeerd het maaiveld en doet dat bovendien met een hogere precisie dan met laseraltimetrie mogelijk is. Anderzijds meet hij relatief weinig punten en is achteraf niet met zekerheid te zeggen waarom de baak juist daar geplaatst werd. In laseraltimetrie zit door vegetatie, zelfs al is het laag gras, een zekere spreiding en een zekere systematische hoogtefout. Het is aan te bevelen naar de invloed van vegetatie, de verschillen tussen terrestrische en laserdata en de potentie van het opnemen meerdere reflecties per puls voor de bepaling van het maaiveld nader onderzoek te doen.

Kniklijnen zoals een kruin- of teenlijn zijn, doordat er bij deze zeer langgerekte structuren als het ware een middeling plaatsvindt, zowel op het oog als met programmatuur heel precies te localiseren, zelfs in data met een geringe puntdichtheid, beter zelfs dan de man op de dijk dat kan. Voor het afleiden van een profiel uit de laserdata dient exact de locatie van het terrestrische profiel gekozen te worden; als dit niet recht is dient ook daarmee rekening gehouden te worden. De praktijk onder waterkeringbeheerders om opgeleverde laserhoogtebestanden te controleren met behulp van terrestrisch gemeten profielen van waterkeringen is onverstandig omdat hierin te veel storende factoren meespelen.

Eén van de toepassingen van de vervaardiging van profielen van waterkeringen is de uitvoering van stabiliteitsberekeningen, onder meer ten behoeve van de toetsing. De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie wilde de minimaal noodzakelijke specificaties voor laseraltimetrie die in dit rapport zijn vastgesteld, toetsen op zijn gevolgen voor de stabiliteitsberekening. GeoDelft heeft deze berekeningen voor drie locaties uitgevoerd op een conventioneel terrestrisch gemeten profiel en op het uit het 50cm-laserhoogteraster van de AHN-WZE-proef bepaalde profiel. De stabiliteitsfactoren laten in het algemeen geen significante verschillen zien. Deze laserdata is hiervoor dus geschikt, zij het dat de voor de stabiliteit cruciale slootdiepte en waterpeil handmatig moeten worden toegevoegd, terwijl de landmeter deze gelijk zou meenemen. Ook moeten no-data-waarden worden verwijderd en moeten de profielen ruim voorbij de teensloten lopen.

Laseraltimetrie heeft een enorme potentie voor waterkeringbeheer, die niettemin nog verder kan worden benut. Met name doet de praktijk van het beschouwen van profielen geen recht aan het vlakdekkende karakter van de data. Het verdient aanbeveling de toepassing van meer vlakdekkende analysemethoden te onderzoeken. In praktijk wordt aan de hoge eisen aan de planimetrische precisie nauwelijks voldaan, terwijl deze eisen onder meer zinvol zijn bij hoogte- en zettingsverschilbepalingen, een belangrijke potentiële toepassing van laseraltimetrie.

Met dit document is de basis gelegd voor de stroomlijning van de uitbesteding van laseraltimetrieprojecten en de onderbouwing daarvan met weloverwogen specificaties. Niettemin is daarmee nog niet aan de gehele doelstelling van de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie voldaan. In de beoogde fase 3 worden onder andere documenten opgesteld waarin een standaardbestek, beoordelingscriteria ten behoeve van de gunning, een standaardcontract en een controleprocedure worden uitgewerkt. Daarnaast wordt de vergelijkbaarheid van met GPS of waterpassingen gemeten profielen met laseraltimetrie onder de loep genomen, wordt de invloed van onder meer vegetatie op de bepaling van het maaiveld onderzocht en wordt onderzocht in hoeverre terrestrische metingen en technieken als radarinterferometrie en wegdekmeetmethodieken laseraltimetrie kunnen aanvullen. Ook wordt de bij waterschappen en AHN-2008 ter beschikking gekomen laserdata geanalyseerd met het oog op het optimale gebruik ten behoeve van het waterkeringbeheer.

DE STOWA IN HET KORT

De Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, kortweg STOWA, is het onderzoeksplatform van Nederlandse waterbeheerders. Deelnemers zijn alle beheerders van grondwater en oppervlaktewater in landelijk en stedelijk gebied, beheerders van installaties voor de zuivering van huishoudelijk afvalwater en beheerders van waterkeringen. Dat zijn alle waterschappen, hoogheemraadschappen en zuiveringsschappen en de provincies.

De waterbeheerders gebruiken de STOWA voor het realiseren van toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk juridisch en sociaal-wetenschappelijk onderzoek dat voor hen van gemeenschappelijk belang is. Onderzoeksprogramma's komen tot stand op basis van inventarisaties van de behoefte bij de deelnemers. Onderzoekssuggesties van derden, zoals kennisinstituten en adviesbureaus, zijn van harte welkom. Deze suggesties toetst de STOWA aan de behoeften van de deelnemers.

De STOWA verricht zelf geen onderzoek, maar laat dit uitvoeren door gespecialiseerde instanties. De onderzoeken worden begeleid door begeleidingscommissies. Deze zijn samengesteld uit medewerkers van de deelnemers, zonodig aangevuld met andere deskundigen.

Het geld voor onderzoek, ontwikkeling, informatie en diensten brengen de deelnemers samen bijeen. Momenteel bedraagt het jaarlijkse budget zo'n zes miljoen euro.

U kunt de STOWA bereiken op telefoonnummer: 030 -2321199.

Ons adres luidt: STOWA, Postbus 8090, 3503 RB Utrecht.

Email: stowa@stowa.nl.

Website: www.stowa.nl

LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER

INHOUD

	VOORWOORD	
	SAMENVATTING	
	STOWA IN HET KORT	
1	INLEIDING	1
1.1	Achtergrond	1
1.2	Probleemstelling	2
1.3	Doelstellingen	2
1.4	Leeswijzer	3
1.5	Vooruitblik	4
2	ONTWIKKELINGEN ROND GROOTSCHALIGE LASERALTIMETRIE	5
2.1	Inleiding	5
2.2	Een aantal constateringen	5
2.3	Ontwikkelingen op het gebied van specificaties	7
2.3.1	Technische aspecten	7
2.3.2	Temporeel aspect: jaar en moment van inwinnen	8
2.3.3	Nevenaspecten	9
2.3.4	Gebruiksdoelstellingen	9
2.4	Conclusie	10

3	EISEN VOLGEND UIT HET VOORSCHRIFT TOETSEN OP VEILIGHEID	12
3.1	Inleiding	12
3.2	Primaire versus regionale waterkeringen	12
3.3	De VTV hanteert geen Stochastische benadering	13
3.4	Methodiek toetsing op hoogte in de VTV	13
3.5	De hoogte van de kruin	14
3.6	Puntafstand langs de waterkering	15
3.7	Planimetrische precisie langs de waterkering	16
3.8	Puntafstand dwars op de waterkering	16
3.9	Planimetrische precisie dwars op de waterkering	17
3.10	Taludhelling	17
3.11	De andere kant van de balans: het toetspeil	18
3.12	Uitvoering van de toetsing	19
3.13	Tijdafhankelijkheid van de hoogtemeting	19
3.14	Conclusies geometrische hoogtecriteria	20
4	EISEN AAN LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER	22
4.1	Inleiding	22
4.2	Specificaties proefproject AHN-2 Zeeland	22
4.2.1	Inleiding	22
4.2.2	Gebruikerseisen zonder vertaling naar technische eisen	23
4.2.3	Hoogteprecisie	23
4.2.4	Planimetrische precisie	24
4.2.5	Filtering en herbemonstering	24
4.2.6	Tijdstip en overige specificaties laservlucht	24
4.2.7	Te leveren producten	24
4.2.8	Kwaliteitscontrole en -borging	25
4.3	Enige overwegingen rond de specificaties	25
4.3.1	Inleiding	25
4.3.2	Een ander regime voor regionale keringen?	25
4.3.3	Nearest neighbour-, bilineaire interpolatie en een Hoekgridbestand	26
4.3.4	Zettingbepalingen	27
4.4	De eisen en de discussie rond de totstandkoming daarvan	28
4.4.1	Inleiding	28
4.4.2	Hoogteprecisie	29
4.4.3	Planimetrische precisie	30
4.4.4	Punt dichtheid of laserpuntfrequentie	32
4.4.5	Rastergrootte laserhoogtebestand	33
4.4.6	Filtering	34
4.4.7	Strookbreedte, vlieghoogte of te meten strook	36
4.4.8	Dataformaat	36
4.4.9	Optische beelden	37
4.4.10	Videobeelden	38
4.4.11	Orthofotomozaïek	38
4.4.12	Kartering	39
4.4.13	Uitvoering van de vlucht	41
4.4.14	Kwaliteitscontrole door de aannemer	42
4.4.15	Acceptatiecontrole door de opdrachtgever	42
4.4.16	Metadata en gebruikersdocumentatie	42

4.5	Conclusie gewenste specificaties laseraltimetrie voor waterkeringbeheer	42
4.6	gewenste specificaties laseraltimetrie voor specifiek gebruik	44
5	PROCESBESCHRIJVING VAN LASERALTIMETRIEPROJECTEN	46
5.1	Inleiding	46
5.2	Het specificatieproces	47
5.3	Het aanbestedingproces	47
5.3.1	Inschrijvingsvereisten	47
5.3.2	Opstellen van het bestek en gunningscriteria	48
5.3.3	Aanbestedingstraject	48
5.3.4	De gunning	49
5.3.5	Het contract	49
5.4	Het proces vóór uitvoering van de opdracht	49
5.5	Het proces tijdens uitvoering van de opdracht	50
5.6	Het proces na uitvoering van de opdracht	50
6	EVALUATIE LASERDATA AHN-PROEF ZEELAND MET HET OOG OP WATERKERINGBEHEER	51
6.1	Inleiding	51
6.2	Typen waterkering en Data	51
6.3	Analyse van de eigenschappen van de laserdata	53
6.3.1	Inleiding	53
6.3.2	Bewerking, analyse, presentatie en commentaar	53
6.3.3	De laserdata van Noord-Beveland van de proef AHN-WZE	53
6.3.4	De laserdata van een boezemkade van Hollands Noorderkwartier	59
6.4	De vergelijking van dwarsprofielen uit de laserdata met terrestrische profielen	62
6.4.1	Inleiding	62
6.4.2	Werkwijze bij de vergelijking van de dwarsprofielen	63
6.4.3	Vergelijking van de laserprofielen met de terrestrische profielen van de AHN-WZE-proef	66
6.4.4	Analyse van laserdata met hogere punt dichtheid van een regionale kering van Hollands Noorderkwartier	76
6.5	Stabiliteitsberekeningen door GeoDelft	77
6.5.1	Inleiding	77
6.5.2	Bodemopbouw en freatische lijnen	77
6.5.3	Bewerking van de data	77
6.5.4	Resultaten van de stabiliteitsberekeningen	78
6.6	Conclusies	82
7	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	83
7.1	Conclusies	83
7.1.1	Organisatorische conclusies	83
7.1.2	Technische conclusies	84
7.1.3	Conclusies evaluatie proef AHN-WZE	84
7.1.4	Conclusies stabiliteitsberekeningen	86
7.2	Aanbevelingen	87
7.2.1	Organisatorische aanbevelingen	87
7.2.2	Technische aanbevelingen	87
7.2.3	Aanbevelingen stabiliteitsberekeningen	88
7.2.4	Aanbeveling voor fase 3 Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie	88

	BIJLAGEN	
A	GEOSTATISTISCHE BEGRIPPEN	91
A.1	INLEIDING	91
A.2	HET STOCHASTISCH KARAKTER VAN MEETWAARDEN	91
A.3	DE NORMALE VERDELING, STANDAARDAFWIJKING EN GEMIDDELDE WAARDE	92
A.4	PRECISIE, STANDAARDAFWIJKING, NAUWKEURIGHEID EN BETROUWBAARHEID	93
A.5	ILLUSTRATIE: EEN DIJK GEMETEN MET LASERALTIMETRIE	94
A.6	SYSTEMATISCHE VERSUS TOEVALLIGE FOUTEN	96
A.7	IDEALISATIEPRECISIE	98
A.8	MIDDELEN VAN LASERDATA TOT EEN RASTER	98
A.9	PRECISIE IN LIGGING	99
A.10	KWALITEITSBEGRIJPPEN	99
B	BEGRIJPPEN	102
C	GESPREKSVERSLAGEN VOORSCHRIFT TOETSEN OP VEILIGHEID	108
D	ANALYSE VAN BESTAANDE BESTEKKEN	111
D.1	INLEIDING	111
D.2	ENIGE OPMERKINGEN OVER HET BESTEK VAN AHN-2 VERSUS DAT VAN DE WATERSCHAPPEN	111
D.3	ENIGE OPMERKINGEN OVER DE BESTEKKEN VAN DE DEELNEMENDE WATERSCHAPPEN	113
E	OVERZICHT STANDAARDBESTEK UITBESTEDING LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER	116
F	OVERZICHT GUNNINGSCRITEIA LASERALTIMETRIE-AANBIEDINGEN	118
F.1	DOEL DOCUMENT	118
F.2	VOORSTEL INHOUDSOPGAVE	118
G	OVERZICHT CONTRACT OPDRACHTGEVER / OPDRACHTNEMER LASERALTIMETRIE	120
G.1	DOEL DOCUMENT	120
G.2	VOORSTEL INHOUDSOPGAVE	120
H	OVERZICHT CONTROLEPROCEDURE UITBESTEDING LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER	122
I	REFERENTIES	124

1

INLEIDING

1.1 ACHTERGROND

Naar aanleiding van de kadeverschuivingen bij Wilnis en Terbregge in 2003 en de verzakking van de kanaaldijk bij Stein in 2004 stelden stowa en Rijkswaterstaat dww een plan van aanpak op voor onderzoek naar verbetering van inspecties van waterkeringen. In het rapport van *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Stroomlijning van inrichting en uitvoering van inspecties* [11] werd onder andere geconstateerd dat er behoefte is aan

- een strakkere stroomlijning van inrichting en uitvoering van visuele inspecties;
- een eenduidige definitie van en instructies voor het inspectieproces en aan borging van de reproduceerbaarheid ervan;
- producten die de inrichting en uitvoering van inspecties ondersteunen.

Geconstateerd werd tevens dat, in aanvulling op visuele inspecties, remotesensingtechnieken en in-situ-metingen ondersteuning kunnen bieden aan het verkrijgen van van goede waarnemingen en diagnoses van de toestand van waterkeringen.

FASE 1

In het kader van Water Innovatiebron (WINN) werd onderzocht op welke manier aanvullende technieken snel zouden kunnen bijdragen tot het verbeteren van de operationale praktijk van het waterkeringbeheer. In het *Advies aan RWS voor innovatie dijkinspecties* [8] werd geconstateerd dat dijkinspecties momenteel nog hoofdzakelijk gebaseerd zijn op visuele waarnemingen en dat de kwaliteit van deze inspecties verbeterd zou kunnen worden door gebruik te maken van technische hulpmiddelen. Omdat het naar verwachting nog enige jaren zal duren alvorens de lopende studies naar optimalisering van dijkinspecties tot een eindoordeel komen, werd aanbevolen nu reeds de inzet van kansrijke hulptechnieken te bevorderen. In de *Concept startnotitie toekomstvisie inspectie en monitoring* [19] werd dit verder uitgewerkt.

FASE 2

De aanbevelingen uit de verkennende fase 1 hebben geleid tot fase 2, waarover in dit rapport wordt gerapporteerd. Een van de kansrijke inwinningstechnieken waarvoor in fase 1 werd aanbevolen de operationele inzet te onderzoeken in een volgende fase en in praktijk te beproeven, is laseraltimetrie. Dit rapport is hiervan een uitvloeisel: probleemstelling en doelstellingen worden verderop uitgewerkt.

FASE 3

Nadat in fase 2 het fundament gelegd is voor de op de praktijk van het waterkeringbeheer toegesneden toepassing van laseraltimetrie, zal in fase 3 de operationele inzet verder worden bevorderd door standaarddocumenten op te stellen en bij lopende inwinningsprojecten onderzoek te doen naar nog openstaande vragen. Dit wordt uitgewerkt in de vooruitblik (§ 1.5) en in de aanbevelingen in dit rapport (§ 7.2).

1.2 PROBLEEMSTELLING

De uitvoering van laseraltimetrie door waterkeringbeheerders vindt momenteel in het algemeen versnipperd plaats. Kennis en ervaring zijn niet centraal aanwezig of geborgd en aanbestedingen en verwerking vinden niet gestroomlijnd plaats. Waterschappen stellen elk op hun eigen wijze specificaties in hun bestekken en besteden individueel aan.

De snelle technische ontwikkeling van laseraltimetrie maakt het mogelijk dat de specificaties voor het landsdekkende maaiveldbestand, het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN), toegevoegen naar de eisen die voor het waterkeringbeheer aan het hoogtebestand gesteld worden. Afstemming is hier noodzakelijk, met name gezien het initiatief van de Stuurgroep AHN om in 2007 met Waterschap Zeeuwse Eilanden een proef te doen voor het vervaardigen van een laseraltimetriebestand dat een voor het AHN ongekende punt dichtheid kent en geschikt zou kunnen zijn voor gebruik met het oog op het waterkeringbeheer.

1.3 DOELSTELLINGEN

Conform het genoemde advies aan Rijkswaterstaat met betrekking tot innovatieve dijkinspecties is door STOWA in 2006 de *Werkgroep Grootschalig uitvoeringsproject Laseraltimetrie* (WGL) opgericht. Deze werkgroep, die aansluiting zoekt bij lopende initiatieven binnen de waterschappen en het AHN, stelt zich het volgende tot doel:

De WGL ondersteunt de waterschappen en het AHN bij het opzetten en uitvoeren van een grootschalig uitvoeringsproject laseraltimetrie, dat resulteert in een volledig op de werkpraktijk van de waterkeringbeheerder aansluitend laseraltimetrie product.

Bij deze hoofddoelstelling zijn de volgende subdoelstellingen geformuleerd, die voorwaarden zijn voor het doen slagen van de geformuleerde hoofddoelstelling:

- op korte termijn worden ervaringen gedeeld tussen het AHN en waterschappen die reeds ervaring hebben met laseraltimetrie projecten of dit op korte termijn van plan zijn;
- om de samenwerking binnen het uitvoeringsproject te bevorderen en de resultaten eenduidig en uitwisselbaar te krijgen, wordt een standaard specificatie opgesteld waaraan de ingewonnen hoogtegegevens dienen te voldoen;
- de gegevens in het hoogte-informatiesysteem dienen
 - voldoende gestandaardiseerd te zijn;
 - geïmplementeerd te zijn in de organisatie;
 - volgens een standaardprocedure te worden ingewonnen en verwerkt;
- ten behoeve van een gestroomlijnde aanbesteding worden een standaardbestek, beoordelingscriteria ten behoeve van de gunning, een standaardcontract en een controleprocedure opgesteld;
- kennis en ervaring op het gebied van laseraltimetrie en de specificatie, aanbesteding, controle en het gebruik ervan wordt vastgelegd en de verspreiding ervan onder waterkeringbeheerders wordt bevorderd.

De WGL denkt met de Stuurgroep AHN mee over hun uitvoeringsprogramma, waarbij er naar gestreefd wordt Nederland in kaart te brengen met hoogtegegevens die behalve voor waterbeheer ook voor waterkeringbeheer bruikbaar zullen zijn.

De komst van een dergelijk AHN-2 maakt de initiatieven en documenten van de WGL niet overbodig:

- de WGL-documenten maken kennis toegankelijk en overdraagbaar binnen een waterschap;
- de documenten vormen een goede kennisbasis om bestuur en management in te lichten;
- de actualisatie van het AHN-2 kan voor waterkeringbeheerders soms te lang duren, waardoor zij toch een eigen laseraltimetrie project aanbesteden en behoefte hebben aan ondersteuning daarbij;
- waterkeringbeheerders kunnen behoefte hebben aan hoger of anders gespecificeerde laseraltimetriedata dan die van het AHN-2 of aan een combinatie met andere data en daarom een eigen laseraltimetrie project aanbesteden.

De WGL-documenten hebben niet tot doel de inhuur van externe begeleiding overbodig te maken.

1.4 LEESWIJZER

Zowel de techniek van hoogtemeting met laseraltimetrie als de toepassing en organisatie daarvan maken een sterke ontwikkeling door. In hoofdstuk 2 deze ontwikkelingen geschetst, op basis waarvan de werkgroep grootschalig uitvoeringsproject laseraltimetrie (WGL) van gedachten heeft gewisseld over de grootschaliger toepassing van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer.

Bij de vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen wordt door waterschappen intensief gebruik gemaakt van laserhoogtebestanden. In hoofdstuk 3 zijn uit het daarbij gebruikte Voorschrift Toetsen op Veiligheid criteria afgeleid die aan het gebruik van laseraltimetrie te stellen zijn, opdat de resulterende bestanden geschikt zijn om te gebruiken voor de toetsing.

In hoofdstuk 4 wordt, mede op basis van bestaande bestekken van waterschappen en die van de proef van het AHN in Zeeland, een analyse gemaakt van criteria die aan laseraltimetrische data dienen te worden gesteld, opdat deze zo goed mogelijk aansluit op de informatiebehoefte die de waterkeringbeheerder heeft. Aan het einde van hoofdstuk 4 mondt deze analyse uit in een beredeneerde tabel met gedetailleerde specificaties. Ondersteunend aan deze analyse is de toelichting bij geostatistische en andere begrippen in bijlage A en B.

In hoofdstuk 5 worden, ter ondersteuning van de uitbesteding van laseraltimetrie projecten, de verschillende processen beschreven: het specificatieproces, het aanbestedingsproces en het proces tijdens en na uitvoering, met onder meer de controle. Deze stappen zullen in een vervolproject worden uitgewerkt. Van de dan op te leveren documenten is in de bijlagen E, F, G en H een inhoudsoverzicht gegeven.

In het voorjaar van 2007 werd door de stuurgroep AHN in samenwerking met het Waterschap Zeeuwse Eilanden een proefproject uitgevoerd dat erop is gericht te onderzoeken in hoeverre een generiek AHN-bestand met hogere specificaties dan tot dan toe gebruikelijk kan worden opgeleverd. In hoofdstuk 6 is de evaluatie beschreven die de Werkgroep Grootschalig Uitvoeringsproject Laseraltimetrie uitvoerde van deze laserdata, om te onderzoeken of deze data voldoet voor gebruik voor waterkeringbeheer. Hierbij wordt de laserdata geanalyseerd, vergeleken met terrestrische data en worden stabiliteitsberekeningen vergeleken.

Dit rapport besluit in hoofdstuk 7 met conclusies en aanbevelingen.

1.5 VOORUITBLIK

Met dit document is nog niet aan de gehele doelstelling van de Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie voldaan. Dit document legt de basis voor een gestroomlijnde aanbesteding van laseraltimetrie ten behoeve van waterkeringbeheer. In de beoogde fase 3 worden onder andere documenten opgesteld waarin een standaardbestek, beoordelingscriteria ten behoeve van de gunning, een standaardcontract en een controleprocedure worden uitgewerkt. Daarnaast wordt de vergelijkbaarheid van met GPS of waterpassingen gemeten profielen met laseraltimetrie onder de loep genomen, wordt de invloed van onder meer vegetatie op de bepaling van het maaiveld onderzocht en wordt onderzocht in hoeverre terrestrische metingen en technieken als radarinterferometrie en wegdekmeetmethodieken laseraltimetrie kunnen aanvullen. Ook wordt de bij waterschappen en AHN-2008 ter beschikking gekomen laserdata geanalyseerd met het oog op het optimale gebruik ten behoeve van het waterkeringbeheer.

2

ONTWIKKELINGEN ROND GROOTSCHALIGE LASERALTIMETRIE

2.1 INLEIDING

Zowel de techniek van hoogtemeting met laseraltimetrie als de toepassingen daarvan maken een sterke ontwikkeling door. Daarnaast zijn er verschillende organisatorische ontwikkelingen, zoals de intensievere toepassing van laseraltimetrie door waterschappen en de actualisatie van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) met hogere specificaties dan tot dan toe. In dit hoofdstuk worden achtergronden en ontwikkelingen geschetst op basis waarvan de werkgroep grootschalig uitvoeringsproject laseraltimetrie (WGL) van gedachten heeft gewisseld over de grootschaliger toepassing van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer, leidend tot de uitwerking in de volgende hoofdstukken.

In § 2.2 wordt een aantal algemene constateringën beschreven. Deze zijn onder meer afgeleid door de waterkeringbeheerders van de aangeleverde bestekken en offertes. In § 2.3 worden de ontwikkelingen op het gebied van de specificaties van laseraltimetrie beschreven. In § 2.4 worden conclusies geformuleerd.

2.2 EEN AANTAL CONSTATERINGEN

Op basis van de ontwikkelingen in de techniek, bij commerciële aanbieders en bij de uitbesteding van laseraltimetrieprojecten door waterkeringbeheerders, wordt in deze paragraaf een aantal algemene uitgangspunten en constateringën beschreven.

- a. Generieke, grootschalige laseraltimetrieprojecten als het AHN worden onder meer voor waterbeheer gebruikt. Laseraltimetrieprojecten voor waterkeringbeheer zijn vanwege de hogere vereiste punt dichtheid tot nu toe gescheiden uitgevoerd van generieke projecten.
- b. De stand van de techniek maakt het nu waarschijnlijk mogelijk de tot nu toe gescheiden toepassingsgebieden waterbeheer en waterkeringbeheer te bedienen met één laseraltimetrie-hoogtebestand. Zo werd tot voor kort standaard 1 punt per vierkante meter ingewonnen bij AHN-projecten; dit was enige jaren geleden nog 'onbetaalbaar'. De proef die de Stuurgroep AHN met het Waterschap Zeeuwse Eilanden uitvoert voor het AHN-2 wint omstreeks 10 punten per vierkante meter in. In oktober 2007 leek het kosteneffectief de specificaties voor een generiek bestand inderdaad te verhogen en zal dit vanuit de Stuurgroep AHN, Rijkswaterstaat en het Waterschapshuis worden georganiseerd. Verschillende randvoorwaarden (ofwel kritieke succesfactoren) spelen een rol, zoals verenigbaarheid van specificaties, prijs, planning en de mogelijke standaard bijproducten.

- c. De behoefte aan het inwinnen van specifieke bestanden door individuele organisaties zal blijven bestaan. Het is onduidelijk waar de grens komt te liggen tussen het algemene (generieke) AHN-bestand en de behoefte aan specifieke bestanden. Deze grens wordt door meerdere (ook niet-technische) aspecten en randvoorwaarden bepaald. Zo wint Rijkswaterstaat naast het AHN ook kustbestanden in met laseraltimetrie voor de ligging van duinen en kustlijn.
- d. Een hogere kwaliteit van een generiek bestand zoals AHN heeft meer potentiële toepassingsgebieden: naast waterbeheer en waterkeringbeheer ook bijvoorbeeld ruimtelijke ordening (gemeenten), infrastructuurbeheer, 3D-modellering en visualisaties. Besluitvorming rondom een generiek bestand wordt binnen een veel breder kader gemaakt, er zijn dus veel meer partijen direct of indirect bij betrokken. Dit vergt een intensievere afstemming en ook daaraan hangt een prijskaartje.
- e. Er zijn meer technieken in opkomst die mogelijkheden bieden die vergelijkbaar met of complementair aan laseraltimetrie zijn, bijvoorbeeld fotogrammetrie, nabij en thermisch infrarood en radarinterferometrie. Elk heeft zijn eigen beperkingen en sterke kanten. Zie daarvoor L.M.Th. Swart, *Remote sensing voor inspectie van waterkeringen* [18]. De combinatie van opnametechnieken kan voor specifieke toepassingen interessant zijn, met name laseraltimetrie en luchtfoto. Daarbij concurreren deze verschillende technieken elkaar doordat ze een beroep doen op dezelfde schaarse middelen binnen een organisatie (mensen, geld, tijd).
- f. Het is belangrijk een onderscheid te maken tussen de organisatie van generieke (algemene, vlakdekkende, grootschalige) projecten van laseraltimetrie en de organisatie van specifieke (kleinschalige, gerichte) toepassingen. Dit onderscheid komt neer op de vraag: eerst samenwerken en dan inwinnen of eerst zelf inwinnen en daarna samenwerken. Bij specifieke projecten bepaalt de organisatie alles zelf en is de organisatorische inspanning geringer dan bij generieke bestanden, waar het accent veel meer op het organisatorische vlak ligt vanwege de intensieve samenwerking tussen verschillende organisaties. Dit zal effectief en efficiënt georganiseerd moeten worden en kost veel tijd.
- g. Waterschappen zijn belangrijke gebruikers van hoogte-informatie zoals ingewonnen met laseraltimetrie. Ze worden steeds grootschaliger en hebben steeds meer financiële en organisatorische slagkracht. Het financiële optimum voor aanbesteding van laseraltimetrie-projecten kan steeds meer binnen één waterschap worden gevonden.
- h. Laseraltimetrie als techniek wordt steeds meer volwassen. Een belangrijk probleem bij het aanbesteden van laseraltimetrie-projecten is dat deze projecten Europees of meervoudig onderhands aanbesteed moeten worden. Als de kritieke succesfactoren in bestekken en gunningsprocedures niet duidelijk of volledig zijn beschreven, bestaat de kans dat projecten aan prijsvechters wordt gegund waarbij het resultaat achteraf te wensen over laat. Kwaliteit is een rekbaar begrip en het is niet eenvoudig om kwaliteitseisen in een bestek eenduidig te beschrijven.

2.3 ONTWIKKELINGEN OP HET GEBIED VAN SPECIFICATIES

Op basis van de beschikbare informatie en recente ervaringen kan worden gesteld dat de specificaties van een laseraltimetrieproject voor waterkeringbeheer worden bepaald door aantal aspecten:

- 1 technische aspecten:
 - puntdichtheid (meetpunten/m²);
 - hoogteprecisie;
- 2 temporeel aspect:
 - jaar en moment van inwinnen;
- 3 nevenaspecten:
 - specificaties eindproduct (gridgrootte, filtering e.d.);
 - inwingsgebied (strookbreedte);
- 4 gebruiksdoelstelling:
 - hoogtemetingen;
 - karteringen.

De ontwikkelingen op het gebied van deze aspecten worden in de volgende paragrafen toegelicht. De daadwerkelijk gewenste specificaties worden beschreven en onderbouwd in § 4.5.

2.3.1 TECHNISCHE ASPECTEN

PUNTDICHTHEID

De standaard voor waterkeringbeheer ligt nu tussen 20 en 40 pt/m². De ondergrens voor waterkeringbeheer wordt gezien als 10 pt/m². Als bovengrens kan 50 worden gehanteerd. In het rapport *DTM-ontwerp met FLI-MAP 400. Eindrapport pilotproject Rijksweg 2* [1] is zelfs sprake van 74 pt/m². AHN was traditioneel 1 pt per 9 m² en ligt nu in de praktijk op ongeveer 1 pt/m². Dit is voldoende voor waterbeheerprojecten (peilbesluiten). In het proefproject dat het AHN in 2007 met Waterschap Zeeuwse Eilanden uitvoert, ligt de puntdichtheid reeds op omstreeks 10 pt/m². In oktober 2007 werd besloten de nieuwe generatie AHN (AHN-2) inderdaad vanaf 2008 zo uit te voeren.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de specificatie van puntdichtheid verandert als gevolg van de mogelijkheid meerdere reflecties ('returns') per laserpuls vast te leggen. Met de nieuwere systemen kunnen standaard 2 tot 4 returns per puls worden vastgelegd en er zijn zelfs systemen waarbij de reflectie als continu signaal wordt vastgelegd (zie voor meer informatie en illustraties *Remote sensing voor inspectie van waterkeringen* [18]). Op die manier kan men hoogteverschillen tussen bijvoorbeeld maaiveld en vegetatie onderscheiden, waarbij het punt dus niet door filtering uit het bestand behoeft te worden verwijderd.

HOOGTEPRECISIE

De standaard voor de precisie van de gemeten hoogte van een individueel laserpunt ligt rond de $\sigma = 5$ cm voor harde topografie. De stand der techniek is ongeveer 4 cm. In speciale gevallen is een standaardafwijking van beter dan 2 cm haalbaar. Zie onder meer het net genoemde rapport *DTM-ontwerp met FLI-MAP 400. Eindrapport pilotproject Rijksweg 2* [1].

Deze getallen gelden uitsluitend voor harde topografie, zoals asfalt. Waterkeringen bestaan niet zelden voor een groot gedeelte uit grasbekleding en de hoogteprecisie van de bepaling van het maaiveld is daarvoor minimaal twee- tot viermaal zo slecht omdat niet altijd het maaiveld wordt gemeten. Belangrijk is daarom dat laseraltimetrie voor waterkeringen vóór het groeiseizoen wordt uitgevoerd. Daarnaast zullen hoogtemetingen met laseraltimetrie die met terrestrische technieken (GPS en waterpassen) nooit geheel kunnen vervangen, omdat de hoogteprecisie van laatstgenoemde technieken hoger is en een landmeter zijn baak weloverwogen op het maaiveld kan zetten, hoe hoog de vegetatie ook is.

Het gaat hierboven om de toevallige fout van de individuele laserhoogtemeting en niet om de systematische fouten. Zie voor een toelichting op deze geostatistische begrippen bijlage A. Het is belangrijk dat de hoogteprecisie correct wordt gespecificeerd in de aanbesteding, op welke ondergrond deze van toepassing is en hoe gecontroleerd wordt dat een bestand aan de specificatie voldoet.

De hoogteprecisie zelf is niet alleenzalmakend. Het tijdsaspect speelt bijvoorbeeld ook een rol. De tijd beïnvloedt de hoogte en relativeert daarmee de hoogteprecisie. Zie de volgende paragraaf.

Daarnaast speelt de ondergrond een belangrijke rol: hoe belangrijk en relevant is het een bos of natuurgebied met 5 cm nauwkeurigheid in te winnen? De natuurlijke hoogtevariatie in die gebieden is bijvoorbeeld al veel groter. Dit wordt in de appendix toegelicht met het begrip ‘idealisatieprecisie’: zie § A.7. Ook de weersomstandigheden tijdens de inwinning beïnvloeden de hoogteprecisie.

De hoogtenauwkeurigheid ziet er op papier (bestek, offerte) onderscheidend uit; in de praktijk blijkt dit aspect dus veel complexer en genuanceerder te liggen. Naar de invloeden van genoemde aspecten op de kwaliteit zou gedegen onderzoek moeten worden gedaan.

2.3.2 TEMPOREEL ASPECT: JAAR EN MOMENT VAN INWINNEN

Ook het exacte moment van opname en de conditie van het oppervlak is van belang voor de te behalen hoogteprecisie: is er 's nachts gemeten, overdag, bij regen, was het droog, was het helder weer, hoeveel wind stond er, etc. etc.

Naast de kwaliteit van de inmeting is ook de ‘leeftijd’ van de hoogtemeting van belang. In zettingsgevoelige gebieden is dit aspect belangrijker dan in gebieden waar zetting geen probleem is. Hierdoor kan het belangrijk zijn vaker te meten, of het moment van inmeten (het jaar waarin men de data inwint) beter af te stemmen op de werkprocessen, zodat de data ‘vers’ is en de hoogste waarde en actualiteit heeft.

Een ander temporeel aspect is de snelheid waarmee de data na inmeten beschikbaar komt voor de gebruiker. Stelregel: hoe sneller hoe beter. Er kunnen vraagtekens gezet worden bij producten die een lange verwerkingstijd nodig hebben voordat de eindproducten beschikbaar komen. Dit is vaak een indicatie dat op de ruwe producten veel vereffening moet worden toegepast en dit vermindert de betrouwbaarheid van het product. Bovendien: als een bestand heel nauwkeurig kan worden ingemeten maar het duurt vervolgens een jaar voordat de bestanden kunnen worden opgeleverd en gebruikt, representeren de metingen dan nog steeds het terrein?

2.3.3 NEVENASPECTEN

EINDPRODUCTSPECIFICATIES (GRIDGROOTTE, FILTERING E.D.)

Laseraltimetrieproducten worden in de regel niet op het niveau van de ruwe puntdata gebruikt. De meest gebruikte toepassing is een hoogtegrid. Hierbij wordt een gewogen gemiddelde hoogte bepaald voor een cel van 1 bij 1 meter, 50 cm of zelfs 25 cm. Alle waarden in deze cel worden (gewogen) gemiddeld (zie het begrip ‘middeling’ in bijlage B).

Ook kunnen selecties worden gekozen (alleen de hoogste waarden, laagste waarden) of kunnen de ruwe metingen worden gefilterd. Ruwe meetwaarden bestaan eigenlijk niet meer: er moet altijd een keuze worden gemaakt welke laserhoogte wordt gebruikt (welke return). Daarnaast kan men op verschillende manieren filteren (zie § 4.4.6). Dit kan geschieden om zo goed mogelijk het maaiveld te representeren, maar ook om bijvoorbeeld vegetatie en bebouwing te classificeren.

INWINGEBIED (STROOKBREEDTE)

Bij specifieke inmeting, bijvoorbeeld van waterkeringen, moet het in te meten gebied worden aangegeven. Er ontstaan dus altijd randen. De bepaling van dit gebied is niet altijd even eenvoudig.

Bij een generieke inmeting wordt een veel groter gebied ingemeten en zijn er dus minder randen. Ook hier is het bepalen van de gebiedsgrenzen niet eenvoudig. Worden er juridische grenzen aangehouden (waterschapsgrens, provinciegrens) of natuurlijke grenzen (rivieren, waterscheiding), wordt overlap ingevlogen op de grens of niet?

2.3.4 GEBRUIKSDOELSTELLINGEN

HOOGTEMETINGEN

Er zijn verschillende gebruiksdoelstellingen voor het inmeten van hoogten met laseraltimetrie. In het algemeen gaat het om het verkrijgen van een nauwkeurig en gedetailleerd hoogtemodel van de waterkeringen. Hieruit kunnen bijvoorbeeld profielen worden gegenereerd. Soms wordt laseraltimetrie slechts gedaan om foto's goed te kunnen leggen of omdat men de laser toch in het vliegtuig heeft. Daarnaast kan een meting indicatief zijn of juist dienen voor de oplevering van een belangrijke basisbestand, waarop bijvoorbeeld de wettelijk voorgeschreven vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen wordt gebaseerd of waarmee de legger wordt gevuld of het beheerregister wordt geactualiseerd. Ook voor dijkversterkingen of voor zettingsbepalingen kan laseraltimetrie worden gebruikt.

KARTERINGEN

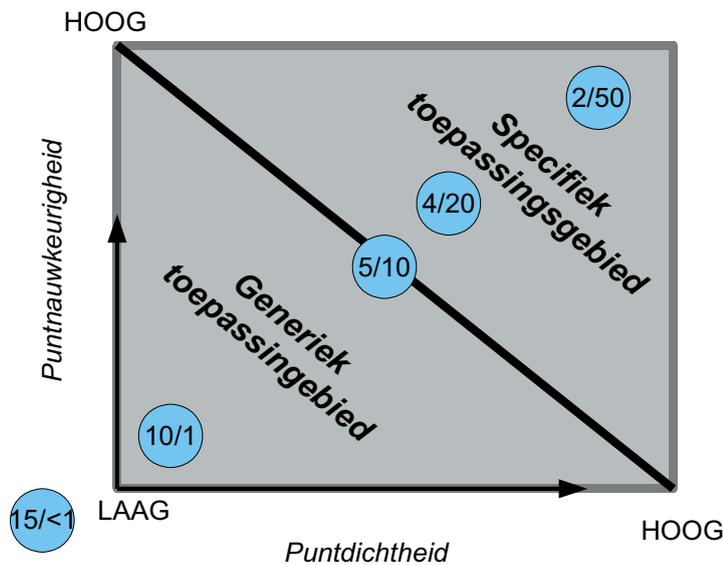
Bijproducten uit laseraltimetrieprojecten zijn bijvoorbeeld nauwkeurige luchtfoto's. De combinatie laseraltimetrie en luchtfoto's is een sterke. Op basis van de combinatie van deze twee producten kunnen 2D- en 3D-karteringen worden uitgevoerd (zie § 4.4.12). Daarbij worden vaak de laserpunten en niet de rasterbestanden gebruikt. De gekarteerde bestanden kunnen worden ondergebracht in een GIS- of CAD-omgeving.

2.4 CONCLUSIE

Figuur 1 geeft een schematische voorstelling van de ontwikkeling en de stand van de techniek van laseraltimetrieprojecten gericht op de inwinning van deze hoogtedata.

Twee factoren bepalen hier de mate waarin een project generiek, in samenwerking en grootschalig kan worden uitgevoerd of wanneer sprake is van specifieke projecten met een technische specificatie die niet kosteneffectief grootschalig kan worden uitgevoerd: het gaat om de punt dichtheid en de puntnauwkeurigheid. De schaal is relatief ten opzichte van de stand der techniek en wordt niet exact aangegeven. Was vroeger een punt dichtheid van één punt per m² het hoogst haalbare, nu is het min of meer de 'standaard ondergrens'.

FIGUUR 1 VOOR SPECIFIEKE TOEPASSINGSGEBIEDEN ZIJN DE EISEN IN TERMEN VAN PUNTDICHTHEID (IN PUNTEN PER M²) EN PUNTNAUWKEURIGHEID (IN CM) VAAK HOGER DAN VOOR GENERIEKE TOEPASSINGEN. NAARMATE DE TECHNIEK ZICH ONTWIKKELT, KUNNEN GENERIEKE BESTANDEN GEBRUIKT WORDEN VOOR TOEPASSINGEN WAARVOOR VROEGER SPECIFIEKE PROJECTEN MOESTEN WORDEN UITGEVOERD.



Op de x-as staat aangegeven de punt dichtheid (in pt/m²) en op de y-as de puntnauwkeurigheid (in cm). De cirkels geven de huidige toepassingsgebieden aan, met in de linkeronderhoek de huidige AHN-specificatie van ongeveer 10 cm nauwkeurigheid en een punt dichtheid van 1/m² en rechtsboven het hoogst haalbare met een puntnauwkeurigheid van ongeveer 2 cm en hoge punt dichtheden (hier aangegeven met 50).

De zwarte lijn geeft aan de overgang tussen generieke inwinningsprojecten en de specifieke inwinningsprojecten. Het actueel hoogtebestand Nederland (AHN) is per definitie generiek omdat er één bestand grootschalig wordt vervaardigd dat geheel Nederland dekt. De inwinning van waterkeringen is om verschillende redenen specifiek te noemen: in de eerste plaats is de vereiste punt dichtheid hoog en de vereiste punt precisie eveneens hoog. In de tweede plaats wordt deze hogedichtheidsdata alleen ingewonnen voor een specifieke strook, namelijk de strook die zich over de waterkering slingert.

Op dit moment onderzoekt de stuurgroep AHN een puntnauwkeurigheid van ongeveer 5 cm en een punt dichtheid van 10. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie onderzoekt in dit rapport de gewenste specificaties en de mate waarin de voorgestelde specificaties van het tweedegeneratie-AHN (AHN-2) voldoende zijn voor waterkeringbeheer. Indien de vereiste specificaties strenger zijn dan de AHN-2-specificatie, zal men een specifiek inwinningsproject moeten opzetten.

Dit toont tevens aan dat een belangrijk aandachtspunt bij het vervaardigen van generieke bestanden de vraag is in hoeverre deze aansluiten op de specifieke behoefte van de individuele gebruikers. Als de generieke producten niet aansluiten op de behoefte zullen de producten niet effectief kunnen worden gebruikt en zal de behoefte aan specifieke producten toenemen.

3

EISEN VOLGEND UIT HET VOORSCHRIFT TOETSEN OP VEILIGHEID

3.1 INLEIDING

De basis voor de vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen is het wettelijke *Voorschrift Toetsen op Veiligheid (VTV, De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001–2006)* [3]. Bij deze toetsing wordt door waterschappen intensief gebruik gemaakt van laserhoogtebestanden. In dit hoofdstuk zijn uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid de eisen afgeleid die er bij de aanbesteding van laseraltimetrie aan de lasermetingen te stellen zijn, opdat de resulterende bestanden geschikt zijn om te gebruiken voor de toetsing.

Het meest ondubbelzinnige criterium voor de geometrische eisen aan (de toetsing van) waterkeringen is de kruinhoogte. Op zijn beurt is deze kruinhoogte weer een aspect waarop getoetst wordt volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid. Daarom wordt in dit hoofdstuk de manier geanalyseerd waarop in dat document de toetsing op kruinhoogte wordt voorgescreven.

De hoogte is echter niet het enige geometrische criterium dat in de VTV aan de orde komt. De toetsing op stabiliteit is uiteraard zeer belangrijk en daarbij speelt het dwarsprofiel een belangrijke rol. In dit hoofdstuk gaat het in de eerste plaats om de criteria ter bepaling van de hoogte van de kruin, maar daarnaast komt ook het dwarsprofiel aan de orde.

De analyse in dit hoofdstuk is besproken met twee medewerkers van Rijkswaterstaat DWW. Een samenvatting van deze gesprekken is te vinden in bijlage C.

Met de analyse in dit hoofdstuk en de bespreking van de bestekken van de verschillende waterschappen en de specificaties van de proef AHN-WZE is de Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie uiteindelijk gekomen tot de specificaties zoals deze zijn behandeld in § 4.4 en de tabel in de concluderende § 4.5. Deze zijn uiteraard niet altijd gelijk aan die welke in dit hoofdstuk behandeld worden. De analyse in dit hoofdstuk is echter niet recursief aan de uiteindelijk vastgestelde specificaties aangepast.

3.2 PRIMAIRE VERSUS REGIONALE WATERKERINGEN

Het goed specificeren van laseraltimetrieprojecten kent de hoogste urgentie in het geval van de vijfjaarlijkse toetsing: deze is immers wettelijk voorgeschreven. Aan de andere kant betreft de vijfjaarlijkse toetsing uitsluitend de primaire waterkeringen, terwijl de waterkeringbeheerders ook een zeer grote informatiebehoefte hebben betreffende hun regionale waterkeringen. De inzet van laseraltimetrie kan in deze behoefte voor dit minimaal vijf maal zo grote areaal op een effectieve manier bijdragen.

Met de toetsing van primaire keringen en de opstelling van de exacte eisen daarvoor is reeds veel ervaring. Vóór de VTV was er de Leidraad Toetsen op Veiligheid. Voor wat betreft de regionale keringen is dat veel minder het geval. Ten tijde van het opstellen van dit rapport is de *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen* [3] verschenen. Omdat dit document nog in het conceptstadium verkeert en de eisen in de VTV verder zijn ugekrystalliseerd, wordt in dit hoofdstuk uitsluitend het Voorschrift Toetsen op Veiligheid van de primaire waterkeringen betrokken.

3.3 DE VTV HANTEERT GEEN STOCHASTISCHE BENADERING

De toetsing op hoogte is geen uitzondering in zijn ingewikkeldheid ten opzicht van de andere aspecten in de VTV. Wat echter opvalt is dat in de VTV weliswaar sprake is van marges, maar niet van stochastische onzekerheden zoals ze in bijlage A beschreven worden. De kruinhoogtemarge is een verschil tussen kruinhoogte en toetspeil met inachtneming van toeslagen en dit verschil mag, om twee gevallen te noemen, ten hoogste 0,3 of 0,5 meter zijn. In deze marge zitten waarschijnlijk onzekerheden verwerkt, bijvoorbeeld in het toetspeil, dat uit de met stochastische variaties behepte berekening van de hydraulische randvoorwaarden voortkomt.

De vraag is nu welke onzekerheid er is toegestaan in de kruinhoogte, of preciezer geformuleerd: wat de standaardafwijking van de hoogte mag zijn. Men zou de meting als absoluut juist kunnen opvatten, waarna de marge de stochastische spreiding in de meting opvangt. Daarmee is echter nog allesbehalve duidelijk hoe groot de precisie in de kruinhoogtemeting mag zijn. Daarnaast kan worden opgemerkt dat alleen al de idealisatieprecisie (zie voor een toelichting van dit begrip § A.7) laat zien dat het onverstandig is de kruinhoogtemeting als absoluut juist op te vatten.

Dat de vraag omtrent de gewenste precisie van de bepaling van de kruinhoogte in de VTV niet in stochastische termen wordt beantwoord, maakt het lastig een precisie-eis te stellen aan het met laseraltimetrie (of terrestrisch) in te winnen hoogtemodel. Dit leidt tot onduidelijkheden en interpretaties, zowel in de aanbesteding en controle van de laseraltimetrische data, als in de verwerking van de data door de waterkeringbeheerder.

Overigens is er buiten de VTV beslist aandacht voor het stochastische karakter van metingen en de uitkomst van toetsingen als kansberekening, bijvoorbeeld bij het project Veiligheid Nederland in Kaart (VNK).

3.4 METHODIEK TOETSING OP HOOGTE IN DE VTV

Toetsing is erop gebaseerd dat de 'sterkte' van een aspect van de waterkering tegen een bepaald type faalmechanisme voldoende is, gegeven de 'belasting'. De begrippen sterkte en belasting zijn in de VTV verder uitgewerkt. In het geval van dijken en dammen (katern 5) gaat het, voor zover het het aspect hoogte betreft, om de faalmechanismen overloop en golfoverslag. Beide kunnen een te groot debiet over de waterkering veroorzaken (VTV, katern 5, § 1.2).

'Hoogte' (ht) is een beoordelingsaspect dat een eigen 'toetspoot' vormt, zonder de vele deelsporen die bijvoorbeeld het toetspoot 'stabiliteit' (piping, macrostabiliteit, enz.) kenmerken (VTV, katern 2, § 5). De belasting wordt gevormd door het Toetspeil: "voor de toetsing op hoogte wordt de stilwaterstand in maatgevende omstandigheden gebruikt: dit is gelijk aan Toetspeil plus de toeslagen voor lokale opwaaiing, buistoten en bui-oscillaties" (VTV, katern 5, § 2.1). De sterkte wordt niet alleen gevormd door de kruinhoogte: ook de weerstand van kruin en binnentalud tegen overslag, de eigenschappen op het gebied van begaanbaarheid en de mogelijkheden voor afvoer en berging van overslaand water worden als 'sterktekenmerk' genoemd.

3.5 DE HOOGTE VAN DE KRUIJN

Er wordt getoetst op de absolute hoogte van de buitenkruinlijn of soms, als een ander punt op de kruin hoger is, op de hoogte van dat laatste. Voor de hoogtetoets maakt het feitelijk niet uit waar het hoogtepunt precies ligt. Het gaat erom dat de hoogte de laagste waarde is van een karakteristiek 'stuk' van de waterkering: een sectie (voor de consequentie die dat voor de precisie in de planimetrische positie van het hoogtepunt heeft: zie verderop).

Katern 5, § 3.1 van de VTV: "Het eerste kenmerk is de absolute hoogte ter plaatse van de buitenkruinlijn. Voor de toetsing is van belang wat per sectie de laagste waarde van de kruinhoogte is tot aan de peildatum. In de praktijk is dat meestal de actuele kruinhoogte gecorrigeerd met de zetting en klink die wordt verwacht. De actuele kruinhoogte kan worden bepaald door een lengtewaterpassing over de buitenkruinlijn. De bemonsteringsafstand is afhankelijk van de aanwezige variatie; bij een redelijk uniform profiel kan worden gedacht aan een afstand in lengterichting van 20 m. Een schatting van de zetting en klink tot aan de peildatum kan bijvoorbeeld worden gemaakt door een vergelijking van de gemeten actuele kruinhoogte met metingen van enkele jaren geleden."

Nog afgezien van dat de VTV geen precisie-eis geeft voor de bepaling van de hoogte, zullen de volgende aspecten de vereiste precisie van de hoogte beïnvloeden:

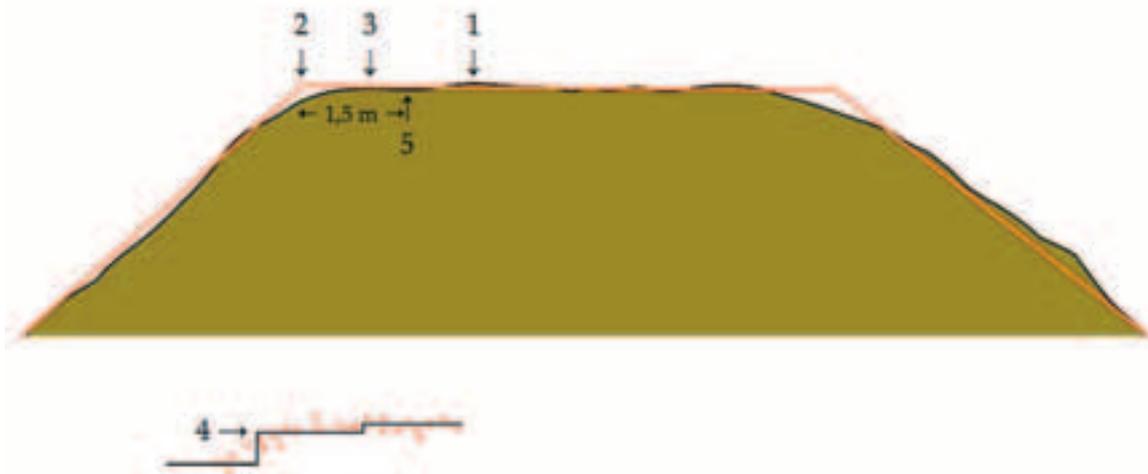
- 1 de precisie van de hoogtemeting zelf als gevolg van de toevallige fout;
- 2 de systematische fout van de hoogtemeting zelf;
- 3 de idealisatieprecisie: in hoeverre de gekozen hoogte (de locatie van het gekozen hoogtepunt) representatief is voor de hoogte van 'het laagste stuk' van de sectie;
- 4 de precisie van de bepaling van de zetting en klink van de kruin;
- 5 de tijd tussen gekozen peildatum en meting van de hoogte.

Voorlopig lijkt de conclusie gerechtvaardigd dat de toevallige en systematische fout van de hoogtemeting zelf niet de beperkende factor zijn in de precisie van de hoogte voor de toets. Daarnaast maken geotechnici duidelijk (zie onder meer bijlage C) dat de sterkte van waterkeringen van vele zaken afhangt, waarvan met name de grondsterkte met grote onzekerheden behept blijft omdat de opbouw en ondergrond slecht bekend zijn. Voor de faalkans is dus een exacte vaststelling van de hoogte enigszins relatief.

De vaststelling van de *buitenkruinlijn* is van groot belang, zowel qua *ligging* als qua *hoogte*. De exacte ligging is van belang vanwege de keur: de verschillende zones zijn vastgesteld ten opzichte van de buitenkruinlijn. De exacte *hoogte* is vooral van belang in verband met de toetsing. In figuur 2 wordt geïllustreerd dat de vaststelling van de ligging en hoogte van de buitenkruinlijn in praktijk niet ondubbelzinnig is. Niet altijd leidt het gebruik van laseraltimetrie tot dezelfde conclusie als de identificatie van de buitenkruinlijn in het terrein. De figuur illustreert de volgende vijf mogelijkheden, die tot verschillende conclusies leiden:

FIGUUR 2

VIJF MANIEREN OM IN PRAKTIJK UIT LASERALTIMETRIEDATA DE LIGGING EN DE HOOGTE VAN DE BUITENKRUINLIJN TE BEPALEN



- 1 de buitenkruinlijn is het hoogste punt van de waterkering;
- 2 de buitenkruinlijn is de snijlijn van de twee vlakken over de kruin en over het buitentalud; omdat de waterkering niet trapezoidaal maar afgerond van vorm is ligt de buitenkruinlijn te ver naar buiten;
- 3 de buitenkruinlijn is de lijn zoals de waterkeringbeheerder die werkelijk waarneemt op de kering (soms eenvoudigweg 'kant weg');
- 4 de buitenkruinlijn wordt bepaald uit het hoogteraster dat door middeling van de lasermeetpunten is berekend; door de middeling van de rastercel waarin de buitenkruinlijn valt over een stuk van de kruin en een stuk van het talud komt de hoogte lager uit dan de hoogte van de feitelijke buitenkruinlijn;
- 5 de buitenkruinlijn wordt bepaald door vanaf de snijlijn van de vlakken over de kruin en over het buitentalud (als in 2) anderhalve meter naar binnen te rekenen.

Als het gaat om de bepaling van de hoogte, met name met het oog op de toetsing, kan de ligging van de kruinlijn het beste volgens methode 5 worden vastgesteld. Ook het werkelijk hoogste punt (punt 1) is daarvoor een zinvolle keuze. Voor de ligging is ook de topografisch vastgestelde kruinlijn (methode 3) acceptabel.

3.6 PUNTAFASTAND LANGS DE WATERKERING

Voor de hoogtetoeets maakt het feitelijk niet uit waar het hoogtepunt precies ligt. Het gaat erom dat de hoogte de laagste waarde is van een karakteristiek 'stuk' van de waterkering. Maar welk stuk? Zijn daaruit een meetpuntafstand (bemonsteringsafstand) en een planimetrische precisie-eis af te leiden?

Overigens wordt er in deze paragraaf vanuit gegaan dat een punt een representatief meetpunt is, onafhankelijk van de vraag of deze terrestrisch of met laseraltimetrie wordt ingewonnen. Bij laseraltimetrie gaat het uiteindelijk om de uit individuele laserreflecties te middelen hoogte van een rastercel en dus om de afmeting van die rastercel (zie de toelichting bij 'middeling' in bijlage B).

De dijkkring wordt verdeeld in secties, die elk apart worden getoetst. Een sectie is een dijkvak waarin slechts één keringstype en één soort opbouw voorkomt (vrij vertaald, zie VTV katern 2, hoofdstuk 7). Binnen elke sectie moet de laagste waarde van de kruinhoogte (tot aan

de peildatum – en dat is iets anders dan ‘op’) worden gevonden en daarop wordt getoetst. De VTV geeft aan dat bij een redelijk uniform dijkprofiel kan worden gedacht aan een puntafstand van 20 meter (zie het citaat op de vorige bladzijde).

Vanwege het glooiende en/of hobbelige verloop van de kruin van de waterkering is 20 meter echter feitelijk geen goede puntafstand. Een landmeter kan op het oog schatten of hij per 20 meter een representatief punt te pakken heeft; met laseraltimetrie kan dat niet. Hoe dan ook is vanwege de idealisatieprecisie (toegelicht in bijlage A, § A.7) een veel kleinere puntafstand te verkiezen. Voor de kruin van een met gras of asfalt beklede waterkering zal, bij een te bereiken precisie van ongeveer 5 centimeter of beter, de puntafstand toch maximaal ongeveer 1 meter mogen zijn. Dit is slechts een schatting van achter een bureau: het hangt af van de werkelijke ‘hobbeligheid’ van de kruin. Van alle zo bepaalde hoogtewaarden wordt per sectie de laagste genomen, waarmee de toetsing wordt uitgevoerd.

Dit laat onverlet dat de dichtheid van de lasermeetpunten hoger zal moeten zijn. Als de idealisatieprecisie dat toelaat, dus als één hoogtewaarde voor een gebied van 1 meter voldoende representatief is (en dat is zeker iets om nader te onderzoeken; in § 6.2 blijkt dit zeker niet het geval voor taluds), dan kunnen verschillende lasermetingen worden gemiddeld tot de waarde voor één gebied. Dit brengt de precisie omhoog (zie bijlage § A.8).

Deze benadering komt sterk overeen met die van het bestek voor het AHN-2-proefproject binnen het Waterschap Zeeuwse Eilanden: de punt dichtheid van de lasermetingen wordt niet gespecificeerd, maar de door middeling te behalen precisie voor één gebiedje van een halve meter wel.

3.7 PLANIMETRISCHE PRECISIE LANGS DE WATERKERING

Voor de bepaling van de hoogte waarop wordt getoetst is feitelijk de absolute planimetrische precisie (hoe precies weten we waar de meting gedaan is?) niet van belang. Het gaat erom het laagste punt te vinden, niet waar dat punt ligt: dat mag best 100 meter schelen.

Dit geldt niet als de toets wordt uitgevoerd door de hoogte of het profiel te vergelijken met bestaande data: het ontwerp of het in de legger opgenomen profiel. De toetsing neemt daarmee genoegen als aan een aantal voorwaarden is voldaan (VTV § 4.1 stap 1). Als data met elkaar vergeleken moeten worden, moeten zij op dezelfde plek liggen. Bepalend lijkt dan de variatie in de hoogte langs de kruinlijn: hoe groter die is, hoe preciezer de locatie van de hoogtemeting moet kloppen met het profiel in de legger. Dat is feitelijk hetzelfde criterium als bij de bepaling van de puntafstand en daar kwamen we op ruwweg 1 meter.

3.8 PUNTAFASTAND DWARS OP DE WATERKERING

De hoogtevariatie dwars op de waterkering is veel groter dan langs de kruinlijn. Toch is de kruin van een waterkering enigszins vlak. Ook hier is het belangrijk zich het idee van de idealisatieprecisie te realiseren. Het is voorstelbaar dat de glooiing of hobbeligheid van de kruin in dwarsrichting ongeveer tweemaal zo sterk is als in de lengterichting. Als het erom gaat het hoogste punt van een bepaald profiel te bepalen, is daarom een puntafstand van 0,5 meter wellicht representatief: tweemaal zo groot als hierboven genoemd voor de lengterichting. De opmerkingen hierboven over het middelen van een hoger aantal lasermeetpunten gelden ook hier.

Er zijn echter twee situaties denkbaar waarbij een kleinere puntafstand dwars op de waterkering nodig is. In de eerste plaats als *de ligging van de kruinlijn* moet worden bepaald. Dit is niet zonder meer het hoogste punt in een smal vlak, maar meestal een kniklijn, met name als het gaat om de binnen- of buitenkruinlijn (zie figuur 2 en de toelichting daarbij). Omdat de hellingen groter zijn en de ligging een juridische status heeft (waar men zich bij de toetsing verre van houdt; dit zijn aanvullende eisen vanuit een ander belang), dient de puntafstand in die gevallen waarschijnlijk kleiner te zijn, mogelijk 0,2 meter.

Opgemerkt wordt dat een kniklijn nauwkeuriger kan worden bepaald dan de rastercelgrootte suggereert omdat het een lijnelement is dat zich in één richting over vele rastercellen uitstrekt: er vindt feitelijk een middeling over vele rastercellen plaats.

Het tweede geval waarin de puntafstand dwars op de waterkering kleiner zou moeten zijn dan voor de bepaling van de kruinhoogte, is als het gehele profiel moet worden gemeten. De hellingen zijn hier veel groter. Daarom is ook de idealisatieprecisie veel slechter: op een helling is één punt per halve meter waarschijnlijk niet representatief voor de hoogte in dat stukje. Dit wil overigens niet zeggen dat het middelen van metingen over een halve meter niet een representatieve *gemiddelde* taludhoogte geeft.

3.9 PLANIMETRISCHE PRECISIE DWARS OP DE WATERKERING

Voor de precisie waarmee de positie van een hoogtemeting dwars op de waterkering bekend moet zijn geldt hetzelfde als voor de precisie in de lengterichting: als het alleen om de hoogte gaat, doet de planimetrische precisie er weinig toe; als er een vergelijking met andere data wordt gemaakt, is deze zeer belangrijk. De precisie dwars op de waterkering moet aanmerkelijk hoger zijn dan in de lengterichting omdat de hoogtevariatie veel groter is. De precisie in ligging is vergelijkbaar met de bemonsteringsafstand, hierboven besproken, dus op de kruin 0,5 meter en op het talud mogelijk zelfs 0,2 meter.

3.10 TALUDHELLING

Het is overigens opmerkelijk dat behalve de hoogte ook de taludhelling in de VTV een belangrijke rol speelt terwijl deze niet erg expliciet genoemd wordt. Het ligt voor de hand dat dit voor de sterkteberekeningen een belangrijke parameter is, maar ook bij de hoogtetoetsing speelt de taludhelling een belangrijke rol. Het overslagdebiet is een belangrijke parameter bij de toetsing en deze hangt niet alleen af van de kruinhoogte, maar ook van de taludhelling (VTV katern 5 § 4.1 stap 2.1). Als niet behoeft te worden getoetst aan de hand van het overslagdebiet maar door vergelijking met het ontwerpprofiel, is de taludhelling ook een voorname parameter: deze toetsing mag alleen worden uitgevoerd als, onder andere, “de taludhelling niet steiler is dan de ontwerpwaarde” (stap 1).

Daarmee speelt de precisie waarmee de taludhelling kan worden bepaald feitelijk een veel grotere rol in de toetsing dan uit het niet expliciet voorkomen als toetsparameter zou kunnen worden afgeleid. Zoals bij in de paragraaf over de bemonsteringsafstand dwars op de waterkering is gezegd, zijn de eisen die hieraan gesteld worden groter dan aan de bemonsteringsafstand voor de bepaling van de kruinhoogte.

3.11 DE ANDERE KANT VAN DE BALANS: HET TOETSPEIL

Het functioneren van de waterkering is een kwestie van de balans tussen enerzijds de sterkte (inclusief de hoogte) en anderzijds de belasting, met name het maatgevend hoogwater (plus een aantal toeslagen). Tot nu toe heeft dit hoofdstuk zich geconcentreerd op de bepaling van de precisie-eis voor de hoogte. Daarbij is onder meer vastgesteld dat de bepaling van de hoogte behept is met een stochastische onzekerheid en allerlei praktische beperkingen.

Op vergelijkbare manier heeft de ‘andere kant van de balans’, de bepaling van de waterstand, ook een stochastische spreiding. Wat is de precisie van de bepaling van het toetspeil? Waarvan hangt deze af? Hoe groot is de precisie van de bepaling van de maximale piekafvoer bij Lobith op 15.000 of 16.000 m³ per seconde? Wat heeft dat voor gevolgen op het toetspeil op een bepaalde waterkering? Hoe groot zijn de toeslagen voor lokale opwaaiing, buistoten en bui-oscillaties en met welke precisie zijn deze te bepalen? Het heeft weinig zin de hoogte van een waterkering op centimeters nauwkeurig vast te willen stellen als de belasting bekend is tot op decimeters.

In het rapport van Wim Silva et al., *Rampenbeheersstrategie Overstroming Rijn en Maas. Achtergrondrapportage Veiligheid en rivierkunde* [13] wordt de kans op overstromingen uitgebreid geanalyseerd, waarbij rekening wordt gehouden met de onzekerheid in de bepaling van de maximale aanvoer bij Lobith, de verdeling van het rivierwater over Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn en IJssel, de vorm van de waterafvoergolf, wind, de variatie in stromingsweerstand van het zomerbed en de uiterwaarden, variatie in de zijdelingse toestroming via rivieren en kanalen en onzekerheden in de modellen dit dit voor de bepaling van de waterstanden modelleren. De RBSO-methode (Rampenbeheersstrategie Overstroming) is niet deterministisch maar probabilistisch, zoals op pagina 42 van genoemd rapport wordt toegelicht, in tegenstelling tot de deterministische toetsing volgens de VTV (zie § 3.3). Er zijn verschillende scenario's die elk met een zekere kans optreden. Men laat zien dat zelfs als de gemeten waterafvoeren bij Lobith rechtstreeks worden gecorreleerd met de waterstand op een aantal plekken er toch nog steeds een spreiding optreedt van 6 cm op de Waal en het Pannerdensch Kanaal tot 12 cm op de Nederrijn en Lek en 17 cm op de IJssel.

Ook de RIZA-memo *Afleiding onzekerheid in waterstand bovenrivierengebied van Rijn en Maas* [15] zoekt naar de onzekerheden in de waterstanden en meldt dat deze het gevolg zijn van de onzekerheid in de bepaling van de maximale afvoer bij Lobith, onzekerheden in de invloeden van opwaaiing, topvervlakking, ruwheidsvariaties in winter- en zomerbed, morfologische processen, laterale stromingen, enzovoort. Daarnaast zijn ook modellen beperkt in hun precisie, zowel door rekennauwkeurigheid als door schematisatie van de werkelijkheid. De bepaling van het maatgevend hoogwater is bijvoorbeeld een extrapolatie van een gering aantal calibratiehoogwaters. Het behoeft geen betoog dat de extrapolatie van een niet goed bekend en zeker niet lineair verschijnsel gebaseerd op een aantal getallen die op zich al met een flinke onzekerheid behept zijn, niet anders dan met een zeer grote onzekerheid kan geschieden. Uiteindelijk komt men in laatstgenoemde memo op een maximale standaardafwijking van de maatgevende hoogwaterstand van 14 cm voor de Waal en het Pannerdensch Kanaal, 15 cm voor de Nederrijn en Lek, 5 cm voor de Bovenrijn en 19 cm voor de IJssel. En dan nog luidt de laatste zin van de memo: “kanttekening: bovenstaande waarden hebben een sterk indicatief karakter omdat ze gebaseerd zijn op zeer grove schattingen”.

3.12 UITVOERING VAN DE TOETSING

Zoals hierboven aangegeven, is de toetsing op hoogte volgens de VTV een vergelijking van de sterkte, met name maar niet uitsluitend de kruinhoogte, met de belasting. Dit geldt niet als mag worden getoetst op het ontwerp, want daarbij is reeds rekening gehouden met de belasting en dat hoeft, als aan bepaalde voorwaarden is voldaan, niet opnieuw te gebeuren. De hoogtecriteria zijn hierboven tegen het licht gehouden; nu bekijken we de belasting.

De belasting wordt gevormd door het Toetspeil: “voor de toetsing op hoogte wordt de stilwaterstand in maatgevende omstandigheden gebruikt: dit is gelijk aan Toetspeil plus de toeslagen voor lokale opwaaiing, buistoten en bui-oscillaties” (VTV, katern 5, § 2.1). Merk op dat deze toeslagen voor het bovenrivierengebied niet in rekening behoeven te worden gebracht, “de effecten hiervan worden geacht te zijn verdisconteerd in de minimum vereiste kruinhoogtemarge” (katern 4, § 3.4.1). Dat werpt een interessant licht op de totstandkoming van de marge: daarover en over de rol van de bijdragende onzekerheden zou toch literatuur te vinden moeten zijn.

In de gevallen dat volgens de VTV niet mag worden getoetst op het ontwerp, speelt het overslagdebiet een belangrijke rol. Deze kan worden berekend uit de kruinhoogte én de taludhelling (katern 5 § 4.1 stap 2.1). Hier ziet men dus al direct dat deze twee parameters een hoofdrol spelen. Afhankelijk van het overslagdebiet toetst men de bekleding van het binnentalud, maar een cruciale rol is weggelegd voor de kruinhoogtemarge. Dit is het verschil tussen kruinhoogte (met daarin zetting en klink, zie boven) en toetspeil met inachtneming van toeslagen. Grenswaarden voor dit verschil zijn onder verschillende omstandigheden 0,3 of 0,5 meter. Bij 0,5 meter en een groot overslagdebiet worden er extra eisen gesteld en is soms geavanceerde toetsing nodig. De grenswaarde van 0,3 meter wordt gehanteerd bij kleine overslagdebieten. 0,5 meter wordt daar als veilig beschouwd, kleiner dan 0,3 meter niet: “Bij een marge kleiner dan 0,3 m is er mogelijk sprake van een overgangssituatie tussen de faalmechanismen overslag en overloop. [...] Het mechanisme overloop is veel gevaarlijker voor de veiligheid dan het mechanisme overslag en het overloopdebiet is zeer gevoelig voor onnauwkeurigheden in de maatgevende waterstand. In die situatie is daarom [...] geavanceerde toetsing nodig om aan te tonen dat de veiligheid niet in gevaar wordt gebracht door de kans op overloop.”

Opmerkelijk is dat pas bij geavanceerde toetsing, uit te voeren door specialisten, het begrip onzekerheid wordt genoemd: “Daarbij kan onder meer worden beschouwd in hoeverre de onzekerheden in de maatgevende waterstand worden afgedekt door de marge tussen kruinhoogte en maatgevende stilwaterstand.”

3.13 TIJDAFHANKELIJKHEID VAN DE HOOGTEMETING

De hoogtemeting is geen in de tijd onveranderlijke waarde. Bij de bepaling van de hoogte spelen de volgende tijdaspecten een rol:

- 1 zetting en klink;
- 2 tijd tussen opname of bepaling van een parameter en de peildatum waarmee gerekend wordt: extrapolatie;
- 3 zwellen en krimpen van de waterkering door het vochtgehalte op het moment van opname (met name bij veendijken);
- 4 beweging van de waterkering als reactie op de al dan niet hoge waterstand op het moment van opname.

Opgemerkt wordt dat regionale waterkeringen vaak een geheel andere belasting en dus ook een ander vervormingsgedrag kennen ten opzichte van primaire waterkeringen. Vaak staat het water constant enkele decimeters onder de kruin.

Anderzijds stelt ook de lasermeettechniek eisen aan de opnamedatum:

- 5 meest geschikte meettijdstip vanwege de kans op sneeuw en het ontbreken van zoveel mogelijk begroeiing en gebladerte is tussen 1 november en 1 april;
 - 6 er zit een zekere verwerkingstijd tussen het inwinnen en het beschikbaar stellen aan de gebruiker.
- Een tijdaspect dat bij de planning zal moeten meespelen:
- 7 de datum waarop de toetsing moet worden uitgevoerd met het oog op de tijd voor het opstellen van de rapportage en het uitbrengen daarvan aan de provincie.

3.14 CONCLUSIES GEOMETRISCHE HOOGTECRITERIA

Uit het bovenstaande worden hier de volgende conclusies getrokken. Deze gaan alleen over de te stellen eisen aan de hoogte en de positieprecisie en mede over het dwarsprofiel; het tijdsaspect wordt buiten beschouwing gelaten. Opmerkingen van geotechnici bij deze conclusies zijn opgenomen in bijlage C.

Merk overigens op dat de onderstaande conclusies uitgangsmateriaal waren voor de discussie over de uiteindelijk te stellen specificaties in § 4.4 en § 4.5, maar dat deze laatste uiteindelijk anders kunnen luiden dan de hieronder gegeven conclusies. Deze zijn niet recursief aangepast.

- 1 In de VTV is weliswaar een enkele keer sprake van marges, maar niet van stochastische onzekerheden. In principe speelt de precisie van een parameter nergens een rol.
- 2 Het is verstandig zich de principes van precisie door de toevallige en systematische fout te realiseren. Heel belangrijk voor het stellen van precisie-eisen op het gebied van de terreinhoogte is het principe van de idealisatieprecisie.
- 3 Met het noemen van de getallen 0,3 en 0,5 meter als grenswaarden voor de kruinhoogtemarge in de uitvoering van de toetsing en het verschillende toetsverloop afhankelijk van het verschil van 0,2 meter hebben we wel een indicatie van de totale precisie die aan zowel de kruinhoogte als aan het toetspeil plus toeslagen wordt gesteld. Op grond van deze getallen kan de precisie-eis eerder worden gesteld op een standaardafwijking $\sigma = 0,1$ of $0,15$ meter dan op 0,2 meter. Dit is de precisie voor de kruinhoogtemarge; omdat dit een verschil is, is de precisie van zowel de kruinhoogte als het toetspeil $\sqrt{2}$ maal zo klein. Deze zal dus ongeveer 0,10 meter bedragen. Deze totale precisie is weer opgebouwd uit de precisie van de bijdragen.
- 4 Maatgevend voor de hoogtetoets is de laagste waarde van de absolute hoogte ter plaatse van de buitenkruinlijn per sectie. Waar deze hoogte wordt bereikt is voor de toetsing niet van belang.
- 5 De VTV geeft aan dat de puntafstand langs de waterkering bij een redelijk uniform profiel zo'n 20 meter zou kunnen zijn. Dit lijkt (afhankelijk van de vereiste precisie) een onderschatting van de hobbeligheid van de kruin.
- 6 Een landmeter kan een op het oog representatief punt meten; met laseraltimetrie kan dit niet. Van achter het bureau lijkt een meetpuntafstand in de lengterichting van de waterkering van 1 meter verstandig.
- 7 Door, indien de idealisatieprecisie dit toelaat, meer metingen over deze 1 meter te doen, kan de precisie omhoog gebracht worden. De punt dichtheid is op zichzelf geen eis.

- 8 De planimetrische precisie van de hoogtemeting is nauwelijks van belang, tenzij de toetsing wordt uitgevoerd door vergelijking met andere data, zoals het leggerprofiel. Langs de waterkering is 1 meter in dat geval waarschijnlijk voldoende, dwars erop 0,5 meter op de kruin en op het talud mogelijk zelfs 0,2 meter.
- 9 Deze hoge precisie-eis kan ook worden gesteld als een kniklijn (bijvoorbeeld de locatie van de buitenkruinlijn) moet worden bepaald als het profiel in kaart moet worden gebracht, hoewel bij een lijnelement aangrenzende cellen als het ware gemiddeld worden.
- 10 Ten onrechte speelt de taludhelling in de VTV een ondergeschikte rol. Bij de toetsing op hoogte blijkt dit een cruciale parameter bij de bepaling van het overslagdebiet en als voorwaarde voor het toetsen in vergelijking met het ontwerpprofiel.
- 11 De bovengenoemde precisie van 0,1 meter van de ene kant van de 'toetsbalans', de kruinhoogte, is de som van
- de precisie van de hoogtemeting zelf als gevolg van de toevallige fout;
 - de systematische fout van de hoogtemeting zelf;
 - de idealisatieprecisie: in hoeverre de gekozen hoogte representatief is voor de hoogte van 'het laagste stuk' van de sectie;
 - de precisie van de bepaling van de zetting en klink van de kruin;
 - de tijd tussen gekozen peildatum en meting van de hoogte.
- Ook is nog van belang
- de precisie van de taludhelling;
 - de berekening van het overslagdebiet uit taludhelling en kruinhoogte.
- De conclusie lijkt gerechtvaardigd dat de toevallige en systematische fout in de hoogtemeting zelf niet de beperkende factor zijn in de precisie van de hoogte voor de toets.
- 12 De genoemde precisie van de andere kant van de 'toetsbalans', het toetspeil plus toeslagen, is de som van
- de precisie in de verwachte rivierwaterafvoer onder maatgevende omstandigheden;
 - de precisie van het model dat uit de rivierwaterafvoer de waterstand ter plekke van de te toetsen waterkering berekent (met onzekerheden als bijvoorbeeld hydrodynamische weerstanden in de uiterwaarden);
 - de precisie in de bepaling van opwaaiing, buistoten en bui-oscillaties (hoewel deze geacht worden in het bovenriviereengebied geen grote invloed te hebben op de kruinhoogtemarge, wat op zich ook weer een veronderstelling met een zekere precisie is).
- 13 De bepaling het maatgevend hoogwater kent in verschillende rapporten en analyses een sterker probabilistisch karakter dan het deterministische Voorschrift Toetsen op Veiligheid.

4

EISEN AAN LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER

4.1 INLEIDING

Uit verschillende bronnen zijn eisen bekend die worden gesteld aan laserhoogtemetingen en hun bijproducten zoals fotobeelden. In hoofdstuk 3 werd al gepoogd uit het Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor het aspect hoogte de eisen aan hoogtemetingen af te leiden. Omdat het proefproject van de Stuurgroep AHN met het Waterschap Zeeuwse Eilanden erop is gericht te onderzoeken in hoeverre een generiek AHN-bestand met hoge specificaties voldoet aan de eisen van waterkeringbeheerders, worden in § 4.2 de specificaties van het AHN-2-proefproject besproken.

Omdat het doel van dit rapport is deze specificaties zo op te stellen dat de bestanden voor de beheerders van alle waterkeringen in Nederland bruikbaar en acceptabel zijn, worden in § 4.4 alle mogelijke specificaties geanalyseerd, mede op basis van een inventarisatie van de bestekken die ter beschikking zijn gesteld door de aan de Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie deelnemende waterschappen en gesprekken met waterschappers betrokken bij WGL en AHN. Daaraan voorafgaand worden in § 4.3 enige zijdelingse aspecten besproken. In § 4.5 worden de vastgestelde eisen aan een algemeen bruikbaar bestek voor laserhoogtemetingen in tabelvorm samengevat. Voor enkele kleine specifieke toepassingen zijn andere specificaties gewenst: deze worden besproken in § 4.6.

De discussie over de eisen zoals waterkeringbeheerders die in praktijk stellen wordt van een fundament voorzien door de toelichting bij geostatistische terminologie (bijvoorbeeld precisie, toevallige en systematische fout) in de bijlages A en andere begrippen in bijlage B.

4.2 SPECIFICATIES PROEFPROJECT AHN-2 ZEELAND

4.2.1 INLEIDING

In het voorjaar van 2007 werd door de stuurgroep AHN in samenwerking met het Waterschap Zeeuwse Eilanden een proefproject uitgevoerd dat erop is gericht te onderzoeken in hoeverre een generiek AHN-bestand met hogere specificaties dan tot dan toe gebruikelijk kan worden opgeleverd. Dat bestand zou dan behalve voor generieke en waterbeheertoepassingen ook geschikt moeten zijn voor gebruik voor waterkeringbeheer. Omdat de Werkgroep Grootchalig Uitvoeringsproject Laseraltimetrie (WGL) beoogt inwinning en gebruik van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer te stroomlijnen en grootschalig aan te pakken, is dit initiatief zeer interessant.

De Stuurgroep AHN heeft de Werkgroep Grootchalig uitvoeringsproject Laseraltimetrie de beschikking gegeven over *Bijlage 1: Specificaties hoogtegegevens; bijlage 2: Kwaliteitscontrole en -borging opdrachtnemer van het Projectbestek AHN-2 WZE* [14]. Het is opmerkelijk dat de daarin opgenomen specificaties veel gedetailleerder en technischer zijn dan de bestekken zoals de verschillende waterschappen die aan de WGL ter beschikking hebben gesteld. Ze zijn, net als in het algemeen de laseraltimetriedocumenten van Rijkswaterstaat AGI, door zeer gespecialiseerde experts opgesteld (afkomstig van ITC en Geodelta).

Enige opmerkingen over de specificaties volgen hieronder. Daarbij moet men zich realiseren dat de specificaties voor het AHN een generiek doel dienen, terwijl de WGL laseraltimetrie met als specifiek doel waterkeringbeheer beziet.

4.2.2 GEBRUIKERSEISEN ZONDER VERTALING NAAR TECHNISCHE EISEN

De opstellers van de specificaties hebben onder meer een aantal technische details weten te vervangen door gebruikerseisen, waarbij de vertaling in technische eisen aan de opdrachtnemer wordt overgelaten. Meest opvallend daarbij:

- Er is geen punt dichtheidseis gesteld, maar een precisie-eis per rastercel van 0,5 x 0,5 m. Bij een lage puntprecisie moet de punt dichtheid hoger zijn om de uiteindelijk in de eindtermen vereiste precisie voor een rastercel te kunnen behalen. Meerdere laserpunten met lage precisie middelen zo uit tot een rastercel met hoge precisie.
- Er is geen gewone planimetrische precisie-eis gesteld, maar de cryptische eis dat “een topografisch object van 2 x 2 meter eenduidig en met een positieafwijking van maximaal 50 centimeter kan worden geïdentificeerd.” Deze eis wordt overigens wel vertaald in de conventionele geodetische precisiebegrippen.

Deze specificaties zijn afgeleid uit vragen aan de gebruiker met betrekking tot zijn informatiebehoefte. De vraag is of waterkeringbeheerders zich daarin in het algemeen herkennen en of het hen met statistiek is uit te leggen.

4.2.3 HOOGTEPRECISIE

De specificatie van de hoogteprecisie is in het AHN-2-document zorgvuldig statistisch en geodetisch onderbouwd. Men hanteert de geostatistische begrippen die in bijlage A zijn toegelicht: de hoogteprecisie wordt gescheiden in een standaardafwijking (toevallige fout) en een systematische fout. Voor beide eist men een maximum van 5 cm. Men hanteert daarbij het begrip ‘nauwkeurigheid’ en bedoelt daarmee expliciet de ‘standaardafwijking’ 1σ , waarbinnen bij een normale verdeling 68% van de waarnemingen valt, zoals in § B.3 is beschreven. Deze eisen gelden voor het herbemonsterde raster (zie voor deze begrippen bijlage B) en dit is een belangrijke opmerking daar dit door middeling tot stand komt, waardoor de resulterende precisie verbetert (zie bijlage § A.8). De precisie van de individuele laserhoogtepunten mag dus slechter zijn.

Tijdens de workshop op de Kennisdag Waterkeringen (9 maart 2007) bleek dat het waterschap feitelijk een eis gesteld heeft van 15 cm. Daarbij heeft men waarschijnlijk stochastische en systematische fout op een hoop gegooid en de specialisten hebben dit van elkaar gescheiden.

Rijkswaterstaat AGI heeft in 2002 vastgesteld dat de precisie van een vlakdekkend laseraltimetriebestand uit vijf foutsoorten bestaat (zie G.B.M. Brand et al., *Precisiebeschrijving AHN 2002* [6]). Deze blijven in dit bestek onder de oppervlakte; ze worden gedeeltelijk genoemd

(o.a. positiefouten veroorzaakt door het GPS-systeem), maar dienen voor de gebruiker worden gereduceerd tot een stochastische en een systematische fout. In de onlangs gepubliceerde evaluatie van de proef in Zeeland *AHN Pilot. Evaluatie product- en proceskwaliteit* concludeert men, althans de ‘second opinion’ door Rijkswaterstaat AGI, dat niet alle foutsoorten met dit bestek voldoende onder controle zijn. De evaluatie leidde er dan ook toe dat de specificaties in het bestek zullen worden gepreciseerd.

4.2.4 PLANIMETRISCHE PRECISIE

Er is geen gewone planimetrische precisie-eis gesteld: een eis als “de precisie van de positie van een hoogtemeting dient 25 cm in x en y te bedragen”. In plaats daarvan bezigt men de cryptische eis dat “een topografisch object van 2 x 2 meter eenduidig en met een positieafwijking van maximaal 50 centimeter kan worden geïdentificeerd.” Hoe zich dit vertaalt in een planimetrische precisie staat nog te bezien. In § 1.1.2 wordt wel opgemerkt dat de te kiezen interpolatietechniek voor het regelmatig raster hierop nauw moet worden toegesneden.

Wat betreft de systematische fout spreekt over een maximale karterfout. Men eist niet alleen dat de planimetrische precisie wordt gesplitst in de stochastische fout en de maximale systematische fout, maar ook dat de aannemer bewijst dat deze gehaald zijn, wat overigens ook voor de punt dichtheid geldt.

4.2.5 FILTERING EN HERBEMONSTERING

De uitvoering van de filtering en de herbemonstering wordt nauwkeurig voorgeschreven, met name door de wijze waarop de aannemer verslag moet doen van zijn kwaliteitsborging.

4.2.6 TIJDSTIP EN OVERIGE SPECIFICATIES LASERVLUCHT

Het tijdstip waarop de laservlucht wordt uitgevoerd is gespecificeerd in de vorm van een uiterste datum, een afwijking daarvan door eventuele begroeiing, door weersomstandigheden die het terrein niet-representatief maken en, in het geval van kustmetingen, door het getijdenster. Een planning voor bijvoorbeeld (deel)leveringen wordt (hier) niet genoemd.

Opmerkelijk is dat men zich, ondanks hetgeen hierboven is opgemerkt, toch niet beperkt tot de precisie-eisen zelf, maar ook bemoeienis wil hebben met een aantal facetten waarvan bekend is dat ze de verschillende precisie-aspecten van het laserhoogtebestand beïnvloeden. Men eist daarom dat de stroken zo lang mogelijk zijn. Daarnaast moeten de stroken overlappen. Het vliegplan moet bovendien ter goedkeuring aan de opdrachtgever worden overlegd. Merk op dat men bij waterkeringbeheer in het algemeen maar één strook vliegt, die de waterkering volgt. Het afleiden van eigenschappen voor de waterkering uit een laserhoogtebestand dat is vervaardigd in stroken zou in principe kleine afwijkingen kunnen introduceren die het gevolg zijn van het in verschillende stroken vallen van de waterkering. Door specifiek hoogte-data in te winnen voor de waterkering zou men zich deze afwijkingen besparen.

4.2.7 TE LEVEREN PRODUCTEN

Men verlangt in principe vijf primaire producten:

- 1 de ongefilterde data: de laserhoogtemetingen waar de uitschieters wél uitgefilterd zijn;
- 2 de gefilterde data: data waaruit alle objecten boven het maaiveld en alle vegetatie boven 0,5 meter gefilterd zijn;
- 3 data geïnterpoleerd naar een raster van 0,5 x 0,5 meter;
- 4 data geïnterpoleerd naar een raster van 1,0 x 1,0 meter;
- 5 data geïnterpoleerd naar een raster van 5,0 x 5,0 meter.

Daarnaast vereist men metagegevens en gegevens met betrekking tot de door de aannemer uit te voeren controle. Ook het dataformaat wordt beschreven, waarbij men een niet leverancier-specifiek formaat specificeert: ASCII-data.

Opmerkelijk is dat men “een zeer grote voorkeur” uitspreekt voor de opname van digitale foto-opnamen, maar deze niet eist. Orthofoto's zijn expliciet niet nodig; de optische beelden dienen alleen ter verificatie. Hoe hierop bij een eventuele gunning beoordeeld wordt, wordt uit dit document niet duidelijk.

4.2.8 KWALITEITSCONTROLE EN -BORGING

Opmerkelijk is dat de aannemer in zijn offerte uitgebreid dient te specificeren hoe hij aan bepaalde kwaliteitseisen denkt te kunnen voldoen. Ook zijn productieproces dient hij toe te lichten. Daarnaast dient hij na inwinning van de data aan de hand van zadeldaken precisie van ligging en hoogte te berekenen en krijgt hij de beschikking over controledata om de hoogteprecisie aan te tonen. Ook de puntdichtheid, filtering en zelfs de interpolatie moeten in controleerbare vorm worden aangeboden.

4.3 ENIGE OVERWEGINGEN ROND DE SPECIFICATIES

4.3.1 INLEIDING

De bestudering van de ter beschikking gestelde bestekken, de discussie erover binnen de werkgroep grootschalige laseraltimetrie en met name de bespreking met de AHN-‘kopgroep’ op 23 mei 2007 leidden tot verschillende overwegingen ‘achter’ de specificaties van het met laseraltimetrie te vervaardigen product. De specificaties komen in de volgende paragrafen aan de orde. Enkele aspecten die daar zijdelings hun invloed op hebben komen in deze paragraaf aan de orde.

4.3.2 EEN ANDER REGIME VOOR REGIONALE KERINGEN?

In de vorige versie van het WGL-rapport lag de nadruk op primaire waterkeringen. Gedeeltelijk was dit omdat laseraltimetrie vooral wordt gebruikt voor het vullen van het beheerregister en voor de vijfjaarlijkse toetsing, die nauwkeurig voorgeschreven is. Laseraltimetrie is echter ook een krachtig hulpmiddel bij het in kaart brengen van regionale keringen, zoals secundaire keringen en kaden. Het belang daarvan is groot, zowel omdat er minder kennis over de toestand van regionale waterkeringen is dan over die van primaire, als omdat de totale lengte veel groter is (17.000 km) dan die van primaire waterkeringen (3.600 km).

De voorkomende typen regionale waterkeringen verschillen sterk per waterschap. Regelmatig zijn de keringen nauwelijks met het blote oog waarneembaar, terwijl ze bij de vraag of het land erachter geïnundeerd wordt toch een belangrijke rol spelen.

Verschillende waterschappen zijn begonnen een deel van hun regionale waterkeringen met laseraltimetrie in te winnen. De vraag is of dit noodzakelijk is voor de totale lengte aan regionale waterkeringen. Naarmate een groter deel van de regionale waterkeringen met laseraltimetrie zou moeten worden ingewonnen, neemt het aantal vliegstroken dermate toe dat het zou kunnen lonen het gehele areaal van een waterschap strooksgewijs in te winnen en daaruit de primaire en regionale waterkeringen voor de waterkeringbeheerder te snijden. Dit is het onderwerp van de kosten/batenanalyse (‘businesscase’) die in het kader van het AHN gemaakt wordt.

Voor het omslagpunt in deze analyse is het dus van belang te bepalen in hoeverre regionale waterkeringen ingewonnen zouden moeten worden. Daarbij zou een selectie kunnen worden gemaakt aan de hand van het type of belang of aan de hand van het hoogteverschil met de omgeving. Denkbaar is het criterium dat een waterkering (of het nu een primaire of regionale is) meegenomen moet worden als het hoogteverschil tussen de te keren waterstand en het achterland minimaal een meter is. Voor naar schatting 80% van de totale lengte aan primaire en regionale waterkeringen lijkt dit te gelden.

Om deze discussie te beslechten, of er althans richtinggevende uitspraken over te kunnen doen, heeft de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie een analyse gemaakt van drie locaties waarvan door de Stuurgroep AHN en de aannemer laserdata ter beschikking is gesteld. Waterschap Zeeuwse Eilanden stelde daarvan ook de terrestrisch gemeten profielen ter beschikking. Deze analyse wordt besproken in hoofdstuk 6.

4.3.3 NEAREST NEIGHBOUR-, BILINEAIRE INTERPOLATIE EN EEN HOEKGRIDBESTAND

Een raster met één hoogtewaarde per rastercel geeft een trapvormig hoogtemodel, dat in het geval van topografie waarbij hellingen van groot belang zijn, zoals bij waterkeringen, aan de werkelijkheid weinig recht doet. De optie om de rastercel te verkleinen brengt hoge inwinnings- en opslagkosten met zich mee.

Er zijn verschillende compromissen tussen een gedetailleerd puntenbestand en een trapvormig rasterbestand. Het hanteren van een trapvormig hoogtemodel is feitelijk het toepassen van de nearest-neighbourinterpolatie (zie bijlage B). De beperkingen daarvan worden onder meer in hoofdstuk 6 (de evaluatie van de Zeeland-data) getoond. Een veel betere en uit oogpunt van geostatistiek prima te verdedigen benadering is het gebruik van een bilineaire interpolatie. Daarbij wordt voor de hoogte op een zeker punt een middeling in x- en y-richting uitgevoerd afhankelijk van de afstand tot de bekende hoogten op de rasterpunten. Dit kan worden gevisualiseerd door schuine vlakjes.

Een bikubische interpolatie is ook nog mogelijk maar voegt weinig toe behalve een glad uiterlijk dat feitelijk meer informatie suggereert dan er is.

FIGUUR 3

EEN OP BASIS VAN EEN HOEKGRIDBESTAND GEMAAKT GESCHADUWDE HOOGTEMODEL VAN EEN WATERKERING OP TEXEL
(© HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER)

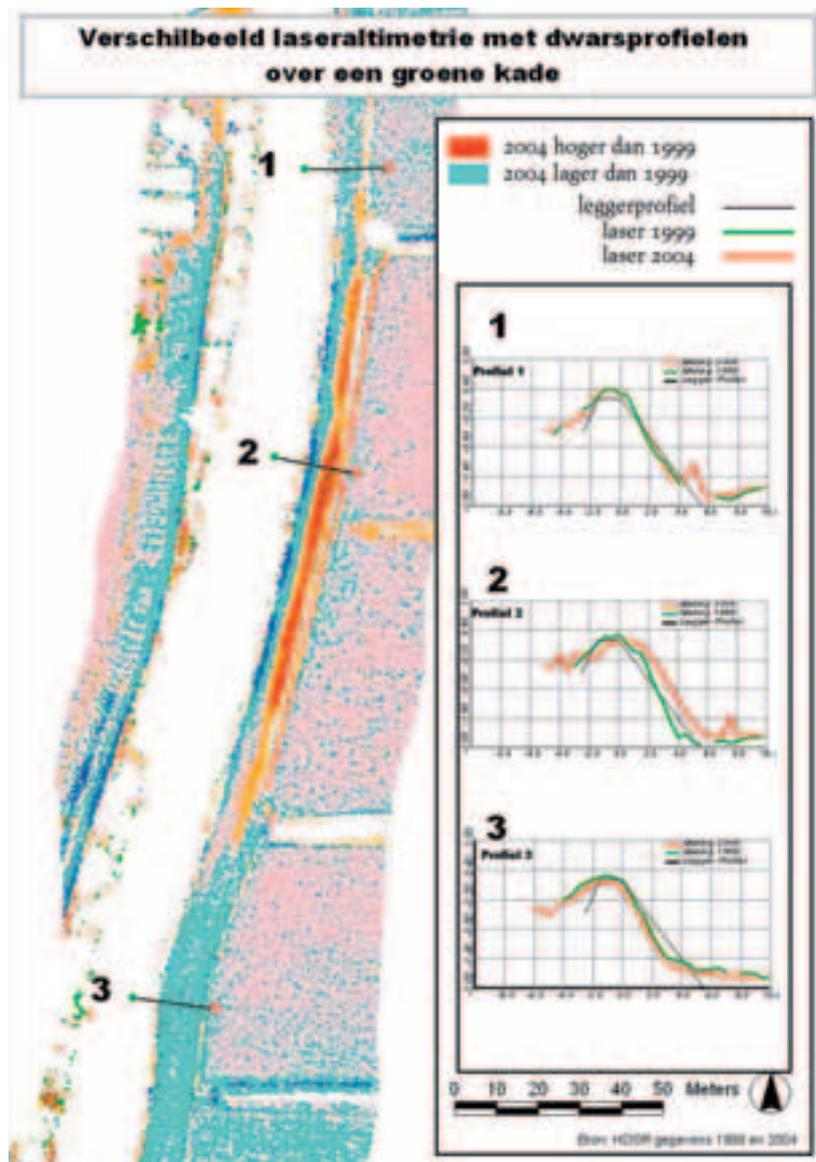


Het zogenaamde *hoek- of hellinggridbestand* kan worden berekend uit de hoogten op het raster en lijkt enigszins op een bilineaire interpolatie. Op een regelmatig raster wordt niet alleen de gemiddelde hoogte van de rastercel wordt opgeslagen, maar ook de grootte en richting van de helling. Dit vergemakkelijkt het visualiseren (zie figuur 3). Uit een hoekgridbestand zijn de snijlijnen tussen hellende vlakken, bijvoorbeeld de teen- en kruinlijnen, beter te bepalen dan uit een hoogteraster. Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier heeft hiermee ervaring.

4.3.4 ZETTINGBEPALINGEN

Naast de hoogte is ook de zetting van een waterkering van groot belang. Of deze uit het verschil van twee met laseraltimetrie ingewonnen hoogtebestanden kan worden bepaald, hangt af van de vereiste precisie. Bij het bestuderen van de eisen aan de bepaling van de zetting kan onderscheid gemaakt worden tussen twee aspecten: de kruin en het talud.

FIGUUR 4 HOOGHEEMRAADSCAP DE STICHTSE RIJNLANDEN HEEFT ALS EEN VAN DE WEINIGE WATERSCHAPPEN BEPAALDE LOCATIES REEDS TWEEMAAL MET LASERALTIMETRIE INGEWONNEN. DAARDOOR WAS HET MOGELIJK VERSCHILBEREKENINGEN UIT TE VOEREN. DE RODE LIJN (LASERDATA VAN 2004) IS IN PROFIEL 2 VOOR HET BINNENTALUD DUIDELIJK HOGER DAN DE GROENE LIJN (LASERDATA VAN 1999). DIT DUIDT OP EEN VERHOOGING VAN HET TALUD MET OMSTREKES EEN HALVE METER OVER DE PERIODE 1999–2004, DIE IN DE OVERZICHTSFIGUUR ZICHTBAAR IS ALS EEN RODE STROOK. DIT BLEEK HET GEVOLG VAN EEN IN DE TUSSENTIJD AANGEBRACHTE VERFLAUWING VAN EEN TE STEIL TALUD. (© HDSR)



De bepaling van de zetting van de kruin dient preciezer te geschieden dan die van het talud. Dit heeft vooral met de waterkerende hoogte te maken, maar ook met de toestand van de weg. Daarnaast moet onderscheid gemaakt worden tussen de zetting na aanleg (de hydrodynamische zetting) en de langzame zetting in de tientallen jaren daarna (de seculiere zetting). De zetting na aanleg en dijkverbetering kan oplopen tot centimeters per jaar, maar ook in gebieden met slappe ondergrond kunnen grote zettingen voorkomen. Een zetting als van de Oostmolendijk van 15 cm in 8 jaar is een uitzondering. Zettingen van 10 mm per jaar zijn interessant en daarbij is het voldoende om per vijf jaar een zetting van 5 cm te kunnen vaststellen. Afhankelijk van hoe homogeen het dijklichaam van opbouw is en of er kleine zettingsverschillen voorkomen, kan daarbij met een puntafstand van omstreeks 10 meter worden volstaan.

Opgemerkt kan worden dat bij de wegbeheerder vaak gedetailleerde informatie over de zetting van de verharding bekend is die ook voor de waterkeringbeheerder van groot belang is, zonder dat de wegbeheerder zich dat goed realiseert.

De kruin is vaak met asfalt bekleed. Hoogtemetingen daarvan zijn relatief precies. Terrestrische metingen kunnen, als ze goed opgezet zijn, aan de eisen voldoen, maar hebben een zeer lage puntdichtheid. Laseraltimetrie kan waarschijnlijk alleen onder gunstige omstandigheden aan deze eisen voldoen. Radarinterferometrie kan er makkelijk aan voldoen, maar is slechts zeer specifiek toepasbaar (zie daarvoor het rapport *Verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie waterkeringen* [19]). In de toekomst zou kunnen worden geïnvesteerd in het aanbrenge van punten die voor radarsatellieten zichtbaar zijn. De inzet van een wegdekmeetvoertuig zoals de ARAN van Rijkswaterstaat DWW kan ook voor waterschappen interessant zijn. Dit meet langs- en dwarsvlakheid en scheuren en er kan een hoogtemodel mee vervaardigd worden. Dit hoogtemodel vormt waarschijnlijk een uitstekende aanvulling op dat wat met laseraltimetrie is ingewonnen.

Taluds kunnen grotere zettingen of hoogteverschillen vertonen dan de kruin. Deze verraden vaak een ander soort instabiliteit dan kruinzettingen, bijvoorbeeld een macro-instabiliteit als afschuiving. Dergelijke zettingen kunnen, omdat ze groter zijn, makkelijker met laseraltimetrische verschilmetingen worden bepaald. Complicerend daarbij is wel dat, in tegenstelling tot bij kruinen, taluds vaak met gras in plaats van asfalt zijn bekleed, waardoor de hoogte-precisie minder is.

In figuur 4 is een verschilbepaling die Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden heeft uitgevoerd van een locatie die reeds tweemaal met laseraltimetrie is ingewonnen: in 1999 en 2004. Profiel 2 gaf een opmerkelijk verschil te zien, die bij nadere bestudering het gevolg bleek te zijn van een in de tussentijd aangebrachte verflauwing van een te steil talud.

4.4 DE EISEN EN DE DISCUSSIE ROND DE TOTSTANDKOMING DAARVAN

4.4.1 INLEIDING

De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie beoogt een goed onderbouwde en gedragen reeks specificaties op te stellen voor de inwinning van hoogtemodellen met laseraltimetrie. Naast de normen afgeleid uit de VTV (hoofdstuk 3) en het bestek van de AHN-proef in Zeeland (§ 4.2) vormen de bestekken die ter beschikking zijn gesteld door de aan de werkgroep deelnemende waterschappen het uitgangspunt. Deze bestekken geven een heel divers beeld te zien

voor wat betreft de wijze van specificeren van de eisen aan de aannemer die het laserhoogtebestand en eventuele nevenproducten moet opleveren. De eerder door de WGL aan de hand hiervan opgestelde lijst met eisen is in verschillende sessies bediscussieerd en bijgesteld. Ook de besprekingen met de kopgroep AHN-2 en de poging van AeroVision om te specificaties in een overzicht te vatten hebben tot bijstelling en nieuwe inzichten geleid. Deze worden in deze paragraaf behandeld. Per specificatie wordt een overzicht gegeven van wat in de afzonderlijke bestekken is vermeld, gevolgd door de discussie leidend tot de uiteindelijk vastgestelde eis.

De uiteindelijke tabel met te stellen eisen is in § 4.5 opgenomen. De verschillende geostatistische begrippen (precisie, standaardafwijking, toevallige en systematische fout, enzovoort) worden in bijlage A toegelicht.

4.4.2 HOOGTEPRECISIE

De in deze paragraaf genoemde getallen voor de hoogteprecisie gelden uitsluitend voor harde topografie, zoals asfalt. Waterkeringen bestaan niet zelden voor een groot gedeelte uit grasbekleding en de hoogteprecisie van de bepaling van het maaiveld is daarvoor minimaal tweemaal tot viermaal zo slecht omdat niet altijd het maaiveld wordt gemeten. Zie de opmerkingen in § 2.3.1.

Het is opmerkelijk dat niet alle waterschappen in hun bestekken onderscheid maken tussen de systematische en de stochastische fout (zie voor een uitgebreide toelichting van deze begrippen bijlage A). Rijnland eist een “minimale nauwkeurigheid in hoogte van 5 cm”. Hollands Noorderkwartier eist een standaardafwijking van 5 cm. Rivierenland eist ditzelfde maar gebruikt de formulering “valt binnen”, hetgeen feitelijk niet de standaardafwijking is, hoewel in de zin erna sprake is van de standaardafwijking alsof het om een andere grootheid gaat.

Rivierenland en Hollands Noorderkwartier stellen eisen aan de systematische fout: men meldt een “maximale gemiddelde fout van 0,05 meter”. Stichtse Rijnlanden legt dit uitgebreid uit en stelt dat de standaardafwijking in hoogte van de individuele laserpunten 5 cm (dat is maximaal 15 cm, merkt men terecht op) dient te zijn, terwijl de systematische fout maximaal 3 cm dient te zijn, “strengere eis omdat de toevallige fout zich uitmiddelt bij omrekening naar gridcellen, de systematische fout niet!”

Arcadis werkt voor Wetterskip Fryslân drie varianten uit met verschillende vlieghoogten en dezelfde vliegsnelheid en pulsrequentie (50 kHz). Men komt voor de standaardafwijking van de hoogte op 4, 5 respectievelijk 8 cm. Gezien alles wat men verder opmerkt is het vreemd dat men niet stilstaat bij de systematische fout. De theoretische mogelijkheden worden naast de in kaart gebrachte informatiebehoefte gezet. Deze vermeldt voor de meeste hoogteparameters een standaardafwijking van 3–5 cm.

Het is niet altijd duidelijk welk bestand nu aan deze precisie-eis moet voldoen: de individuele punten in het originele puntenbestand of de gemiddelde hoogte van een rastercel. Die laatste voldoet door middeling veel makkelijker aan de eisen. Rivierenland meldt wél dat deze eis voor “de ingewonnen punten” geldt. In de nota van toelichting meldt Rivierenland dat “de laserdata als uitgangspunt voor de kartering dient te worden gebruikt. De nauwkeurigheid is een afgeleide van de nauwkeurigheid van de ingewonnen laserpunten”. Rivierenland geeft voor de kartering en de rasterbestanden dus geen eisen.

Het is opmerkelijk dat veel waterschappen bij de precisie-eis ook het stelsel geven, bijvoorbeeld het RD-stelsel of NAP voor hoogte. De precisie hangt niet af van het stelsel want er is geen schaalfactor. Dit laat onverlet dat men kan eisen dat de hoogte-informatie in een bepaald stelsel gegeven moet worden.

Uiteindelijk komt de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie tot de eis dat de standaardafwijking van de toevallige fout in hoogte van een rastercel voor harde topografie maximaal 5 cm mag zijn. Daarnaast mag de systematische fout maximaal 5 cm zijn. De opdrachtnemer dient aan te tonen dat beide specificaties zijn gehaald. Deze specificatie is conform die van de AHN-proef in Zeeland.

De WGL volgt de benadering van de AHN-proef in Zeeland en stelt geen eisen aan de precisie van de individuele laserpunten: via de grootte van de rastercel, het aantal laserpunten daarbinnen en de net vermelde precisie-eisen van de rastercel is de hoogte voldoende gespecificeerd.

4.4.3 PLANIMETRISCHE PRECISIE

Rijnland eist in zijn bestek een minimale nauwkeurigheid van 5 cm in x en y. Rivierenland eist eveneens 5 cm en ook hier gebruikt men de term “valt binnen”. Stichtse Rijnlanden maakt veel werk van de hoogteprecisie, maar meldt niets over de planimetrische precisie, omdat de ervaring uitwijst dat als aan de hoge hoogteprecisie-eis is voldaan, de planimetrische precisie ruimschoots voldoende is. Hollands Noorderkwartier laat de planimetrische precisie ongenoemd in zijn bestek van 2005, maar in november 2006 eist men voor wat betreft het karteren (dus niet bij de laserdata zelf): “de plaatsnauwkeurigheid mag maximaal 25 cm afwijken ten opzichte van de fotolijnen/kniklijnen”.

Arcadis werkt voor Wetterskip Fryslân drie varianten uit met verschillende vlieghoogten en dezelfde vliegsnelheid en pulsrequentie (50 kHz). Men komt voor de planimetrische standaardafwijking op 5, 6 respectievelijk 10 cm. De werkelijk gewenste precisie is af te leiden uit de tabel met de informatiebehoefte. De ligging van de kade mag worden vastgesteld met een standaardafwijking in x en y van 25 cm, maar de kruinbreedte wil men graag op 10 cm weten. Vrij uitzonderlijk geeft men ook de planimetrische precisie voor de te karteren objecten en deze komt doorgaans op 25 cm uit.

Sommige bovengenoemde eisen zijn zeer streng. De ervaring heeft inmiddels geleerd dat de controle hierop niet zodanig plaatsvindt dat kan worden vastgesteld of aan deze hoge eisen ook werkelijk is voldaan. De controle geschiedt in het algemeen door inpassing in bestaande data, veelal de GBKN of luchtfoto's, met hun beperkte planimetrische precisie.

Over de planimetrische precisie is intensief gediscussieerd met het bureau dat door de Stuurgroep AHN was ingehuurd om samen met de ‘kopgroep AHN-2008’ (de waterschappen waarvoor waarschijnlijk in 2008 het nieuwe AHN-2 wordt ingewonnen) de specificaties op te stellen voor het bestek van AHN-2. Niet alleen de eis zelf, maar ook de wijze van formuleren in de tabel die uit de bespreking met de ‘kopgroep AHN-2008’ kwam, zorgde voor veel analyse en discussie. Aanvankelijk concludeerde de WGL dat de systematische fout in de planimetrie maximaal 10 cm zou mogen zijn. Dit staat in schril contrast met de AHN-2-eis van 50 cm.

Wij waren 21 juni akkoord met het wijzigen van de eis in de GBKN-eisen. Deze houden in dat in bebouwd gebied de *relatieve puntprecisie* ≤ 28 cm is. Dit komt onzes inziens overeen met een toevallige fout van $\sqrt{2}$ keer zo klein, dus 20 cm. Het zegt echter niets over de *systematische* fout en dat was nu juist het enige waar wij eisen aan stelden. Het is niet geheel duidelijk hoe de GBKN de systematische fout specificeert; vermoedelijk doet men dat in termen van aansluiting. Daarnaast mag de relatieve precisie van de GBKN voor landelijk gebied tweemaal zo groot zijn: 56 cm. Een waterkering is op zich landelijk gebied, maar als het gaat om het vastleggen van het gebied tot waar de keur zich uitstrekt gaat het onder meer over gebouwen die aan de dijk liggen en dan is de eis voor het stedelijk gebied meer voordehandliggend.

Aanvankelijk stelde de WGL aan de toevallige fout in de planimetrie geen eisen, omdat deze in het algemeen veel kleiner is dan de systematische fout. Daarnaast is deze nauwelijks van belang, althans als het gaat om kortgolvlige fouten in de orde van decimeters: de bepaling van topografische lijnen, zoals kruinlijnen, geschiedt door de bepaling van een meterslange kniklijn door puntdata. De karakteristieke lengte van deze kniklijn maakt dat de toevallige planimetrische fout van individuele punten vrijwel uitmiddelt. Naar aanleiding van het bovenstaande nam de WGL de geïnterpreteerde GBKN-specificatie over: de standaardafwijking van de toevallige fout mag maximaal 20 cm bedragen. (De voor de GBKN gespecificeerde relatieve precisie is $\sqrt{2}$ maal zo groot.)

Bij de bepaling in ligging van de kruinlijn is zowel voor de toetsing als voor het opstellen van legger (met zijn juridische betekenis) een hoge precisie noodzakelijk. Met voldoende nabije controlepunten is de systematische fout een stuk kleiner te krijgen dan 50 cm en dat is zeer gewenst. Sommige waterkeringen hebben een helling van 1:3. Als de waterkering 50 cm verkeerd ligt, betekent dat een systematische hoogtefout van 17 cm, terwijl hierboven een systematische fout van maximaal 5 cm werd geëist. Bovendien zijn dan veelbelovende toepassingen als verschilberekeningen, zoals die in figuur 4 op vrij grove schaal werd getoond, niet direct meer mogelijk.

Er zijn twee argumenten om de eis aan de maximale systematische fout voor de kruinlijn beperkt te houden tot bijvoorbeeld de grootte van de rastercel van 50 cm. In de eerste plaats is de kruinlijn in het terrein vaak lastig te identificeren. Dat betekent dat terrestrische meetploegen de ligging daarvan naar beste weten inschatten en daarin kan beslist een 'fout' van 50 cm zitten. In de tweede plaats is de rastercelgrootte beperkt tot 50 cm (zie verderop): wat heeft het voor zin de kruinlijn dan veel preciezer te willen vaststellen? Beide argumenten kunnen worden weerlegd. Een kruinlijn – en kniklijnen in het algemeen – zijn zeer langgestrekte structuren. Ondanks het beperkte oplossend vermogen van het laserraster is de ligging toch zeer precies vast te leggen doordat er in de richting van de kniklijn als het ware een middeling plaatsvindt over ettelijke rastercellen. Zelfs bij slechts 15 punten per vierkante meter en zelfs al zijn de individuele metingen behept met planimetrische en hoogtefouten, zowel op het oog als met programmatuur is prima een kniklijn te localiseren, veel beter zelfs dan de man op de dijk dat kan.

Daarom stelt de WGL de eis dat het systematische deel van de planimetrische fout maximaal 15 cm mag bedragen.

Bij de evaluatie van de proef AHN-WZE en de opstelling van de specificaties met de 'kopgroep' waarvoor het AHN-2 in 2008 ingewonnen zal worden, kwam de Stuurgroep AHN de WGL hierin niet tegemoet. Men houdt vast aan de specificatie van de proef. In een technische sessie van

WGL adviseur Rens Swart met René van der Velden en Leon Hendriks van AeroVision werd de achtergrond van de ‘maximale karterfout 50 cm’ in het bestek van AHN-WZE geanalyseerd. Volgens de opstellers, ITC en Geodelta, kan deze worden bereikt als volgt:

- 1 punt dichtheid $10/m^2 \rightarrow$ puntspatiëring 30 cm (men haalde 24 cm) \rightarrow maximale afwijking 15 cm;
 - 2 systematische fout in ligging 20 cm;
 - 3 standaardafwijking in ligging 5 cm.
- Totaal is de maximale fout daarmee $1 + 2 + 3 \cdot 3 = 50$ cm.

WGL vond 3 nauwelijks interessant (voor ligging althans, zoals hierboven is uiteengezet) en de redenatie van 1 was nieuw voor ons. Onze redenatie: de gewenste maximale karterfout van 15 cm is als volgt te bereiken:

- 1 als we de redenatie van de opstellers van het AHN-WZE-bestek volgen: maximale afwijking 10 cm \rightarrow puntspatiëring 20 cm \rightarrow punt dichtheid (volgens de formule van Rens Swart) $29 \text{ pt}/m^2$;
- 2 systematische fout in ligging 5 cm (bleek bij AHN-WZE 20 cm, maar moet haalbaar zijn);
- 3 voor karteren kan de standaardafwijking in ligging vrijwel verwaarloosd worden: deze middekt uit over een lijn door een flink aantal punten; de opstellers van het AHN-WZE-bestek zijn het kennelijk hiermee niet eens.

Volgens deze redenatie van de Werkgroep zou 25 en zelfs 15 cm dus haalbaar moeten zijn met 30 punten/ m^2 . De Werkgroep concludeert daarmee dan ook dat de eis aan het systematische deel van de planimetrische fout van maximaal 15 cm gehandhaafd dient te worden.

4.4.4 PUNTDICHTHEID OF LASERPUNTFREQUENTIE

Rijnland eist een punt dichtheid van 12 punten/ m^2 . Rivierenland eist minimaal 10 punten/ m^2 , maar in de “conformiteitenlijst gunning wensen” wordt 15 punten/ m^2 genoemd, wat volgens de nota van inlichtingen eis resp. wens is. Stichtse Rijnlanden eist 10–20 punten/ m^2 . Hollands Noorderkwartier eist in zijn tweede bestek van november 2006 minimaal 20 punten/ m^2 . Arcadis werkt voor Wetterskip Fryslân drie varianten uit met verschillende vlieghoogten en dezelfde vliegsnelheid en puls frequentie (50 kHz) en komt dan op 21, 15 respectievelijk 6 punten/ m^2 .

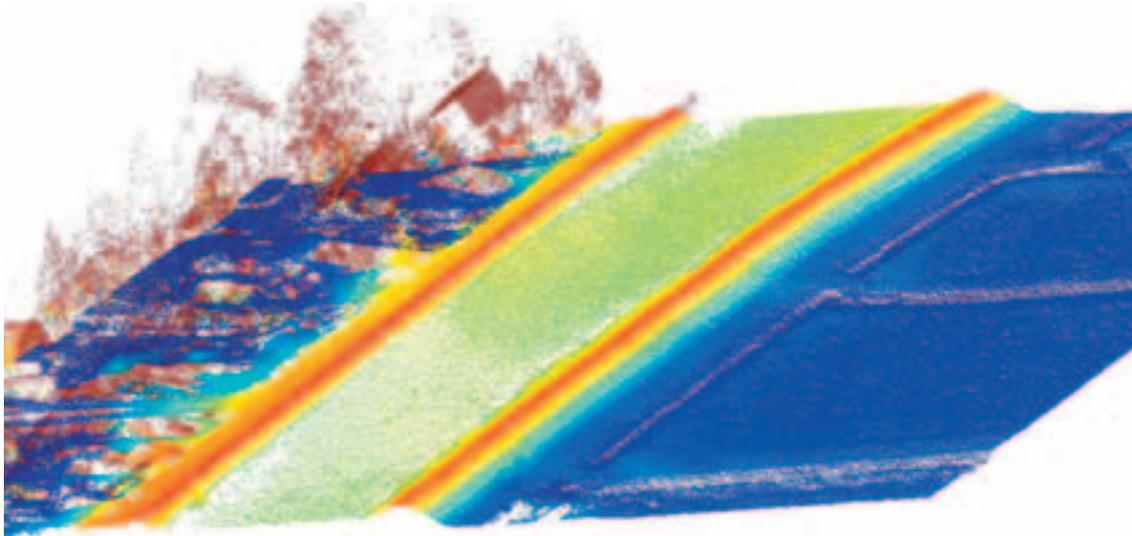
Voor de AHN-proef werd zoals in § 4.2.2 opgemerkt geen eis aan de punt dichtheid gesteld. Bij oplevering bleek dat er in maart 2007 in Zeeland gemiddeld 10 punten/ m^2 waren ingewonnen. Zie hoofdstuk 6 voor een analyse van deze bestanden door WGL. Daarin is ook een dichtheidsplaatje opgenomen. In figuur 5 is een vogelvluchtafbeelding opgenomen van 630.000 individuele laserpuntjes van een kade van Hollands Noorderkwartier, die een indruk geeft van wat een dichtheid van 20 punten/ m^2 aan informatie biedt. Zie verder hoofdstuk 6.

De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie stelt wél een eis aan de punt dichtheid. De belangrijkste reden daarvoor is dat naast het rasterbestand ook het laserpuntenbestand een gewenst product is. Dit product wordt bijvoorbeeld, hetzij in dezelfde uitbesteding hetzij later, gebruikt om een kartering of classificatie op uit te voeren. Daarbij is een hoge dichtheid van de originele laserpunten gewenst. Daarnaast wordt het laserpuntenbestand soms ook voor interpretatie gebruikt.

We eisen daarom een minimale punt dichtheid van 20 punten/ m^2 . Deze waarde geldt voor harde topografie.

FIGUUR 5

EEN VOGELVLUCHTAANZICHT VAN 630.000 NAAR HOOGTE GEKLEURDE LASERPUNTEN VAN DE KADE VAN DE POLDER BEETSKOOG IN DE BUURT VAN HOORN. DIT ZIJN OMSTREEKS 20 PUNTEN PER VIERKANTE METER. DE KRUIJN VAN DEZE KADE, DIE NIET VEEL BREDER DAN ÉÉN METER IS, LIGT OP OMSTREEKS +0,15M NAP; DE POLDER ROND -1,80M. (© STOWA WGL & SWARTVAST; DATA HOOGHEEMRAADSCHAP HOLLANDS NOORDERKWARTIER).



4.4.5 RASTERGROOTTE LASERHOOGTEBESTAND

Rijnland, Rivierenland, Stichtse Rijnlanden en Hollands Noorderkwartier eisen een rastergrootte van (soms maximaal) 0,5 meter. Dit is ook de specificatie die voor de AHN-2-proef in Zeeland wordt aangehouden. Eind 2006 wint Hollands Noorderkwartier regionale keringen in en wordt de eis 0,25 meter.

De aanvankelijk binnen de werkgroep voorgestelde rastercelgrootte van 50 cm van het hoogteraster wordt niet algemeen als voldoende beschouwd. Carlo Langelaan (Rijkswaterstaat DWW) meldde al eerder dat een puntafstand van 20 cm in het profiel dwars op de waterkering wenselijk zou zijn (zie § 3.8 en bijlage C). Leo Harren (Waternet) en Marc Bruins Slot (Waterschap Friesland) meldden dat 50 cm voor kleine regionale keringen niet voldoende is. Regionale keringen zijn (in het algemeen) niet alleen lager dan primaire, maar hebben ook een gedetailleerder profiel. Dit punt wordt besproken in § 4.3.2. Waternet heeft een informatiebehoeftebepaling laten uitvoeren en daarbij is vastgesteld dat een hoogtebestand een rastergrootte van 25 cm dient te hebben.

Mogelijk kan voor de vereiste rastergrootte een onderscheid tussen primaire en regionale keringen worden aangebracht: 50 respectievelijk 25 cm. Aanvankelijk stelden wij, gezien de verdeling in hoogte van regionale keringen, dat voor alle primaire en 80% van de regionale waterkeringen een rastergrootte van 50 cm voldoende zou moeten zijn. Dit zou tevens betekenen dat daarvoor waarschijnlijk het nieuwe AHN voldoende is, een conclusie met zeer grote betekenis. Voor 20% oftewel ongeveer 3.400 km regionale waterkeringen zou een rastergrootte van 25 cm gewenst zijn.

Om deze discussie te beslechten, of er althans richtinggevende uitspraken over te kunnen doen, heeft de werkgroep grootschalige laseraltimetrie een analyse gemaakt van de laserdata en terrestrische profielen op drie locaties in het gebied van de proef bij Waterschap Zeeuwse Eilanden. Het gaat daarbij om relatief grote keringen van meer dan 4 meter hoog. Daarnaast kreeg WGL de beschikking over laserdata van een polderkade van Hollands Noorderkwartier met een smalle kruin en nauwelijks 2 meter hoog. Deze analyse wordt besproken in hoofd-

stuk 6. De conclusie luidt dat voor het overgrote deel van de keringen een rastergrootte van 50 cm voldoende is. Alleen voor lage en smalle regionale keringen is 25 cm aan te raden.

Alleen bij de AHN-2-proef worden eisen gesteld aan de wijze van interpoleren om uit de laserpunten het raster te berekenen. Deze interpolatiemethode was bij het 'oude' AHN precies voorgeschreven (zie *Productspecificatie AHN 2000* [9]).

4.4.6 FILTERING

Rivierenland suggereert in zijn bestek dat ongefilterd betekent "geen extra bewerkingen", maar in het algemeen zal de aannemer de uitschieters wel uitfilteren. Voor het filterresultaat hanteert Rivierenland nogal ongespecificeerd "maaiveld = ground". Hollands Noorderkwartier specificeert enigszins het verschil tussen het ongefilterde en gefilterde hoogtemodel: in het eerste zijn alleen uitschieters ("reflectie op vogels en dergelijke") verwijderd; in het tweede dient het maaiveld over te blijven en mogen lege gebieden worden geïnterpoleerd met een vrij door de aannemer te kiezen maar wel te documenteren interpolatiemethode.

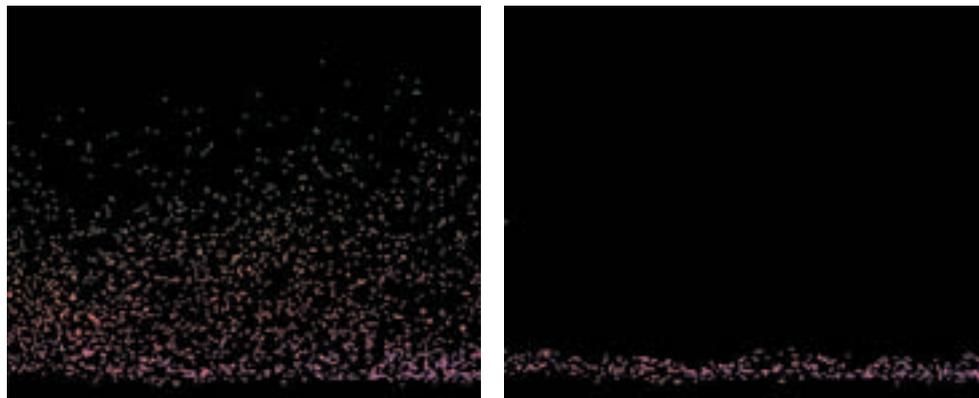
De volgende laseraltimetrieproducten zijn denkbaar:

- 1 Laserpuntbestanden:
 - 1.1 alleen uitschieters verwijderd;
 - 1.2 vegetatie en objecten verwijderd: gefilterd tot maaiveld.
Behalve de x,y,z-waarde van het laserpunt bestaan ook producten waarbij meerdere reflecties per puls of de golfvorm van de reflectie worden toegevoegd of de intensiteit van de reflectie. Deze bevatten meer informatie en kunnen filtering van vegetatie (zie figuur 6) of kartering (zie figuur 9) vergemakkelijken.
- 2 Rasterbestanden, waarbij de laserpunten worden geïnterpoleerd tot een gemiddelde hoogte per rastercel (zie figuur 54):
 - 2.1 alleen uitschieters verwijderd;
 - 2.2 vegetatie en objecten verwijderd: gefilterd tot maaiveld;
 - 2.3 bestand met verwijdering niet-maaivelddata zoals waterkeringen en walkanten en wateroppervlakken;
 - 2.4 gefilterd tot maaiveld met de daardoor ontstane gaten dichtgeïnterpoleerd.

Tijdens het overleg tussen de AHN-kopgroep en de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie werd vastgesteld dat de eisen op het gebied van het 'onderscheidend vermogen' voor waterkeringbeheer strenger zijn dan voor waterbeheer, terwijl ze voor wat betreft classificatie van het maaiveld en objecten ('filtering') juist minder streng zijn.

FIGUUR 6

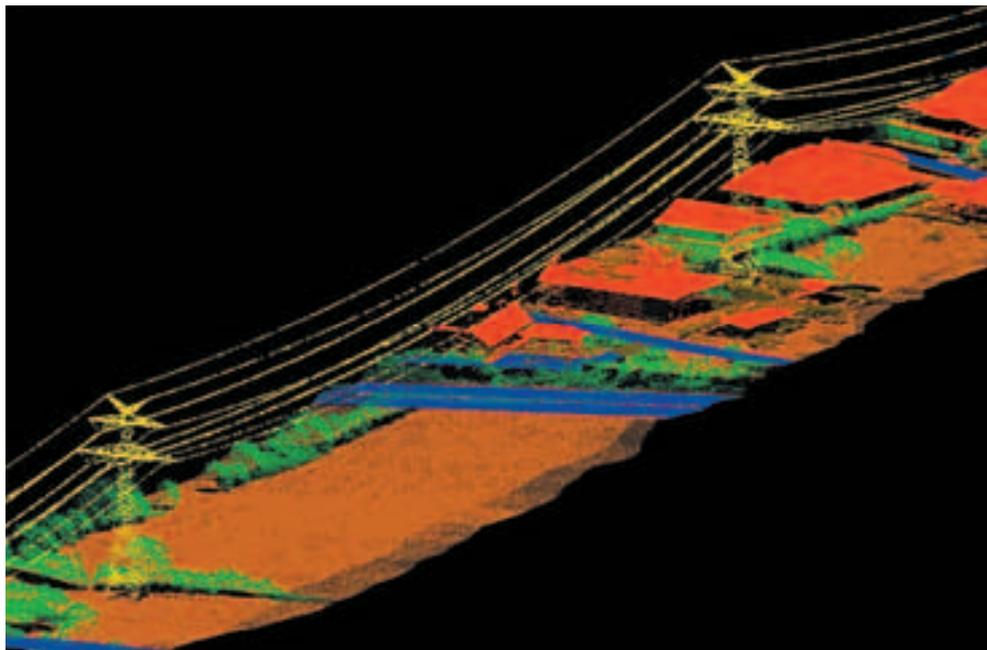
BIJ HOGE PUNTDICHTHEDEN VALLEN ER VOLDOENDE LASERREFLECTIES DOOR DE VEGETATIE OP HET MAAIVELD OM HET ONDSCHIED TUSSEN VEGETATIE EN MAAIVELD TE KUNNEN MAKEN. HET GEBRUIK VAN LASERSCANNERS DIE MEERDERE REFLECTIES PER PULS OPNEMEN MAAKT DIT NOG BETER MOGELIJK. RECHTS HET NA FILTERING GESELECTEERDE MAAIVELD. (©FUGRO-INPARK, FLI-MAP 400)



Voor waterkeringbeheer staat het profiel van de waterkering (het verloop van de hoogte dwars op de waterkering) voorop. Dit zou men maaiveld kunnen noemen, ook al is er sprake van relatief grote hellingen. Aan de bepaling van de hoogte van de kruin worden de hoogste precisie-eisen gesteld. Voor de kruin is het dan ook van belang dat eventuele begroeiing zoveel mogelijk wordt uitgefilterd, zodat het hoogtemodel het profiel van het grondlichaam beschrijft. De kruin van vele waterkeringen is bekleed met asfalt: daar is filtering niet van belang. Voor zover er sprake is van gras, zou dit liefst moeten worden uitgefilterd, maar in praktijk gebeurt dit niet omdat het nauwelijks mogelijk is. De precisie-eisen aan met gras beklede waterkeringen zijn lager dan die aan harde topografie, die in § 4.4.2 en in de tabel (§ 4.5) vermeld zijn. Sommige waterschappen stellen deze expliciet. De AHN-2-proef vereist filtering voor begroeiing hoger dan 0,5 meter. Het fotogrammetrisch ingewonnen Digitaal Topografisch Bestand (DTB) van Rijkswaterstaat geeft voor harde topografie een precisie van 9 cm, voor zachte 12,5 cm. Voor de inwinning van waterkeringen wordt om deze redenen het vliegen buiten het groeiseizoen nog sterker voorgeschreven dan voor het AHN. Ook kan men het maaien van de waterkeringen afstemmen op de datum van inwinning van de laserdata. De al dan niet gefilterde bestanden met de laserdata zijn onder meer gewenst ter interpretatie van de gerasterde laserdata.

FIGUUR 7

OP BASIS VAN BEPAALDE KARAKTERISTIEKEN KUNNEN SLIMME FILTERALGORITMEN WORDEN GEMAAKT WAARMEE VERSCHILLENDE SOORTEN TOPOGRAFIE KUNNEN WORDEN GECLASSIFICEERD. DEZE KLASSEN HEBBEN HIERBOVEN EEN EIGEN KLEUR GEKREGEN.
(© FUGRO-INPARK, FLI-MAP 400)



Het wegfilteren van bebouwing en dergelijke objecten is voor waterkeringbeheer niet beslist nodig. Het levert geen extra informatie. Profielen worden niet ter plekke van bebouwing getrokken. Doordat het laserbestand ook voor andere doeleinden dan het berekenen van profielen wordt gebruikt, wordt ook het op maaiveld gefilterde bestand gevraagd.

Soms wordt onderscheid gemaakt tussen *filtering*, waarmee het verwijderen van uitschieters en het berekenen van het maaiveld wordt bedoeld, en *classificatie*, waarmee bijvoorbeeld objecten worden onderscheiden van het maaiveld. Zie bijvoorbeeld figuur 7.

4.4.7 STROOKBREEDTE, VliegHOOGTE OF TE METEN STROOK

Rijnland geeft in zijn bestek in tabelvorm een indicatie van de strookbreedten: minimaal 50 meter voor de secundaire en 100 meter voor de primaire waterkeringen, maar een vectorbestand is leidend. Rivierenland geeft een referentielijn (vectorbestand) en de eis 75 meter binnendijks en 65 meter buitendijks op te nemen. Hollands Noorderkwartier is er in het programma van eisen nog niet helemaal uit en vraagt te offreren met voor 75% een strookbreedte van 80 meter, voor 15% 120 meter en voor 5% 150 meter. Voor regionale keringen hanteert men 80 meter. Alleen daarbij noemt men de referentielijn waarop de strook gecentreerd moet worden. De drie varianten van Wetterskip Fryslân komen gezien de verschillende vlieghoogten op een strookbreedte van 115, 140 respectievelijk 325 meter, maar men noemt daarnaast de “strookbreedte eindproducten gegarandeerd” 75, 100 respectievelijk 275 meter.

De Werkgroep concludeert dat het het verstandigst is de strookbreedte bij de aanbesteding aan te geven door middel van een vectorbestand. Indicatief kan een strookbreedte van 50–80 meter voor regionale en 100–150 meter voor primaire waterkeringen worden aangehouden. De Werkgroep stelt geen eisen voor wat betreft de vlieghoogte. De overige producteisen specificeren het gewenste product voldoende. Zodra echter orthofoto's worden vervaardigd, kan de vlieghoogte of beeldhoek worden geëist vanwege de maximaal aanvaardbare omvalling.

4.4.8 DATAFORMAAT

Rijnland vraagt de puntdata als ASCII-bestand te leveren, de GIS-bestanden als ArcGIS shape, de videobestanden als MPEG, de fotobestanden als MrSID (daarbij kan nog een compressie-eis worden gesteld) en de ondersteunende documenten als MS Word-bestand. Rivierenland vraagt ook om de hoogte als ASCII-bestand te leveren en doet dat bovendien voor de intensiteitswaarden. De rasterbestanden als 'ESRI-grid' met 4 decimalen drijvendekomma. Vreemd genoeg wordt de grootte van het raster hier gespecificeerd. Voor de digitale foto's vraagt men het ECW-formaat, voor video MPEG. De kartering moet zowel als 3D-shape als als DWG-bestand geleverd worden. Stichtse Rijnlanden heeft orthofotomozaïeken in TIFF-formaat en merkt daarvan als nadeel op dat ze niet gecomprimeerd zijn. Hollands Noorderkwartier eist voor de ruwe en gefilterde laserhoogtedata zowel het ASCII-xyz-formaat als het ESRI rasterformaat. Zowel het ruwe fotomateriaal als de orthofotomozaïeken moeten in zowel ECW- als TIFF-formaat geleverd worden. Daarnaast is er sprake van een Excel-bestand met administratieve gegevens.

Naast eventueel aanvullende specifieke formaten, stelt de WGL dat de laserpuntdata in ieder geval in ASCII x,y,z moeten worden geleverd (en indien de intensiteit van de reflectie wordt gevraagd: x,y,z,i). De rasterdata moet in ieder geval als ASCIIgrid worden geleverd. Foto's als ECW of MrSID vanwege de ontsluiting via een pyramidale bestandsstructuur. Daarbij is het verstandig de maximale compressie te specificeren om compressieartefacten binnen de perken te houden. Video kan worden geleverd als MPEG en eventueel AVI, waarbij het specificeren van de codec voor een betere controle over de kwaliteit kan zorgen.

4.4.9 OPTISCHE BEELDEN

Rivierenland eist ECW-beelden met een resolutie van 1280 x 960 pixels bij één beeld per seconde. Er wordt dus geen geometrische resolutie gegeven. Volgens de nota van inlichtingen dienen de fotobeelden alleen ter verificatie van de laseropname. Bovendien eist Rivierenland dat de foto's en videobeelden "evenwijdig en volgordelijk aan de waterkering zijn weergegeven" en dat ze gekoppeld zijn aan het basisbestand (dus eenvoudig op te roepen vanuit een geografische context).

Stichtse Rijnlanden heeft tijdens het vorige project de beschikking gekregen over zowel ruwe foto's (nadir en voorwaarts) als orthofoto's. De foto's hebben een "pixelgrootte van 5 cm, waardoor objecten van 50-100 cm nog te onderscheiden zijn" en zijn elke 2 seconde gemaakt. Hollands Noorderkwartier eist voorwaarts en neerwaarts opgenomen fotobeelden en gebruikt daarbij wel de term "hoge resolutie" maar specificeert deze niet. Daarnaast moeten ze zo worden aangeleverd dat ze vanuit het kaartbeeld op de juiste plaats opgeroepen kunnen worden.

In tegenstelling tot bij de AHN-WZE-proef, waar het leveren van optisch materiaal wordt aangemoedigd maar niet verplicht gesteld, eist de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie de productie van optische beelden. Daaraan wordt bovendien de eis gesteld dat ze tegelijk met de laserdata worden opgenomen. Omdat waterkeringbeheerders met sterk geaccidenteerd terrein te maken hebben (in vergelijking tot gebruikers van een grootschalig maaiveldhoogtebestand als het AHN), waarvan bovendien precieze hoogteprofielen moeten worden vervaardigd, is het essentieel dat kan worden teruggегреpen op fotografische opnames van het terrein als het laserbestand vragen oproept. De optische bestanden dienen dus hoofdzakelijk als interpretatiehulpmiddel.

Ook voor deze eis gold dat hieraan bij het opstellen in september 2007 van de specificaties van het AHN-2 voor 2008 niet werd tegemoetgekomen. Het eisen van gelijktijdig gemaakte luchtfoto's zorgt voor een beperking in de flexibiliteit van de aannemer. Er zijn altijd omstandigheden denkbaar die opname van optische beelden verhinderen, terwijl laseraltimetrie wel kan. Als een aannemer het moet garanderen, is zijn risico groter, moet hij heel misschien andere maatregelen treffen en daardoor wordt het bestand duurder. Dit zou dan consequenties hebben voor de prijs van het AHN-2-bestand voor geheel Nederland. Hier ziet men duidelijk de afweging tussen een generiek en specifiek bestand, met een gevoelige kosten/batenafweging.

Niettemin wordt verwacht dat de meeste aanbieders optische beelden zullen verstrekken, gezien de punten die hiermee in de gunning kunnen worden verdiend. In de aanbesteding wordt slechts voor 30% op prijs geselecteerd en voor 70% op kwaliteit, waaronder de verstrekking van optische beelden. Voor met name waterkeringbeheerders met ervaring met het gebruik van laseraltimetrie zijn optische beelden dermate essentieel dat dit als een te zachte eis wordt beschouwd. De WGL zal het gebruik van het AHN-2-bestand in 2008 voor waterkeringgebruik nauwlettend evalueren.

Het kan informatief zijn niet alleen beelden pal naar beneden (naar het voetpunt oftewel nadir) ter beschikking te hebben, maar ook voorwaarts en eventueel achterwaarts genomen foto's. Daardoor kan onder objecten of tegen de wanden van objecten worden gekeken.

4.4.10 VIDEOBEELDEN

Rivierenland eist MPEG-beelden met een resolutie van 352 x 255 pixels bij 25 beelden per seconde. Er wordt dus geen geometrische resolutie gegeven. De videobeelden dienen alleen ter verificatie van de laseropname, dus om bijvoorbeeld een vreemd verschijnsel in de laserdata te kunnen identificeren als een galopperend paard dat voor een soort 'heg' in de hoogtedata zorgde.

Het doel van videobeelden is hetzelfde als dat van fotobeelden, zoals in § 4.4.9 omschreven. Sommige waterschappen prefereren videobeelden boven fotobeelden. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie vereist videobeelden niet.

4.4.11 ORTHOFOTOMOZAÏEK

Zie voor een toelichting van het begrip orthofotomozaïek bijlage B.

Rijnland en Stichtse Rijnlanden eisen een resolutie van minimaal 5 cm. Rivierenland vraagt geen orthofotobestand (men heeft dat al) en volgens de nota van inlichtingen zijn er ook geen extra punten mee te verdienen. Hollands Noorderkwartier vraagt om een resolutie van beter dan 10 cm; in 2006 om 5 cm. Stichtse Rijnlanden heeft orthofotomozaïeken met een resolutie van 5 cm in TIFF-formaat en merkt als nadeel op dat ze niet gecompriemd zijn.

De reeds genoemde drie varianten van Wetterskip Fryslân leiden volgens Arcadis gezien de vlieghoogten tot beeldresoluties van 2,5, 3,5 respectievelijk 5,5 cm, bij een beeldbreedte van 147, 184 respectievelijk 305 meter.

Op basis van de wensen van de betrokken waterschappen vereist de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie aanvankelijk een gewenste resolutie van het orthofotomozaïek van 5 cm. Verschillende waterschappen hebben hiermee ervaring en beschouwen dat als een zeer waardevolle uitbreiding van hun beheerinstrumentarium.

Een kwantitatieve specificatie van de grootte van de objecten die men daadwerkelijk wil zien ontbrak tot nu toe grotendeels. Dit betekent dat de door verschillende waterschappen geformuleerde resolutie-eis niet fysisch onderbouwd is. Het is niet verstandig op basis van gewoonte een eis te formuleren. Dit was een discussiepunt bij het stellen van de specificaties samen met de kopgroep AHN-2008. Zeker is wel dat de specificatie van de AHN-2-proef in Zeeland dat objecten van 2 x 2 meter herkend moeten kunnen worden onvoldoende voor waterkeringbeheer is. De specificatie van Stichtse Rijnlanden dat objecten van 40 cm moeten kunnen worden herkend lijkt fysisch niet overeen te stemmen met de eis van een resolutie van 5 cm. Welke resolutie noodzakelijk is voor het beschrijven van objecten wordt onder meer bepaald door het Nyquist-theorema uit de natuurkunde. In de militaire beeldverwerking wordt aangenomen dat minimaal één pixel noodzakelijk is voor detectie (is er iets te zien?), drie voor classificatie (wat is er te zien?) en vijf voor identificatie (welke tank is dit?). Behalve de ruimtelijke resolutie speelt ook de radiometrische resolutie een rol (het onderscheidend vermogen in aantal kleuren en licht en donker). Bij Waternet heeft men bepaald dat voor beheer, opsporing en handhaving – juist voor waterkeringen – brandkranen, drainageputten en leidingdeksels moeten kunnen worden herkend, objecten van minimaal zeg 20 cm. Elders worden meterkasten en dijpalen genoemd. Op basis van die eis is men tot de vereiste resolutie van 5 cm gekomen. Deze eis stemt overeen met de net genoemde beeldverwerkingsprincipes.

Daarom concludeert de Werkgroep dat, indien orthofoto's worden vervaardigd, de resolutie daarvan minimaal 5 cm dient te bedragen.

Zoals in § 4.4.9 werd opgemerkt, zijn optische beelden een vereist bijproduct bij een laserhoogtemodel en deze dienen bovendien op hetzelfde tijdstip gemaakt te zijn. Dit is vooral ter verificatie en interpretatie van verschijnselen in de laserdata, die zoals gezegd voor waterkeringbeheerders van groot belang zijn. Feitelijk is daarvoor een niet geometrisch gecorrigeerd fotobeeld voldoende. De stap van goede optische beelden naar orthofoto's is niet buitengewoon complex, hoewel de beperking van de omvalling eisen aan de strookbreedte en vlieghoogte tot gevolg heeft, wat voor een flinke kostenstijging zorgt. In de beheerpraktijk zijn orthofoto's zeer waardevol ten opzichte van niet geometrisch gecorrigeerde optische beelden. Daarom wordt geadviseerd de eis van optische beelden te combineren met de wens van orthofoto's en de verwerking van nadirfoto's tot orthofoto's te belonen.

Deze wens plus die dat de fotobeelden tegelijk met de laseropnamen worden gemaakt, beperkt de keuze aan opnametijdstippen. Het opnemen van een groot deel van Nederland met 5 cm resolutie in één jaar zal daarnaast mogelijk tot capaciteitsproblemen leiden.

De kwaliteit van orthofoto's die tijdens laseropnamen worden vervaardigd is substantieel minder dan de orthofoto's die met klassieke fotogrammetrische camera's worden gemaakt, omdat deze laatste geometrisch en radiometrisch aan veel hogere eisen voldoen (ze zijn ook minimaal tienmaal zo duur).

Ook orthofoto's hebben een precisie in ligging, die bovendien per punt kan verschillen. In het algemeen worden hiervoor geen eisen gesteld. Rijkswaterstaat IJsselmeergebied controleert hierop louter door op het oog te beoordelen of de foto over een bestaand vectorbestand valt. De WGL eist voor de systematische fout in planimetrie hetzelfde maximum als voor het laserdataraster: 15 cm.

Er zijn echter nog meer eisen te stellen. Denkbaar is hoe dan ook dat de zonnestand, lichtval en de stroken een kleur- en intensiteitsverschil geven waarop zou kunnen of moeten worden gecorrigeerd. Er is een voorbeeld bekend van een waterschap dat óók eisen stelde op het gebied van witbalans en kleur en op grond daarvan het opgeleverde bestand kon afkeuren.

4.4.12 KARTERING

Voor het vullen van legger en beheerregister laten waterschappen de ligging van een aantal 'waterkeringstopografische lijnen' (buiten- en binnenkruinlijn, binnenteen, bekleedingsvlakken) en diverse objecten (kademeubilair, bomen, kunstwerken, rasters, puntobjecten, palen en dergelijke) karteren, waarbij mede de laserhoogtedata wordt gebruikt.

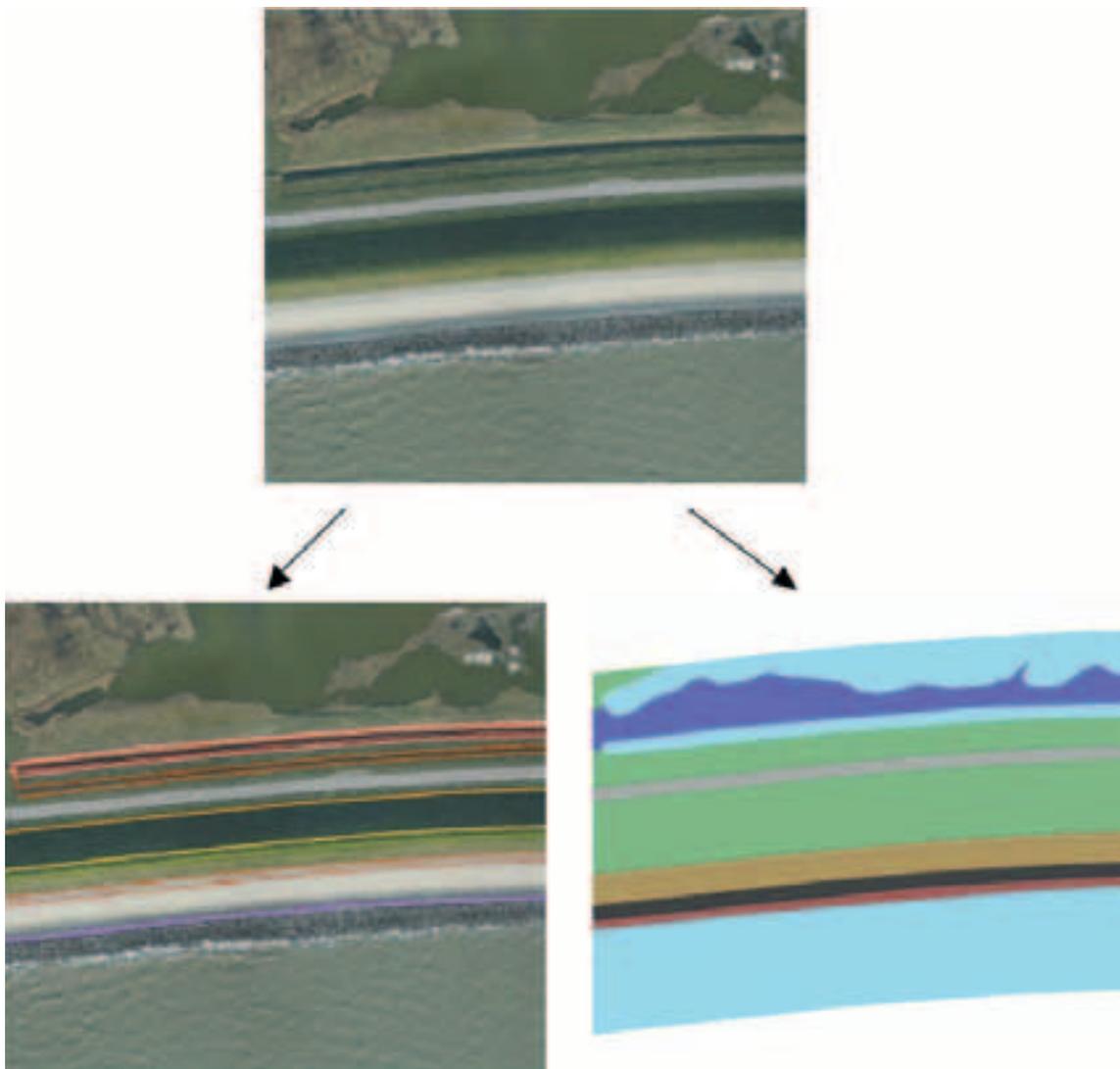
Rijnland laat buiten- en binnenkruinlijn en binnenteen karteren en vraagt naar de mogelijkheden voor het karteren van de bekleedingsvlakken. Rivierenland laat uitgebreid karteren en vereist codering volgens een lange lijst met entiteiten. Stichtse Rijnlanden merkt op dat een te groot deel van de gekarteerde objecten (met name bomen) onjuist bleek en stelt voor daarvoor in het vervolg eisen te stellen. Hollands Noorderkwartier vraagt een kartering en stelt daaraan eind 2006 geometrische eisen: "Het karteren moet plaatsvinden op basis van de orthobeelden en ingewonnen hoogtedata. De plaatsnauwkeurigheid mag maximaal 25 cm afwijken ten opzichte van de fotolijnen/kniklijnen". Alleen de te karteren elementen en de typen die deze kan hebben zijn in een tabel voorgeschreven.

Hollands Noorderkwartier karteert niet louter op basis van het laserhoogtebestand. De Grootsschalige Basiskaart Nederland (GBKN) is voor kartering een belangrijk uitgangspunt, zeker voor het karteren van bebouwing. Behalve de laserdata worden ook de luchtopnamen gebruikt, vooral bij wijze van toets op de actuele toestand. De mutaties die ten opzichte van de GBKN worden opgemerkt, worden teruggemeld aan de GBKN.

Het is verstandig de kartering uit te voeren op basis van de *laserpunt*data en in de aanbesteding de kartering op basis van het *raster*bestand uit te sluiten: de resolutie is daarvoor te beperkt. In § 4.2.4 is toegelicht dat ondanks een beperkte resolutie en puntdichtheid lijnstructuren toch met grote precisie in ligging kunnen worden vastgelegd. Bij het karteren kunnen optische beelden van dienst zijn, met name waar het gaat om classificatie van bijvoorbeeld bekledingsvlakken of de controle daarvan. Er zijn aanbieders die bij het karteren de intensiteit van de gereflecteerde laserpuls gebruiken (zie figuur 9).

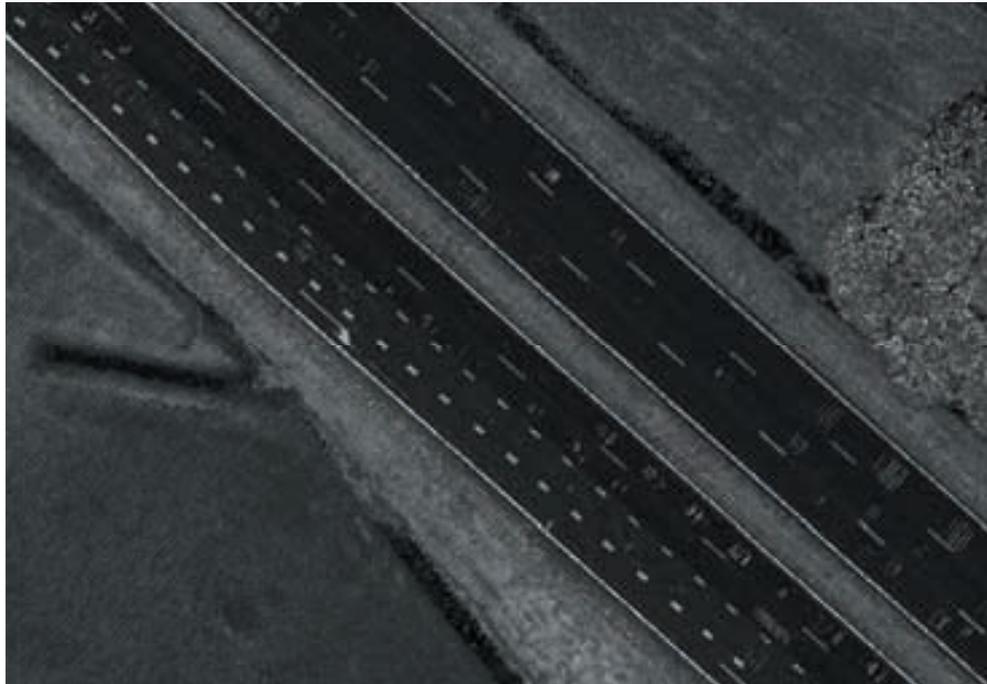
FIGUUR 8

KARTERING VAN EEN WATERKERING LEIDT TOT LIJN- EN VLAKGEVORMDE VECTORDATA (© TERRAIMAGING)



FIGUUR 9

VAN DE INTENSITEIT VAN DE REFLECTIE VAN ELK INDIVIDUEEL LASERPUNTJE KAN EEN INTENSITEITSBEELD WORDEN VERVAARDIGD. EEN DERGELIJK BEELD KAN HELPEN BIJ DE UITVOERING VAN DE KARTERING OMDAT DEZE EXACT DEZELFDE DATA LAAT ZIEN ALS HET HOOGTEMODEL.
(© FUGRO INPARK, FLI-MAP 400)



De specificatie van karteringswerkzaamheden is zeer complex. Alle punt-, lijn- en vlakelementen moeten worden gespecificeerd, alsmede de codes waarmee zij dienen te worden gekarteerd en de bijbehorende datastructuur. Het is verstandig zo veel mogelijk aansluiting te zoeken bij komende standaarden op het gebied van waterschapsinformatie-infrastructuur. De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie eist geen kartering. Wel is de specificatie zodanig opgesteld dat de vervaardigde producten basismateriaal kunnen zijn voor een in dezelfde uitbesteding of later uit te voeren kartering.

4.4.13 UITVOERING VAN DE VLUCHT

Geen van de opdrachtgevers wil het vluchtplan tevoren goedkeuren. Het jaargetijde en de vereiste weersomstandigheden en terreingesteldheid zijn vaak wel gespecificeerd. Rijnland en Rivierenland melden expliciet dat de leverancier voor alle toestemmingen en vergunning moet zorgen. Hollandse Noorderkwartier vraagt de aannemer de procedure hiervoor inzichtelijk te maken in zijn offerte.

De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie vereist dat er in het bladloze seizoen gevlogen wordt, dat het gras laag is, er geen sneeuw ligt, er geen water op het land staat, dat er geen neerslag valt, dat de windsnelheid beperkt is en dat als er in de buurt van uiterwaarden en kust opgenomen wordt het water laag staat. Deze eisen dienen bij uitvoering van de vlucht nader te worden gespecificeerd, bijvoorbeeld door contact met de opdrachtgever over de waterstand.

4.4.14 KWALITEITSCONTROLE DOOR DE AANNEMER

In de bestekken zijn geen aanwijzingen voor kwaliteitscontrole door de aannemer zelf aangetroffen. Wel vraagt Hollandse Noorderkwartier de aannemer in zijn offerte de procedure voor kwaliteitsbewaking en voortgangscntrole inzichtelijk te maken, maar stelt hier geen eisen aan.

De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie stelt vooralsnog geen eis op dit gebied. Later zal een document worden opgesteld dat de uitbesteding en de controle precies beschrijft.

4.4.15 ACCEPTATIECONTROLE DOOR DE OPDRACHTGEVER

Rijnland meldt dat het een ander bedrijf dan de aannemer van de laservlucht controlemetingen zal laten uitvoeren. Hoe dit gebeurt laat men in het midden. In een aparte brief heeft men de aannemer laten weten hoe de controle precies zal worden uitgevoerd. Rivierenland meldt: "Controle van de harde topografie vindt steekproefgewijs plaats door terrestrische metingen in het veld. Controle van de zachte topografie (bijvoorbeeld de entiteiten van de waterkering) vindt steekproefgewijs plaats door het genereren van profielen uit de ingewonnen laserdata." Rijnland heeft in een aparte brief aan de aannemer zijn controleprocedure laten weten. Controle van het opgeleverde product is zeer belangrijk, maar een relatief complexe aangelegenheid. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie zal in fase 3 een document opstellen dat de handreikingen voor de controle biedt.

4.4.16 METADATA EN GEBRUIKERSDOCUMENTATIE

Gebruikers van met laseraltimetrie ingewonnen data hebben behoefte aan makkelijk toegankelijke metadata en begrijpelijke documentatie over aspecten van de inwinning en verwerking. Wat betreft metadata valt te denken aan opnametijdstip, precisie en dichtheid. Deze data dient tegelijk met het laserbestand toegankelijk te zijn, om in gevallen van twijfel aan wat het laserbestand te zien geeft terug te kunnen zoeken op de opnameomstandigheden en product- en verwerkingsspecificaties.

In een achtergronddocument zou informatie kunnen worden aangeboden over de wijze waarop is ingewonnen en gecontroleerd, de bewerkingen die zijn uitgevoerd en de specificaties en kwaliteitsborging van de resulterende bestanden. *Het Kwaliteitsdocument laseraltimetrie Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden* [16] van de Meetkundige Dienst wordt hiervoor door HDSR als goed voorbeeld gezien.

4.5 CONCLUSIE GEWENSTE SPECIFICATIES LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER

In de tabel hieronder zijn de conclusies opgenomen zoals deze zijn geformuleerd op basis van alle inventarisaties en analyses in § 4.4 van dit document. De verschillende versies van deze analyses en de onderstaande tabel zijn besproken en bijgesteld door de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie op 9 mei en 21 juni 2007, mede naar aanleiding van de bespreking van de AHN-'kopgroep' en WGL op 23 mei en 21 juni 2007 ten behoeve van de AHN-2008-specificaties.

In onderstaande tabel worden eerst de vereiste en optionele producten genoemd. De specificaties volgen daarna, onderverdeeld in geometrische en overige specificaties. Voor de toelichting zij verwezen naar § 4.4.

TABEL 1 VEREISTE EN GEWENSTE PRODUCTEN OP HET GEBIED VAN LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER MET HUN SPECIFICATIES

Vereiste producten	Specificatie	Toelichting en gebruik
Ongeclassificeerd puntbestand, alleen uitschieters verwijderd		Ter interpretatie van hetgeen in laserdata te zien is
Als maaiveld geclassificeerd puntbestand: vegetatie, objecten en bebouwing verwijderd	minimaal vegetatie $\geq 0,5\text{m}$ verwijderd, met behoud van zoveel mogelijk punten op maaiveld	Voor berekening kniklijnen, maaiveld en kartering
Als maaiveld geclassificeerd puntbestand geïnterpoleerd naar raster		Voor operationeel gebruik, inclusief trekken van profielen en uitvoering toetsing primaire waterkeringen
Ongeclassificeerd puntbestand geïnterpoleerd naar raster		Ter interpretatie van de 'gaten' op plaatsen met bomen of gebouwen. Sommige gebruikers zijn juist in boomtoppen of gebouwhoogten geïnteresseerd
Nadirfoto's		Ter interpretatie van hetgeen in de laserdata te zien is en voor dagelijks gebruik door beheerder. Als orthofoto's voorhanden zijn wordt hiervan weinig gebruik gemaakt
Optionele producten		
Ortho-gerectificeerd fotomosaïek		Ter interpretatie van hetgeen in de laserdata te zien is, voor dagelijks gebruik door beheerder onder andere data (waaronder beheerregister) en ter controle van de kartering
Voorwaartse foto's		Idem; voordeel is dat je <i>onder</i> objecten kunt kijken
Voorwaartse video		Idem
Ongeclassificeerd puntbestand met intensiteit laserreflectie		Voor gebruik bij kartering
Kartering objecten en (bekledings)vlakken		Kartering op basis van puntbestand, niet op basis van raster; eventueel met gebruikmaking van laserintensiteit
Geometrische specificaties		
Rastergrootte	50 cm; voor kleine regionale keringen 25 cm	Voor de primaire waterkeringen en vermoedelijk 80% van de regionale voldoet een orthogonaal raster van 50 cm. Voor de overige 20% kleine regionale keringen is een raster van 25 cm gewenst.
Puntdichtheid	$\geq 20/\text{m}^2$	Op zich specificeren de eisen voor rastergrootte plus hoogteprecisie de puntdichtheid voldoende, maar voor visuele interpretatie van laserdata en voor classificatie en kartering is deze eis toch noodzakelijk
Hoogteprecisie per laserpunt	niet eisen	De hoogteprecisie wordt vereist via die van de rastercel en het aantal punten/ m^2
Hoogteprecisie per rastercel – toevallige fout – systematische fout	$\sigma = 5\text{ cm}$ $\leq 5\text{ cm}$	De toevallige fout geldt voor asfalt; zowel de toevallige als systematische fout moeten worden aangetoond
Planimetrische precisie – toevallige fout – systematische fout	$\sigma = 20\text{ cm}$ $\leq 15\text{ cm}$	Toevallige fout in planimetrie is 'klein genoeg' maar wordt toch gespecificeerd (als GBKN); systematische fout daarentegen aantonen: voor kartering en juridisch gebruik, maar ook omdat planimetrische fout op steil talud resulteert in grote hoogtefout
Orthofotomosaïek – pixelgrootte – planimetr. systematische fout	5 cm $\leq 15\text{ cm}$	Objecten van 20 cm te onderscheiden
Nadirfoto's – pixelgrootte – beeldafmeting in pixels	5 cm niet eisen	
Voorwaartse foto's – pixelgrootte – beeldafmeting in pixels – beelden per seconde	niet eisen niet eisen niet eisen	Pixelgrootte kun je voor schuine foto niet eisen; totale beeldafmeting eventueel wel
Voorwaartse video – beeldafmeting in pixels – beelden per seconde	niet eisen niet eisen	

Vlieghoogte	niet eisen	Mogelijk wel vlieghoogte eisen vanwege de maximale omvalling bij orthofoto's
Strookbreedte		Eis te stellen aan de hand van te leveren vectorbestand; indicatie:
– primaire waterkeringen	vectorbestand	primaire 100–150 meter, regionale 50–80 meter
– regionale waterkeringen	vectorbestand	
Overige specificaties		
Dataformaten		Hoogtedata: andere formats naast ASCII (bijv. ESRI) in overleg.
– laserpuntdata	ASCII x,y,z (,i)	Indien intensiteit (i) van laserdata wordt geleverd: in zelfde
– rasterdata	ASCIIgrid	bestand toevoegen. Foto's in piramidestructuur als ECW of MrSID;
– foto's	ECW of MrSID	specificeer de compressie. TIFF optioneel. Video: AVI optioneel;
– video	MPEG	specificeer voor maximale kwaliteitsborging de codec
Opnametijdstip laserdata	bladloos, laag gras, geen sneeuw, geen water op het land, rivieren/kust laag water, geen neerslag, maximale windsnelheid	
Opnametijdstip foto's en video	Tijdens laseropname	Foto en video dient onder meer ter verificatie van de laserdata en dient dus tegelijk opgenomen te zijn
Opnametijdstip orthofoto's	Zie hiernaast	Als losse foto's en video worden geleverd, geldt daarvoor de eis van gelijktijdigheid met laseropname; gelijktijdigheid orthofoto's is dan een <i>sterke wens</i> . Worden alleen orthofoto's geleverd, dan is gelijktijdigheid een <i>eis</i>
Orthofotomozaïek beeldkwaliteit	Radiometrie en kleur gecorrigeerd	
Uitvoering classificatie (filtering)	Niet hier eisen	Specificeert AHN-2 voldoende. De classificatie voor waterkeringen is minder streng dan voor waterbeheer
Controle	Niet hier eisen	Specificeert AHN-2 voldoende
Opnamefrequentie	Eens per 4–5 jaar	
Gebruikersdocumentatie en metadata		Huidige documentatie betreffende datakwaliteit en controle is te gecompliceerd en te weinig toegankelijk

4.6 GEWENSTE SPECIFICATIES LASERALTIMETRIE VOOR SPECIFIEK GEBRUIK

Voor bepaalde toepassingen zijn de eisen veel hoger of anders van karakter, met name zettingsverschillen en schadebepaling. In hoofdstuk 2 is dit 'specifiek gebruik' genoemd. De WGL heeft deze specificaties op 15 februari 2007 een aparte plaats in de tabel gegeven. Deze specificaties lijken tot de conclusie te leiden dat deze vooralsnog niet gelijk met het laseraltimetriebestand voor toetsing en beheer ingewonnen kunnen worden.

TABEL 2 SPECIFICATIES VOOR SPECIFIEKE TOEPASSINGEN VAN LASERALTIMETRIE DIE BUITEN HET LASERHOOGTEBESTAND VOOR WATERKERINGBEHEER VALLEN

Specifiek gebruik	precisie
Zettingsverschillen	mm/jaar/m
Calamiteiten	mm
Schade aan panden	mm/jaar/lengte object
Karteringen	< 5 cm
Asfaltering	1 – 2 cm

Zettingbepalingen worden in § 4.3.4 toegelicht. Daar gaat het vooral om zettingen van grote delen van waterkeringen. Hier gaat het om zettingsverschillen tussen punten die niet meer dan een aantal meter uit elkaar liggen. Ze zijn belangrijker naarmate het verschil in zetting in millimeter per jaar per meter afstand groter is. Mogelijk vormt radarinterferometrie in bepaalde omstandigheden een goede aanvullende meettechniek voor zettingsverschillen.

Schade aan panden wordt doorgaans niet veroorzaakt door een uniforme zetting, maar door 'zettingshellingen': een verschil in zetting tussen de ene en de andere hoek van het object. De meting van asfaltheogte heeft mede te maken met de afrekening van het volume asfalt met de aannemer en komt daarom zeer precies. Mogelijk kan het wegdekmeetvoertuig ARAN van Rijkswaterstaat DWW hierbij ook van dienst zijn.

5

PROCESBESCHRIJVING VAN LASERALTIMETRIEPROJECTEN

5.1 INLEIDING

De Werkgroep Grootschalig uitvoeringsproject Laseraltimetrie (WGL) heeft in de loop van 2006 contact opgenomen met het Actueel Hoogtebestand Nederland om de krachten ten aanzien van laseraltimetriemetingen voor het water(kering)beheer te bundelen. Het doel van de samenwerking was om het AHN zowel voor waterbeheer als waterkeringbeheer toepasbaar te maken. Uit een voorlopig opgestelde kosten/batenanalyse bleek dat samenwerking in het AHN tussen waterbeheer en -keringbeheer financieel en organisatorisch sterk aan te bevelen was.

Tijdens de samenwerking bleek dat er een verschil was in de eisen die waterbeheerders en waterkeringbeheerders stelden aan de laseraltimetriemeteresultaten. De afstemming tussen beide groepen vindt ten tijde van het schrijven van dit rapport nog plaats. Het ziet er naar uit dat, op basis van de gezamenlijk geformuleerde eisen, voor alle primaire en ongeveer 80% van de regionale waterkeringen mag worden verwacht dat hier voor de beheerder bruikbare informatie te verkrijgen is.

Verwacht wordt dat dit in 20% van de gevallen (zo'n 3.400 km regionale keringen in Nederland) niet het geval is. Er lijkt dan ook behoefte te zijn aan handvatten (in de vorm van standaarddocumenten) die de beheerder kan gebruiken om zelf laseraltimetrieproducten op te zetten en in uitvoering te brengen. Dit is door de leden van de WGL bevestigd. In dit hoofdstuk komt verder de procesbeschrijving van laseraltimetrieprojecten aan bod waaraan de standaarddocumenten zijn verbonden.

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden is in de procesbeschrijvingen in het kader van laseraltimetrieprojecten reeds vergevorderd. Bij de beschrijving van dit hoofdstuk is dan ook gebruik gemaakt van informatie afkomstig uit het *Werkboek FLI-MAP* [17], geschreven door Marten Westerink, werkzaam bij het hoogheemraadschap.

Onderstaande paragrafen beschrijven op hoofdlijnen op welke wijze de verschillende processen ten aanzien van laseraltimetrie binnen waterschappen wordt uitgevoerd. Een en ander dient uiteindelijk uit te monden in een gedetailleerd stappenplan waarin ook formats zijn opgenomen voor het opstellen van bestekken, gunningscriteria en de acceptatie van de producten. Tevens behoort een implementatiestrategie van de geleverde informatie binnen de beheerorganisatie tot een van de mogelijk op te leveren producten.

5.2 HET SPECIFICATIEPROCES

Voordat een waterschap kan beginnen met het aanbesteden en in uitvoering brengen van de inwinning van hoogtegegevens, dient eerst duidelijk te zijn waarvoor de hoogtegegevens worden ingewonnen. Enkele voorbeelden hiervan zijn:

- waterbeheer (bergingsgebieden, bodemdaling door bemaling, overstromingsscenario's);
- waterkeringbeheer (verzakkingen in keringen, profielen van keringen, etc.);
- het gebruik van de informatie (globale gegevens over hoogte, precieze gegevens over hoogte, inspectie, etc.).

De verschillende doelen waarvoor wordt gemeten hangen immers samen met de eisen die aan de metingen dienen te worden gesteld.

Hiervoor is het noodzakelijk dat de benodigde specialisten (laseraltimetrie, waterbeheer, waterkeringbeheer, etc.) en een (externe) intermediair die de verschillende vakgebieden op elkaar kan afstemmen worden betrokken. Veelal is een combinatie van personen van de beheerder en gespecialiseerde externe adviesbureaus noodzakelijk. Richting deze bureaus is een heldere en eenduidige opdrachtomschrijving noodzakelijk.

Afhankelijk van de wensen en eisen die de beheerder stelt aan de in te winnen hoogtedata, wordt gekozen voor een inwinstrategie, waartoe laseraltimetrie een van de opties is. In het verdere verloop van dit hoofdstuk wordt het gebruik van laseraltimetrie als uitgangspunt gehanteerd. Nadat de keuze voor laseraltimetrie is gemaakt kunnen de wensen en eisen van de beheerders worden vertaald in de specificaties, criteria en randvoorwaarden voor de uitvoering, verwerking en het gebruik van de laseraltimetriedata.

5.3 HET AANBESTEDINGPROCES

Er zijn een aantal stappen noodzakelijk om tot aanbesteding over te kunnen gaan. Dit zijn de volgende:

- 1 Het opstellen van inschrijvingsvereisten (§ 5.3.1)
- 2 Opstellen van het bestek en gunningscriteria (§ 5.3.2)
- 3 Het aanbestedingstraject en de beoordeling van de offertes (§ 5.3.3)
- 4 De gunning (§ 5.3.4)
- 5 Het contract, de werkelijke gunning (§ 5.3.5)

5.3.1 INSCHRIJVINGSVEREISTEN

De volgende punten kunnen van belang zijn om als inschrijvingsvereisten, met bewijslast, voor te schrijven, zonder hierbij uitpuddend te willen zijn:

- Niet in staat zijn van faillissement of liquidatie verkeren
- In de laatste 3 boekjaren soortgelijke werken in de GWW-sector ten bedrage van ...
- Op tijd werken hebben opgeleverd
- Ten minste één vergelijkbaar werk op een vakkundige en regelmatige wijze hebben uitgevoerd
- Aanneemsom van tenminste een zeker bedrag toegekend gekregen/uitgevoerd
- In bezit zijn van geldige en van toepassing zijnde certificaten (VCA, ISO, ...)

Bij het opstellen van standaard documenten kan bovenstaande niet uitpuddende lijst, nader worden uitgewerkt in het document met betrekking tot de gunningscriteria.

5.3.2 OPSTELLEN VAN HET BESTEK EN GUNNINGSCRITERIA

Afhankelijk van de in huis aanwezige kennis kan ondersteuning worden gevraagd aan een externe adviseur om te ondersteunen bij het opstellen van het bestek. Hierbij zijn buiten een heldere en gedetailleerde omschrijving van het project ook gegevens opgenomen over onder andere:

- Aanpak van de metingen en specificaties (laseraltimetrie, terrestrische contrametingen, etc.).
- Boeteclausules (levertermijnen, meettermijnen, etc.).
- Tevens worden de in § 4.4 opgenomen aspecten betrokken bij het opstellen van het bestek.
- Het in te vliegen gebied (afmetingen, locatie, etc.).
- De door de opdrachtgever gestelde leveringsvoorwaarden (zie onder andere het *Werkboek FLL-MAP* [17], de diverse bestekken en het door het Wetterskip Fryslân uitgevoerde *Vergelijkingsonderzoek datainwinning laseraltimetrie vs terrestrisch meten* [2]).

Tevens worden parallel aan het opstellen van het bestek de gunningscriteria opgesteld. Deze criteria helpen de beheerder uiteindelijk bij de beoordeling van de offertes en ondersteunen hem zo objectief mogelijk bij het maken van de uiteindelijke keuze. Ook hiervoor is het raadzaam een gespecialiseerd, extern bureau in te schakelen. Enkele voorbeelden van gunningscriteria zijn:

- Verhouding prijs – kwaliteit
- Gedetailleerde beschrijving aan te leveren producten
- Compleetheid van de offerte ten aanzien van het in het bestek opgestelde format en de vereiste informatie
- In hoeverre wordt tegemoetgekomen aan de in § 4.4 gestelde eisen ten aanzien van de te leveren producten
- Levertijden
- Door de aannemer gegeven garanties
- Certificeringen (b.v. ISO)
- Referenties van de uitvoering van gelijksoortige projecten
- Enzovoort.

De gunningscriteria worden zo concreet en meetbaar mogelijk geformuleerd zodat de beoordeling eenduidig en reproduceerbaar uitgevoerd kan worden.

Door WGL wordt geconcludeerd dat het verstandig is binnen de WGL te komen tot inhoudelijk onderbouwde standaarddocumenten voor:

- 1 Gunningscriteria (zie voor inhoudsopgave bijlage F);
- 2 Bestek voor de aanbesteding van laseraltimetrieprojecten (zie voor inhoudsopgave bijlage E).

5.3.3 AANBESTEDINGSTRAJECT

Afhankelijk van de omvang van het aan te besteden project, kan de opdracht op de volgende wijzen aanbesteed worden, zonder uitputtend te zijn:

- Onderhands
- Meervoudig onderhands
- Onderhandeling met voorafgaande aankondiging (Nederland en Europa)
- Onderhandeling zonder voorafgaande aankondiging
- Openbaar voor Nederland
- Openbaar binnen Europa

De regels voor aanbestedingen kunnen aanleiding geven (vooral bij grotere aanbestedingen) om een externe adviseur in te huren om de beheerder hierbij te ondersteunen. Aanbestedingsprocedures luisteren zeer nauw en bij het maken van fouten door de aanbestedende partij kunnen bedrijven via bezwaarprocedures tot eisen voor schadevergoeding komen. Deze zaken kunnen leiden tot grote vertragingen en extra kosten voor de beheerder.

5.3.4 DE GUNNING

Nadat verschillende bedrijven offertes hebben toegezonden, worden de offertes beoordeeld op basis van de reeds eerder opgestelde gunningscriteria. Er dient een duidelijke en helder onderbouwd besluit te worden gevormd waarin de uiteindelijke keuze voor de opdrachtgunning kenbaar wordt gemaakt.

Gegund kan worden op:

- enkel en alleen de laagste prijs;
- de economisch voordeligste inschrijving;
- een tevoren opgezet beoordelingsstelsel met bijvoorbeeld organisatorische, technische en kwaliteitsaspecten.

Aanbevolen wordt om in het kader van de WGL standaarddocumenten op te stellen ten aanzien van gunningscriteria. In bijlage E is een mogelijke inhoudsopgave opgenomen van dit document.

5.3.5 HET CONTRACT

Vervolgens wordt voor de partij die de opdracht gegund heeft gekregen een contract opgesteld waarin de voorwaarden voor uitvoering (leveringsvoorwaarden, specificaties te leveren producten, etc.), boeteclausules, betalingsvoorwaarden, etc. duidelijk zijn verwoord. Het contract dient dermate goed te zijn geformuleerd dat er geen misverstanden kunnen ontstaan en dat de aannemer zich ten allen tijde gebonden voelt aan het contract. Zoals ook in het *Werkboek FLI-MAP* is verwoord door Marten Westerink (Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden), mag het contract geen openingen bieden voor verwarring en onduidelijkheid. Alle eventualiteiten dienen erin te zijn opgenomen en afgedekt.

Aanbevolen wordt om in het kader van de WGL een standaard contract op te stellen waarin de verhoudingen, verplichtingen etc. zijn geregeld tussen de aannemer en opdrachtgever. Voor een mogelijke inhoudsopgave van een contract wordt verwezen naar bijlage G.

5.4 HET PROCES VÓÓR UITVOERING VAN DE OPDRACHT

Na gunning van de opdracht kan de aannemer starten met de uitvoering van het project. De opdrachtgever (beheerder) houdt tijdens de uitvoering de vinger aan de pols wat voortgang betreft. Tevens kan hij ter controle een extern bureau de opdracht geven om tijdens het uitvoeren van de metingen terrestrische contrametingen uit te voeren. Hiermee verschaft de beheerder zichzelf het instrument om bij oplevering van de ingewonnen data door de aannemer een controleslag uit te voeren.

Indien de opdrachtgever aan de opdrachtnemer gedetailleerde digitale GIS-gegevens aanlevert over zijn beheergebied, zal het proces binnen het project geoptimaliseerd worden.

5.5 HET PROCES TIJDENS UITVOERING VAN DE OPDRACHT

De aannemer is tijdens het uitvoeren van de opdracht volledig zelf verantwoordelijk voor de voortgang en juiste uitvoering van het project. In principe heeft de opdrachtgever (beheerder) in dit stadium geen rol ten aanzien van het project. Wel wordt aanbevolen om als opdrachtgever controlemomenten in te bouwen. Geëist kan worden op vooraf vastgestelde tijdstippen het volgende te leveren:

- 1 Proefbestanden met eerste resultaten ten aanzien van de laseraltimetriemetingen
- 2 Proefbestanden ten aanzien van de kartering van de resultaten
- 3 etc.

Overigens kan het ook tijdens de uitvoering nuttig of noodzakelijk zijn dat de opdrachtgever contact met de aannemer houdt. Zo beschrijft het AGI kwaliteitsplan bijvoorbeeld (§ 5.6.5) dat de aannemer geïnformeerd zal worden over de tijden van hoogwater in de uiterwaarden of aan de kust.

5.6 HET PROCES NA UITVOERING VAN DE OPDRACHT

Na afloop van de eigenlijke uitvoering van het project en bij oplevering van de verkregen resultaten dient het waterschap een uitvoerige controle uit te voeren op het aangeleverde. Hieronder vallen onder andere:

- Controleren (meta)data op basis van de in het bestek opgenomen beschrijvingen
- Vergelijken met de terrestrisch ingewonnen controlepunten
- Controleren controledata: precisie op bekende punten of profielen (eventueel extern)
- Controleren op volledigheid, uitschieters, strookvereffening, punt dichtheid, filtering, interpolatie (eventueel extern)

Nadat de opdrachtgever alle data en producten heeft gecontroleerd en heeft goedgekeurd kan tot acceptatie hiervan worden overgegaan. Na acceptatie kan het project met de aannemer worden afgesloten.

Denkbaar is een opzet waarbij een groot deel van de controle aan de aannemer zelf wordt overgelaten. Daarbij staat de kwaliteit van het uiteindelijke product voorop en is de wijze waarop deze totstandkomt daaraan ondergeschikt. De aannemer dient de wijze van controleren en de wijze waarop hij de gevraagde kwaliteit heeft gehaald zelf te rapporteren. Dit is de aanpak die is gevolgd bij de AHN-proef begin 2007 in Zeeland (zie *Projectbestek AHN-2 WZE. Bijlage 1: Specificaties hoogtegegevens; bijlage 2: Kwaliteitscontrole en -borging opdrachtnemer* [14]).

De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie zou kunnen voorzien in een standaarddocument waarin een verantwoorde controle van opgeleverde data, zoals hierboven globaal omschreven, nauwkeurig is beschreven. In bijlage H is hiervoor een opzet beschreven. In het document kan onder meer verwezen worden naar documenten die Rijkswaterstaat AGI heeft opgesteld voor het controleren van laseraltimetrieproducten, zowel voor onderdelen van het AHN als voor andere doeleinden. Op verzoek van de Werkgroep heeft AGI deze documenten ter beschikking gesteld voor gebruik door de waterschappen.

6

EVALUATIE LASERDATA AHN-PROEF ZEELAND MET HET OOG OP WATERKERINGBEHEER

6.1 INLEIDING

De Werkgroep Grootschalig Uitvoeringsproject Laseraltimetrie (WGL) beoogt inwinning en gebruik van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer onder meer te stroomlijnen door specificaties op te stellen, zoals in § 4.4 is gebeurd. De vraag is daarbij aan welke specificaties laserdata moet voldoen om een representatief maaiveld-hoogtebestand op te leveren, waarmee actuele profielen kunnen worden gegenereerd en de veiligheidsnormen kunnen worden getoetst.

In het voorjaar van 2007 werd door de stuurgroep AHN in samenwerking met het Waterschap Zeeuwse Eilanden (WZE) een proefproject uitgevoerd dat erop is gericht te onderzoeken in hoeverre een generiek AHN-bestand met hogere specificaties dan tot dan toe gebruikelijk kan worden opgeleverd. Dat bestand zou dan behalve voor generieke en waterbeheertoepassingen ook geschikt moeten zijn voor gebruik voor waterkeringbeheer en daarom was dit voor de WGL interessant. In de loop van 2007 ontstond de gewenste samenwerking tussen de WGL en de Stuurgroep AHN, waarbij onder meer de voor de nieuwe generatie AHN in 2008 te gebruiken specificaties werden besproken, gebaseerd op de proef in Zeeland.

Omdat de specificaties van de WGL op sommige punten strenger waren dan die van het bestek voor de proef AHN-WZE, voerde de WGL een evaluatie uit met de recentelijk ingewonnen laserdata, met name om in praktijk te kunnen zien wat de resolutie van een raster nu betekent voor het beoordelen van profielen van waterkeringen, onder meer door het uitvoeren van stabiliteitsberekeningen. Hierbij werd met het oog op het type waterkering ook data van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier betrokken.

In § 6.2 wordt besproken naar welke typen waterkering de WGL onderscheid wil maken ten behoeve van zijn analyse en welke data zij daarvan heeft verzameld. In § 6.3 wordt de laserdata geanalyseerd en vergeleken met de terrestrische data. In § 6.5 wordt één van de doelstellingen van de analyse besproken: het onderzoeken van de invloed van de methode van inwinning op de stabiliteitsberekening. Daartoe zijn door GeoDelft berekeningen gemaakt op zowel de terrestrische profielen als de in § 6.3 uit de laserdata berekende profielen. Ten slotte worden in § 6.6 conclusies geformuleerd.

6.2 TYPEN WATERKERING EN DATA

De evaluatie richt zich op drie verschillende typen waterkeringen. Deze zijn, los van de categorie-indeling in de VTV, door de WGL zo gekozen dat er naar verwachting per type een duidelijke uitspraak mogelijk is of de specificaties, zoals in § 4.4 vastgesteld, of zoals deze in de proef AHN-WZE gehanteerd werden, voldoende zijn voor de toepassing van laseraltimetrie met het oog op waterkeringbeheer. Per type heeft de werkgroep daarnaast vastgesteld welke

typen data voor de evaluatie nodig zijn.

Typen waterkering:

- 1 primaire zeekering, hoogte kruin t.o.v. achterland meer dan 7 meter;
- 2 primaire rivierkering, hoogte tussen 4 en 7 meter;
- 3 kleine regionale kering, hoogte t.o.v. achterland minder dan 1 meter.

Gewenste data:

- 1 lasermeetpunten (puntenwolken);
- 2 laserdata op raster 50 cm, gefilterd naar maaiveld;
- 3 laserdata op raster 25 cm, gefilterd naar maaiveld;
- 4 terrestrische dwarsprofielen op de uitgekozen locaties om vergelijkingen te kunnen uitvoeren;
- 5 gegevens over ondergrond en opbouw van de waterkering in verband met de stabiliteitsberekening: grondprofiel (opbouw van de grond, mag als prent), geometrische opbouw (waar ligt welke laag, mag desnoods paar honderd meter verderop zijn), welke grondsoort betreft het, wat is de grondwaterstand, en/of (als er geen grondprofiel is): de uitkomst van een eerdere stabiliteitsberekening.

Uiteindelijk kreeg de WGL dankzij medewerking van de Stuurgroep AHN, de projectmanager, Waterschap Zeeuwse Eilanden, de aannemer van de proef en Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier de beschikking over de volgende data, hieronder beschreven per type waterkering.

- 1 Voor de zeekering werd door Waterschap Zeeuwse Eilanden een met GPS gemeten profiel van van de Oosterscheldedijk in Noord-Beveland ter beschikking gesteld. Deze zeedijk is omstreeks 7,5 meter hoog. Door de aannemer werd laserdata ter beschikking gesteld: de gefilterde laserpunten en het 50cm-raster; het 25cm-raster is niet beschikbaar en zou gezien de geringe punt dichtheid van omstreeks 10/m² ook geen zin hebben.
- 2 Zeeland heeft geen primaire rivierkeringen met een hoogte tussen 4 en 7 meter, maar wel enkele binnendijken. Er werden door WZE profielen van twee binnendijken ter beschikking gesteld, een tussen Kortgene en Kats en een tussen Kortgene en Colijnsplaat, beide omstreeks 2,5 meter hoog. De aannemer stelde laserdata ter beschikking.
- 3 Kleine regionale keringen met een hoogte t.o.v. het achterland minder dan 1 meter komen in Zeeland niet voor en bovendien heeft de proef AHN-WZE geen data met hoge punt dichtheid en een 25cm-raster opgeleverd. Daartoe konden we terecht bij Kier van Gijssel van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, die de laserpunten en zowel een 50cm- als 25m-laserraster laserdata en een terrestrisch (GPS-) profiel ter beschikking stelde van de noordelijke boezemwaterkering van de polder Beetskoog, in de buurt van Hoorn. Weliswaar is het hoogteverschil tussen de kade en de polder zo'n twee meter, maar de kade is zeer smal en het was de voor deze analyse best beschikbare data. De punt dichtheid bedroeg tussen de 20 en 30/m². Het 25cm-raster werd door Hollands Noorderkwartier speciaal voor deze analyse uit de laserpunten berekend.

Helaas was er geen gelegenheid de gewenste gegevens over de opbouw van de waterkering en de samenstelling van de ondergrond te verkrijgen. Zie hiervoor § 6.5.

6.3 ANALYSE VAN DE EIGENSCHAPPEN VAN DE LASERDATA

6.3.1 INLEIDING

Alvorens de dwarsprofielen te genereren en te analyseren (§ 6.4), worden in deze paragraaf de eigenschappen van de laserdata bekeken: de locatie van de gebieden, de laserpuntverdeling en het raster. In § 6.3.2 worden de bijdragen van betrokkenen kort genoemd. In § 6.3.3 gaat het om de laserdata van Noord-Beveland van de proef AHN-WZE. In § 6.3.4 wordt de door Hollands Noorderkwartier verstrekte laserdata van een boezemkade bestudeerd.

6.3.2 BEWERKING, ANALYSE, PRESENTATIE EN COMMENTAAR

De laser- en terrestrische data werd indien nodig door Matthijn de Vette van Waterschap Rivierenland bewerkt en geconverteerd naar ascii-data. Deze werd door Rens Swart, adviseur van de WGL, geanalyseerd met Matlab, waarbij de hieronder weergegeven informatie werd gegenereerd. Willem Rijn, projectleider geo-informatie van Waterschap Zeeuwse Eilanden en nauw betrokken bij de uitvoering van de AHN-proef, gaf na afloop commentaar bij de vragen die de analyse opwierp en verstreekte enige foto's. Ellen Tromp van GeoDelft voerde de stabiliteitsberekeningen uit.

6.3.3 DE LASERDATA VAN NOORD-BEVELAND VAN DE PROEF AHN-WZE

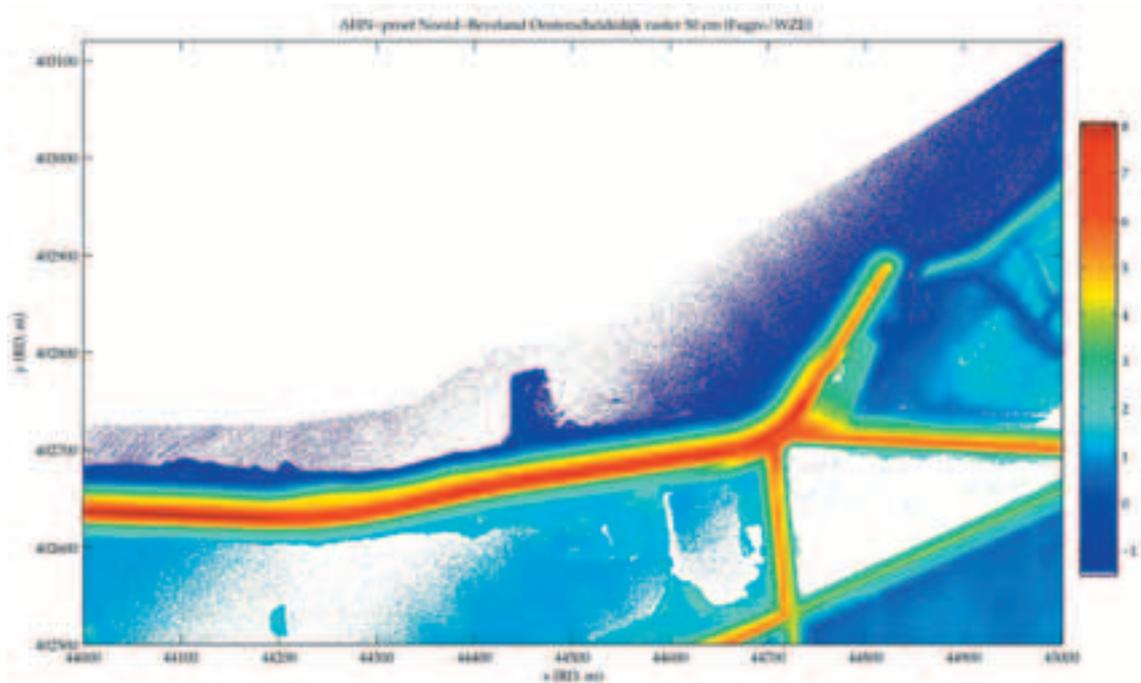
Uit de proef die de Stuurgroep AHN met Waterschap Zeeuwse Eilanden hield, is laserdata van drie locaties in Noord-Beveland beschikbaar.

In figuur 10 is de ligging van de Oosterscheldedijk aan de noordkant van Noord-Beveland te zien. De drie rode lijnen zijn de locaties van de profielen die door de landmeters van Waterschap Zeeuwse Eilanden gemeten zijn. Het linkerprofiel, nummer 6, wordt verderop nader beschouwd. In figuur 11 is het laserhoogtebeeld van ongeveer hetzelfde gebied afgebeeld. De kleur is gecodeerd naar de hoogte, die van $-1,5$ tot $+8$ meter NAP loopt. Water reflecteert de laser sterk en daarom wordt daarvan alleen een signaal ontvangen pal onder de helikopter. Daardoor zijn in figuur 11 de stroken te herkennen waarover de helikopter gevlogen heeft. Ook de watergolfjes zijn te herkennen.

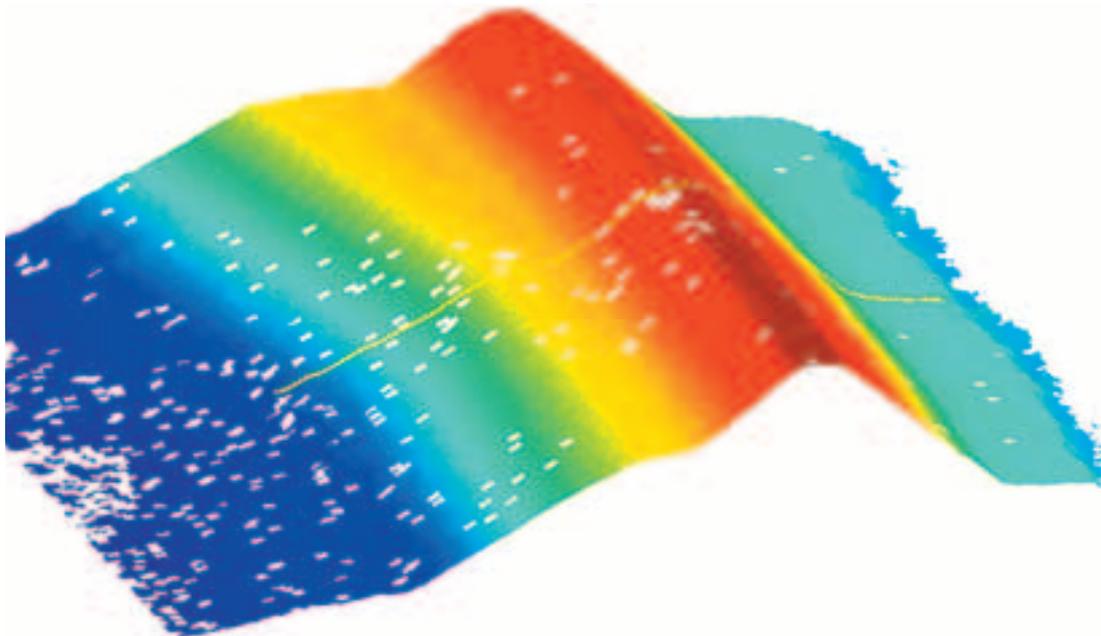
FIGUUR 10 DE LOCATIE VAN PROFIEL 6 OVER DE OOSTERSCHELDEDIJK. LUCHTFOTOMOZAÏEK MET EEN RESOLUTIE VAN 15 CM, GEMAAKT VOOR DE REGIONALE ZEEUWSE OVERHEDEN (NIET TIJDENS DE INWINNING VAN DE LASERALTIMETRIE). (© WATERSCHAP ZEEUWSE EILANDEN)



FIGUUR 11 HET MET LASERALTIMETRIE INGEWONNEN HOOGTEBESTAND VAN DE OOSTERSCHELDEDIJK. DIT GEBIED IS 1000 BIJ 600 METER.
(© AFBEELDING SWARTVAST & STOWA WGL; DATA STUURGROEP AHN & WATERSCHAP ZEEUWSE EILANDEN)



FIGUUR 12 EEN VOGELVLUCHTAFBEELDING VAN EEN 100 METER BREDE STROOK VAN DE OOSTERSCHELDEDIJK.
DEZE DIJK IS 7,5 METER HOOG; DE HOOGTE IS HIER MET EEN FACTOR 2 OVERDREVEN

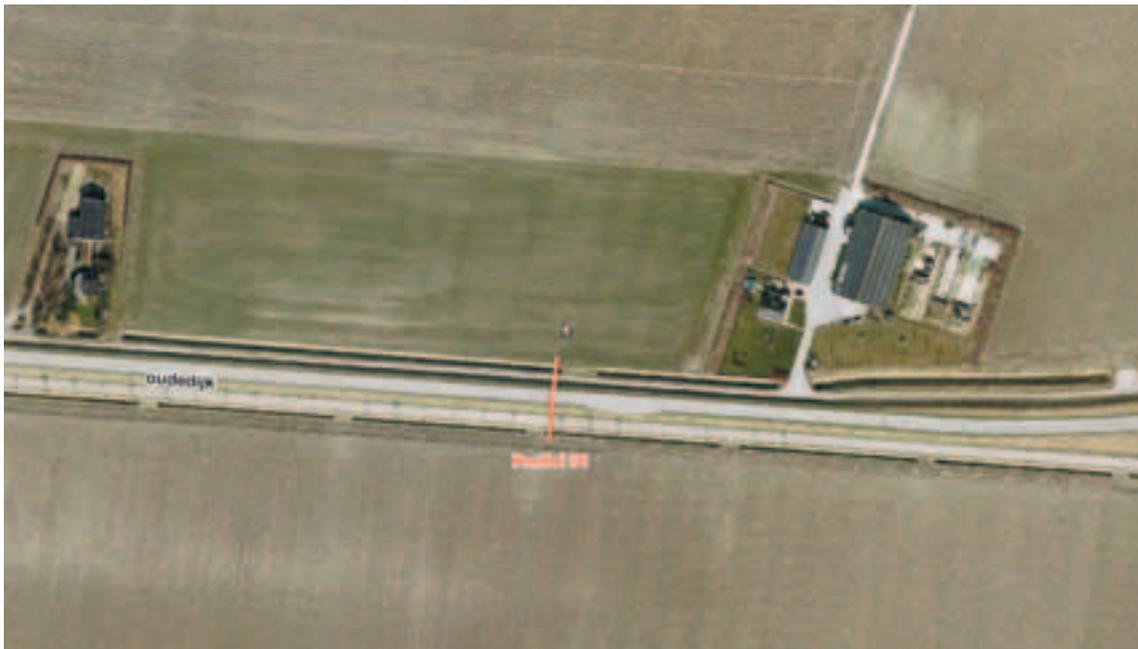


In figuur 12 is een vogelvluchtafbeelding van een 100 meter brede strook van de Oosterscheldedijk weergegeven. De hoogte van deze 7,5 meter hoge dijk is hier met een factor 2 overdreven om het profiel beter zichtbaar te maken. Deze afbeelding geeft een goed beeld van de dichtheid waarmee het laserraster – met rastercellen van 50 x 50 cm – het terrein beschrijft. De locatie van de punten van het geïnterpoleerde laserprofiel ter plekke van het terrestrische profiel is aangegeven in geel. De locatie van de punten van het geïnterpoleerde laserprofiel ter plekke van het terrestrische profiel nummer 6 is aangegeven in geel.

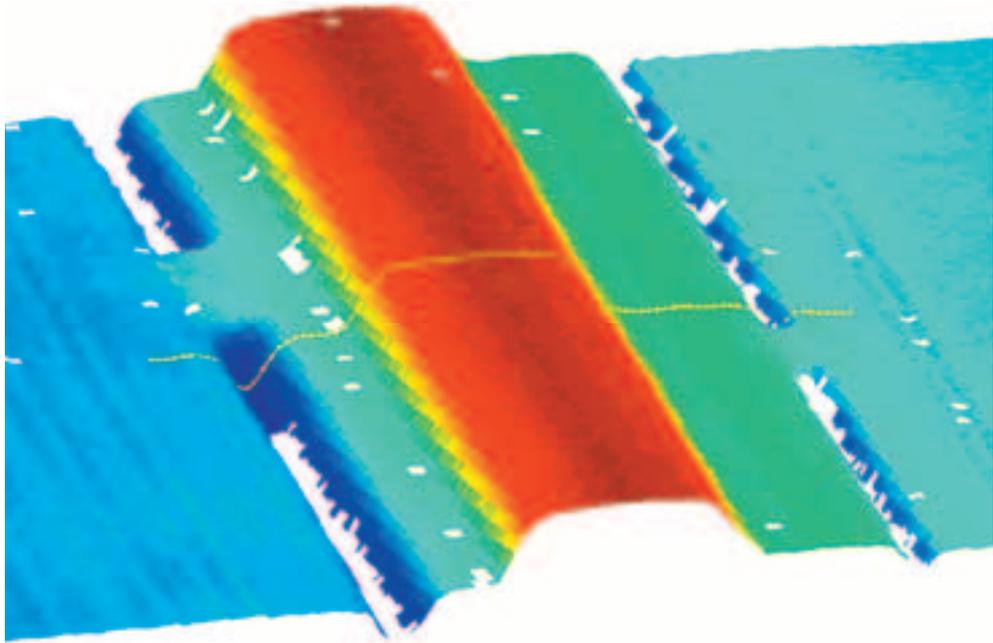
Merk op dat er relatief veel lege rastercellen zijn. Volgens Waterschap Zeeuwse Eilanden zijn de gaten een gevolg van de filtering: na verwijdering van de niet-maaiveldlaserpunten resten er onvoldoende laserpunten om de rastercel te vullen. Omdat dergelijke gaten ongewenst zijn, worden ze 'dichtgerekend' en als apart raster geleverd. Dit is verstandig, omdat daarmee onderscheid gemaakt kan worden tussen werkelijk gemeten data en geïnterpoleerde data. Zoals hierna wordt getoond, kunnen lege cellen óók het gevolg zijn van inhomogeniteiten in de ligging van de laserpunten, waardoor sommige cellen net leeg blijven.

Profiel 1 ligt op de binnendijk tussen Kortgene en Kats, zoals het luchtfotomosaïek in figuur 13 laat zien. Het laserhoogtebestand is weergegeven in figuur 15. De bebouwing en de viaducten zijn duidelijk uit de laserdata verwijderd. In figuur 14 is een vogelvluchtafbeelding van het laserhoogteraster van de binnendijk opgenomen. Deze dijk is omstreeks 2 meter hoog; de hoogte is hier omwille van de visualisatie met een factor 2 overdreven. De 'betegeling' met het 50cm-raster is duidelijk zichtbaar, met name waar de helling sterk verandert (daarbij moet worden bedacht dat het mathematisch onmogelijk is een oppervlak met vierzijdige tegels te beleggen; dit kan alleen door elk vierkant in twee driehoekjes te verdelen en dat is ook de methode die in figuur 14 is gevolgd). De locatie van de punten van het geïnterpoleerde laserprofiel ter plekke van het terrestrische profiel is aangegeven met gele puntjes.

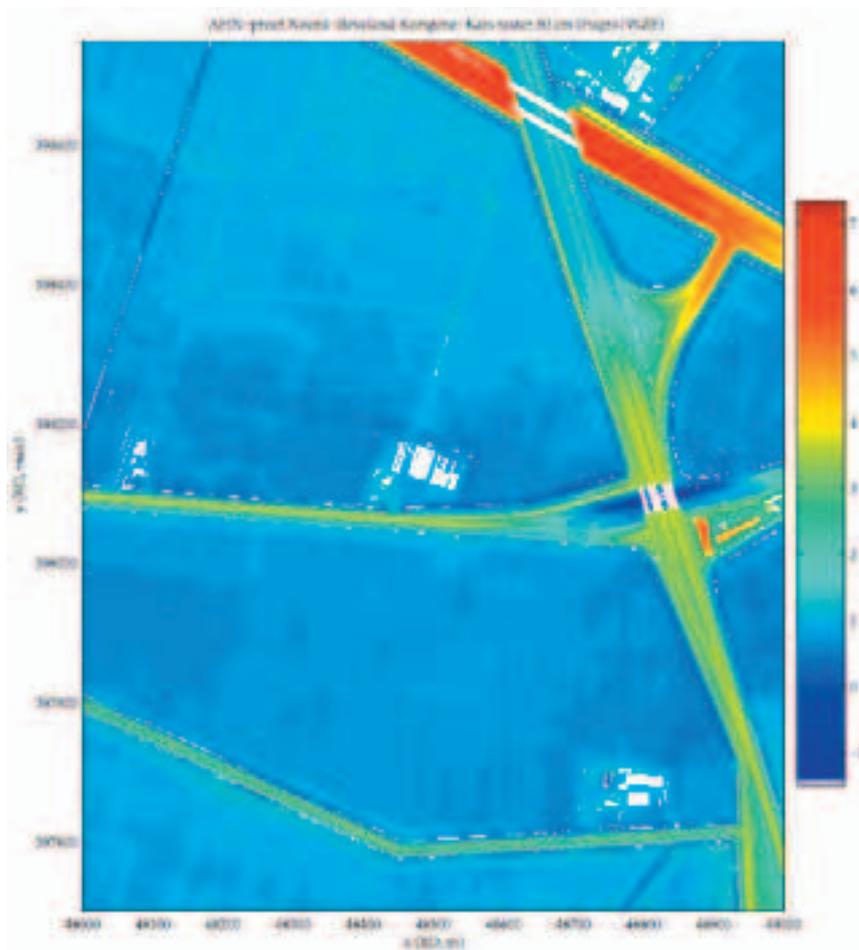
FIGUUR 13 LUCHTFOTOMOZAÏEK VAN DE SITUATIE ROND PROFIEL 1



FIGUUR 14 EEN VOGELVLUCHTAFBEELDING VAN EEN 100 METER BREDE STROOK VAN DE BINNENDIJK TUSSEN KORTGENE EN KATS. DEZE DIJK IS OMSTREEKS 2 METER HOOG; DE HOOGTE IS MET EEN FACTOR 2 OVERDREVEN. DE LOCATIE VAN DE PUNTEN VAN HET GEÏNTERPOLEERDE LASERPROFIEL TER PLEKKE VAN HET TERRESTRISCHE PROFIEL IS AANGEGEVEN IN GEEL. DE TEENSLATEN ZIJN DUIDELIJK ZICHTBAAR; WAAR ER WATER IN STAAT REFLECTEERT DE LASER NIET TERUG. OOK DE PLOEGVOREN ZIJN GOED TE HERKENNEN. MET NAME OP STERK BUIGENDE HELLINGEN ZIJN IS DE BETEGELING VAN HET 50CM-RASTER TE ZIEN

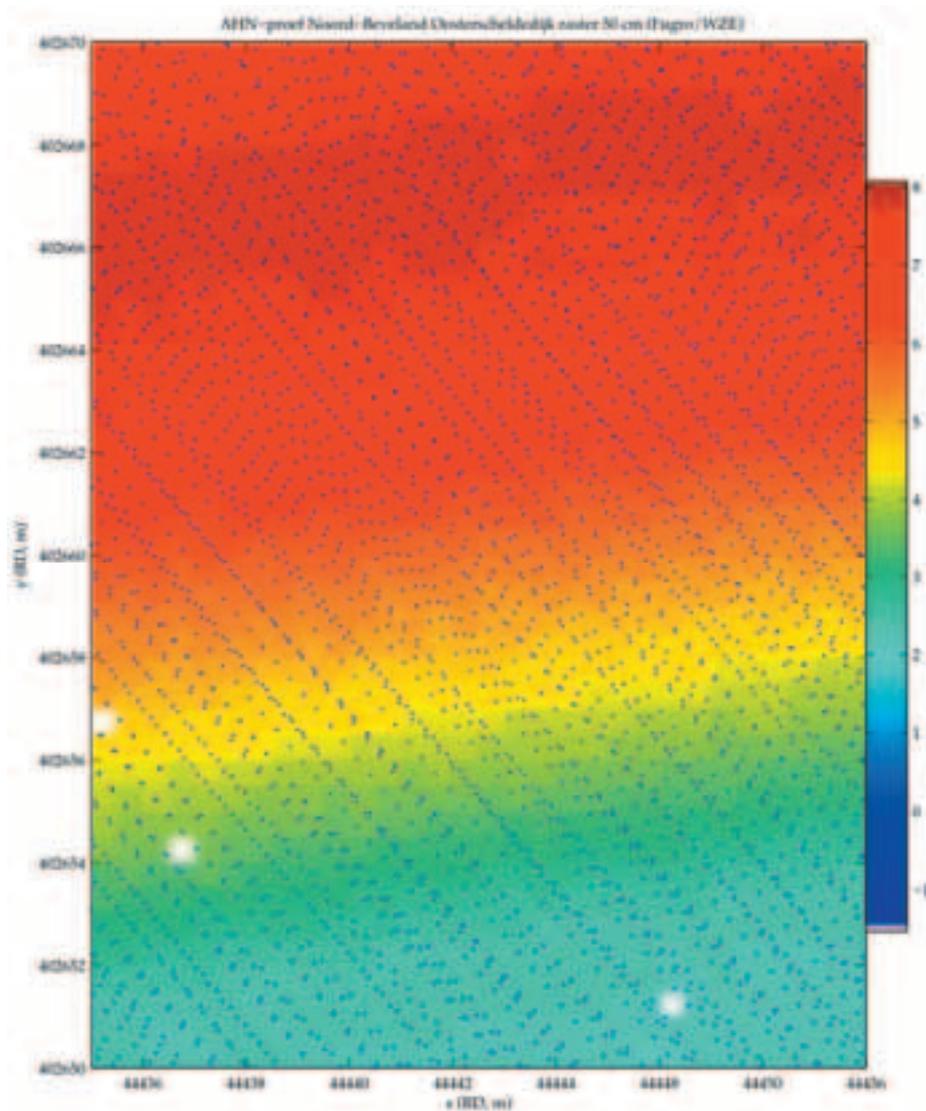


FIGUUR 15 HET 50CM-LASERRASTER VOOR EEN GEBIED VAN 1000 X 1250 METER ROND PROFIEL 1, TUSSEN KORTGENE EN KATS IN NOORD-BEVELAND



In figuur 16 is een uitsnede van 15 bij 20 meter van het steilste deel van het talud van de Oosterscheldedijk genomen. Per rastercel van 50 x 50 cm is er één hoogtewaarde, die als gekleurd blokje is weergegeven (de kleuren zijn die van de legenda in figuur 11). Hier overheen zijn de originele lasermeetpunten getekend. Deze geven een merkwaardig patroon te zien, dat een allesbehalve homogene puntspatiëring tot gevolg heeft. Ondanks dat de gemiddelde dichtheid van de laserpunten zo'n 10 punten per vierkante meter bedraagt, zijn er rastercellen (50 x 50 cm) waar net niet één origineel laserpunt in valt. Deze zijn in de figuur te zien als witte 'no-data'-cellen. Dit kan, naast filtering, één van de oorzaken zijn van de gaten in figuur 12. Het betekent ook dat er vele cellen zijn waarvan de hoogte maar door één laserpunt wordt bepaald, waarmee de hoogteprecisie dus niet beter is dan die van de individuele laserpuntmeting. Deze inhomogene puntspatiëring is niet gewenst.

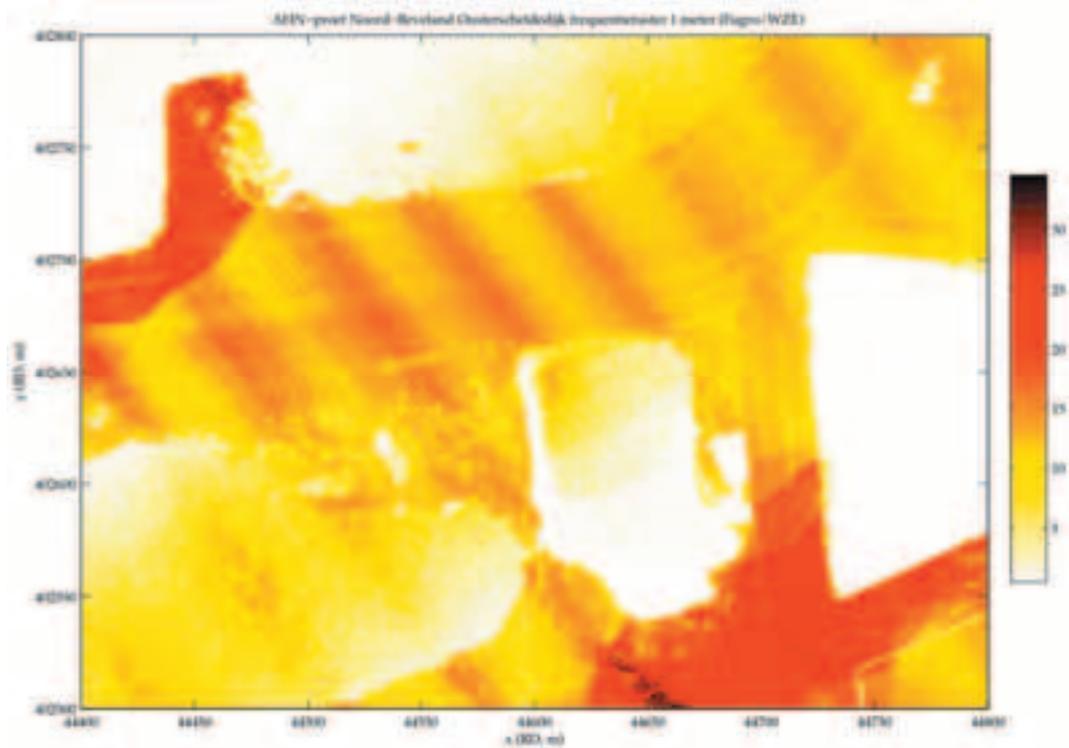
FIGUUR 16 EEN UITSNEDE VAN 15 X 20 METER VAN HET STEILSTE DEEL VAN HET TALUD VAN DE OOSTERSCHELDEDIJK. OVER HET HOOGTERASTER ZIJN DE INDIVIDUELE LASERPUNTEN AFGEBEELD.



Het patroon van niet erg equidistant verdeelde lijnen met laserpunten wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat de laser van deze aannemer drie bundels tegelijk verwerkt: één bundel is naar het nadir gericht, één bundel naar voren en een bundel naar achteren. Het voordeel is dat daarmee gedeeltelijk onder objecten en overhangen kan worden gekeken en dat ook verticale wanden enige laserreflecties vertonen. Het nadeel is dat de helikopter hetzelfde punt vanaf drie verschillende lokaties meet, waardoor kleine snelheids- en standverschillen leiden tot verschillen in de dichtheid van het puntenpatroon. In figuur 11 is dit waarschijnlijk relatief sterk zichtbaar omdat er op dat moment veel wind stond, waardoor het platform relatief instabiel bewoog.

Interessante informatie over de verdeling van de laserpunten geeft een dichtheidsbeeld, waarin het aantal laserpunten per vierkante meter of een andere oppervlakte-eenheid wordt weergegeven. Dit wordt ook wel frequentiediagram genoemd en inspectie hiervan maakt bij Rijkswaterstaat AGI een vast deel uit van de controleprocedure. In figuur 17 is het aantal laserpunten per vierkante meter van een stuk van 300 bij 400 meter weergegeven. De dichtheid is gecodeerd van lichtgeel tot donkerrood, hetgeen een goed beeld geeft van de informatie.

FIGUUR 17 EEN WEERGAVE VAN DE LASERPUNTDICHTHEID VOOR EEN STUK VAN 300 X 400 METER VAN DE OOSTERSCHELDEDIJK. DE DICHTHEID IS GEMIDDELD 10 PUNTEN PER VIERKANTE METER. DE VERSCHILLENDE VERSCHIJNSELEN WORDEN IN DE TEKST TOEGELICHT



Behalve dat de gemiddelde dichtheid maar net 10 pt/m² is, is ook te zien dat deze allesbehalve homogeen is. Er is een aantal verschijnselen zichtbaar. Natuurlijk is de dichtheid boven water zeer gering. De banden dwars op de voortbewegingsrichting van de helikopter (naar het noordoosten) zijn waarschijnlijk een gevolg van de inhomogene puntspatiëring door de verschillende bijdragen van de drie bundels waarover hiervóór al gesproken werd. Als het platform stamp vertoont (de neus gaat dan verticaal op en neer), heeft dat gevolgen voor de dichtheid van de lijnen op de grond en als elk punt bovendien vanaf drie locaties wordt beschenen, ontstaan er ingewikkelde dichtheidsvariaties. Ook is de overlap tussen de stroken te zien: de dichtheid is hier uiteraard ongeveer tweemaal zo hoog en de kleur dus roder.

Ook is te zien dat er als het ware verschillende overlappen over elkaar zijn afgebeeld, resulterend in verschillende gegolfde randen over elkaar. De golven zelf zijn het gevolg van de rol van het platform: de helikopter draait enigszins om zijn lengteas en de laserbundel draait mee. Bij een vliegtuig zijn deze platformbewegingen minder (zie ook *Remote sensing voor inspectie van waterkeringen* [18]).

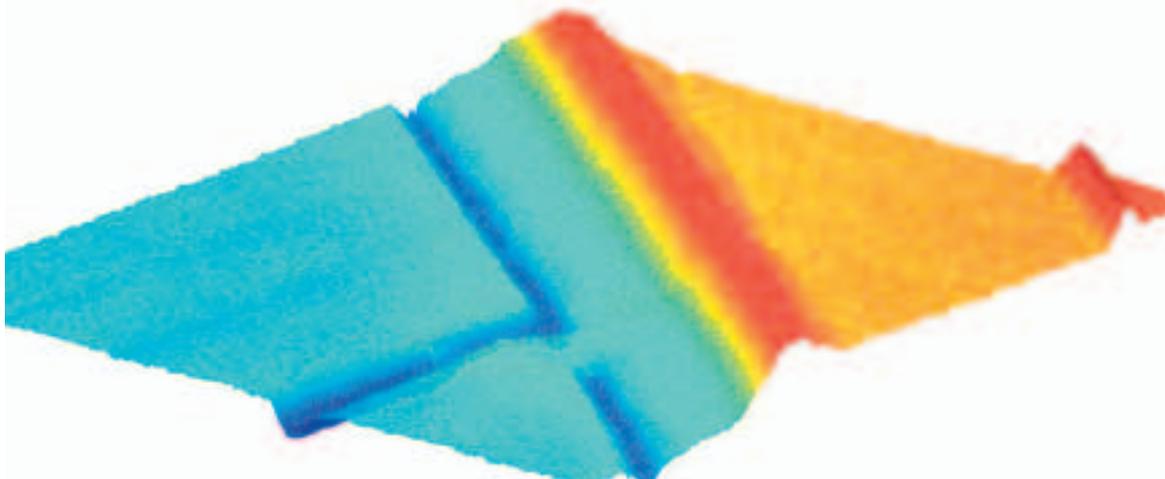
Het behoeft geen betoog dat voor een laserbestand met zowel een minimale als een homogene precisie eisen kunnen worden gesteld aan de dichtheid van de laserdata. Het dichtheidsdiagram is daarvoor een geschikt inspectiemiddel.

6.3.4 DE LASERDATA VAN EEN BOEZEMKADE VAN HOLLANDS NOORDERKWARTIER

'Kleine' regionale keringen met een hoogte t.o.v. het achterland minder dan 1 meter – het derde type in § 6.2 – komen in Zeeland niet voor en bovendien heeft de proef AHN-WZE geen data met hoge punt dichtheid en een 25cm-raster opgeleverd. De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie wilde in praktijk vaststellen in hoeverre laserdata met een zekere punt dichtheid voldoet om 'kleine' regionale waterkeringen te kunnen beschrijven en analyseren. Daartoe heeft Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier in 2005 ingewonnen laserdata en een terrestrisch (GPS-) profiel ter beschikking gesteld van de noordelijke kade van de polder Beetskoog, in de buurt van Hoorn. Weliswaar is het hoogteverschil tussen de kade en de polder zo'n twee meter, maar de kade is zeer smal en het was de voor deze analyse best beschikbare data. De punt dichtheid bedroeg tussen de 20 en 30/m². Het 25cm-raster werd door Hollands Noorderkwartier speciaal voor deze analyse uit de laserpunten berekend.

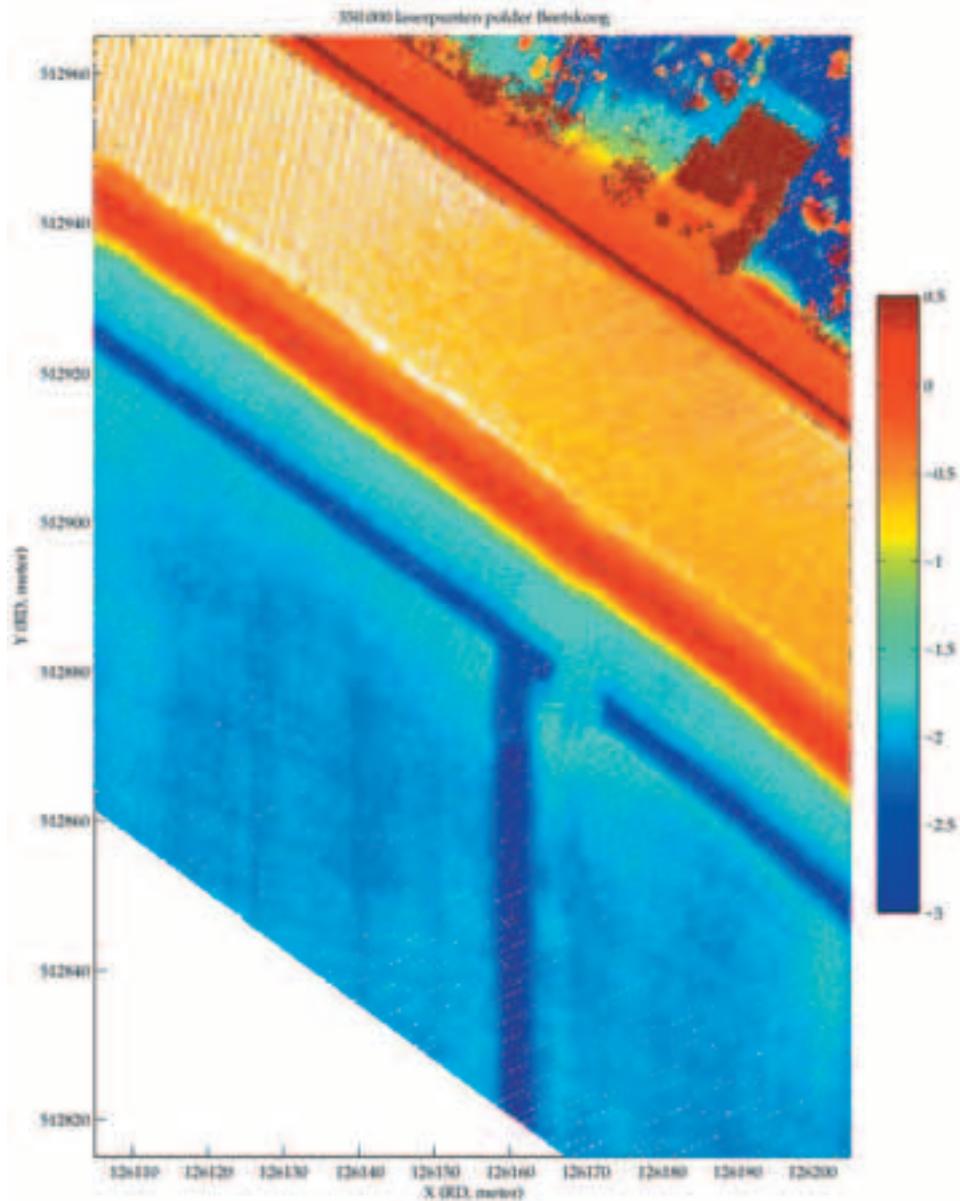
In figuur 5 op bladzijde 46 is een vogelvluchtvisualisatie opgenomen van een ongefilterd stuk van 150 bij 220 meter rond de kade: hier zijn 630.000 puntjes afgebeeld, waarbij de kleur de hoogte aangeeft en alles boven een halve meter rood is (omwille van het oplossend vermogen). In figuur 18 is een deel van het 50cm-raster rond de kade afgebeeld. In figuur 19 is een afbeelding van de laserpunten in het platte vlak weergegeven. Enigszins zichtbaar is dat deze laserdata niet in één vlucht totstandgekomen is. Omdat dit gebied in de hoek van de polder ligt en de vlucht zoveel mogelijk de kade heeft gevolgd, komt de data uit verschillende vluchten, waarschijnlijk zelfs vier. Dit leidt voor dit gebiedje tot een dichtheid van gemiddeld 23 punten per vierkante meter. Ook het wateroppervlak heeft gedurende één van de vluchten goed gereflecteerd.

FIGUUR 18 EEN STUK VAN 100 BIJ 100 METER VAN DE 50CM-RASTERHOOGTEDATA ROND DE KADE VAN POLDER BEETSKOOG. DE HOOGTE IS OVERDREVEN MET EEN FACTOR DRIE. HET WATEROPPVLAK IS VOLLEDIG MET LASER GEMETEN. AAN DE WATERKANT STAAT RIET, DAT IN FIGUREN VERDEROP ZICHTBAAR IS. DE DAMWAND AAN DE OVERKANT IS RECHTS ZICHTBAAR



FIGUUR 19

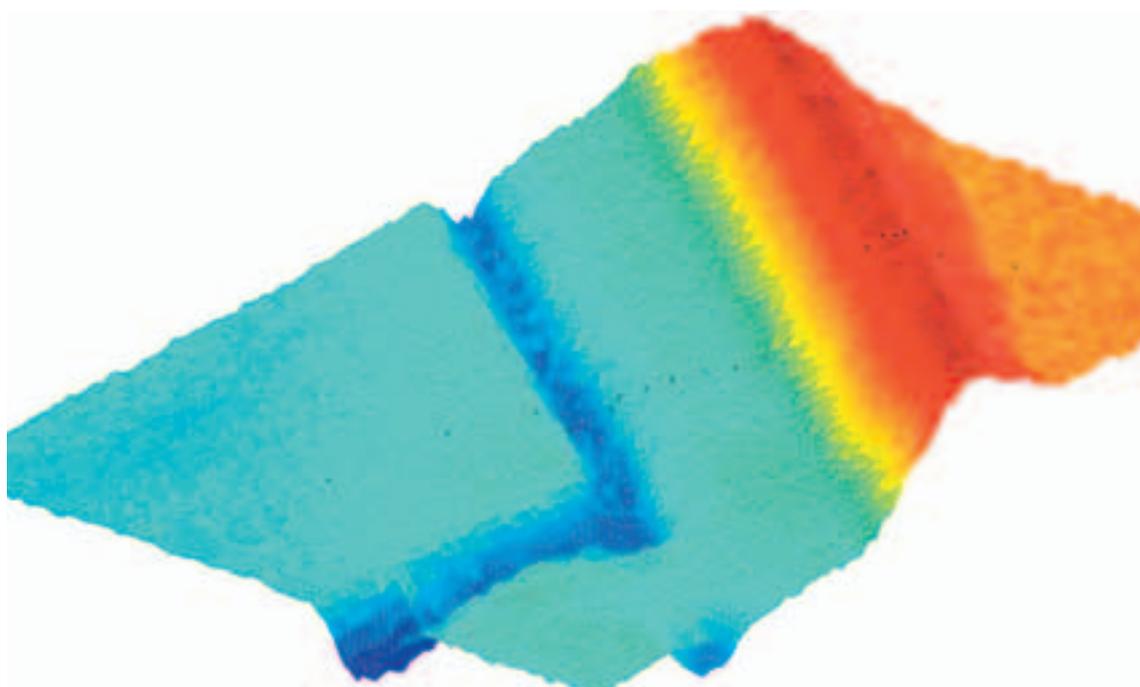
EEN DEEL VAN 100 BIJ 150 METER VAN DE STROOK OVER DE KADE VAN DE POLDER BEETSKOOG BIJ HOORN. DE POLDER LIGT OP OMSTREEKS $-1,80$ M NAP; DE KADE, WAARVAN DE KRUIJN NAUWELIJKS EEN METER BREED IS, LIGT OP OMSTREEKS $+0,15$ M. HOOGTEN BOVEN $0,5$ M ZIJN IN ÉÉN KLEUR WEERGEGEVEN. DE INDIVIDUELE LASERPUNTEN ZIJN ZICHTBAAR. VÓÓR DE DUIDELIJK ZICHTBARE BEBOUWING VAN HET DORPJE OUDENDIJK AAN DE OVERKANT VAN DE POLDER STAAT EEN DAMWAND DIE ALS DONKERRODE STREEP ZICHTBAAR IS. (© FIGUUR SWARTVAST & STOWA WGL, DATA HOLLANDS NOORDERKWARTIER)



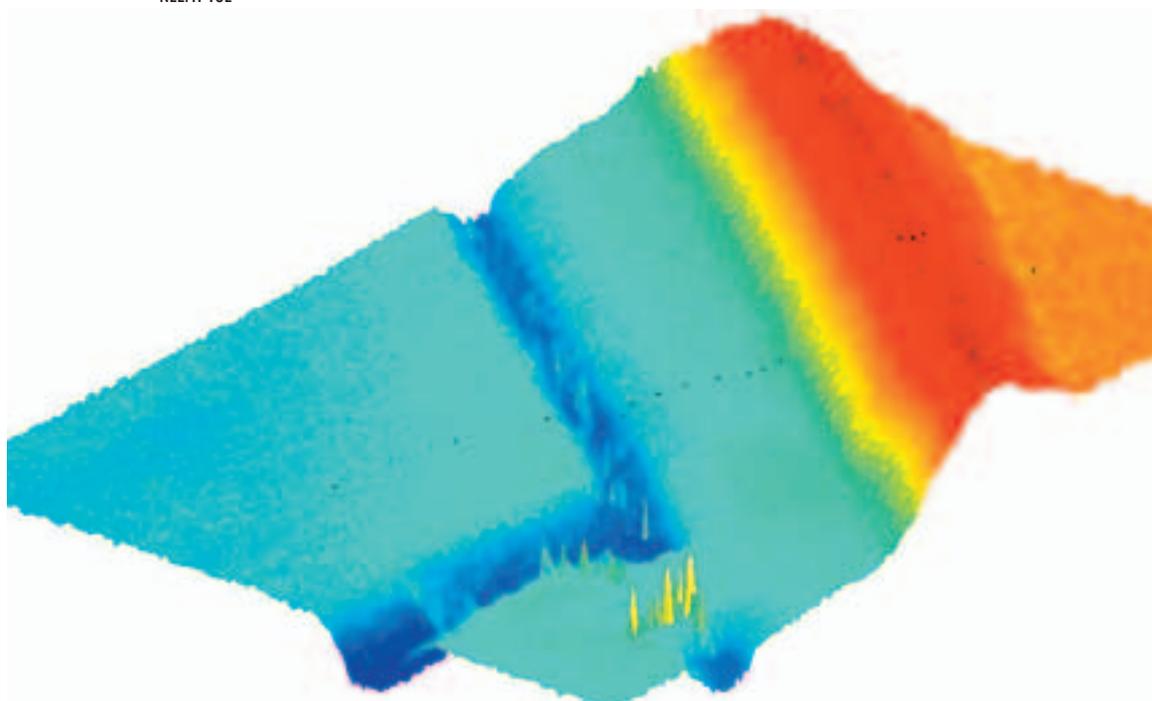
Om een indruk te krijgen van in hoeverre een 25cm-raster het terrein nu beter beschrijft dan een 50cm-raster, voor relatief kleine keringen als deze kade, wordt een vogelvluchtaanzicht van een relatief klein maar representatief deel van beide getoond. In figuur 20 is het 50cm-raster afgebeeld; de 'betegeling' van het raster is goed zichtbaar. In figuur 21 is het 25cm-raster afgebeeld. Dit toont meer detail, wat met name voor de relatief kleine en smalle kade van belang is, maar ook het ruisniveau neemt toe, doordat maar weinig punten bijdragen tot de gemiddelde hoogte van een dergelijke kleine rastercel. Bij een – tamelijk variërende – dichtheid van gemiddeld 29,6 punten per vierkante meter, is het aantal punten in een rastercel van 25 bij 25 cm gemiddeld slechts 1,85.

Overigens zijn ook piekjes te zien, het gevolg van het gebruik van de ongefilterde laserdata voor de berekening van het 25cm-raster.

FIGUUR 20 EEN REPRESENTATIEF STUK VAN 40 BIJ 50 METER VAN HET 50CM-HOOGTERASTER. DE HOOGTE IS MET EEN FACTOR DRIE OVERDREVEN. DE ZWARTE PUNTJES ZIJN DE LOCATIES VAN DE TERRESTRISCHE METINGEN

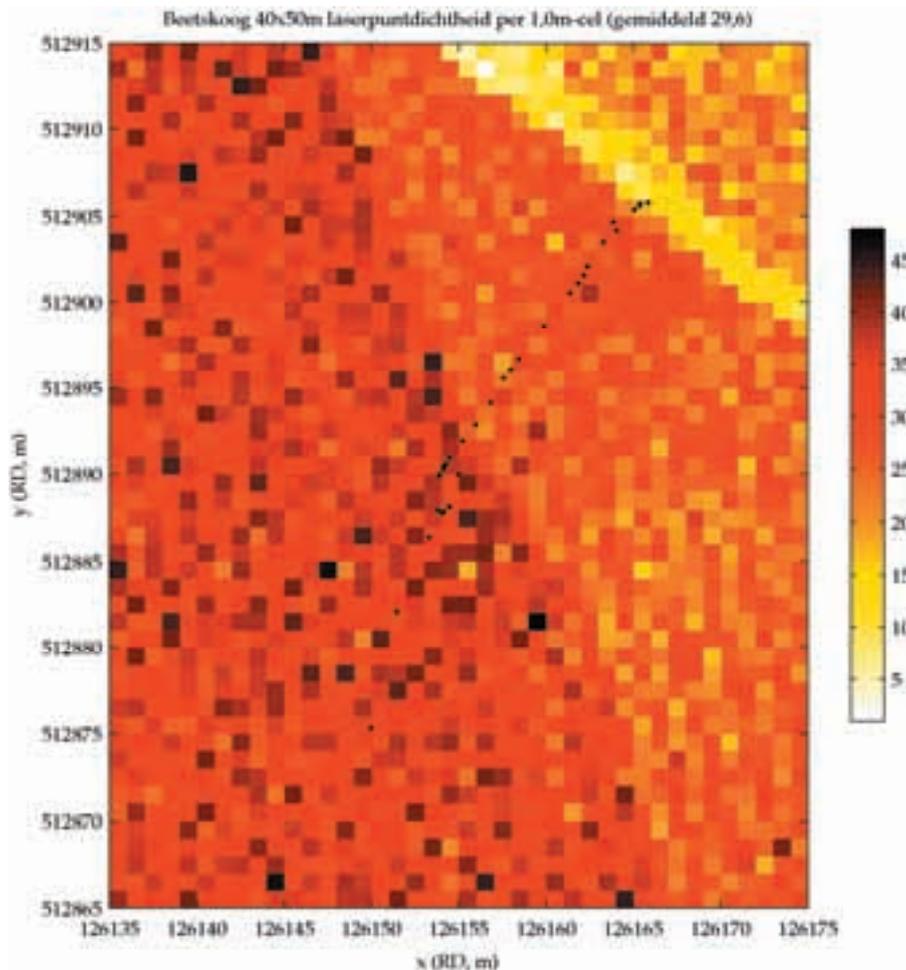


FIGUUR 21 HET STUK UIT FIGUUR 20, MAAR NU IN HET 25CM-RASTER. DOORDAT DEZE BEREKEND IS UIT DE ONGEFILTERDE DATA ZIJN ENIGE PIEKJES ZICHTBAAR. HET TERREIN WORDT IN GROTER DETAIL BESCHREVEN, WAT MET NAME VOOR DE KADE VAN BELANG IS, MAAR OOK DE RUIS NEEMT TOE



In figuur 22 is de dichtheid van de laserpunten afgebeeld voor het beschouwde stuk in figuur 20. De dichtheid is gemiddeld hoog, met uitschieters tot $48/m^2$, doordat het linker gedeelte eenmaal extra werd bedekt voor een laservlucht, hetgeen goed zichtbaar is. Voor een 25cm-raster met zijn 16 cellen per vierkante meter veroorzaakt een gemiddelde dichtheid van $30 \text{ pt}/m^2$ een dermate laag aantal punten per cel dat de ruis toeneemt. De ruis die hier is getoond leidt tot de conclusie dat het niet verstandig is een 25cm-raster te gebruiken bij een dichtheid van omstreeks 30 laserpunten per vierkante meter. De puntruïschilt overigens per aanbieder. Het uitgangspunt van het bestek voor de proef AHN-WZE om niet een eis te stellen aan de puntdichtheid maar aan de hoogteprecisie per rastercel (die afhangt van de puntprecisie en het aantal punten daarin), is daarom valide.

FIGUUR 22 DE DICHTHEID VAN DE LASERPUNTEN VAN EEN GEBIED VAN 40 BIJ 50 METER ROND DE KADE VARIEERT VAN MINDER DAN 10 PER VIERKANTE METER VOOR HET RIET LANGS DE WATERKANT TOT MEER DAN 45 IN DE POLDER. HET GEMIDDELD LIGT OP 29,6 PUNTEN PER VIERKANTE METER



6.4 DE VERGELIJKING VAN DWARSPROFIELEN UIT DE LASERDATA MET TERRESTRISCHE PROFIELEN

6.4.1 INLEIDING

Om een indruk te krijgen van de mate van detail in de representatie van het terrein bij het 50cm-raster zijn dwarsprofielen berekend uit de laserrasterdata. Deze zijn vergeleken met de 'klassieke' methode van profielbepaling: met GPS ingewonnen terrestrische profielen. Van deze terrestrische metingen waren voor wat betreft de data van AHN en Waterschap Zeeuwse Eilanden de ligging van het begin- en eindpunt beschikbaar; bij de data van Hollands Noorderkwartier was de ligging van elk GPS-meetpunt afzonderlijk voorhanden.

In § 6.4.2 wordt de werkwijze uiteengezet bij het genereren van profielen uit de laserdata en de vergelijking met de GPS-data. In § 6.4.3 worden de profielen van AHN-WZE vergeleken en in § 6.4.4 die van HHNK.

6.4.2 WERKWIJZE BIJ DE VERGELIJKING VAN DE DWARSPROFIELEN

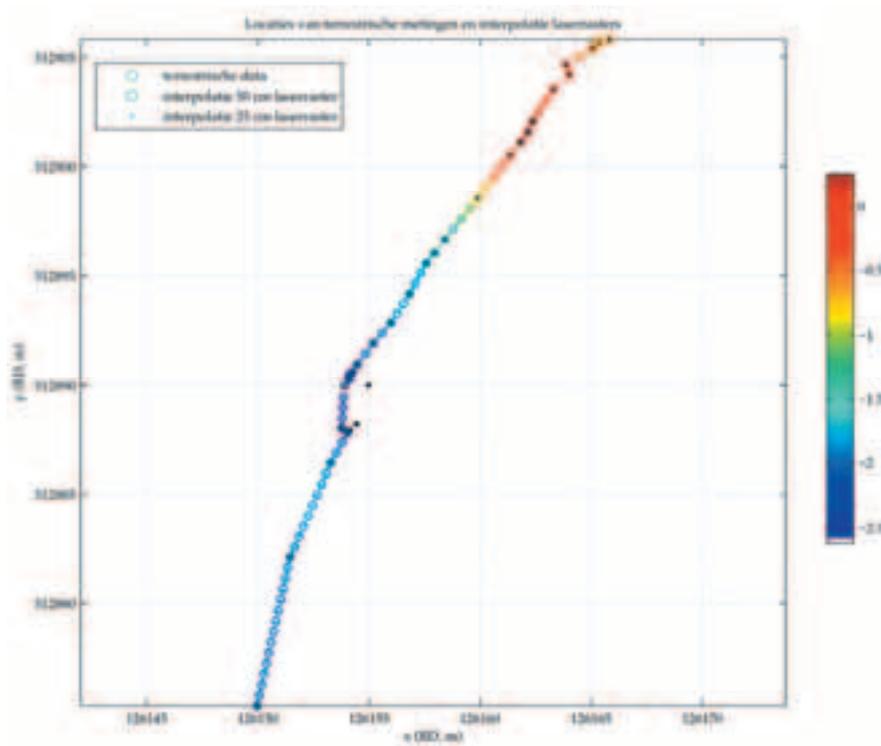
Tussen begin- en eindpunt van het terrestrisch profiel werden zodanig meetpunten gekozen dat er één punt viel binnen elke rastercel. Van de terrestrische metingen van WZE was alleen de ligging van het begin- en eindpunt beschikbaar. De uit het raster geïnterpoleerde punten waren regelmatig verdeeld tussen dit begin- en eindpunt. De gele puntjes op de lijn in figuur 12 en figuur 14 zijn de locaties waar de hoogte uit het laserraster werd berekend volgens de zojuist beschreven methode.

Bij de data van Hollands Noorderkwartier was de ligging van elk GPS-meetpunt afzonderlijk voorhanden. Daardoor kon worden opgemerkt dat de dwarsprofielen niet precies langs een rechte lijn waren ingemeten: zie figuur 23. Tussen elk meetpunt werd op regelmatige afstand een locatie bepaald waarop een hoogtewaarde uit het laserraster werd geïnterpoleerd. Dit gebeurde voor het 50cm- en 25cm-raster afzonderlijk.

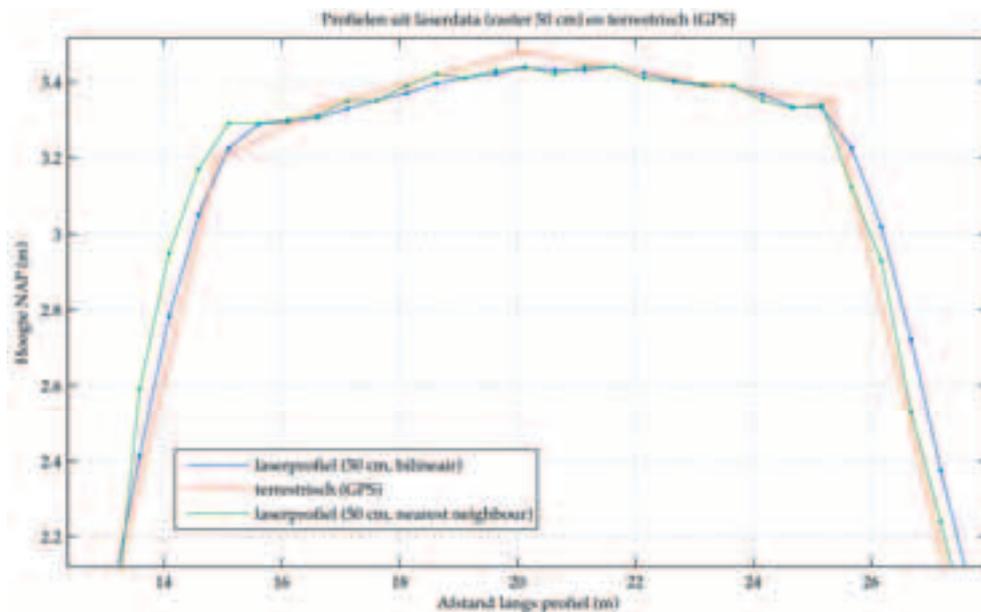
Ter plekke van deze meetpunten werd de een hoogtewaarde berekend. Dit kan op (minimaal) twee verschillende manieren. Als hoogte kan de hoogtewaarde van de rastercel waarin het meetpunt ligt worden genomen. Dit komt neer op nearest-neighbourinterpolatie. Men zou hiervoor kunnen kiezen omdat dit het meest recht doet aan de informatie zoals die in het raster zit. Een alternatief is om de hoogte te berekenen als lineaire interpolatie tussen de de hoogten van de omliggende rastercellen, gewogen met de afstand van het meetpunt naar de centra van deze cellen. Dit is bilineaire interpolatie. Deze is te verkiezen boven de nearest-neighbourinterpolatie omdat recht wordt gedaan aan de ligging binnen de rastercel, waarmee de vorm van het terrein zo goed mogelijk wordt gerepresenteerd. Zie de uitleg in appendix B; vooral figuur 53 is instructief.

In figuur 24 is het deel rond de kruin van profiel 1 (zie verderop) afgebeeld, waarbij de hoogte sterk is uitgerekt om de verschillen beter te kunnen beoordelen. Zichtbaar zijn de terrestrische meetpunten en de twee verschillende manieren van interpoleren. De nearest-neighbourinterpolatie varieert sterk, afhankelijk van waar het punt in de rastercellen valt, terwijl de bilineaire interpolatie gladder is en, zoals we verderop zullen zien, het terrein beter volgt.

FIGUUR 23 VAN DE GPS-METINGEN VAN HOLLANDS NOORDERKWARTIER WAS VAN ELK PUNT DE LOCATIE BEKEND: DE ZWARTE PUNTJES. DEZE BLEKEN BEPAALD NIET OP ÉÉN LIJN TE LIGGEN. TUSSEN DEZE PUNTEN WERD DE 50CM-LASERRASTERDATA (CIRKELS) EN DE 25CM-RASTERDATA (PUNTEN) GEÏNTERPOLEERD



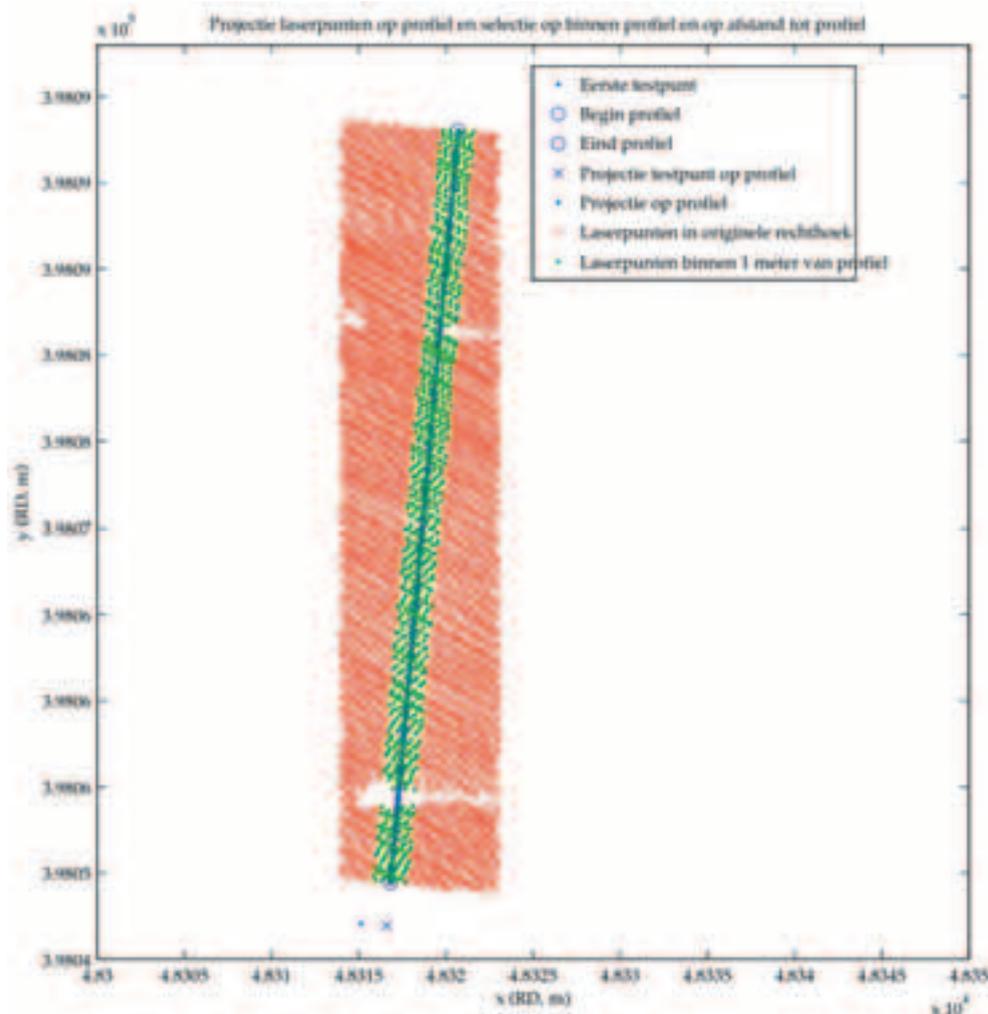
FIGUUR 24 PROFIEL 1 ROND DE KRUIJN, WAARBIJ DE HOOGTE STERK IS UITGEREKT OM DE VERSCHILLEN TUSSEN DE TERRESTRISE PUNTEN EN DE TWEË INTERPOLATIEMETHODEN BETER TE KUNNEN BEOORDELEN



Om de verschillen tussen (de verschillende interpolaties van) het laserraster en de terrestrische metingen beter te kunnen beoordelen, betrekken we ook de originele laserpunten erbij. Daarmee wordt tevens geïllustreerd hoe representatief het laserraster is voor de originele punten waaruit deze berekend is.

Zie voor de werkwijze figuur 25. Uit een rechthoek rond het profiel (rode punten) worden alle laserpunten, die onregelmatig liggen, geselecteerd die minder dan een meter verwijderd zijn van het profiel (groene punten). Daartoe worden ze op de profiellijn geprojecteerd en wordt hun afstand berekend. Als voorbeeld is onderin de figuur een laserpuntje (puntje) geprojecteerd (kruisje) op de lijn door de terrestrische metingen. De afstand tot de lijn wordt in de figuren hierna gebruikt om met een kleur aan te geven hoe ver het betreffende punt van het profiel ligt. Daardoor ontstaat er inzicht in de representativiteit van de laserpunten voor het profiel. Dit is onder meer gebeurd in figuur 28, die hierdoor meer informatie biedt dan figuur 24.

FIGUUR 25 OM BETER TE KUNNEN BEOORDELEN OF DE LASERHOOGTE UIT HET RASTER, WAARUIT HET PROFIEL GEÏNTERPOLEERD IS, REPRESENTATIEF IS VOOR DE LASERPUNTEN, WORDEN OOK DEZE LASERPUNTEN IN DE ANALYSE BETROKKEN. IN DE TEKST WORDT DE WERKWIJZE UITGELEGD

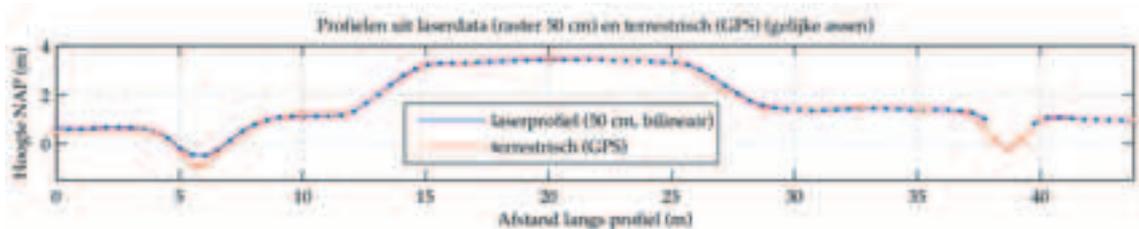


Voor de vergelijking van de terrestrische data met de laserdata wordt de terrestrische data lineair geïnterpoleerd. Vervolgens wordt elk punt van het geïnterpoleerde laserprofiel het verschil berekend en afgebeeld als in figuur 32.

6.4.3 VERGELIJKING VAN DE LASERPROFIELEN MET DE TERRESTRISCHE PROFIELEN VAN DE AHN-WZE-PROEF

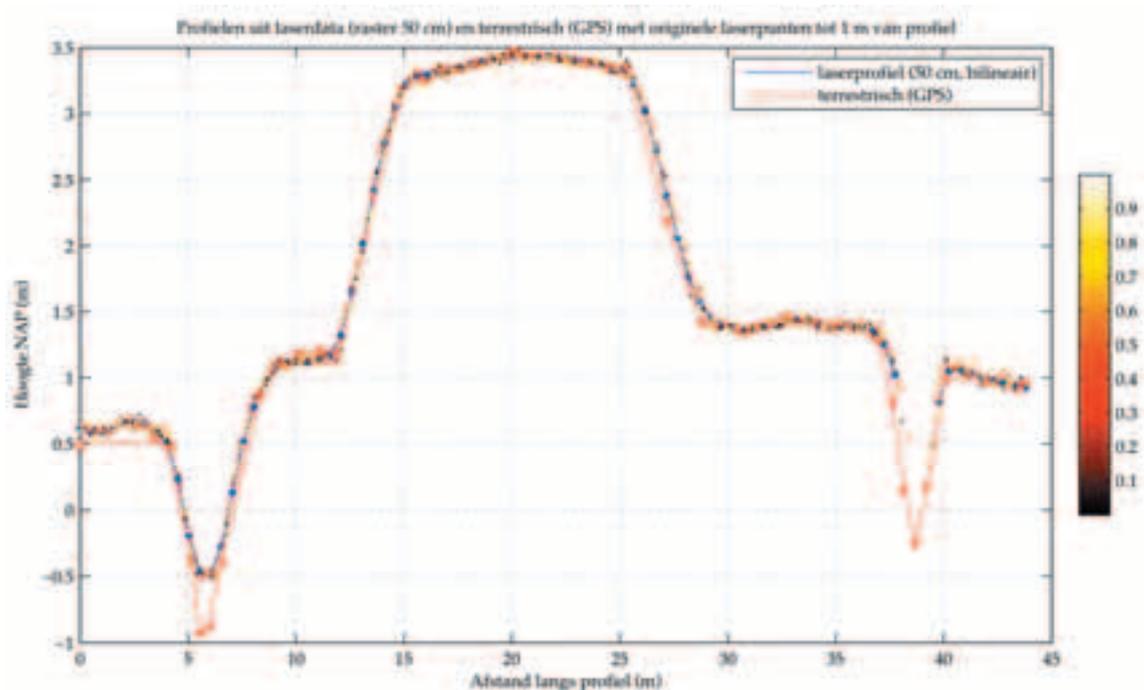
Met de in de vorige paragraaf beschreven methodiek zijn van drie locaties in Noord-Beveland de laserprofielen berekend en vergeleken met de met GPS ingemeten terrestrische profielen. Twee ervan analyseren we hier.

FIGUUR 26 DE TERRESTRISCH EN MET LASERALTIMETRIE GEMETEN PROFIELEN ZIJN HIER WEERGEGEVEN MET GELIJKE ASSEN IN LENGTE EN HOOGTE



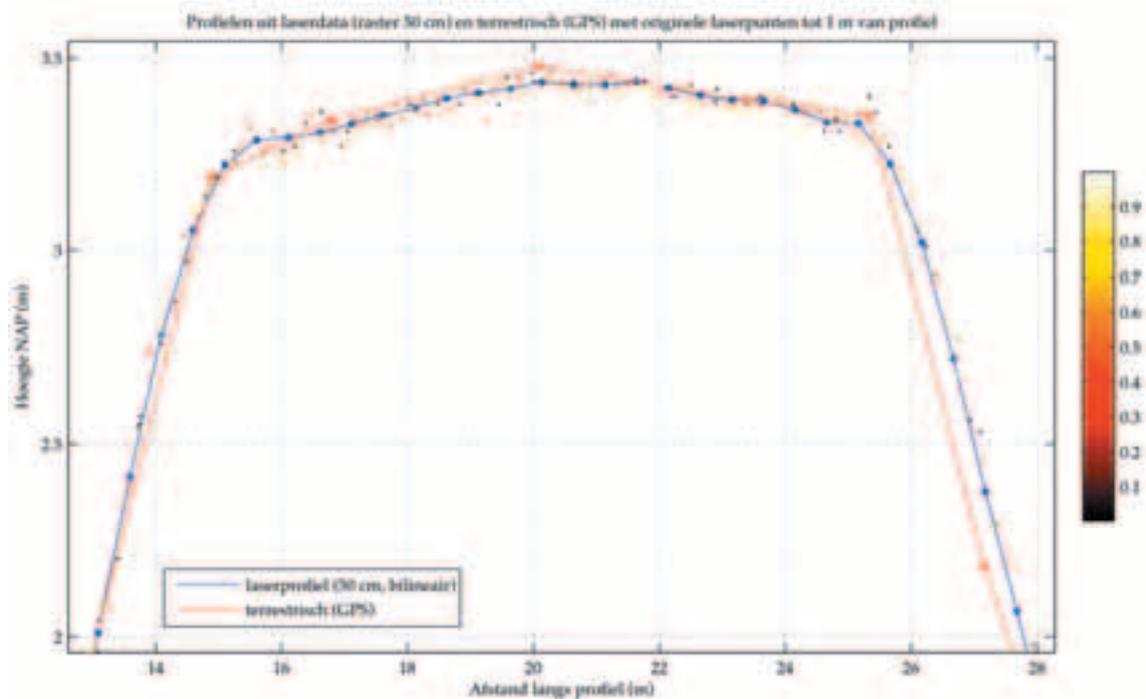
In figuur 26 zijn de terrestrisch en met laseraltimetrie (bilineair geïnterpoleerd) gemeten profielen weergegeven met gelijke assen in lengte en hoogte. Weliswaar geeft dit een goede indruk van de werkelijke verschijningsvorm van de waterkering, de verschillen waarom het in deze analyse draait zijn niet te beoordelen. Daarom wordt in het vervolg de hoogte overdreven. In figuur 27 zijn de terrestrische metingen over het gehele, 43 meter lange profiel getekend als rode punten, verbonden met lijnen. Tevens is het uit het 50cm-laserraster bilineair geïnterpoleerde laserprofiel bepaald (zie voor de methodiek de vorige paragraaf): de blauwe punten. Daarnaast zijn de binnen een meter van het profiel liggende individuele lasermeetpunten weergegeven. Hierna analyseren we uitsneden uit dit profiel.

FIGUUR 27 OVERZICHT VAN PROFIEL 1. DE HOOGTE IS 7X OVERDREVEN OM DE HOOGTEVERSCHILLEN BETER ZICHTBAAR TE MAKEN. WEERGEGEVEN ZIJN DE TERRESTRISCHE METINGEN, HET UIT HET LASERRASTER BEPALDE PROFIEL EN DE BINNEN EEN METER VAN HET PROFIEL LIGGENDE INDIVIDUELE LASERMEETPUNTEN



FIGUUR 28

DE KRUIJN VAN PROFIEL 1, ONGEVEER 6X IN HOOGTE OVERDREVEN, MET TERRESTRISCHE METINGEN (ROOD), HET LASERRASTER (BLAUW) EN DE LASERPUNTENWOLK (LICHTGELE TOT DONKERRODE PUNTEN, AFHANKELIJK VAN DE AFSTAND TOT HET PROFIEL)



In figuur 28 is een uitsnede van de kruin weergegeven, met de hoogte sterk overdreven (ongeveer 6x) om de verschillen zichtbaar te maken. De rode punten zijn de locaties waar de landmeter de kruin op naar zijn oordeel representatieve punten heeft gemeten. De blauwe punten zijn de uit het 50cm-laserraster geïnterpoleerde laserpunten. Omdat het profiel vrijwel noord-zuid ligt, is de afstand tussen deze punten vrijwel 50 cm (zie voor de interpolatiemethodiek de vorige paragraaf). Daarnaast zijn de originele laserreflecties afgebeeld, voor zover ze binnen een meter van de getrokken profiellijn lagen. Ze hebben een kleur gekregen: hoe donkerroder, hoe dichter ze op de profiellijn liggen, hoe lichtgeler hoe verder van de profiellijn af (zie de toelichting bij de methodiek aan het einde van de vorige paragraaf).

Deze figuren laten enkele interessante aspecten zien. In de eerste plaats valt op dat het laserraster veel dichter is dan de landmeter zijn punten kiest. Deze profielen (en die hierna) laten zien dat de laserdata de variaties in terreinhoogte veel gedetailleerder beschrijft dan de punten van de landmeter. Anderzijds maakt de laser geen keuze, terwijl de landmeter met zijn meetinstructie op zak op het oog probeert representatieve punten aan te meten, met name kniklijnen en de kruinlijn. Ook valt op dat de originele laserpunten goed laten zien hoe variabel het lasersignaal is: het is goed zich niet blind te staren op het 'exacte' verloop van de blauwe geïnterpoleerde laserdata. Niettemin vertoont de laserdata een tamelijk kleine spreiding. Als wordt aangenomen dat de spreiding volledig het gevolg is van de meetprecisie en dus niet van de terreinvariatie (zie bijlage A en met name § A.7 over idealisatieprecisie), wat gezien het feit dat de kruin geasfalteerd is niet onrealistisch is, lijkt de meetprecisie een standaardafwijking van ongeveer 3-4 cm te vertonen. Dit komt overeen met de conclusies die bij de evaluatie van de proef in opdracht van de Stuurgroep AHN werden getrokken, waar over de gehele proef 5 cm werd gerapporteerd (zie [20]).

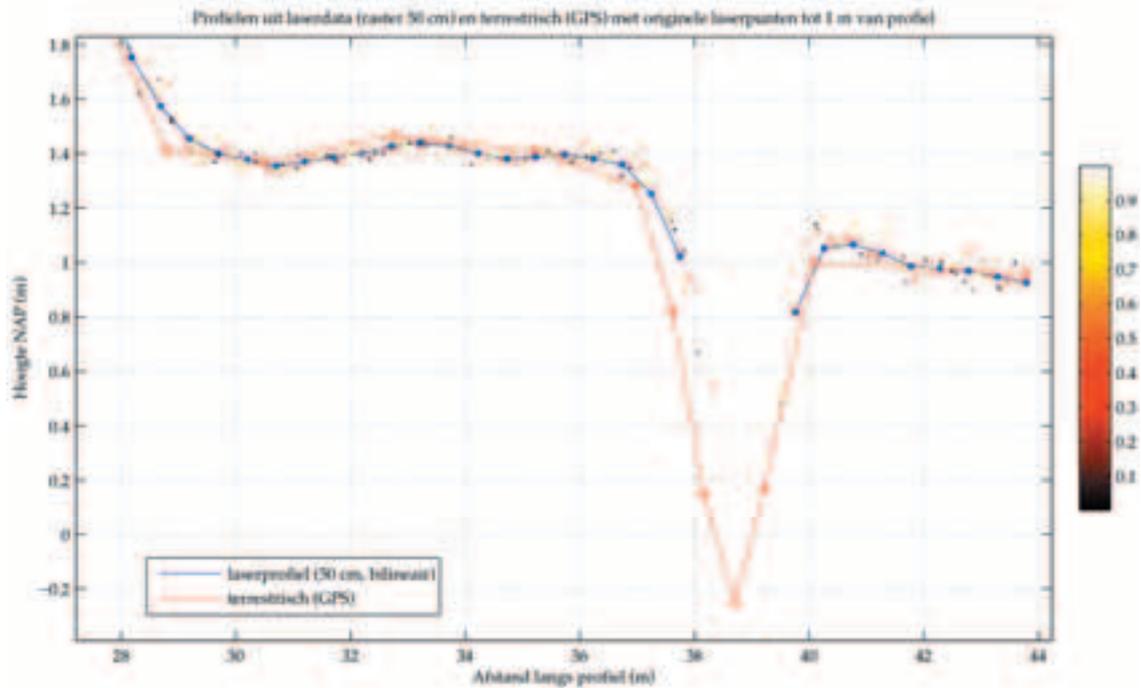
Opmerkelijk is dat ook de spreiding in de laserdata niet kan verklaren waarom de landmeter de kruin hoger meet. Ook Willem Rijn van Waterschap Zeeuwse Eilanden kan hiervoor geen sluitende verklaring vinden, maar merkt op dat het niet is uit te sluiten dat er een toevallige fout is opgetreden in de GPS-meting, bijvoorbeeld door de invloed van bomen op de dijk. Zowel profiel 1 hierboven als het eveneens geanalyseerde profiel 3 betreffen het het midden van een geasfalteerde weg. Het kan natuurlijk ook zo zijn dat de landmeting niet te hoog is maar dat de laserdata te laag is: ook de laserdata kan een systematische afwijking bevatten. Het is niet zonder meer duidelijk welk van de twee metingen het dichtst bij de werkelijkheid ligt. De eisen m.b.t. de hoogte die aan de AHN-proef gesteld zijn, zijn 5 cm systematisch en 5 cm standaardafwijking. De standaardafwijking van de GPS-metingen bedraagt volgens WZE circa 2,5 cm. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie kan in deze analyse geen uitspraak over de systematische fout doen omdat, behalve de eisen in de aanbesteding gesteld, de daarvoor noodzakelijke informatie niet voorhanden is. Waterschap Zeeuwse Eilanden heeft tijdens de laservluchten ook referentiemetingen (waterpassingen) uitgevoerd op verharde (geasfalteerde) parkeerterreinen. De verschillen met de laserdata varieerden van 0-5 cm. De evaluatie in opdracht van de stuurgroep AHN [20] rapporteert een systematische hoogtefout van 0 cm.

Zonder een hermeting van dit profiel, bij voorkeur met behulp van een andere methodiek zoals bijvoorbeeld een waterpassing, is uiteindelijk voor het verschil op de kruin geen sluitende verklaring te geven, vindt ook Willem Rijn.

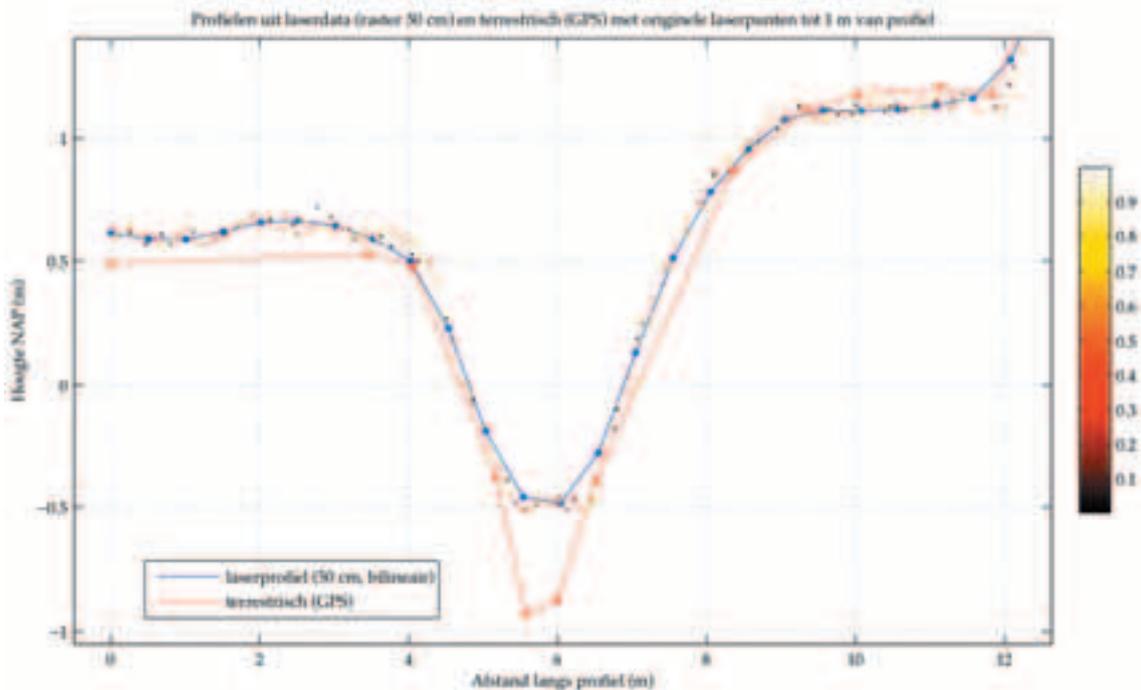
Ook beide teensloten van profiel 1 zijn nader geanalyseerd. In figuur 29 is de rechter teensloot afgebeeld; in figuur 30 de linker. In de eerste plaats kan worden opgemerkt dat de landmeter van de 'slootopografie' méér meet dan met laseraltimetrie mogelijk is. De laser geeft soms signaal terug op het wateroppervlak, maar meestal ontstaan er no-data-gaten. De landmeter meet echter in één moeite door behalve het taludprofiel ook het waterpeil. Belangrijker nog: de landmeter meet de slootdiepte. Daaraan behoeft bij laseraltimetrie niet gedacht te worden. Dit is belangrijk omdat voor stabiliteitsberekening de slootdiepte een belangrijke, misschien wel cruciale rol speelt, zoals in § 6.5 zal blijken.

De situatie rond de linker teensloot laat tamelijk grote verschillen zien tussen de laserdata en de terrestrisch gemeten punten. Er valt op dit punt geen gat voor het wateroppervlak; het lijkt erop dat het waterpeil ten tijde van de laservlucht lager was dan tijdens de meetcampagne van de landmeter (de rode punten), hoewel er sprake is van spreiding en de grootte van de systematische fouten niet bekend zijn. Belangrijker is dat de berm aan de voet van het talud (rechts in figuur 30) met laseraltimetrie systematisch zo'n 5 centimeter lager wordt gemeten, terwijl de berm links systematisch 10 cm hoger is. Voor een deel vallen deze afwijkingen nog binnen de maximaal te verwachten fouten, gezien de precisie van de GPS-metingen en die van de laserdata. Daarnaast kan het te maken hebben met de keuze van de landmeter zijn baak op een bepaalde plaats te zetten, alsmede met het soort oppervlak. Belangrijk is ook dat het profiel van de landmeter slechts op een zeer beperkt aantal punten is gebaseerd en dit zou, vindt ook Willem Rijn (WZE), een belangrijker oorzaak kunnen zijn dan feitelijke hoogteverschillen ter plaatse van de terrestrische gemeten punten.

FIGUUR 29 TEENSLOOT PROFIEL 1 RECHTS



FIGUUR 30 DE SITUATIE ROND DE LINKER TEENSLOOT VAN PROFIEL 1 LAAT RELATIEF GROTE VERSCHILLEN ZIEN TUSSEN DE LASERDATA EN DE TERRESTRISCH GEMETEN PUNTEN. DE PUNTENWOLK LAAT ZIEN DAT HET LASERRASTER INDERDAAD DE WATERKERING GOED REPRESENTEERT. DE BERM AAN DE VOET VAN HET TALUD (RECHTS) WORDT MET LASERALTIMETRIE SYSTEMATISCH ZO'N 5 CENTIMETER LAGER GEMETEN, TERWIJL DE BERM LINKS SYSTEMATISCH 10 CM HOGER IS. OOK IS TE ZIEN DAT MET LASERALTIMETRIE NIET EXACT HET WATERPEIL WORDT GEMETEN, ZOALS DE LANDMETER DOET, LAAT STAAN DE SLOOTDIEPTE



FIGUUR 31

SITUATIE TER PLAATSE VAN PROFIEL 3, EEN BINNENDIJK DIE VERGELIJKBAAR IS MET DIE WAAR PROFIEL 1 IS GEKOZEN.
(© WATERSCHAP ZEEUWSE EILANDEN)



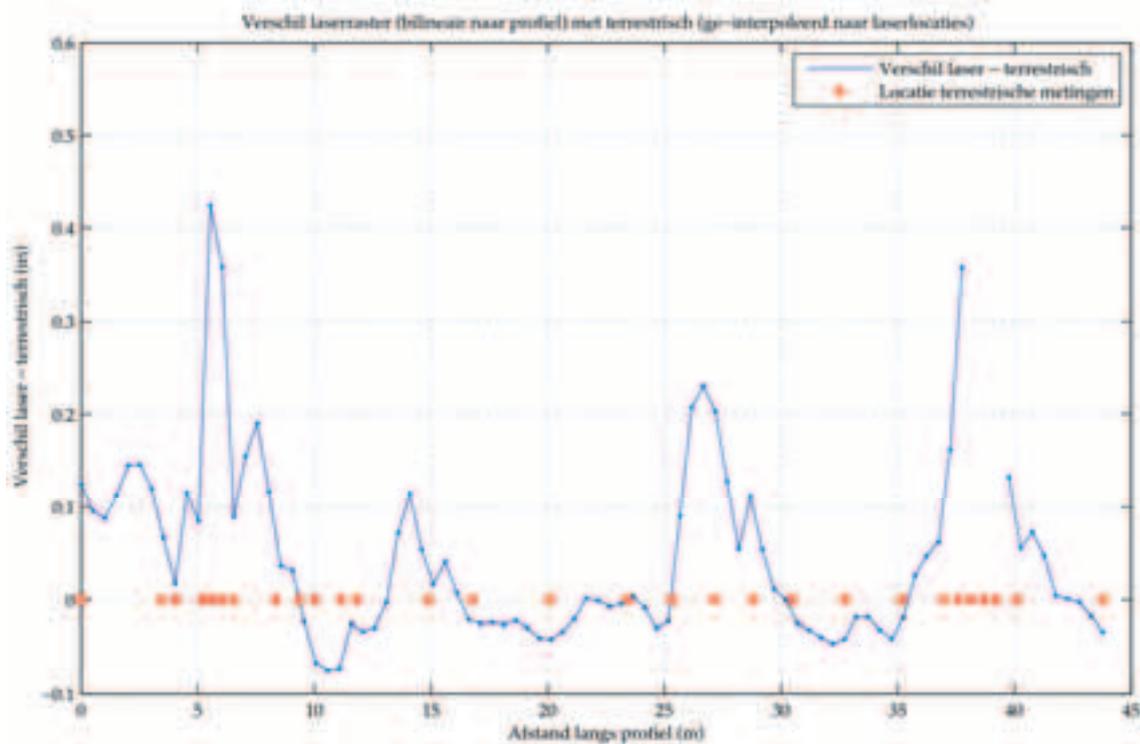
Willem Rijn verduidelijkt de overwegingen waarom de landmeter zijn baak (in casu GPS-ontvanger) op een bepaalde plaats zet als volgt. “Wanneer onze landmeter fysiek een profiel meet, zal hij in principe alle knikpunten in een profiel inmeten. Daarbij maakt hij in het terrein een keuze voor o.a. de positie van de teen en de kruin. Om de werkelijkheid zo reëel mogelijk weer te geven zal hij doorgaans tussen de knikpunten extra punten meten. Verder meet hij ter plaatse van objecten zoals afrasteringen, verhardingen of overgangen (scheiding) in constructie-elementen.” Met betrekking tot de getoonde verschillen: “Indien de landmeter meerdere punten had gemeten vanuit de insteken en extra punten in het talud, dan had het terrestrisch gemeten profiel hoogstwaarschijnlijk minder afwijkingen vertoond t.o.v. het laserprofiel.”

Zowel Rens Swart (WGL) als Willem Rijn (WZE) merken op dat het met laseraltimetrie gegenereerde profiel het feitelijke terrein – zo te oordelen – beter en met een grotere mate van detail beschrijft dan de terrestrische metingen. Het laserprofiel heeft een veel groter aantal punten, terwijl de precisie niet veel slechter is dan die van de terrestrische metingen. Het is met name opvallend dat een talud in het laserprofiel zijn werkelijke, niet-geïdealiseerde kromming vertoont, terwijl de landmeter het idealiseert tot enkele kniklijnen, waardoor er rechte lijnen in het terrestrische profiel ontstaan die niet de feitelijke situatie weergeven (zie figuur 27, figuur 28, figuur 33 en figuur 34). Dit wil overigens niet zeggen dat daarmee het terrestrische profiel niet aan zijn doel voldoet.

Volgens de methode die in § 6.4.1 beschreven is, is voor het gehele profiel ook het verschil bepaald tussen de laserdata en de terrestrische metingen. In figuur 32 is te zien dat de kruin (rond 20 meter) het kleine verschil vertoont waarover hiervóór gesproken werd, maar dat de taluds grotere verschillen tonen. De hiervóór besproken verschillen in de bermen van de linker teensloot zijn ook te herkennen. De verschillen in de richting van de 40 cm worden veroorzaakt door de teensloten, waar de landmeter de slootbodembodem mat, terwijl de laser niet verder kwam dan het wateroppervlak, voor zover er al signaal terugkwam. Willem Rijn heeft geen ongelijk als hij oordeelt dat deze grafiek op die punten een nogal vertekend beeld geeft. “De laserpunten op het water zijn in principe no-data points en zouden in dat opzicht geen onderdeel mogen uitmaken van de verschilberekening. Zonder deze pieken ziet de grafiek er al veel gunstiger uit. Ten tweede gaat het m.i. om de verschillen in het profielverloop. Op de taluds is het verschil feitelijk kleiner dan wanneer dit wordt gevisualiseerd met absolute hoogteverschillen.” Dit laatste is Rens Swart niet met hem eens. Daarnaast moet worden gedacht aan de invloed van een systematische fout in ligging: zie verderop.

FIGUUR 32

HET VERSCHIL TUSSEN DE UIT HET LASERRASTER GEÏNTERPOLEERDE PROFIEL EN DE TERRESTRISCHE METINGEN (DE RODE PUNTEN GEVEN DE LOCATIES DAARVAN AAN). DE GROOTSTE AFWIJKINGEN WORDEN VEROORZAAKT DOORDAT DE LANDMETER DE SLOOTDIEPTE HEeft GEMETEN EN DE LASER NIET

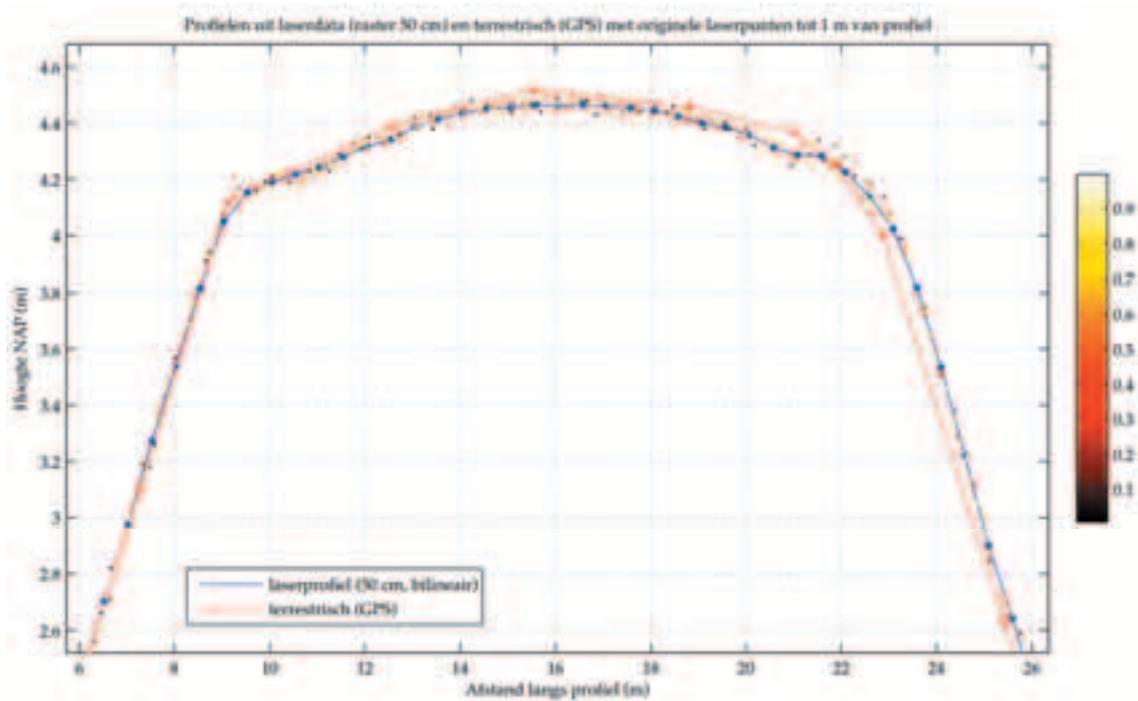


Van het profiel van de andere binnendijk, die tussen Kortgene en Colijnsplaat ('profiel 3'), laten we slechts enkele grafieken zien. Deze binnendijk is vergelijkbaar met de dijk die hier vóór in detail bestudeerd werd ('profiel 1'). In figuur 31 is de landmeter aldaar in actie te zien.

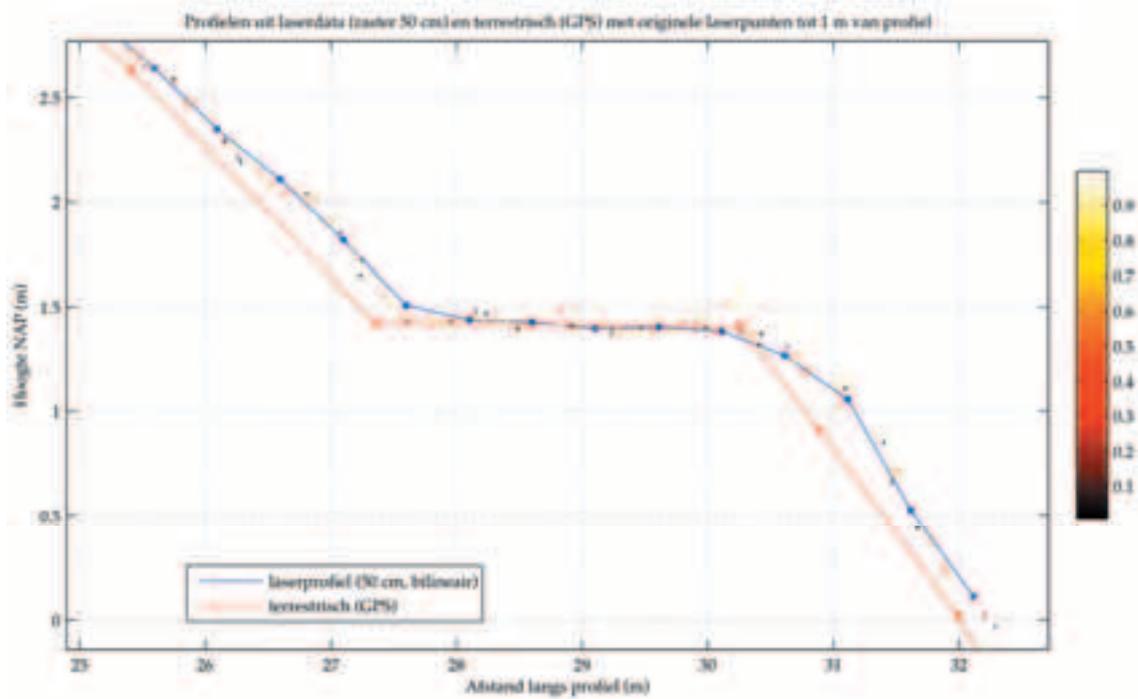
In figuur 33 ligt de kruin volgens de terrestrische data niet alleen marginaal hoger, ook is goed te zien dat de laserdata een hogere mate van detail heeft dan de meetpunten die de landmeter selecteerde. In figuur 34 is goed te zien dat de landmeter een taludverloop karakteriseert door in het terrein twee kniklijnen te kiezen, terwijl de laserdata deze minder duidelijk aangeeft, maar het verloop van het talud met een grotere mate van detail toont. Dat de landmeter niet anders kan dan idealiseren, wordt door deze figuur goed geïllustreerd. Zoals opgemerkt wil dit allesbehalve zeggen dat de terrestrische data niet aan zijn doel voldoet. De invloed op de stabiliteitsberekeningen wordt in § 6.5 geanalyseerd.

Tot slot wordt hier het profiel van de Oosterscheldedijk ('profiel 6') geanalyseerd. In figuur 10 werd reeds een luchtopname getoond, in figuur 11 de hoogtekartaart en in figuur 12 een vogelvluchtvisualisatie van het hoogtemodel vervaardigd op basis van het 50cm-raster. In figuur 35 is het totale profiel, bijna 8 meter hoog en 57 meter lang, afgebeeld.

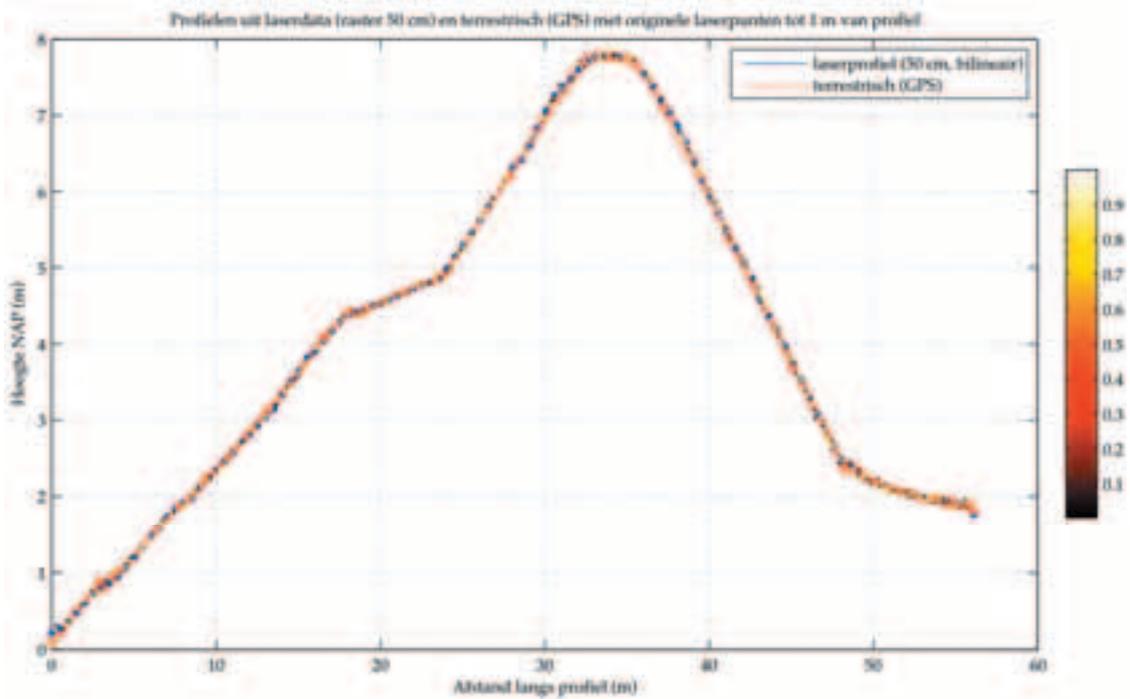
FIGUUR 33 DE VEEL GEDETAILLEERDE LASERDATA LAAT OOK BIJ PROFIEL 3, EEN BINNENDIJK TUSSEN KORTGENE EN COLIJNSPLAAT, EEN ANDER PROFIEL VAN DE KRUIJN ZIEN DAN DE LANDMETER MAT



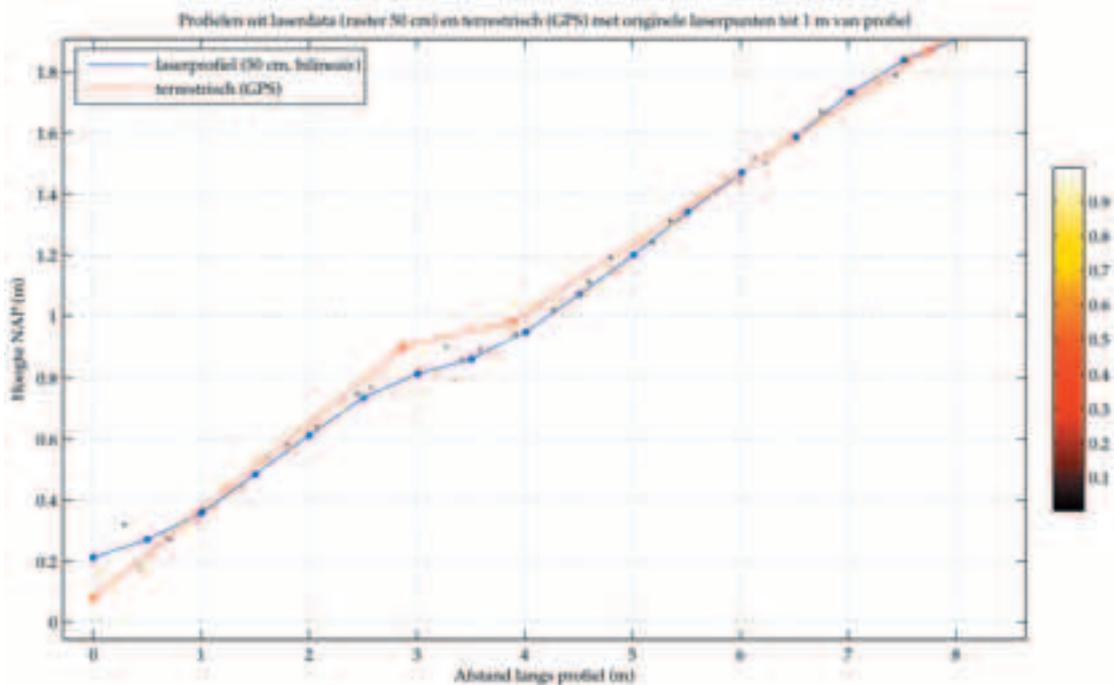
FIGUUR 34 OP HET TALUD VAN PROFIEL 3 LAAT DE LASERDATA EEN ANDER PROFIEL ZIEN DAN DE LANDMETER OP BASIS VAN ENKELE DOOR HEM GEKOZEN KNIKLIJNEN HEFFT GEMETEN



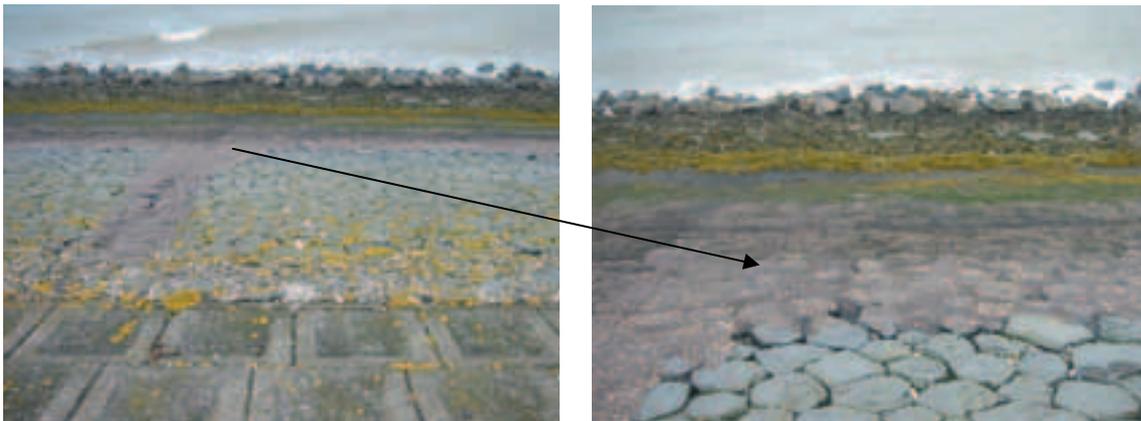
FIGUUR 35 HET PROFIEL VAN DE BIJNA 8 METER HOGE OOSTERSCHELDEDIJK, DIE OOK IN FIGUUR 12 IS AFGEBEELD. HET TERRESTRISCH PROFIEL (ROOD), HET PROFIEL UIT HET LASERRASTER (BLAUW) EN DE BINNEN EEN METER VAN HET PROFIEL LIGGENDE INDIVIDUELE LASERPUNTEN (KLEURGECODEERD) ZIJN SAMEN AFGEBEELD



FIGUUR 36 OP DE OVERGANG VAN TWEE BEKLEDINGMATERIALEN HEeft DE LANDMETER TWEE KNIKLIJNEN GEKOZEN. ZIE DE FOTO IN FIGUUR 37

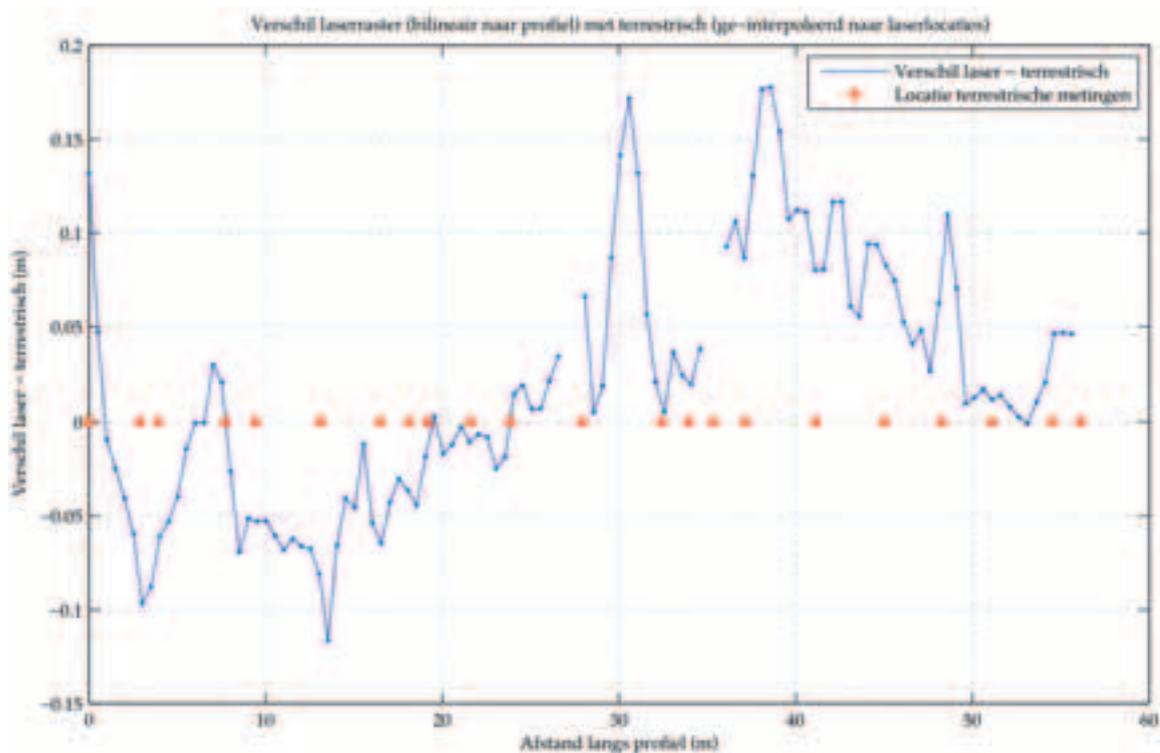


FIGUUR 37 DE SITUATIE DIE AANLEIDING GAF TOT HET METEN VAN TWEE KNIKLIJNEN: IN DE PROFIELVERDEDIGING BEVINDT ZICH EEN OVERGANG TUSSEN TWEE TYPEN BEKLEDINGSMATERIAAL. (© WZE)



Het zeewaartse talud vertoont een opvallende discontinuïteit. De landmeter heeft hier twee kniklijnen gedefinieerd. Ook in de laserdata is dit te zien, maar zoals gebruikelijk met meer detail en minder geïdealiseerd. Slechts een foto kan laten zien wat hier aan de hand is. In het talud van de Oosterscheldedijk blijkt hier een overgang tussen twee bekledingsmaterialen te zitten: zie figuur 37. Als alleen de laserdata ter beschikking zou staan, zou de inspecteur met vragen blijven zitten. Dit geeft het belang van goede topografische achtergrondinformatie aan, bij voorkeur foto's of luchtopnamen.

FIGUUR 38 HET VERSCHIL TUSSEN DE UIT HET LASERRASTER GEÏNTERPOLEERDE PROFIEL EN DE TERRESTRISE METINGEN (DE RODE PUNTEN GEVEN DE LOCATIE DAARVAN AAN). DE SINUSACHTIGE VORM ZOU KUNNEN DUIDEN OP EEN SYSTEMATISCHE FOUT IN LIGGING, MAAR DIT IS NIET HET GEVAL



Tot slot is in figuur 38 het verschil tussen het terrestrische en het laserprofiel afgebeeld. De verschillen zijn ten opzichte van de meetprecisie niet groot en vertonen enige gaten. Opvallend is dat er een sinusachtige vorm is te zien. Bij dijkachtige structuren kan dit duiden op een systematische fout in ligging: de ene zijde lijkt als gevolg daarvan te hoog en de andere te laag gemeten. Omdat het nulpunt van de 'sinus' in figuur 38 niet op de kruin ligt, kan deze conclusie hier niet direct worden getrokken. Niettemin zijn er wel andere aanwijzingen dat er sprake is van een systematische fout in ligging, in ieder geval bij de profielen 3 en 6. De piek in het verschil bij 30 meter is het gevolg van een bol talud, waar het terrestrisch profiel bij gebrek aan meetpunten een rechte lijn is.

Bij trapezoidale structuren als waterkeringen betekent een hoogteverschil met referentiemetingen niet beslist een systematische fout in hoogte. Als gevolg van de helling kan een schijnbare fout in hoogte in werkelijkheid een systematische fout in ligging zijn. Dit is de achtergrond van de eis van WGL die in § 4.4.3 werd onderbouwd: de systematische fout in ligging mag niet meer dan driemaal de systematische fout in hoogte zijn, omdat beide bij een talud van 1 op 3 op hetzelfde hoogteverschil neerkomen. Voor de bepaling van profielen is de ligging niet van groot belang, maar vanwege de dubbelzinnigheid bij het controleren van de hoogte en vanwege de bepaling van *hoogteverschillen* of zettingsbepalingen is een strenge eis aan de ligging op zijn plaats.

Hoewel het relatief geringe aantal terrestrische punten een zwak fundament vormt voor deze conclusie, kan uit figuur 33 en figuur 36 en zeker figuur 34 en figuur 38 worden geconcludeerd dat de ligging van beide laserprofiel 3 en 6 een systematische afwijking vertoont. In principe is de ligging van het *terrestrische* profiel zeer goed bepaald: met een standaardafwijking van zo'n 2 cm. Dit is voor het laserprofiel allerminst het geval. Hiervóór werd al opgemerkt dat in het evaluatierapport [20] voor de *hoogte* een systematische afwijking van 0 cm werd gerapporteerd; in datzelfde rapport is te lezen dat de systematische afwijking in *ligging* vaak maar net het volgens het bestek toegestane maximum van 50 cm haalt (!), terwijl de aannemer aangaf dat deze zou voldoen aan een fout van 5 cm standaardafwijking plus 5 cm systematisch.

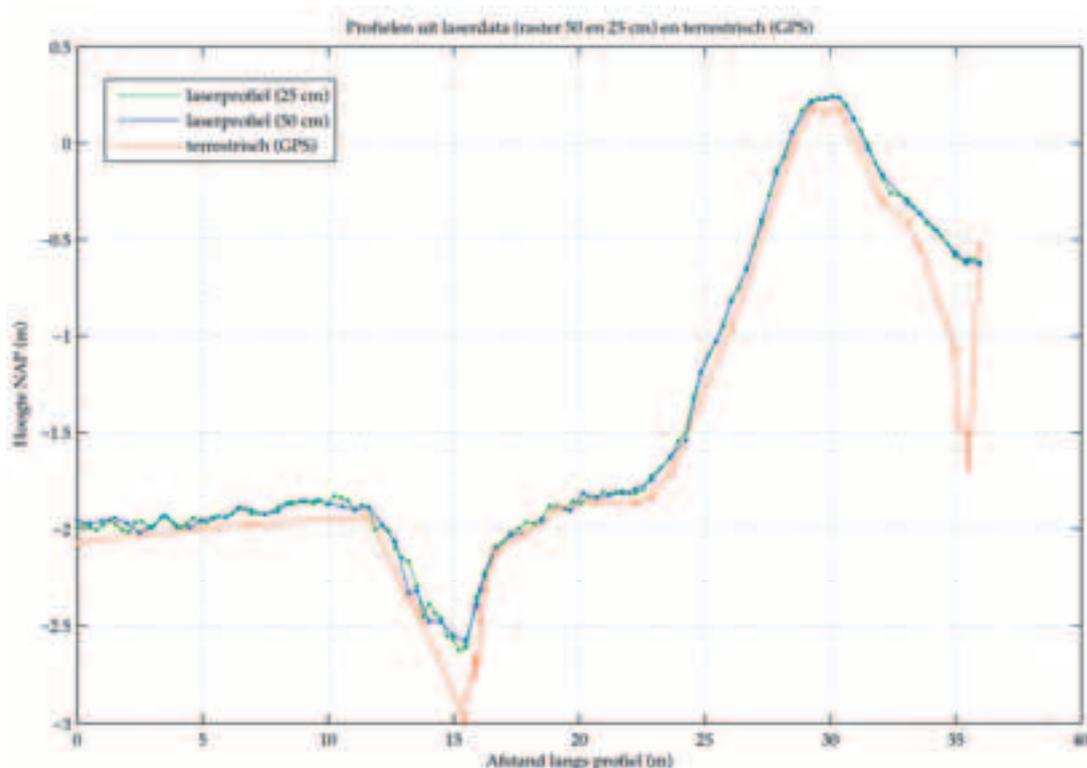
Hier zij nogmaals benadrukt dat de WGL niet de informatie ter beschikking stond om zelf de precisie in hoogte en ligging te controleren. Dat is overgelaten aan de evaluatie zoals deze door de Stuurgroep AHN is georganiseerd; ook is dankbaar gebruik gemaakt van de opmerkingen van het Waterschap Zeeuwse Eilanden.

Het is bij waterkeringbeheerders min of meer praktisch om opgeleverde laserhoogtebestanden te controleren – bij wijze van opleveringscontrole – met behulp van terrestrisch gemeten profielen van waterkeringen. Dit is om enkele redenen onverstandig. In de eerste plaats kan, zoals net is betoogd, moeilijk onderscheid gemaakt worden tussen systematische fouten in hoogte en ligging. In de tweede plaats zijn er te weinig terrestrische metingen op vaak te onduidelijke locaties om er zeker van te zijn dat de terrestrische metingen goed referentiemateriaal vormen. In de derde plaats is een waterkering vaak bepaald geen strakke asfaltvlakte met rechte vlakken; integendeel: vegetatie of een 'hobbelige' bekleding komt vaak voor en dat maakt de vergelijking risicovol. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie hoopt in fase 3 van dit project een goede controleprocedure te kunnen opstellen en publiceren (zie ook bijlage H).

6.4.4 ANALYSE VAN LASERDATA MET HOGERE PUNTDICHTHEID VAN EEN REGIONALE KERING VAN HOLLANDS NOORDERKWARTIER

Van het met GPS gemeten profiel van Hollands Noorderkwartier was, in tegenstelling tot bij WZE hiervóór, per meetpunt de locatie bekend. Daardoor was het berekenen van het bijbehorende laserprofiel lastiger. Tussen de individuele terrestrische punten werden lijnen getrokken, waarop de laserdata werd geïnterpoleerd: zie figuur 23. Dit leidt tot de conclusie dat bij de hiervóór bestudeerde profielen wel eens niet precies de juiste data is vergeleken, omdat mogelijk de profiellijn niet recht was.

FIGUUR 39 DE VERGELIJKING TUSSEN DE TERRESTRISCHE METINGEN (ROOD) EN HET PROFIEL GEÏNTERPOLEERD UIT HET 50CM-RASTER (BLAUW) EN HET 25CM-RASTER (GROEN)



Langs dit profiel werd de laserdata met de terrestrische vergeleken. (Vanwege de complexiteit werden de laserpunten er niet bij betrokken zoals in figuur 27). Het resultaat staat in figuur 39. Vrijwel overal ligt de laserdata hoger. Dit kan duiden op een systematische fout, maar het kan evenzeer de invloed van vegetatie zijn: dit is inderdaad een kade bekleed met gras. Hoewel bij het terrestrische profiel met een grotere zekerheid het maaiveld gemeten is, kan ook de subjectiviteit van de landmeter verschillen verklaren. Het is zeker niet zonder meer verstandig bij een grasbekleding met het in de figuur weergegeven verschil de laserhoogte-data te corrigeren. Het verschil in verloop tussen de 25cm- en 50cm-data is niet goed verklaarbaar; wel wordt de eerdere opmerking bevestigd dat de 25cm-data sterker varieert, doordat er een middeling over minder laserpunten plaatsgevonden heeft. Net als bij de WZE-data geeft de teensloot een duidelijk verschil te zien. De zeer grote verschillen rechts, bij de boezem, zijn het gevolg van twee elementen: ten eerste staat er riet en ten tweede heeft de landmeter ook hier de bodem mee gemeten.

6.5 STABILITEITSBEREKENINGEN DOOR GEODELFT

6.5.1 INLEIDING

Eén van de toepassingen van de vervaardiging van profielen van waterkeringen is de uitvoering van stabiliteitsberekeningen, onder meer ten behoeve van de toetsing. De Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie wilde de minimaal noodzakelijke specificaties voor laseraltimetrie, die in hoofdstuk 4 na analyse en discussie in de werkgroep zijn vastgelegd, toetsen op zijn gevolgen voor de stabiliteitsberekening. Daarbij zou de berekening worden uitgevoerd op een conventioneel terrestrisch gemeten profiel en op het uit het 50cm-laserhoogteraster bepaalde profiel. Als de verschillen in de tweede decimaal zouden zitten, zouden de profielen althans voor de stabiliteitsberekening gelijkwaardig zijn.

Ellen Tromp van GeoDelft voerde in overleg met Theo Stoutjesdijk de stabiliteitsberekeningen uit en schreef er voor WGL een kort rapport over [21]. In § 6.5.2 wordt de opbouw van de bodem en de ligging van de freatische lijnen besproken. In § 6.5.3 komt de bewerking van de data ter sprake en in § 6.5.4 zijn de resultaten van de stabiliteitsberekeningen te vinden.

6.5.2 BODEMOPBOUW EN FREATISCHE LIJNEN

Omdat er geen informatie over de bodemopbouw ter beschikking stond, heeft GeoDelft gekozen te rekenen met twee willekeurige bodemopbouwen: een ‘slappe’ en een ‘sterke’ variant. De bodemopbouwen zijn afgeleid van gegevens die beschikbaar waren van geotechnisch onderzoek op Zuid-Beveland. In het brieffrapport *Analyse stabiliteit profielen 1, 3 en 6* [21] licht Ellen Tromp deze twee varianten van bodemopbouw toe. Wat betreft de materiaaleigenschappen zijn waar mogelijk proefgegevens gebruikt op basis van celproeven die in het verleden in opdracht van Waterschap Zeeuws Vlaanderen en Waterschap Zeeuwse Eilanden zijn uitgevoerd (zie voor een omschrijving hiervan genoemd rapport [21]).

Voor de berekeningen is de vrije grondwaterspiegel in de waterkeringen van belang, de zogenoemde freatische lijn. Voor de polderpeilen is ofwel het slootpeil (indien van toepassing) ofwel een niveau van 40 cm onder het maaiveld aangehouden. Voor profiel 6 (een buitendijk) is een toetspeil van NAP +3,45 m aangehouden volgens het Hydraulisch Randvoorwaardenboek 2001. Profiel 1 en 3 zijn binnendijken, waarvoor een toetspeil is aangehouden van 0,50 m onder kruinhoogte. Voor de stijghoogte van het eerste watervoerende pakket is NAP -0,25 m aangehouden, welke op basis van een aantal peilbuizen van DINO is verkregen.

6.5.3 BEWERKING VAN DE DATA

De terrestrische data bevat 19 tot 30 punten per profiel. Deze relatief ijle data bevat onder meer de waterpeilen en slootdiepten: de landmeter heeft die tijdens de meetcampagne direct meegenomen. Voor de laserdata zijn de profielen genomen zoals die in de vorige paragraaf zijn geïnterpoleerd uit de 50cm-rasterdata. Deze profielen bevatten dan ook veel meer data dan de terrestrische: tussen de 70 en 120. Dit is voor de stabiliteitsberekeningsprogramma's echter geen probleem.

Een probleem is dat de laserprofielen no-data-waarden bevatten. Deze moesten handmatig worden verwijderd. Daarnaast zijn de slootdiepten van groot belang voor de stabiliteitsberekening. Omdat de laserprofielen deze niet bevat, moesten deze handmatig worden toegevoegd. Opgemerkt wordt dat deze slootdiepten hoe dan ook niet met laseraltimetrie gemeten kunnen worden, zodat altijd data uit andere bron noodzakelijk is, mogelijk zelfs uit een aparte meetcampagne, terwijl de landmeter deze tegelijk met het profiel dat hij toch al meet, kan meenemen.

6.5.4 RESULTATEN VAN DE STABILITEITSBEREKENINGEN

Voor de drie verstreekte profielen is het terrestrisch profiel en het laseraltimetrisch profiel doorgerekend voor de situaties met een slappe en stevige bodemopbouw. Daarnaast zijn alle berekeningen voor de profielen 1 en 3 dubbel gemaakt: één voor elke zijde van de dijk waartegen het toetspeil komt te staan. Dit zijn immers binnendijken waar het water in principe van beide kanten kan komen. Er zijn dus in totaal $(3 + 2) \times 2 \times 2 = 20$ berekeningen gemaakt. De resultaten staan in tabel 3.

TABEL 3

DE RESULTATEN VAN DE STABILITEITSBEREKENINGEN VAN DE DRIE ZOWEL TERRESTRISCH ALS MET LASERALTIMETRIE GEMETEN PROFIELEN

Profiel	Ligging toetspeil	Bodemopbouw	Terrestrisch profiel	Laseraltimetrisch profiel
Profiel 1 (binnendijk)	rechts	slap	1,42	1,45
		stevig	1,46	1,46
	links	slap	1,33	1,33
		stevig	1,33	1,33
Profiel 3 (binnendijk)	rechts	slap	1,04	1,11
		stevig	1,04	1,12
	links	slap	1,14	1,31
		stevig	1,14	1,31
Profiel 6 (buitendijk)		slap	1,19	1,19
		stevig	1,20	1,20

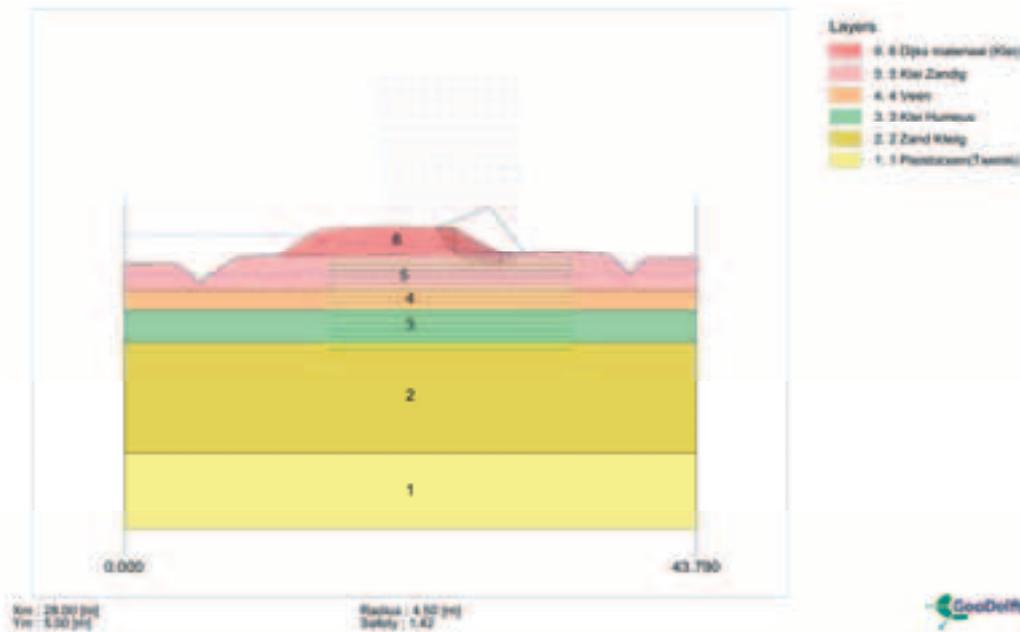
Bij wijze van voorbeeld zijn in figuur 40 en figuur 41 van het binnendijkprofiel 1 de twee diagrammen afgebeeld van de stabiliteitsberekening met het water links (figuur 40) en rechts (figuur 41). Beide afbeeldingen betreffen de berekening op basis van de 'slappe' grondopbouw en het terrestrisch ingemeten profiel. Voor een groot aantal glijcirkels is de berekening gedaan (zie het rekenraster), waarbij de figuur de glijcirkel met de kleinste stabiliteit weergeeft. Opvallend aan figuur 41 is dat de slootdiepte bepalend is voor de ligging van de glijcirkel. Een juiste bepaling van de slootdiepte is in dit geval (en in enkele andere gevallen in deze casus) dus cruciaal. Dit is des te opmerkelijker daar de slootdiepte door de landmeter direct meegemeten wordt, terwijl deze niet uit de laserdata kan worden afgeleid. Voor deze cruciale parameter zijn in het geval van laseraltimetrie dus aanvullende metingen (of in ieder geval data) nodig.

In figuur 42 is de stabiliteitsberekening met dezelfde parameters als in figuur 41 afgebeeld, zij het dat het profiel met laseraltimetrie is ingewonnen. Het is nauwelijks te zien dat het profiel een iets grotere mate van detail vertoont en de stabiliteitsfactor verschilt niet van die op basis van het terrestrische profiel.

Ellen Tromp (GeoDelft) concludeert in haar rapport [21] dat profiel 1 en 6 verwaarloosbare verschillen in stabiliteit geven tussen de terrestrische metingen en het laseraltimetrisch profiel. In potentie geeft dit aan dat beide methoden gelijkwaardig zijn. Bij profiel 3 zijn er wel verschillen gevonden. Het is daarbij waarneembaar dat het terrestrisch gemeten profiel hoekiger is (zie figuur 43) en het laseraltimetrisch profiel vloeiender. Dat suggereert dat indien het terrestrisch gemeten profiel meer punten zou bevatten de resultaten van de berekeningen alsnog dicht bij elkaar zouden kunnen liggen. Het lijkt erop dat laseraltimetrie een tenminste gelijkwaardige en wellicht zelfs betere methode is ten opzichte van de terrestrische meting.

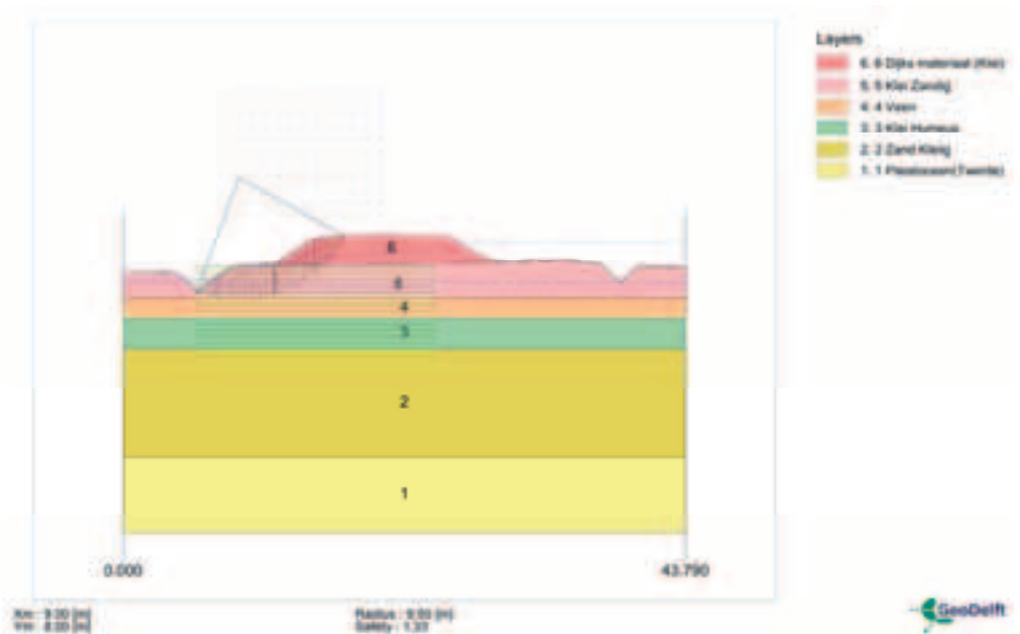
FIGUUR 40

HET TERRESTRISCH GEMETEN PROFIEL 1, EEN BINNENDIJK, WAARVAN HIER DE STABILITEIT BEREKEND IS MET HET WATER LINKS. DIT IS DE SLAPPE VARIANT QUA GRONDOPBOUW. VAN ALLE OP HET REKENRASTER BEREKENDE GLIJCIRKELS HEEFT DE GETEKENDE GLIJCIRKEL DE GROOTSTE INSTABILITEIT: 1,42. DE GLIJCIRKEL IS ZEER ONDIEP EN DE OPBOUW DOET ER DUS WEINIG TOE. DE FREATISCHE LIJN EN WATERPEILEN ZIJN GESTREEPT. (© GEODELFT)

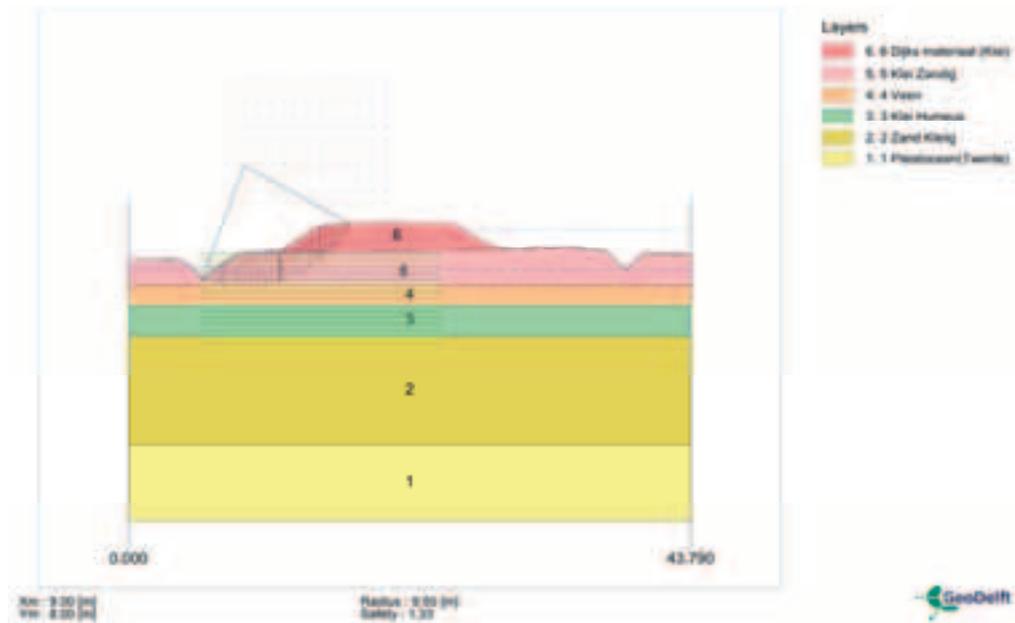


FIGUUR 41

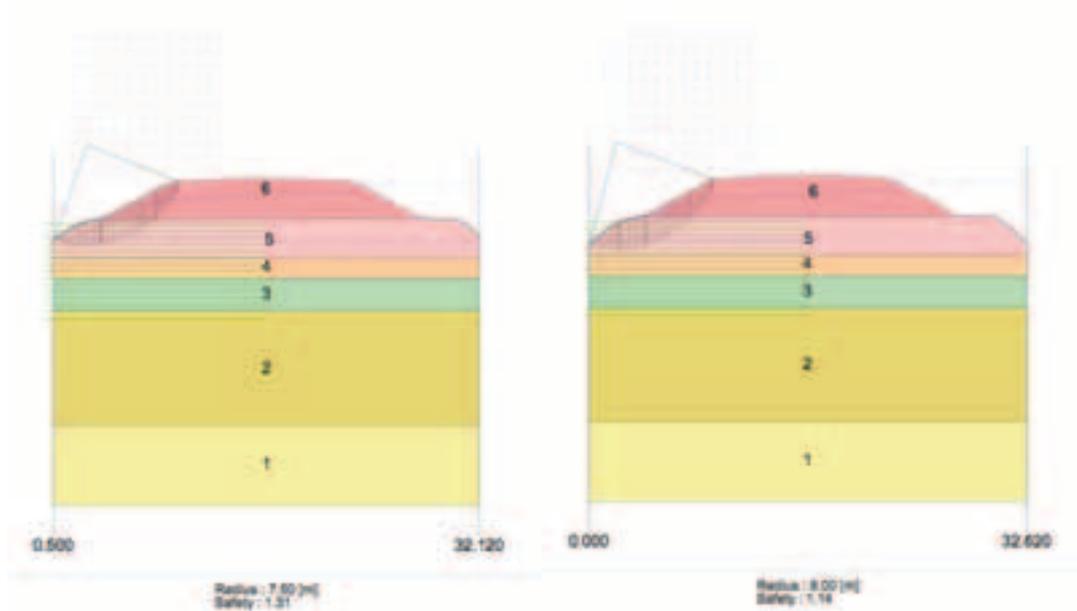
HET TERRESTRISCH GEMETEN PROFIEL 1 UIT FIGUUR 40, WAARVAN HIER DE STABILITEIT BEREKEND IS MET HET WATER RECHTS EN DE SLAPPE VARIANT QUA GRONDOPBOUW. DE GLIJCIRKEL IS HIER GROTER EN DE STABILITEIT MET 1,33 KLEINER. MERK OP DAT DE SLOOTDIEPTE BIJ DEZE STABILITEIT EEN CRUCIALE ROL SPEELT. (© GEODELFT)



FIGUUR 42 DE STABILITEIT VAN PROFIEL 1 UIT FIGUUR 40 EN FIGUUR 41, MET HET WATER RECHTS EN DE SLAPPE VARIANT QUA GRONDOPBOUW, MAAR DITMAAL BEREKEND OP BASIS VAN HET MET LASERALTIMETRIE GEMETEN PROFIEL. ONDANKS DAT HET PROFIEL EEN IETS GROTERE MATE VAN DETAIL TE ZIEN GEEFT EN DAT DE SLOOTBODEMS HANDMATIG MOESTEN WORDEN TOEGEVOEGD, GEEFT DE BEREKENING GEEN VERSCHIL IN STABILITEIT TE ZIEN. (© GEODELFT)



FIGUUR 43 DE DIAGRAMMEN VAN DE STABILITEITSBEREKENINGEN VAN PROFIEL 3 MET HET WATER AAN DE RECHTERKANT TEGEN DE DIJK. LINKS HET MET LASERALTIMETRIE GEGENEREERDE PROFIEL, RECHTS HET TERRESTRISCH GEMETEN PROFIEL. DE HIER WEERGEGEVEN COMBINATIE GAF HET GROOTSTE VERSCHIL TUSSEN LASERALTIMETRIE EN GPS-METINGEN AAN. (© GEODELFT)



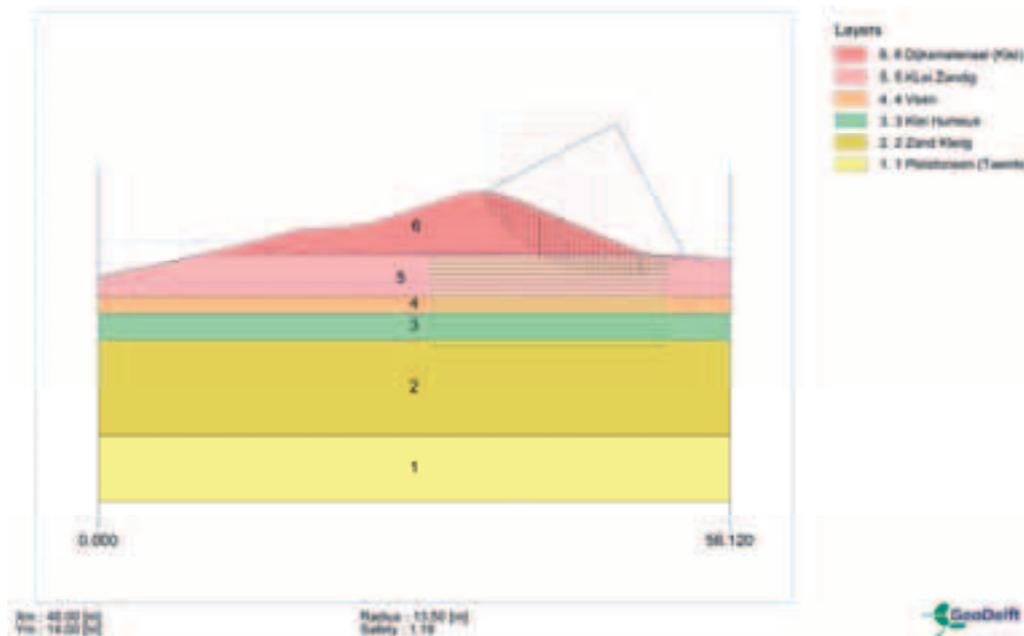
In figuur 43 is de combinatie afgebeeld waarbij het grootste verschil in stabiliteit optrad tussen het met GPS en het met laseraltimetrie ingewonnen profiel. Het gaat hier om binnendijkprofiel 3, met het water rechts. Of de grondopbouw slap of stevig is, maakte niet uit (zie verderop). Het terrestrisch gemeten profiel geeft een stabiliteitsfactor van 1,14, het laseraltimetrisch profiel 1,31. In eerste instantie zou men kunnen concluderen dat ogenschijnlijk kleine verschillen in geometrie toch een niet te verwaarlozen verschil in berekende

stabiliteitsfactor ten gevolge hebben. Als de diagrammen in figuur 43 aan een nauwkeuriger blik worden onderworpen, blijkt het grootste verschil in geometrie op te treden ter plekke van de slootbodem. Het laseraltimetrisch profiel moest handmatig worden gecorrigeerd voor het ontbreken van de slootbodem; was dit op dezelfde wijze doorgetrokken als het terrestrisch profiel, dan had de stabiliteit naar alle waarschijnlijkheid niet zo'n groot verschil te zien gegeven.

Niettemin is uit het belang van de slootdiepte bij de diepte van de glijcirkels en daarmee van de stabiliteitsfactor wel te concluderen dat een profiel niet mag eindigen bij de sloot, zoals in figuur 43 het geval was. Daarmee bestaat immers de kans dat de een buiten de sloot eindigende representatieve glijcirkel niet wordt gevonden. Deze data zou bij de laseraltimetrie in principe alsnog uit de beschikbare data moeten zijn af te leiden.

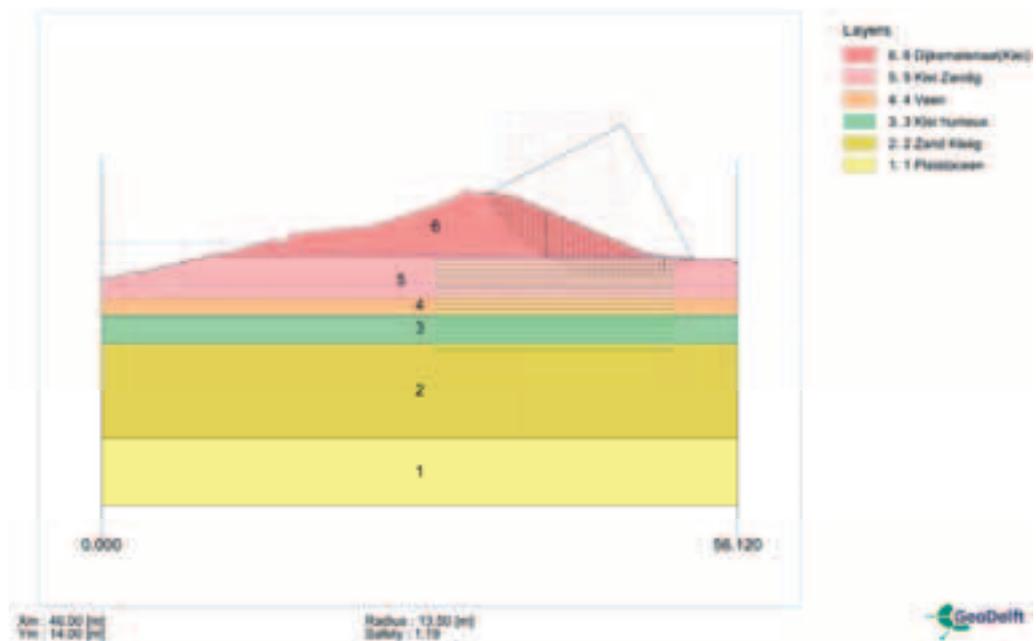
Wat in de rekenresultaten verder opvalt is dat er nauwelijks verschil is gevonden tussen een slappe en een stevige ondergrond. Dit komt volgens GeoDelft doordat de maatgevende glijcirkels betrekkelijk ondiepe glijcirkels zijn, die voor het grootste deel door het dijksmateriaal gaan. Het dijksmateriaal heeft in beide gevallen dezelfde sterkte-eigenschappen. Bij diepere glijcirkels zou er een groter verschil gevonden zijn.

FIGUUR 44 DE STABILITEITSBEREKENING OP BASIS VAN HET TERRESTRISCH GEMETEN PROFIEL EN DE 'SLAPPE' GRONDOPBOUW VAN DE ZEEDIJKKACHTIGE OOSTERSCHELDEDIJK



FIGUUR 45

DE STABILITEITSBEREKENING VAN OP BASIS VAN HET UIT HET LASERRASTER GEÏNTERPOLEERDE PROFIEL VAN DE OOSTERSCHELDEDIJK. DE STABILITEITSFACTOR VERSCHILT NIET MET DIE IN FIGUUR 44, MAAR HET PROFIEL IS GEDETAILLEERDER EN TOONT ENIGE DISCONTINUÏTEITEN IN DE DATA DIE OM CORRECTIE VRAGEN



De resultaten van een profiel ingemeten met laseraltimetrie is sterk afhankelijk van de opschoning van de data. In profiel 6 in figuur 45 is te zien dat het profiel nog discontinuïteiten bevat. Dit zou gevolgen kunnen hebben voor de stabiliteit, maar dat is hier niet het geval. Het is van belang er in de interpretatieslag van de ruwe meetdata voor te zorgen dat dit soort ruis zoveel mogelijk wordt verwijderd.

GeoDelft concludeert voorts dat, nu de reken capaciteit geen beperking meer is en de exacte geometrie van groot belang blijkt te zijn, het aan te bevelen zou zijn om uit de laseraltimetrische data dwarsprofielen om de 10 meter te genereren en (geautomatiseerd) door te rekenen, in plaats van bijvoorbeeld om de 100 m of een andere 'representatieve' waarde. Dijkvakken worden nu ingedeeld op basis van een inschatting dat het dijkvak 'ongeveer hetzelfde dwarsprofiel' heeft. Dit is misschien een te grove benadering en bovendien inmiddels qua reken capaciteit niet meer nodig.

6.6 CONCLUSIES

De conclusies van de evaluatie van de data uit het proefproject AHN-WZE zijn opgenomen in hoofdstuk 7.

7

CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

7.1 CONCLUSIES

De conclusies zijn in enkele categorieën verdeeld. Aanbevelingen volgen verderop.

7.1.1 ORGANISATORISCHE CONCLUSIES

1. De door waterschappen verstrekte bestekken laten zien dat het veel vaak opnieuw wordt uitgevonden. Op de formulering en volledigheid van de bestekken is daarnaast regelmatig wat af te dingen.
2. Een techniek die bij de specificatie, aanbesteding, controle en ontsluiting zo'n hoog specialistisch kennisniveau vereist, maakt samenwerking en kennisdeling zeer aanbevelenswaardig.
3. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie lijkt een zinvolle rol gespeeld te hebben bij de stroomlijning van de uitbesteding van laseraltimetrieprojecten en de onderbouwing daarvan met weloverwogen specificaties.
4. De door WGL gewenste samenwerking met het AHN is tot stand gebracht. De werkgroep heeft dankzij deze samenwerking een zeer nuttige evaluatie van de proefdata van Zeeland kunnen uitvoeren en bij de vaststelling van de specificaties van het AHN-2 in 2008 de gefundeerde vereisten voor waterkeringbeheer kunnen inbrengen.
5. Het ziet er naar uit dat het AHN-2 voldoende gespecificeerd is om aan de vereisten voor gebruik voor waterkeringbeheer te voldoen voor alle primaire waterkeringen en zo'n 80% van de regionale waterkeringen.
6. Het kan voor individuele waterschappen noodzakelijk zijn naast het AHN-2 een aparte uitbesteding van laseraltimetrie te doen, bijvoorbeeld voor kleine regionale waterkeringen, in gevallen dat extra producten zijn vereist en als de actualisatiedatum of -frequentie onvoldoende is.
7. Voor dergelijke initiatieven is het verstandig dat waterkeringbeheerders hun krachten bundelen en gebruik maken van gezamenlijke specificaties en de kennis die binnen de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie is opgebouwd.
8. De rol van het Waterschapshuis als organisatorische spil voor laseraltimetrie voor waterkeringbeheer en andere toepassingen is een goede en veelbelovende ontwikkeling, ook omdat daarmee een rechtspersoon ontstaat die doelgericht alle waterschappen kan vertegenwoordigen.

7.1.2 TECHNISCHE CONCLUSIES

Hieronder zijn alleen de conclusies te vinden die niet beschreven zijn als uitvloeisel van de evaluatie met de data van de proef AHN-WZE (zie daarvoor § 7.1.3).

9. Laseraltimetrie heeft een enorme potentie voor waterkeringbeheer.
10. Niettemin kan deze potentie nog verder worden benut (zie aanbevelingen).
11. Nu per puls meerdere reflecties of zelfs de golfvorm kan worden geregistreerd, wordt het beter mogelijk zelfs bij gras het maaiveld te bepalen. Dit laat onverlet dat vegetatie altijd fouten op de bepaling van het maaiveld tot gevolg zal hebben. Deze fout is voor waterkeringbeheer niet verwaarloosbaar, maar ook moeilijk vast te stellen.
12. Het is verstandig laseraltimetrie uit te voeren met een hoge punt dichtheid ($\geq 20/m^2$). Hiermee ontstaat niet alleen een grotere mate van detail en een grotere hoogteprecisie door over meerdere punten te middelen, maar ook is het beter mogelijk uit de data het maaiveld te bepalen.
13. De controle door waterschappen van opgeleverde laseraltimetriebestanden is in het algemeen summier en soms gebrekkig. De bestekken vermelden vaak eisen op het gebied van de planimetrische precisie, waaraan, zo leert de ervaring, in praktijk nauwelijks wordt voldaan. Het is wel mogelijk, maar zowel de uitvoering van de meting door de aannemer, als de controle door de waterkeringbeheerder, schiet tekort om deze precisie te realiseren.
14. Ondanks dat aan de hoge eisen aan planimetrische precisie nauwelijks wordt voldaan, zijn deze eisen wel degelijk zinnig, met name om hoogte- en zettingsverschilbepalingen te kunnen uitvoeren.
15. Het is verstandig een goed begrip te hebben van geostatistische en andere begrippen zoals deze in de bijlagen A en B worden toegelicht. Deze kennis lijkt vaak in geringe mate aanwezig. Specificatie, controle en gebruik lijden hieronder.
16. Kniklijnen zoals een kruin- of teenlijn zijn ten opzichte van de laserpuntafstand zeer langgerekte eendimensionale structuren. Een gering aantal punten per vierkante meter, die bovendien zijn behept met planimetrische en hoogtefouten, lijkt de precieze bepaling van de ligging van dergelijke lijnen in de weg te staan. Doordat deze lijnen echter zeer langgerekte structuren zijn, vindt er in de richting van de kniklijn als het ware een middeling plaats. Daardoor is zowel op het oog als met programmatuur een kniklijn heel precies te localiseren, beter zelfs dan de man op de dijk dat kan.

7.1.3 CONCLUSIES EVALUATIE PROEF AHN-WZE

17. De punt dichtheid van het tijdens het proefproject AHN-WZE vervaardigde bestand is gemiddeld 10 punten per m^2 . Dit is voldoende voor het gebruik bij het berekenen van profielen van 'grote' waterkeringen, dat wil zeggen brede keringen met een hoogte van meer dan een meter ten opzichte van het achterland.
18. Het raster van 50 cm is voor de topografie van de bestudeerde 'grote' waterkeringen gedetailleerd genoeg.

19. Voor 'kleine' regionale keringen met een hoogte van minder dan een meter ten opzichte van het achterland en/of een kruinbreedte van minder dan een meter is een rastergrootte van 25 cm gewenst. De punt dichtheid moet daartoe minimaal $30/m^2$ zijn.
20. Zelfs op goed reflecterend terrein vallen in de proefdata AHN-WZE regelmatig gaten omdat er binnen een rastercel van 50 bij 50 cm niet één laserpunt valt of omdat de punten bij de filtering verdwenen zijn. Dit is ongewenst. Er zouden minimaal twee punten per rastercel moeten zijn.
21. De puntspatiëring is zeer onregelmatig. Dit heeft te maken met de inwintechniek van drie verschillend gerichte laserbundels. Het resultaat is onder meer de zojuist genoemde gaten. Daarnaast heeft dit, doordat er per rastercel een sterk verschillend aantal laserpunten vallen, tot gevolg dat de precisie van de hoogte van een rastercel zeer inhomogeen is. Dit is niet gewenst, maar niet werkelijk problematisch omdat doordat altijd meerdere aangrenzende cellen worden beschouwd dergelijke inhomogeniteiten uitmiddelen.
22. De mate van detail in een laserhoogteraster van 50 cm is veel groter dan die van terrestrische profielen. Laserdata, zelfs als deze naar een raster is gemiddeld, beschrijft het terrein veel beter dan terrestrische meetpunten.
23. Een landmeter bepaalt zijn keuze van een 'representatief' punt in het terrein op het oog. Enerzijds heeft hij daarbij meer informatie dan in laserdata zit, anderzijds zijn kniklijnen in laserdata door de overmaat aan data beter (algoritmisch) te bepalen dan op het oog door de landmeter.
24. Een landmeter meet gegarandeerd het maaiveld en doet dat bovendien met een hogere precisie dan met laseraltimetrie mogelijk is. In laseraltimetrie zit door vegetatie, zelfs al is het laag gras, een zekere spreiding en een zekere systematische hoogtefout.
25. Voor het afleiden van een profiel uit de laserdata dient exact de locatie van het terrestrische profiel gekozen te worden. Een terrestrisch profiel is in het algemeen niet recht. Hiermee moet bij het bepalen van een profiel in laserdata rekening gehouden worden.
26. Voor het interpoleren van de laserdata naar het profiel is de nearest-neighbourinterpolatie te verkiezen boven de bilineaire interpolatie.
27. De geconstateerde verschillen tussen de terrestrische en de laserdata zijn zonder extra informatie over de situatie van het oppervlak, met name qua bekleding en vegetatie, nauwelijks verklaarbaar.
28. Het is zonder extra informatie niet mogelijk te beoordelen of de beslissingen van de landmeter waar hij zijn baak zet al dan niet oorzaak zijn van bepaalde verschillen tussen terrestrische en laserdata.
29. Bij de vergelijking van terrestrische profielen met laserdata kan een optische opname van het terrein niet gemist worden. Dan kan zowel de keuze van de landmeter beter worden begrepen als een betere indruk ontstaan van welk type terrein tot een bepaald soort laserdata heeft geleid.

30. De evaluatie van de WGL betref *niet* de controle van hoogte en ligging van de laserdata. Bij de vergelijking tussen terrestrische en laserprofielen kan er geen uitspraak over worden gedaan of de geconstateerde verschillen een gevolg zijn van systematische fouten in hoogte of ligging.
31. De praktijk onder waterkeringbeheerders om opgeleverde laserhoogtebestanden te controleren – bij wijze van opleveringscontrole – met behulp van terrestrisch gemeten profielen van waterkeringen is om enkele redenen onverstandig. In de eerste plaats kan moeilijk onderscheid gemaakt worden tussen systematische fouten in hoogte en ligging. In de tweede plaats is de dichtheid van de terrestrische metingen te laag en de keuze ervan te onduidelijk om er zeker van te zijn dat de terrestrische metingen goed referentiemateriaal vormen. In de derde plaats is een waterkering vaak bepaald geen strakke asfaltvlakte met rechte vlakken: vegetatie of een ‘hobbelige’ bekleding maakt de vergelijking risicovol.
32. De landmeter meet zowel het wateroppervlak als de slootdiepte van de teensloot. Beide zijn met laseraltimetrie niet mogelijk. Omdat deze gegevens voor de stabiliteitsberekening noodzakelijk zijn, zal deze informatie altijd een extra bewerkingsslag betekenen als met laseraltimetrie gewerkt wordt.
33. Bij deze evaluatie is niet gekeken naar kartering en evenmin naar karteringsprecisie. De redactie in § 4.4.3 lijkt te impliceren dat een punt dichtheid van 10/m² hiervoor te gering is.

7.1.4 CONCLUSIES STABILITEITSBEREKENINGEN

34. Het gebruik van een uit een laserrasterbestand gegenereerd profiel maakt ten opzichte van een terrestrische profiel voor de stabiliteitsberekeningen praktisch niets uit. Een laserraster beschrijft bovendien het terrein gedetailleerder en beter dan een terrestrisch profiel.
35. Dit betekent dat voor de hier bestudeerde grote keringen een rastergrootte van 50 cm meer dan voldoende is voor stabiliteitsberekeningen.
36. Met de huidige reken capaciteit is het mogelijk alle (in de orde van 100) laserprofielpunten in de stabiliteitsberekening mee te nemen.
37. De laserdata moet worden opgeschoond en aangevuld: ‘no data’-punten mogen niet voorkomen en de waterstand en de slootdiepte moeten apart worden toegevoegd omdat deze in de laserdata niet voorkomen. Daarvoor is in het algemeen toch nog terrestrische data nodig, waardoor het voordeel van laseraltimetrie iets terugloopt.
38. De diepte van de teensloot is in veel gevallen cruciaal is voor de stabiliteit. Bij het onderhouden van de sloot en het meten van de slootdiepte realiseert men zich dat waarschijnlijk niet.
39. Omdat de sloten cruciaal zijn, dienen de profielen tot ruim voorbij de sloten door te lopen.

7.2 AANBEVELINGEN

Bij de aanbevelingen is dezelfde indeling gehanteerd als bij de conclusies. Een aantal aanbevelingen is echter verplaatst onder de paraplu van een aanbeveling voor een fase 3 voor de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie.

7.2.1 ORGANISATORISCHE AANBEVELINGEN

40. Een techniek die bij de specificatie, aanbesteding, controle en ontsluiting zo'n hoog specialistisch kennisniveau vereist, maakt samenwerking en kennisdeling zeer aanbevelenswaardig.
41. Voor dergelijke initiatieven is het verstandig dat waterkeringbeheerders hun krachten bundelen en gebruik maken van gezamenlijke specificaties en de kennis die binnen de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie is opgebouwd.
42. Voor krachtenbundeling en organisatorische stroomlijning is een centrale organisatie aanbevelenswaardig. Mogelijk kan het Waterschapshuis deze rol vervullen.
43. Het is aan te bevelen een kennisinstituut voor de toepassing van remotesensingtechnieken voor water(kering)beheerders te organiseren. De rol van de voormalige Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat wordt node gemist en bij waterschappen zelf is deze kennis fragmentarisch aanwezig.
44. Een dergelijk instituut dient de ontwikkeling van innovatieve technieken te stimuleren door op de praktijk gerichte, maar niet in het dagelijks beheer plaatsvindende, proefprojecten te organiseren.

7.2.2 TECHNISCHE AANBEVELINGEN

45. Laseraltimetrische data is geschikt voor een veel bredere toepassing dan alleen voor het berekenen van profielen van waterkeringen en het vullen van het beheerregister. Initiatieven om deze mogelijkheden te verkennen moeten worden gestimuleerd.
46. Laserdata is vlakdekkende data. De praktijk van het beschouwen van profielen is onderbenutting van dergelijke data. Het is aan te bevelen de toepassing van meer vlakdekkende analysemethoden te onderzoeken. Daarbij wordt niet langer een profiel op een representatieve plaats gekozen, maar worden ettelijke profielen berekend, waaruit vanzelf de geometrische eigenschappen van de kering bepaald kunnen worden. Een volledig vlakdekkende, driedimensionale analyse ligt in het verschiet.
47. Een krachtige toepassing van laserdata is het bepalen van zettingen en zettingsverschillen uit verschillen tussen op twee tijdstippen ingewonnen laserhoogtedata. Weliswaar is de precisie, met name in ligging, daarvoor vaak nog te marginaal, maar voor het waterkeringbeheer verdient de ontwikkeling van een dergelijke analysemethodiek aanbeveling. Daarmee zijn naar verwachting bovendien in een vroeg stadium uitzakkingen van het talud waarneembaar.
48. Laseraltimetrie wint aan kracht door integratie met andere technieken, zoals fotogrammetrie, infraroodwaarnemingen en radarinterferometrie. Multisensor-initiatieven die de kracht van afzonderlijke technieken combineren in één waarneemslag dienen te worden bevorderd.

49. Bij het beschouwen van het vlakdekkende karakter van laseraltimetrie verdient het aanbeveling ook het stochastische karakter te benutten om meer informatie over zowel de waterkering als de inwintechniek boven water te krijgen.

7.2.3 AANBEVELINGEN STABILITEITSBEREKENINGEN

50. Het verdient aanbeveling bij stabiliteitsberekeningen alle laserdata te gebruiken. Reken-capaciteit is hiervoor geen beperking meer. De data dient wel eerst te worden opgeschoond ('no data' verwijderen) en aangevuld (slootdiepte).
51. Omdat de sloten cruciaal zijn, dienen de profielen tot ruim voorbij de sloten door te lopen.

7.2.4 AANBEVELING VOOR FASE 3 WERKGROEP GROOTSCHALIGE LASERALTIMETRIE

Na de fase waarin een verkenning werd gedaan naar potentieel krachtige technieken (fase 1) en de bestudering, specificatie en evaluatie van laseraltimetrie (fase 2), is het aan te bevelen verschillende vragen, taken en uitdagingen te bundelen in een derde fase. Deze fase kan worden uitgevoerd in de loop van 2008.

De volgende aanbevelingen betreffen initiatieven die in fase 3 zouden moeten worden verwezenlijkt.

52. De stroomlijning van specificering en uitbesteding van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer, die de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie tot nu toe heeft gerealiseerd (vooral door dit document en het overleg er omheen), moet vervolgd worden door de standaarddocumenten waarvan in de bijlagen E tot en met H een overzicht gegeven is uit te werken: bestek, aanbesteding, gunning en controle.
53. Nu het AHN-2 zijn beslag krijgt, is het aan te bevelen dit project te blijven volgen en de daarbij ingewonnen data voor het gebruik bij waterkeringbeheer te evalueren, als vervolg op de evaluatie die de WGL bij de proef AHN-WZE reeds heeft uitgevoerd.
54. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie zoekt samenwerking met het Waterschapshuis, met het oog op een zo effectief mogelijke ondersteuning van de toepassing van laseraltimetrie bij het waterkeringbeheer. Stroomlijning en kennisdeling en -borging staan daarbij centraal.
55. De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie zoekt aansluiting bij initiatieven met GeoDelft, rond de Flood Control Room, IJkdijk e.a. De samenwerking rond de stabiliteitsberekeningen tijdens de evaluatie heeft laten zien dat dit tot resultaten leidt. Het leidt tot synergie.
56. De hoogteprecisie lijkt onderscheidend, maar is in de praktijk zeer complex en genuanceerd. Naar de invloeden van allerlei invloeden op de kwaliteit van laserhoogtedata moet onderzoek worden gedaan. Het verdient aanbeveling de invloed van vegetatie op de bepaling van het maaiveld met laseraltimetrie te bepalen. Daarbij dienen ook het seizoen en de moderne mogelijkheden van meerdere geregistreerde laserpuntreflecties te worden betrokken. Ook naar de vraag in hoeverre een hogere puntdichtheid kan leiden tot een betere bepaling van het maaiveld zou nader onderzoek moeten worden gedaan, zowel met betrekking tot het aantal na filtering overgebleven punten op het maaiveld als met betrekking tot het gebruik van meerdere geregistreerde reflecties per puls.

57. Het verdient aanbeveling nader te onderzoeken in hoeverre nu waterpassingen of terrestrische metingen, die onterecht vaak nog als 'de waarheid' worden beschouwd, een benadering van de werkelijkheid vormen en hoeverre het laserhoogtemodel daarvan een representatie is.
58. Bij het verbeteren van de beperkingen in het gebruik van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer dient het potentieel van andere technieken nader te worden onderzocht. WGL denkt daarbij aan het gebruik van radarinterferometrie voor zettings(verschil)metingen en het gebruik van een wegdekmeetmachine voor een nauwkeurige aanvulling van het laseraltimetriehoogtemodel voor zover er asfalt op de kruin ligt of van andere harde bekledingen sprake is.
59. Met name voor hoogteverschilberekeningen (zetting, zettingsverschillen) heeft laseraltimetrie een grote potentie. Dit potentieel is enorm maar raakt aan de grenzen van de techniek. Hiernaar zou nader onderzoek moeten worden gedaan.

BIJLAGE A

GEOSTATISTISCHE BEGRIPPEN

A.1 INLEIDING

Veel beschouwingen over meten gaan over de meetwaarden zelf. Met laseraltimetrie kan een hoogtemodel worden vervaardigd. In eerste instantie wordt dat model als waarheid gezien, waarbij we soms verblind worden doordat het prachtig gevisualiseerd is. In tweede instantie realiseren we ons dat het de vraag is hoe nauwkeurig dat model de werkelijke hoogte weer spiegelt. Hoe precies kun je met laseraltimetrie de hoogte meten? En waar hangt dat van af? Wordt de hoogte preciezer als meetwaarden worden gemiddeld? Ligt het hoogtemodel eigenlijk wel op de goede plek? Hoe precies moet de kruinhoogte bekend zijn om te kunnen toetsen? Hoe groot mogen de afwijkingen volgens het Voorschrift Toetsen op Veiligheid eigenlijk zijn?

Niet altijd wordt bij de beschouwing van een grootheid daarbij ook de precisie daarvan betrokken. Toch is dat belangrijk, want als criteria worden gesteld, bijvoorbeeld in de vorm van eisen in een bestek, moet ook duidelijk zijn wanneer je wel en wanneer je niet tevreden bent. De begrippen precisie en nauwkeurigheid komen dan om de hoek kijken, maar blijken vaak verschillend uitgelegd te worden.

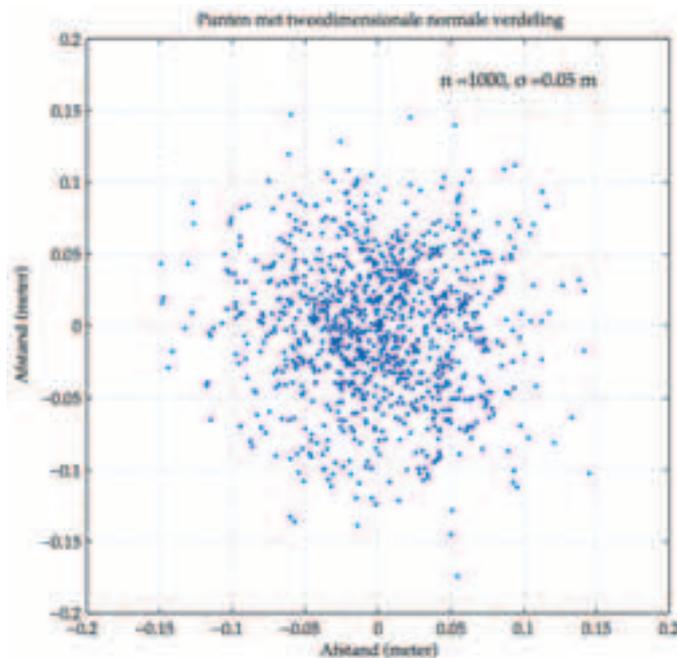
In deze bijlage worden enige geostatistische begrippen gegeven en geïllustreerd. Om te illustreren tot welke verwarring deze begrippen kunnen leiden en om helderheid en eenduidigheid te scheppen in dergelijke begrippen heeft de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat in 2001 een aardige notitie geschreven die dit inzichtelijk maakt (A.E. Bollweg et al., *Wat is precisie?* [4]). Daarnaast heeft de Meetkundige Dienst in 1998 een rapport met definities van kwaliteitsbegrippen gegeven, zoals ze eenduidig binnen geheel Rijkswaterstaat zouden moeten worden gehanteerd (R.G.W. Dood et al., *Kwaliteitsbegrippenhandboek* [7]). In deze bijlage worden geostatistische begrippen beschreven en met eigen voorbeelden geïllustreerd, getoetst aan genoemde publicaties en toegesneden op de inspectie en toetsing van waterkeringen en het inwinnen van geo-informatie daarvoor.

A.2 HET STOCHASTISCH KARAKTER VAN MEETWAARDEN

Als een bepaalde waarde herhaaldelijk wordt gemeten, is de uitkomst zelden elke keer hetzelfde. Metingen zijn behept met meetfouten. Dit is te vergelijken met een schutter die probeert de roos te raken. Hoe goed hij ook is, zijn schoten zullen altijd een verdeling laten zien zoals in figuur 46. Als de schutter zeer ervaren is, verandert wel de spreiding, maar niet de vorm van het patroon. Het patroon ligt in zijn geheel dichter om de roos, maar toont een soortgelijk karakter.

FIGUUR 46

MEETWAARDEN ZIJN BEHEPT MET MEETFOUTEN EN VERTONEN DAAROM EEN ZEKERE SPREIDING. DIT IS TE VERGELIJKEN MET DE VERDELING VAN SCHOTEN VAN EEN SCHUTTER ROND DE ROOS. DEZE WAARDEN HEBBEN VAAK EEN NORMALE VERDELING. HIERBOVEN ZIJN DUIZEND WAARDEN AFGEBEELD, WAARBIJ DE STANDAARDAFWIJKING VAN DE TWEEDIMENSIONALE VERDELING 5 CENTIMETER IS



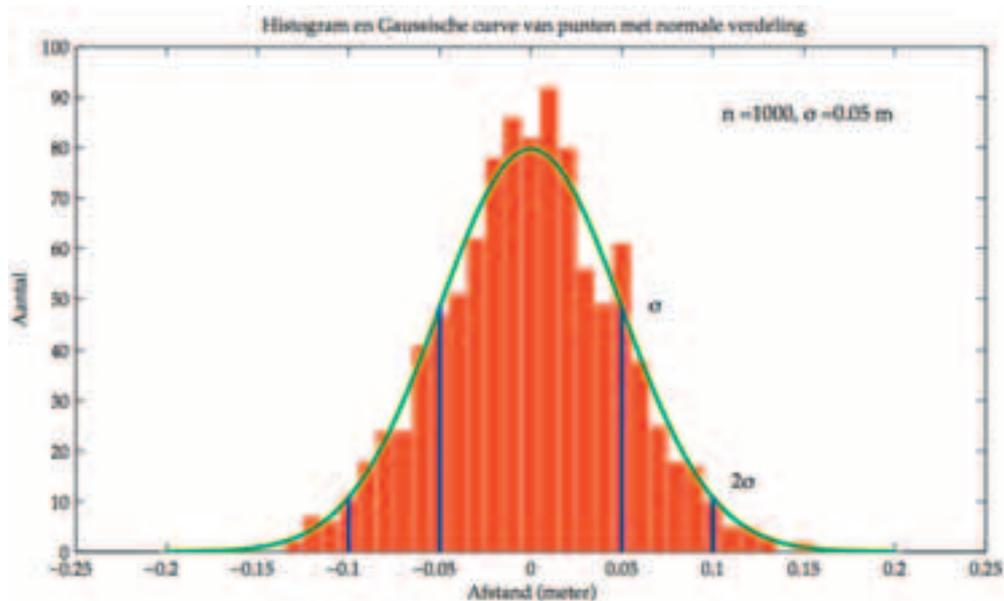
Veel meetwaarden blijken een soortgelijk patroon te hebben. De grootheid die gemeten wordt, is onveranderlijk, maar het lukt nooit hem exact te meten. De metingen hebben een wat men noemt toevals- of stochastisch karakter.

A.3 DE NORMALE VERDELING, STANDAARDAFWIJKING EN GEMIDDELDE WAARDE

De kans op een bepaalde meetwaarde (of op een bepaalde plek van een schot van een schutter) wordt beschreven door een kansverdeling. Veel waarden met een stochastisch karakter hebben de zogenaamde normale verdeling. Door een waarde heel vaak te meten ontstaat een piek rond de gemiddelde waarde, maar er worden ook waarden gemeten aan weerszijden van dit gemiddelde. Zie de definitie in § A.10 en de *Handleiding voor de technische werkzaamheden van het Kadaster* [12]. In figuur 47 is een histogram weergegeven van 1000 metingen van een bepaalde waarde, die als gemiddelde nul heeft. Van elk interval van een centimeter is geteld hoeveel van de 1000 metingen daarbinnen vielen. Dit histogram laat de normale of Gaussische verdeling zien. Zouden er oneindig veel metingen worden gedaan, dan zouden ze de vorm hebben van de groene curve.

FIGUUR 47

VEEL MEETWAARDEN MET EEN STOCHASTISCH KARAKTER HEBBEN EEN NORMALE VERDELING. HIERBOVEN IS HET HISTOGRAM VAN 1000 METINGEN MET EEN STANDAARDAFWIJKING VAN 5 CENTIMETER WEERGEGEVEN. BIJ ONEINDIG VEEL METINGEN ZOU DEN ZE VOLGENS DE GROENE LIJN VERDEELD ZIJN. 32% VAN DE METINGEN VALT BUITEN HET INTERVAL $[-1\sigma, 1\sigma]$



De spreiding van de meetwaarden wordt gekarakteriseerd met de standaardafwijking σ (sigma), de afstand tussen de gemiddelde waarde μ (mu, in figuur 47 nul) en de buigpunten van de normale kansverdeling. In beide figuren is de standaardafwijking 5 centimeter. In het geval van een normale verdeling valt 68% van de 'waarnemingen' binnen 1σ van het gemiddelde μ . Het percentage van de meetwaarden dan binnen een bepaald interval valt (geïllustreerd met de blauwe lijnen in figuur 47), is als volgt:

$[\mu - 1\sigma, \mu + 1\sigma]$	68%
$[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$	95%
$[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$	99,7%

Als men als eis stelt dat waarnemingen maximaal een zekere afwijking mogen hebben, heeft men het in het algemeen over 3σ . Gebruikelijker is echter het gebruik van het begrip *standaardafwijking*, waarbij men zich dus moet realiseren dat 32% van de metingen erbuiten valt.

A.4 PRECISIE, STANDAARDAFWIJKING, NAUWKEURIGHEID EN BETROUWBAARHEID

Het begrip *precisie* wordt in het algemeen niet ondubbelzinnig gebruikt, laat staan het begrip *nauwkeurigheid*. Precisie wordt gedefinieerd (zie § A.10) als de spreiding van een stochastische grootte ten opzichte van het te verwachten gemiddelde; een maat voor de precisie van een enkele grootte is de standaardafwijking σ . Het begrip *nauwkeurigheid* wordt vaak in plaats van precisie gebruikt, maar in het vakgebied dat onder meer de statistiek van het waarnemen van geo-informatie bestudeert, de geodesie, is 'nauwkeurigheid' een overkoepelend begrip voor precisie en betrouwbaarheid. Betrouwbaarheid heeft te maken met de vraag of metingen controleerbaar zijn en of meetwaarden gevoelig zijn voor onontdekte fouten.

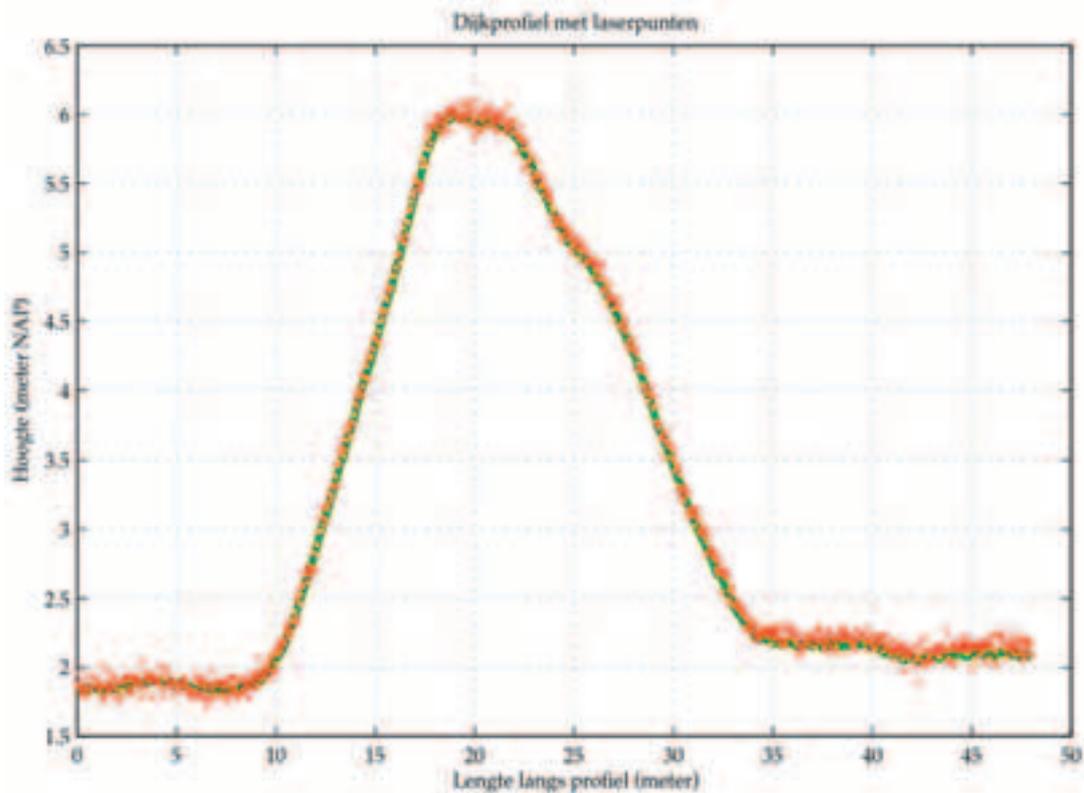
In § A.3 werd besproken hoe de standaardafwijking σ zich verhoudt tot de verdeling van meetwaarden met een stochastisch karakter. 32% van de waarschijnlijke meetwaarden overschrijdt de waarde σ . Om die reden wordt in bepaalde vakgebieden ook wel 2σ als 'nauw-

keurigheid' gebruikt. Daarnaast gebruikt men nog wel eens de term 'maximale fout', die zou kunnen wijzen op 3σ . Omwille van het voorkomen van spraakverwarring is het verstandig vaste definities te hanteren. In § A.10 worden deze geostatistische begrippen geodetisch verantwoord gedefinieerd en toegelicht.

A.5 ILLUSTRATIE: EEN DIJK GEMETEN MET LASERALTIMETRIE

Om enkele geostatistische begrippen te illustreren, is een 48 meter lang model gebouwd van een vier meter hoge dijk. Deze dijk is niet recht en glad: geprobeerd is hem een natuurlijk hobbelig karakter te geven.

FIGUUR 48 EEN MODEL VAN EEN WATERKERING OVER EEN 48 METER LANG PROFIEL MET EEN KUNSTMATIG GEGENEREERD HOBBELIG KARAKTER EN EEN HOOGTE VAN RUIM 4 METER. DE RODE PUNTEN ZIJN DE LASERMETINGEN VAN HET OPPERVLAK. ER WORDEN 20 PUNTEN PER METER GEMETEN EN DE STANDAARDAFWIJKING VAN DE HOOGTEMETING IS 5 CENTIMETER

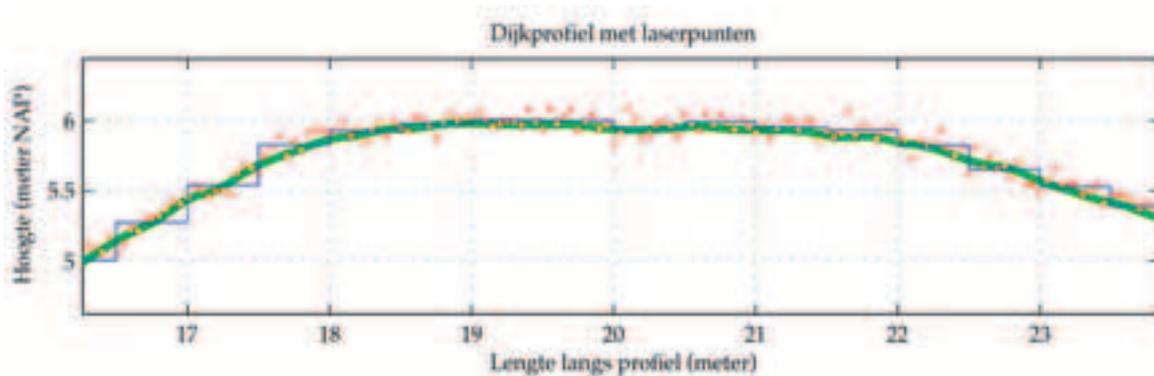


Deze dijk wordt gemeten met laseraltimetrie. In figuur 48 is een profiel getoond waarbij de laserpuntjes over de dijk getekend zijn. De hoogte-as is sterk uitgerekt. Er worden 20 punten per meter gemeten en de standaardafwijking van de hoogtemeting is 5 centimeter, precies de eis die in het kader van AHN-2 en WGL ook gesteld wordt.

Om een indruk te krijgen van de werkelijke spreiding van de laserpunten, is in figuur 49 de kruin weergegeven met gelijke assen in hoogte en in lengte langs het profiel. Te zien is dat de laserpunten zowel boven als onder het werkelijke oppervlak liggen, een gevolg van de standaardafwijking van de lasermetingen. De lasermetingen geven dus niet het werkelijke oppervlak weer.

FIGUUR 49

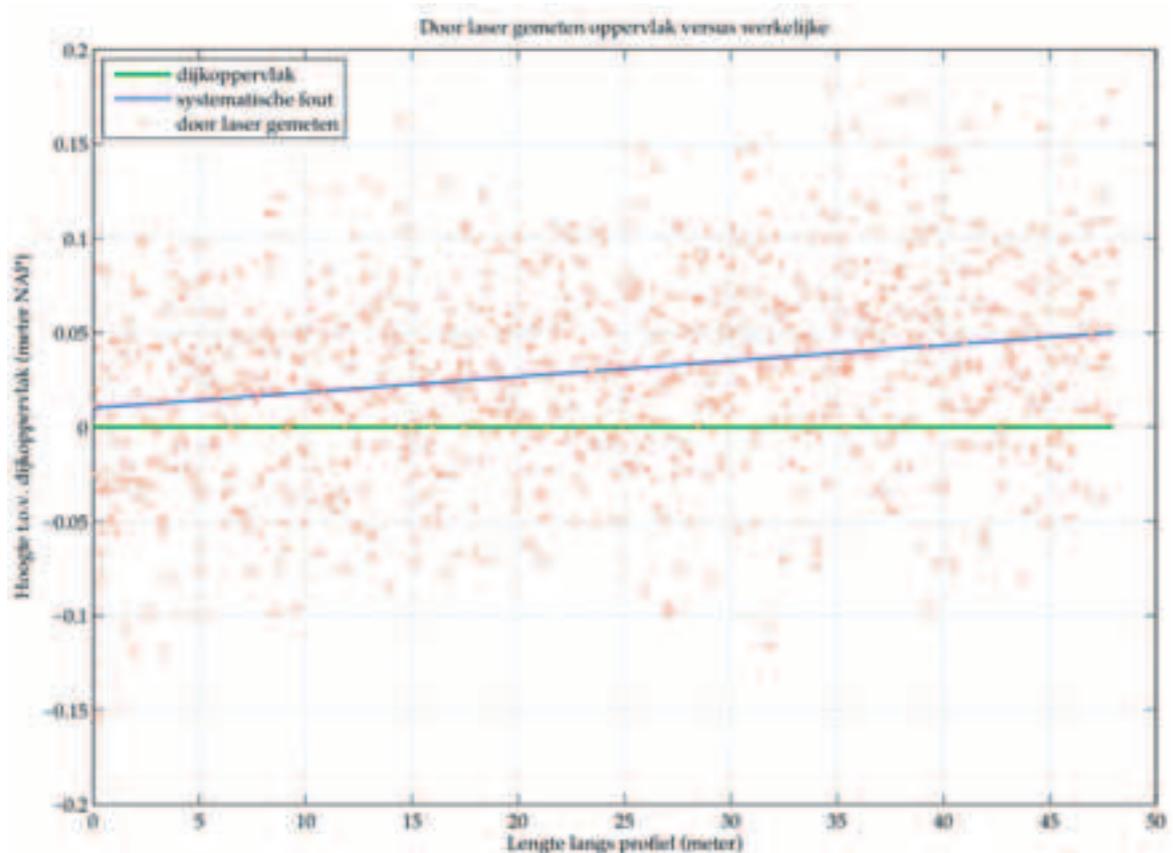
DE KRUIJN VAN HET DIJKMODEL MET GELIJKE ASSEN IN HOOGTE EN IN LENGTE LANGS HET PROFIEL. GROEN IS HET WERKELIJKE (HOBBELIGE) OPPERVLAK, ROOD ZIJN DE LASERPUNTEN. TE ZIEN IS DAT DE LASERPUNTEN ZOWEL BOVEN ALS ONDER HET WERKELIJKE OPPERVLAK LIGGEN, EEN GEVOLG VAN DE STANDAARDAFWIJKING VAN DE LASERMETINGEN. IN BLAUW IS HET UIT DE LASERMETINGEN BEREKENDE GEMIDDELDE HOOGTE PER RASTERCEL VAN 1 METER WEERGEGEVEN



Omdat het om een wiskundig model van het dijklichaam en de lasermetingen gaat, is het mogelijk de exacte hoogte van de dijk af te trekken van de lasermetingen (of beter gezegd: de lasermetingen zijn gesimuleerd door hun stochastisch gedrag op te tellen bij het exact bekende dijkmodel). Zie figuur 50. Nu is het, dankzij het gebruik van een model beter dan ooit in praktijk, mogelijk te zien wat het stochastisch karakter van de lasermetingen betekent. Zelfs als het terrein spiegelglad zou zijn (de groene lijn), geven de lasermetingen door hun beperkte precisie een puntenwolk te zien. Als deze in een histogram zouden worden getekend, zou een Gaussische curve te zien zijn zoals in figuur 47 (maar niet helemaal – zie § A.6).

Ook een stuk van het achterland wordt getoond. In figuur 51, ditmaal met de hoogte-as weer overdreven ten opzichte van de lengte-as, is te zien dat de laserpunten soms ver boven of onder het feitelijke maaiveld liggen. Hier wordt geïllustreerd dat de eis van een standaardafwijking van 5 cm niet betekent dat er geen individuele afwijkingen van bijna 20 cm kunnen voorkomen! Hetzelfde is zichtbaar in figuur 46, die niet voor niets met dezelfde standaardafwijking van 5 cm is gemaakt. De schutter mist de roos soms op 18 centimeter, ook al schiet hij met een standaardafwijking van 5 centimeter!

FIGUUR 50 DE LASERPUNTEN TEN OPZICHTE VAN HET (DOOR HET MODEL EXACT BEKENDE) TERREINOPPVLAK. ZE LATEN DE STOCHASTISCHE SPREIDING ZIEN EN DAARNAAST IS ZICHTBAAR DAT ZE MEER NAAR RECHTS NIET MEER GECENTREERD ZIJN ROND NUL: ER IS SPRAKE VAN EEN SYSTEMATISCHE FOUT



De figuren laten nog enige geostatistische verschijnselen zien, die in de volgende paragraaf aan bod komen.

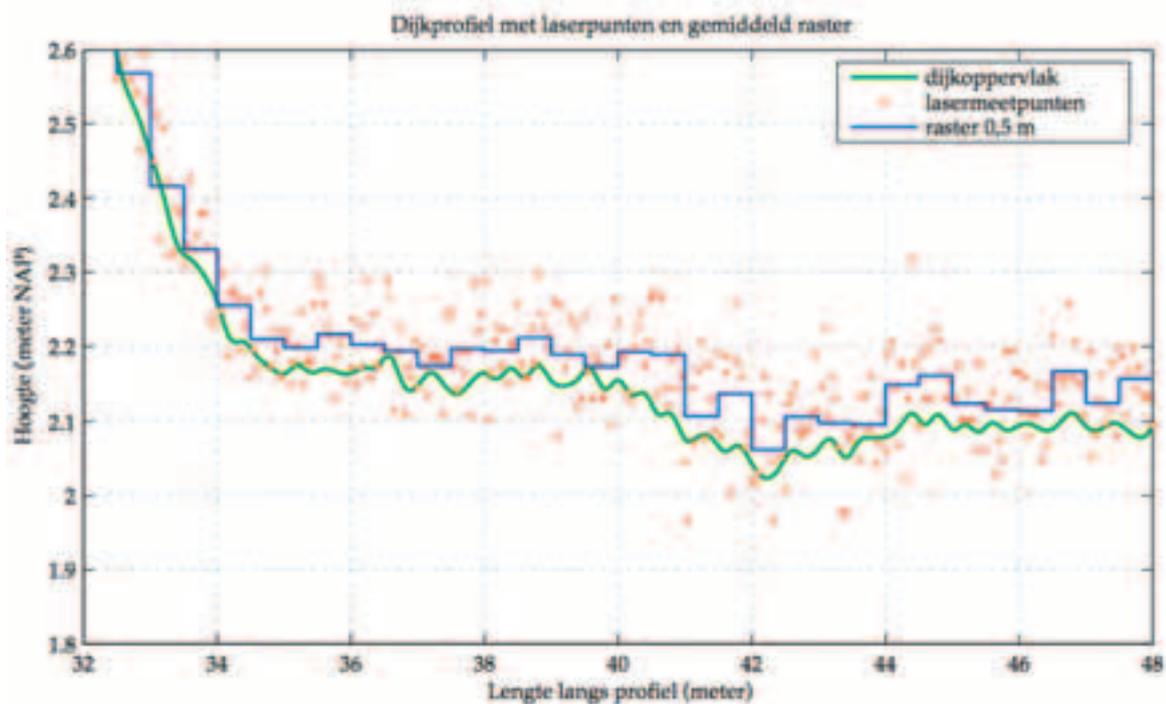
A.6 SYSTEMATISCHE VERSUS TOEVALLIGE FOUTEN

De onmogelijkheid om exacte metingen te doen leidt tot meetfouten. De lasermetingen die hierboven getoond werden, zijn behept met toevallige fouten. Deze toevallige fout heeft een standaardafwijking van 5 cm.

Dit is echter niet het enige type fout dat in de gesimuleerde lasermetingen in figuur 51 zit. Deze figuur laat zien dat er meer laserpunten boven dan onder het terreinoppervlak liggen. Als ze gemiddeld worden per halve meter (de blauwe trapjes) is duidelijk dat ze gemiddeld boven het oppervlak liggen. De metingen blijken behalve met de vanzelfsprekende toevallige fout, ook behept te zijn met een systematische fout. Dit zijn afwijkingen die een relatief lang-golvig of grootschalig verloop hebben en vaak door een functie kunnen worden beschreven.

FIGUUR 51

HET ACHTERLAND VAN DE DIJK LAAT DOOR DE STERK UITGEREKTE HOOGTE-AS DE HOBBLIGHEID VAN HET TERREIN ZIEN (GROEN). HET IS DIT TERREIN DAT DE LASER GEMETEN HEEFT, MAAR DE SPREIDING IS DUIDELIJK ZICHTBAAR (RODE PUNTEN). ALS EEN HOOGTERASTER WORDT BEREKEND DOOR DE PUNTEN OVER 0,5 METER TE MIDDELEN (BLAUW), WORDT ZICHTBAAR DAT ER SPRAKE IS VAN EEN SYSTEMATISCHE FOUT



In figuur 50 is dat ook al te zien. De lasermetingen lijken ten opzichte van het spiegelgladde terrein naar rechts steeds verder naar boven te gaan en ... omdat we het model zelf gebouwd hebben kunnen we bevestigen dat dit zo is. Bovenop de toevallige fout met een standaardafwijking van 5 cm is een systematische fout gesuperponeerd die van 1 cm aan de linkerkant van het profiel lineair oploopt tot 5 cm aan de rechterkant.

Een systematische fout in laseraltimetriedata is verre van denkbeeldig. Niet alleen kan er een constante fout ontstaan doordat de data onjuist aan het NAP is aangesloten, maar ook kan de positiebepaling met GPS weggelopen en kan het INS (inertieel navigatiesysteem) zorgen voor het weggelopen van de bepaling van de stand van het vliegtuig. Er is in die gevallen niet sprake van een constante fout, maar minimaal van een lineaire. Bij het koppelen van naast elkaar gevlogen stroken wordt dat bijvoorbeeld zichtbaar door een verschil tussen de stroken. Zelfs als deze vereffend worden, is nog steeds een grondige controle nodig. In het rapport van de Meetkundige Dienst G.B.M. Brand et al., *Precisiebeschrijving AHN 2002* [6] worden de verschillende bijdragen in de uiteindelijk precisie van een laseraltimetriebestand beschreven. Men onderscheidt maar liefst vijf foutsoorten. Zie daarnaast ook G.B.M. Brand et al., *AHN+ pilot. Kan het AHN nog beter?* [5]

Systematische fouten kunnen een stochastisch karakter hebben met een, vergeleken met de toevallige fout, veel langgolfiger karakter. In het algemeen zijn systematische fouten echter niet stochastisch. Daarom kan er in het algemeen ook geen eis in de vorm van een standaardafwijking aan gesteld worden, maar kan worden geëist dat het verschil met de werkelijkheid maximaal een zekere waarde heeft.

Het bovenstaande maakt duidelijk dat niet alleen een controle noodzakelijk is op de precisie van de laserpunten, maar ook op de systematische fouten die nog in de data kunnen zitten. Daarbij helpt het als bekend is waardoor de systematische fouten veroorzaakt worden,

immers, dan kan de functie waaraan de systematische fout voldoet geschat worden en kan hiervoor makkelijker worden gecorrigeerd, met een preciezer eindresultaat tot gevolg. (Over de aanpak van de controle zal de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie een apart document opstellen, waarbij mede gebruik gemaakt wordt van de door Rijkswaterstaat AGI ter beschikking gestelde documenten die daar voor de controle van laseraltimetrie zijn opgesteld.)

Het verschil tussen systematische en toevallige fouten is vooral belangrijk bij het gebruik van de gegevens. Als je de ligging van het maaiveld of het dijklichaam wilt weten ten opzichte van het maatgevend hoogwater, het polderpeil of wilt vergelijken met een eerder gemeten maaiveld of profiel, dan is de systematische afwijking belangrijk. Als je wilt weten of de kruin is gedaald ten opzichte van de teen, de kruin een inzinking laat zien of oude waterlopen of archeologische verschijnselen wilt opsporen, dan doet de systematische fout minder ter zake dan de toevallige fout.

A.7 IDEALISATIEPRECISIE

Bij het specificeren van de vereiste precisie van de hoogte is het verstandig het begrip idealisatieprecisie in het achterhoofd te houden. Als een individuele hoogtemeting op de kruin een standaardafwijking van 5 cm heeft, maar de kruin een zekere hobbeligheid vertoont, bijvoorbeeld een (moeilijk zichtbaar) licht glooiend verloop van 25 cm of individuele graspolen van 10 cm (niet vreemd voor grasbekleding), dan is het onzin vast te houden aan de eis van een standaardafwijking van 5 cm. Het oppervlak wordt ten onrechte als 'vlak' met een standaardafwijking van 5 cm geïdealiseerd als dat wel zou gebeuren.

Dit wordt geïllustreerd in figuur 51. Doordat de hoogte-as is uitgerekt, zijn de hobbels in het terrein goed zichtbaar. Bij de beschouwing van de laserdata dient men zich dus te realiseren dat een deel van de spreiding afkomstig is van de hobbeligheid van het terrein en dus de werkelijkheid weerspiegelt.

A.8 MIDDELEN VAN LASERDATA TOT EEN RASTER

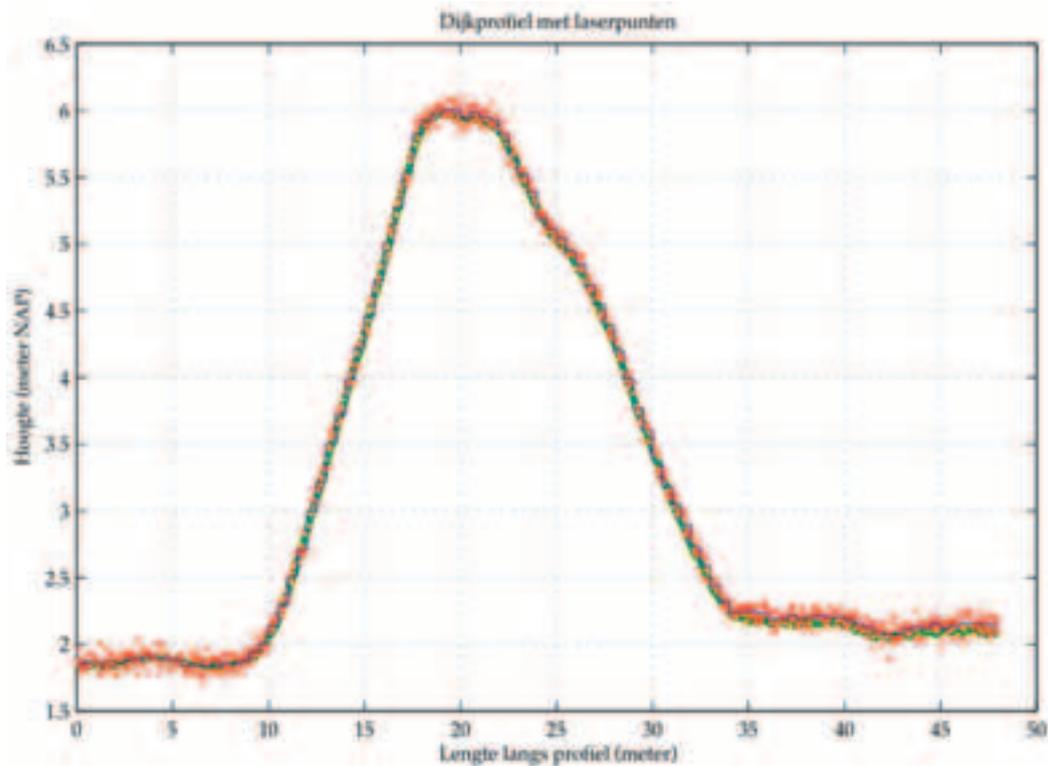
Het werken met de ruwe laserpunten is om meerdere redenen niet handig. Door de data te middelen naar één hoogtewaarde per rastercel kan een makkelijk aan de systemen aan te bieden regelmatig raster worden berekend. Dit reduceert ook de hoeveelheid data aanzienlijk. Belangrijk is dat door middeling de precisie verbetert. Als n waarden worden gemiddeld, neemt de precisie met \sqrt{n} toe. In het voorbeeld hierboven: worden 10 laserpunten met een standaardafwijking van 5 cm gemiddeld naar een raster van een halve meter, dan is in principe de hoogte daarvan met een standaardafwijking van 1,6 cm bekend.

Men moet echter wel in het achterhoofd houden dat deze verbetering alleen geldt als dezelfde grootte wordt gemeten. Zowel door de hobbeligheid van het terrein als in het geval gemeten wordt op een talud, representeert de gemiddelde waarde niet zo precies de terreinhoogte als zojuist berekend. Dat laten de blauwe trapjes in figuur 52 en in het detail in figuur 51 duidelijk zien.

Daarnaast laat figuur 51 goed zien dat het stochastische karakter zelfs bij middeling van 10 waarden nog steeds kan leiden tot een waarde die het terreinverloop minder goed weergeeft. Sommige blauwe hoogtgemiddelden gaan omhoog, terwijl het terrein toch echt omhoog gaat. De metingen aan het teruggekaatste lasersignaal lagen toevallig grotendeels aan één kant van de spreiding.

FIGUUR 52

HET DIJKMODEL UIT FIGUUR 48, MET DAARBIJ DE OVER 0,5 METER GEMIDDELDE LASERPUNTEN. DIT LEIDT TOT HET BLAUWE GETRAPTE HOOGTEMODEL



A.9 PRECISIE IN LIGGING

Naast de precisie van de hoogte (z), is ook de precisie in de bepaling van de ligging van wat gemeten is belangrijk: de planimetrie (x, y). Net als bij de hoogteprecisie kan hierbij onderscheid gemaakt worden tussen een systematische fout en een stochastische fout. Deze laatste is in het algemeen nauwelijks te bepalen. De individuele laserpunten hebben een zekere plaatsbepalingsfout die buitengewoon lastig te bepalen is. In het algemeen gaat het bij ligging echter om de precisie in de bepaling van de ligging van langgerekte structuren en daarbij middelt de stochastische fout uit. Dit geldt bijvoorbeeld bij de bepaling van een kniklijn als de kruinlijn. De bepaling van de ligging daarvan kan behept zijn met een systematische fout. Deze systematische fout is in het algemeen niet normaal verdeeld en derhalve kan men er niet over spreken in termen van standaardafwijking. Aan de andere kant kan men van een groot aantal objecten de fout in ligging controleren met bijvoorbeeld terrestrische metingen en van de zo bepaalde lijst verschillen een standaardafwijking bepalen. Dit is een nuttige benadering. In het algemeen specificeert men de maximale planimetrische fout, die op soortgelijke wijze bepaald kan worden, zonder dat daarvoor een normale verdeling noodzakelijk is.

In het algemeen kan een hoge precisie in planimetrie alleen worden behaald met controlepunten in het terrein: stand- en plaatsbepaling met INS en GPS is daarvoor niet voldoende.

De planimetrische precisie kan ook worden uitgedrukt in de relatieve precisie. Dit is het geval bij de GBKN. Het gaat daarbij om de precisie in de bepaling van de ligging van twee objecten ten opzichte van elkaar, dus niet in absolute zin. De GBKN specificeert geen absolute precisie. De genoemde relatieve precisie is gebaseerd op het verschil in bepaling van twee locaties. Als de bepaling van de ligging van elke locatie behept is met een toevallige fout van 20 cm, is de relatieve precisie in ligging $\sqrt{2}$ maal zo groot, dus 28 cm, zoals in het geval van de GBKN voor het stedelijk gebied.

A.10 KWALITEITSBEGRIPPEN

De hierboven genoemde geostatistische begrippen worden als volgt gedefinieerd. Bij de definities is gebruikgemaakt van het *Kwaliteitsbegrippenhandboek* [7] en ook de *Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster* (HTW) [12] is geraadpleegd, maar de toelichting is op sommige punten specifiek of uitgebreider.

BETROUWBAARHEID

Controleerbaarheid van metingen (of gegevens in een dataset) en de gevoeligheid van het eindproduct voor onontdekte fouten.

FOUT

Het verschil tussen een gemeten waarde en de werkelijke waarde.

KWALITEIT

Het geheel van de navolgende begrippen die van toepassing zijn op de kwaliteitsbeschrijving van een product.

NAUWKEURIGHEID

Een overkoepelend begrip voor het totaal van precisie en betrouwbaarheid. Het is dus een begrip en niet zozeer één kwantificeerbare grootte.

NORMALE VERDELING

Veel waarden met een toevals- of stochastisch karakter hebben de zogenaamde normale verdeling of verdeling van Gauss-Laplace. Door een waarde heel vaak te meten ontstaat een piek rond de gemiddelde waarde, maar er worden ook waarden gemeten aan weerszijden van dit gemiddelde. Zie figuur 47 en § A.3. De normale verdeling laat zich beschrijven door,

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right),$$

waarbij μ de gemiddelde waarde en σ de standaardafwijking van de meetwaarde x is.

ONZEKERHEID

Niet gebruiken.

PRECISIE

Spreading van een stochastische grootte ten opzichte van het te verwachten gemiddelde, bijvoorbeeld de gevoeligheid van een resultaat voor toevallige afwijkingen (bijvoorbeeld als gevolg van meetruis) in de waarnemingsgrootheden. De precisie wordt beschreven door een covariantiematrix. Een maat voor de precisie van een enkele grootte is de standaardafwijking σ .

RELATIEVE PRECISIE

De precisie van stochastische grootheden ten opzichte van elkaar, bijvoorbeeld de precisie in de bepaling van de onderlinge ligging van meetpunten. Dit is niet hetzelfde als de toevallige fout: die beschrijft maar één punt. De GBKN hanteert het begrip relatieve precisie om de precisie van de ligging van twee punten ten opzichte van elkaar te beschrijven. De relatieve precisie is te beschouwen als de precisie in de afstand oftewel het liggingsverschil tussen twee punten. Als de ligging van beide punten afzonderlijk een precisie heeft van σ , is de relatieve

precisie daarom $(\sqrt{2})\sigma$. Wat de relatieve precisie met de toevallige fout gemeen heeft, is dat de systematische fout buiten beschouwing blijft.

RESIDU

Verskil tussen een gemeten waarde en een berekende waarde.

ROOT MEAN SQUARE

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}{n}}$$

Spreidingsmaat. RMS is de spreiding ten opzichte van een bepaalde gekozen waarde x_0 (synoniem: kwadratisch gemiddelde).

STANDAARDAFWIJKING

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

Spreidingsmaat. De standaardafwijking σ (synoniem: standaarddeviatie) is de spreiding ten opzichte van het gemiddelde \bar{x} . Het is een maat voor de precisie van een enkele grootheid. De variantie is σ^2 .

STOCHASTISCH KARAKTER

Als uit een reeks meetwaarden de grove en systematische fouten worden verwijderd, resteert een reeks met een willekeurig of toevallig karakter. Dit is inherent aan het waarnemen of meten. De meetwaarden hebben een stochastisch karakter; ze zijn verdeeld volgens een kans- of waarschijnlijkheidsverdeling. De normale verdeling is een veel voorkomende kansverdeling (zie aldaar).

SYSTEMATISCHE FOUT

Systematische fouten zijn fouten die door een nader te bepalen functie kunnen worden beschreven.

TOETSING

Objectieve, rekenkundige beoordeling of waarnemingen voldoen aan het (mathematisch) model.

TOEVALLIGE (RANDOM) FOUT

Een fout waarvan de waarde statistisch onafhankelijk is van voorgaande of latere waarden.

VALIDATIE

Onafhankelijke controle van een waarde/resultaat.

VARIANTIE

Het kwadraat van de standaardafwijking.

VERWACHTINGSWAARDE

Een reeks meetwaarden centreert zich in het algemeen rond het midden van zijn kansverdeling: de verwachtingswaarde μ .

BIJLAGE B

BEGRIPPEN

In deze bijlage worden enige begrippen met betrekking tot geografische data toegelicht. Zie voor kwaliteitsbegrippen als precisie en systematische fout § A.10.

BEMONSTERINGSAFSTAND

Afstand tussen twee metingen van bijvoorbeeld de hoogte van een dijk of een profiel. Door het meten wordt de continue hoogte als het ware bemonsterd. Het doel van bemonsteren is het oorspronkelijke signaal vast te leggen en zo goed mogelijk te kunnen reconstrueren. In de waterkeringwereld roept ‘bemonsteren’ vooral associaties op met fysieke monsters van de ondergrond, vandaar dat het misschien beter is van *(meet)puntafstand* te spreken.

BEMONSTERINGSINTERVAL

Afstand in ruimte of tijd tussen twee metingen oftewel monsters van een continu signaal. Engels: *sampling distance* resp. *frequency*.

BILINEAIRE INTERPOLATIE

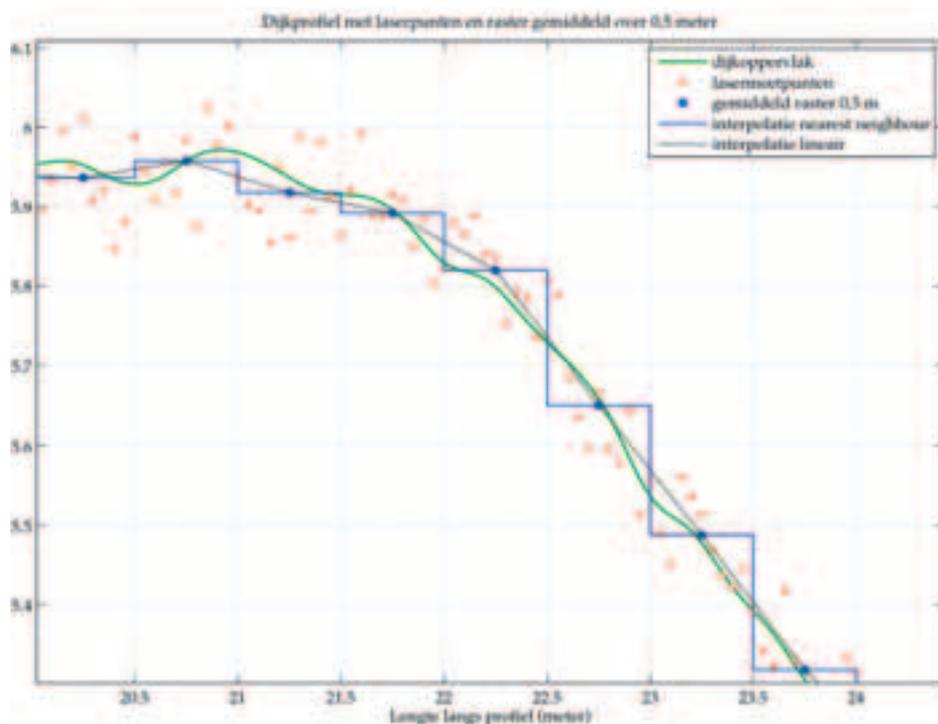
Als hoogtemetingen zijn gemiddeld naar een raster (met alle voordelen van dien, zie onder ‘middeling’), is er één hoogtewaarde per rastercel beschikbaar. Als de hoogte op een willekeurig punt moet worden berekend, moet daarvoor gekeken worden naar de omringende bekende hoogtewaarden. De hoogte kan geïnterpoleerd worden door te kijken naar de dichtstbijzijnde bekende waarde (‘nearest neighbour’), maar ook lineair worden geïnterpoleerd. Omdat het over interpolatie in twee dimensies gaat, spreekt men van *bilineaire* interpolatie. (Er bestaat overigens ook nog *bicubische* interpolatie.)

In figuur 53 zijn 20 laserpunten per meter gemiddeld naar een raster van 50 cm. Per 50 cm is één hoogte beschikbaar (de blauwe bolletjes). Voor een hoogte op een willekeurige plek zou men kunnen kijken naar de dichtstbijzijnde bekende waarde. Daardoor suggereer je niet meer informatie dan er feitelijk is. Deze nearest neighbour-interpolatie komt feitelijk neer op het maken van een hoogtemodel met trapjes: de blauwe lijn in figuur 53. Voor de rasterdata is echter de originele data gebruikt en die lag op een helling, dus het is aannemelijk voor de hoogte op een willekeurig punt de waarde te nemen lineair tussen de beide rasterhoogtewaarden in: lineaire interpolatie (de zwarte lijn).

Bij laserdata gaat het om data in het vlak, terwijl figuur 53 ter demonstratie in één dimensie was. Daarom spreekt men over bilineaire interpolatie in plaats van lineaire interpolatie. De werkwijze is analoog aan het berekenen van het hoogteraster uit de originele data, zoals in figuur 54.

FIGUUR 53

HET DIJKOPPERVLAK IS IN DE FIGUUR GEMETEN MET 20 LASERPUNTEN PER METER, MET ELK EEN STANDAARDAFWIJKING VAN 5 CM. DEZE WORDEN PER 0,5 METER GEMIDDELD, WAARDOOR EEN HOOGTERASTER ONTSTAAT. VOOR DE HOOGTE TUSSEN DEZE RASTERPUNTEN IN KAN MEN DE DICHTSTBIJZIJNDE BEKENDE WAARDE NEMEN (NEAREST BEIGHBOUR) OF LINEAIR INTERPOLEREN



GRID

Engelse term voor raster.

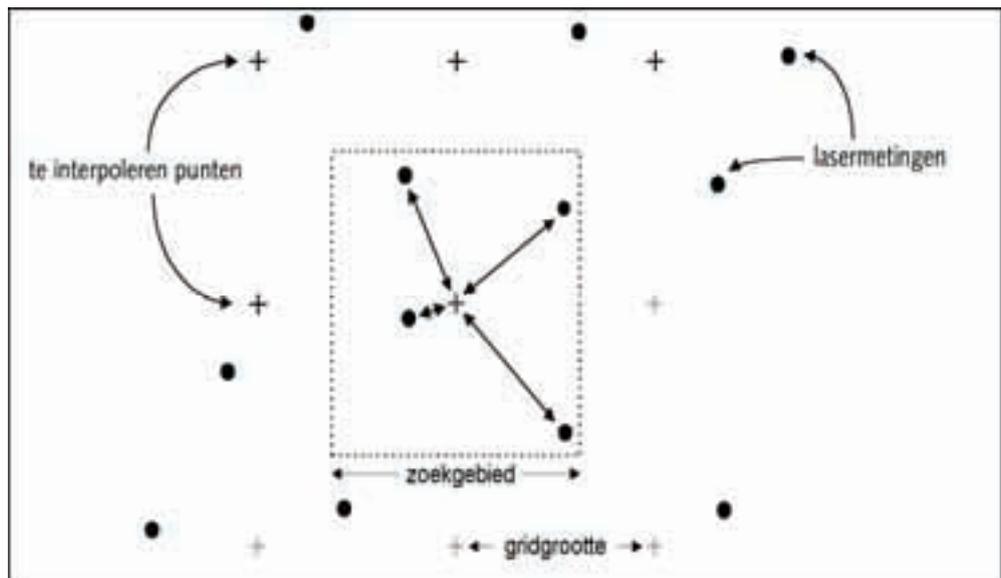
HERBEMONSTEREN

Het berekenen van een raster met zekere rastergrootte uit een raster met een andere rastergrootte. De rastergrootte is feitelijk de bemonsteringsafstand. Als het gaat om het berekenen van een raster uit onregelmatig verspreide data, spreekt men eerder van interpoleren.

MIDDELING (VOOR DE BEREKENING VAN EEN RASTERBESTAND)

De ruwe lasermeetpunten liggen niet op een raster, maar onregelmatig, en het zijn er vele per vierkante meter. Hieruit kan door middeling voor elk punt van een regelmatig raster een gemiddelde hoogte worden berekend. Zie figuur 53 en figuur 54. De invloed van de puntruïsvorm wordt verminderd hierdoor. De middeling vindt op een geavanceerde manier plaats, waarbij onder meer wordt gewogen met de afstand van een laserpunt tot het midden van de rastercel. Zie bijvoorbeeld § 2.3.1 in R.M. van Heerd et al., *Productspecificatie AHN 2000* [9].

FIGUUR 54 DE LASERPUNTEN (ZWARTE BOLLETJES) WORDEN GEÏNTERPOLEERD NAAR EEN RASTER OF GRID (DE KRUISJES) DOOR EEN MIDDELING DIE GEWOGEN IS MET HUN AFSTAND TOT HET RASTERPUNT (© RIJKSWATERSTAAT AGI)



NADIRFOTO

Foto die gemaakt wordt naar het voetpunt of nadir, in dit rapport vanuit een vliegtuig of helikopter. Zie bijvoorbeeld figuur 55. De foto wordt weliswaar naar beneden genomen, maar het is nog niet mogelijk erin te meten. Daarvoor moet het beeld georthorectificeerd worden. Zie aldaar.

FIGUUR 55 EEN OPTISCH BEELD RECHT NAAR HET VOETPUNT (NADIR) GENOMEN. OBJECTEN MET EEN ZEKERE HOOGTE AAN DE RANDEN VAN HET BEELD VERTONEN OMVALLING (© FUGRO INPARK)



FIGUUR 56

OMVALLING EN 'TRUE ORTHO'. LINKS: DOORDAT NIET LOODRECHT NAAR BENEDEN GEKEKEN WORDT, VALLEN GEBOUWEN OM IN DE KIJKRICHTING. GEOGRAFISCH LIGGEN DAK EN PLINT OP HETZELFDE PUNT, MAAR IN HET BEELD VERSCHUIFT HET DAK. DIT KAN OP DEZELFDE MANIER WORDEN GECORRIGEERD ALS TERREINVERTEKENINGEN (ORTHORECTIFICATIE), MAAR DAARVOOR ZIJN HOOGTEGEVENS VAN DE BEBOUWING NODIG EN BOVENDIEN BEELDINFORMATIE VAN HET AFGEDEKTE STUK TERREIN. HET RESULTAAT IS HET BEELD RECHTS. (© K. YAMADA EN M. ODA, JAPAN)



NEAREST-NEIGHBOURINTERPOLATIE

Interpolatie waarbij de dichtbijzijnde bekende waarde wordt genomen. Zie bij bilineaire interpolatie.

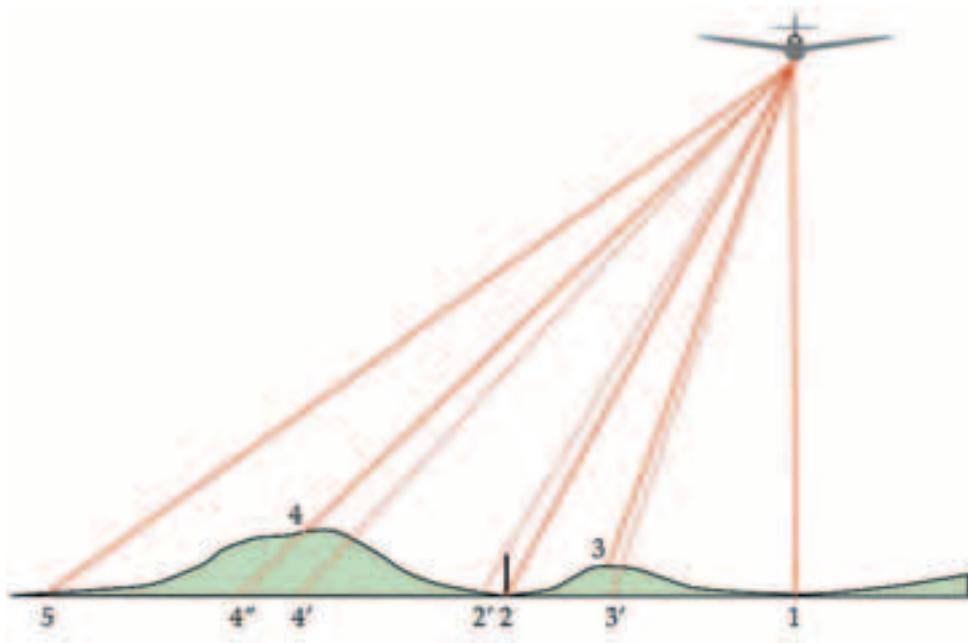
OMVALLING

Het verschijnsel dat objecten die boven het terrein uitsteken, zoals bebouwing, een verplaatsing naar de buitenkant van het beeld krijgen, doordat er vanuit het camerastandpunt schuin tegenaan gekeken wordt. In figuur 57 is steekt punt 2 boven het terrein uit. Door de schuine kijkhoek komt hij in het beeld op dezelfde plek terecht als een punt dat op het terrein op punt 2' ligt. Het stuk tussen 2 en 2' wordt door het object afgedekt. In een foto ligt de dakgoot niet boven de plint van een huis, maar is verschoven, hetgeen de interpretatie van de foto's bemoeilijkt. In figuur 55 is dit enigszins te zien, in figuur 56 in sterke mate.

Omvalling is te beperken door een grote vlieghoogte en een smalle vliegstrook, wat in het algemeen het beeld duurder maakt. Omvalling is te corrigeren door het vervaardigen van een 'true orthofoto'. Bij orthorectificatie (zie aldaar) wordt de plint met behulp van een terreinmodel op de juiste geografische locatie in het beeld geplaatst, maar de dakgoot schuift mee. Alleen als voor de dakgoot een aparte correctie wordt gemaakt, doordat ook de hoogte van alle objecten bekend is, kan deze boven de plint worden afgebeeld. Men spreekt dan van 'true ortho'. Als het terrein dat achter het object schuil ging zichtbaar moet worden gemaakt, moet er een extra beeld beschikbaar zijn dat vanuit een andere positie is genomen. Dit wordt geïllustreerd in figuur 56.

FIGUUR 57

OMVALLING EN ORTHORECTIFICATIE. ZIE DE TOELICHTING BIJ DIE BEGRIPPEN



ORTHOFOTO

Foto die gecorrigeerd is voor verplaatsingen als gevolg van het camerastandpunt en hoogteverschillen. Een orthofoto bevindt zich in een geografisch coördinatenstelsel en kan zonder problemen over een kaart of geografische data gelegd worden (in een GIS bijvoorbeeld).

Foto's (vrijwel) recht naar beneden genomen (nadirfoto's) zijn nog geen orthofoto's. Niet alleen moeten ze eerst in het coördinatenstelsel gebracht worden, ook bevatten ze vertekeningen. Zie figuur 57. Objecten die niet pal onder het vliegtuig liggen worden vanuit het camerastandpunt schuin bekeken. Als het terrein niet vlak is, betekent dat dat ze zich op de fotografische plaat naar binnen (als ze relatief laag liggen) of buiten (als ze relatief hoog liggen) verplaatsen. De punten 1, 2 en 5 in figuur 57 komen in de foto op de plek waar ze horen. Punt 4 ligt hoger dan 1, 2 en 5 en wordt daarom afgebeeld in de richting van de zichtlijn: op 4'', terwijl zijn geografische positie 4' is. De verplaatsing wordt groter naarmate het punt verder naar de rand van het beeld ligt.

Uit een nadirfoto kan een orthofoto worden vervaardigd door voor elk punt een correctie toe te passen voor de hoogte van het terrein. Als de terreinhoogte van punt 4 bekend is, kan een verschuiving worden toegepast zodat het punt in plaats van op 4'' op 4' terecht komt. In figuur 58 is dit gebeurd met figuur 55. In het algemeen wordt het beeld vervolgens nog in een geografisch coördinatenstelsel gebracht, waardoor het in bijvoorbeeld een GIS onder andere data kan worden gelegd. Het beeld in figuur 58 is gedraaid om de bovenkant naar het noorden te laten wijzen.

ORTHOFOTOMOZAÏEK

Een tot een oppervlak 'aan elkaar geplakte' reeks orthofoto's. De orthofoto's moeten daarbij ook radiometrisch en op kleur gecorrigeerd zijn om geen scheidingslijnen en kleurverschillen te zien.

ORTHORECTIFICATIE

Het proces om uit nadirfoto's en een terrein- of hoogtemodel orthofoto's te berekenen; zie aldaar.

FIGUUR 58

DE FOTO UIT FIGUUR 55 IS HIER GEORTHORECTIFICEERD. ALLE PUNTEN ZIJN VOOR DE VERPLAATSING ALS GEVOLG VAN DE TERREINHOOGTE EN DE ZICHTLIJN GECORRIGEERD. DIT HEEFT TOT GEVOLG DAT ER GATEN VALLEN IN HET BEELD. DAARNAAST IS HET BEELD OP HET NOORDEN GERICHT. (© FUGRO INPARK)



PLANIMETRIE

Betreffende het vlak: x en y, in tegenstelling tot de hoogte z. De planimetrische precisie is bijvoorbeeld de precisie in de bepaling van de ligging in x en y.

RASTER

Een verdeling van een oppervlak in punten die op gelijke afstand liggen. Engels: grid. Equidistant raster: de punten hebben in beide coördinaatrichtingen dezelfde afstand.

RESAMPLING

Engelse term voor herbemonsteren. Zie aldaar.

BIJLAGE C

GESPREKSVERSLAGEN VOORSCHRIFT TOETSEN OP VEILIGHEID

Ter verificatie van de analyse van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid in hoofdstuk 3, waar gepoogd werd uit de VTV criteria voor de bepaling van de hoogte af te leiden, zijn gesprekken gevoerd met Carlo Langelaan en Peter Blommaart van Rijkswaterstaat DWW. Een samenvatting daarvan is hieronder opgenomen.

C.1 OPMERKINGEN CARLO LANGELAAN

Op 18 april 2007 sprak Rens Swart met Carlo Langelaan, projectleider afdeling veiligheid hoogwater van DWW. Hij had het concept van hoofdstuk 3 globaal gezien. In het gesprek kwamen we op de volgende punten.

De sterkte van waterkeringen hangt van veel zaken af en elk daarvan is behept met een, soms forse, onzekerheid. Een van de belangrijkste daarvan is af te leiden uit de uitspraak: "het blijft grond". Het gedrag van grond hangt van de precieze samenstelling op een zekere locatie af en die wordt in praktijk geschematiseerd en vereenvoudigd, wat alleen al gezien de onduidelijkheid over de opbouw van de waterkering niet te vermijden is. Het ontwerp van waterkeringen is vaak onbekend omdat ze oud zijn of tekeningen zijn weggegooid en sonderingen kunnen dat maar ten dele goedmaken.

De onzekerheid over de uitgangspunten van de toetsing heeft ook organisatorische en financiële gevolgen, immers, als er werkelijk dijkverbetering noodzakelijk blijkt, financiert het Rijk die, terwijl de waterschappen de ingrepen die vallen onder beheer en onderhoud zelf betalen.

De toetsing hangt van talloze aannamen aan elkaar en wie controleert die? Zaken als deskundigheid en onwetendheid spelen een belangrijke rol en vragen als "waar zitten de risico's?", "hoe zijn de data ingezameld?" en "snap je wat je aan het doen bent?" zou iedereen die zich met waterkeringen bezig houdt zich regelmatig moeten stellen.

De 'andere kant van de balans', zoals dat in § 3.11 genoemd werd, de hydraulische randvoorwaarden, zijn op een decimeter gegeven. Dat zegt iets over de precisie waarmee de waterkeringhoogte getoetst moet worden. Voor rivieren is deze decimeter aardig, maar voor de Zeeuwse eilanden en de Noordzee kan de precisie eerder op 20 cm gesteld worden, terwijl er voor de Waddenzee nog meer onduidelijkheid is. Het grote project Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) en een grote meetcampagne moeten hierover meer kennis verschaffen.

Met al deze onzekerheden gaat men om door een halve meter op de mogelijk noodzakelijke waterkeringhoogte te leggen. Het begrip kruinhoogtemarge, of waakhoogte zoals dat met een iets andere definitie in de vorige toetsronde heette, is dan ook normaliter 50 cm en voor rivieren 30 cm.

Zetting en klink maken weliswaar, zoals in § 3 is opgemerkt, de hoogtebepaling onzekerder, maar zijn langzame en goed bekende processen. De waterkeringbeheerders in bijvoorbeeld veenweidegebieden die hiermee te maken hebben, zijn goed in staat deze te schatten. Het werken met een peildatum geeft dan ook weinig extra onzekerheid.

De peildatum van 1 januari 2006 is erop gericht op één moment de Tweede Kamer te kunnen informeren over de staat van de primaire waterkeringen in Nederland. Waterkeringbeheerders hebben vijf jaar de tijd om de toetsing via extrapolatie naar die datum uit te voeren.

Dat er veel onzekerheden in het gedrag van waterkeringen, de hoogtebepaling en de toetsing zitten is dus duidelijk. Maar inderdaad, zoals in § 3.3 werd opgemerkt, is de benadering nog vrijwel volledig deterministisch. Professor Han Vrijling (TU Delft) legt de nadruk op probabilistisch toetsen. Ook Veiligheid Nederland in Kaart (VNK-2) is eerder probabilistisch omdat men werkt met risico's als product van kans en gevolg. Dit zal de toekomst zijn.

Terecht wordt er volgens Langelaan in § 3.10 de nadruk op gelegd dat het talud (en de taludhelling) een grote rol speelt. Daarnaast is de onderverdeling in secties interessant.

We probeerden vervolgens de getallen uit het bovenstaande stuk te verifiëren. De precisie van 0,10 meter voor de kruinhoogte onderschrijft Carlo. Voor wat betreft de ruimtelijke spreiding langs de kruin denkt hij eerder aan 0,50 meter dan aan 1,0 meter. Voor wat betreft de ruimtelijke spreiding dwars op de dijk lijkt 0,50 meter Carlo zeker te gering; denk eerder aan 0,25 (of 0,2) meter. De voor de toetsing te maken opdeling van de waterkering in secties moet wat Carlo betreft tot op de meter geschieden.

Toen Langelaan na het gesprek het stuk nog beter gelezen had, merkte hij op dat hij “geen onvolkomenheden in het stuk kon ontdekken”, afgezien van wat we bespraken, maar “dat het goed is wanneer meer specialisten uit beide vakgebieden nog eens kritisch naar de notitie kijken.”

C.2 OPMERKINGEN PETER BLOMMAART

Rens Swart had op 18 april 2007 een kort gesprek met Peter Blommaart (projectleider VTV en opdrachtgever van het programma Verbetering Inspectie Waterkeringen), waarin de geometrische eisen met betrekking tot de toetsing en hoogtemetingen ter sprake kwamen.

Blommaart denkt in de eerste plaats deterministisch. Hij gebruikt de begrippen precisie en nauwkeurigheid op een niet-geodetische manier en denkt bij nauwkeurigheid uiteindelijk aan het aantal cijfers achter de komma. Die benadering lijkt voor dit doel te grof; Rens Swart adviseert de geostatistische definities te hanteren zoals in bijlage A beschreven.

De vraag naar de gewenste criteria voor precisie en ruimtelijke spreiding, beantwoordde Blommaart met de wedervraag “hoe precies kun je het leveren?” Dat is nu precies de benadering die Swart niet verstandig vindt. We moeten juist proberen om de werkelijke (beredeneerde) behoefte op de eerste plaats te stellen. Blommaart heeft echter een reden zijn precisiewens zo te formuleren: het kost al de grootste moeite om de hydraulische randvoorwaarden op een decimeter nauwkeurig te kunnen formuleren, laten we dan de precisie maar halen uit de metingen waarmee je het toetspeil confronteert. Als het op een centimeter kan, doe dat dan. Uiteindelijk kwam hij op een precisie van 5 centimeter in z én x en y.

BIJLAGE D

ANALYSE VAN BESTAANDE BESTEKKEN

D.1 INLEIDING

In deze bijlage worden in § D.2 enige indrukken van het bestek voor het AHN-2-proefproject voor het Waterschap Zeeuwse Eilanden geschetst. In § D.3 worden de bestekken en andere documenten zoals die door aan de WGL deelnemende waterschappen zijn verstrekt van commentaar voorzien.

De volgende documenten zijn gebruikt:

- Stuurgroep AHN: Projectbestek AHN-2 WZE. Bijlage 1: Specificaties hoogtegegevens; bijlage 2: Kwaliteitscontrole en -borging opdrachtnemer, januari 2007 [14 in de referentielijst in bijlage I]
- Erik Bongaards, *Werkomschrijving project Inmeten waterkeringen* (bestek), Hoogheemraadschap van Rijnland, juli 2005
- *Aanbestedingsdocument Europese aanbesteding Opname waterkeringen Nr. 2005/S 190 – 187464 Waterschap Rivierenland*, Waterschap Rivierenland, september 2005
- Marten Westerink, *Werkboek FLI-MAP*, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, april 2007 [17 in de referentielijst in bijlage I]
- F.G. van Zwol, *Gegevensinwinning waterkeringen. Programma van eisen*, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, december 2004
- M. Duiveman en L. Harmsen, *Bestek Gegevensinwinning en 3D karteren van de waterkeringen*, Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier, november 2006
- Arcadis, *Vergelijkingsonderzoek datainwinning laseraltimetrie vs terrestrisch meten*, Wetterskip Fryslân, maart 2006 [2 in de referentielijst in bijlage I]
- M. Bruins Slot en S.J. Flos, *Conceptbestek inwinning hoogtegegevens pilotgebied Wymbritseradiel*, Wetterskip Fryslân, november 2006

D.2 ENIGE OPMERKINGEN OVER HET BESTEK VAN AHN-2 VERSUS DAT VAN DE WATERSCHAPPEN**D.2.1 BIJPRODUCTEN: FOTO EN VIDEO**

Waterschappen hebben de potentie van tegelijk mee opgenomen fotografische opnames ontdekt. Deze lijken cruciaal voor de werkprocessen geworden, met name voor interpretatie, beheer en vergunningverlening.

- 1 De AHN-2-specificatie is op dit punt nogal vrijblijvend. “Het heeft een zeer grote voorkeur om digitale luchtopnamen tegelijkertijd met de laserhoogtemetingen in te winnen.” Ze hoeven echter niet georthorectificeerd geleverd te worden.
- 2 De resolutie van de digitale fotobeelden komt dan ook niet in de specificatie voor.
- 3 Over video-opnamen en digitale foto’s neerwaarts of voorwaarts meldt de specificatie niets.

Mogelijk kan het vervaardigen van een gebiedsdekkend (meer dan waterkeringdekkend) (ortho)fotobestand weliswaar enerzijds grote potentie voor waterschappen hebben, maar anderzijds grote gevolgen met zich meebrengen:

- 1 Omdat het AHN landsdekkend is, zou er ook een landsdekkend fotobestand met zeer hoge resolutie ontstaan.

- 2 Dit heeft grote commerciële gevolgen, bijvoorbeeld voor aanbieders van orthofotomozaïeken en landsdekkende satellietbeelden.
- 3 Voor alle klanten heeft het grote gevolgen op het gebied van verwerkings-, opslag- en netwerkcapaciteit, gezien de enorme omvang.

D.2.2 'RUWHEID' VAN HET BESTAND

De AHN-2-proef levert een aantal rasterbestanden (0,5 x 0,5, 1 x 1, 5 x 5 m). Daarnaast wordt de ruwe data geleverd, zowel gefilterd als ongefilterd (de te leveren controlebestanden (o.a. dichtheidsbestand) laat ik hier buiten beschouwing). Dit betekent dat waterschappen weliswaar de waardevolle ruwe data verkrijgen, maar dat zij deze zelf verder zullen moeten 'raffineren'. Dit vergt veel capaciteit en kennis. Fugro heeft voor Rivierenland een extra product op basis van het ruwe bestand gemaakt: op basis van hoogte en intensiteit van de reflectie wordt gekarteerd in geclassificeerde vlakken. Dit is vrijwel onmogelijk op basis van de rasterbestanden en op basis van de ruwe bestanden vergt het van de gebruiker een grote investering.

D.2.3 CONTROLE

De controle van het AHN bij Rijkswaterstaat AGI is zeer intensief, zeer goed gespecificeerd en onderbouwd en geldt het volledige areaal. Getracht is dit bij de AHN-2-proef zoveel mogelijk door de aannemer zelf te laten doen. Dit is daarom ook zeer uitgebreid gespecificeerd. Het is niet eenvoudig te overzien of dit tot een even hoge kwaliteit leidt als de door Rijkswaterstaat AGI gecontroleerd bestanden.

De vraag is of waterschappen de aanbestedingen die zij zelf doen ook zo uitgebreid controleren. De indruk bestaat dat dit niet het geval is. Een opgegeven precisie van 5 cm is prachtig, maar wordt deze overal gehaald? Hoe zit het met de fouten door het verlopen van de traagheidsnavigatiesystemen? En hoe zit het met de strookoverlap en de dwarsstroken?

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden heeft in zijn *Werkboek FLI-MAP* [17] onder meer in §3.3 een uitgebreide evaluatie opgenomen van het in 2004 uitgevoerde project. Na beschrijving van een aantal problemen waarop men stuitte bij de vergelijking met door Ingenieursbureau BCC ingemeten profielen, merkt men op: "Conclusie: de interne datakwaliteitscontrole door Fugro zelf heeft kennelijk niet goed gewerkt. Alleen doordat HDSR zélf terrestrische meetpunten is gaan vergelijken is Fugro erachter gekomen dat een en ander niet klopte." Voor het opleveren van verschilgrids 2004-1999 waren sinds het inwinnen zelfs 34 maanden nodig. Ook op verschillende andere punten, bijvoorbeeld de geleverde objectkarteringen, blijkt een uitgebreide controle noodzakelijk, die bovendien niet te lang moet worden uitgesteld. Dit illustreert precies wat hierboven is opgemerkt.

Opgemerkt moet worden dat een bestand dat uit meerdere stroken bestaat meer fouten kan bevatten (of beter gezegd: de aanwezige fouten beter zichtbaar maakt, tenzij ze zijn wegvereffend, maar dat is een schijnverbetering) dan een opname met één strook. Opnamen van waterkeringen bevatten in het algemeen maar één strook.

D.2.4 INTERPOLATIE

De AHN-2-specificatie maakt veel werk van het te gebruiken interpolatie-algoritme. De merites daarvan zijn zo snel niet te beoordelen. Verondersteld mag worden dat dit ook geldt voor aanbestedende waterschappen. In geen enkel bestek van waterschappen worden aanwijzingen voor interpolatie en middeling gevonden.

D.2.5 MAAIVELDDALING

Het bepalen van maaiveldaling voor peilbesluiten is een zeer heikele kwestie. Ook Rijkswaterstaat AGI heeft daar naar gekeken en een (helaas niet uitgegeven) informatiebehoefteonderzoek naar gedaan. Is de data geschikt voor maaiveldalingbepalingen? Als het al kan, vergt het een zware statistische operatie. Bovendien moet men zich daarbij allerlei praktische en terreinsituaties voorstellen en zich niet blindstaren op statistiek, want dan komt men gegarandeerd van een koude kermis thuis. Vermoedelijk kan men beter inzetten op andere, deels nog te ontwikkelen, technieken inzetten.

D.3 ENIGE OPMERKINGEN OVER DE BESTEKKEN VAN DE DEELNEMENDE WATERSCHAPPEN

D.3.1 RIJNLAND

Naar aanleiding van het document *Werkomschrijving inmeten waterkeringen Hoogheemraadschap van Rijnland* ('bestek inmeten WK') zijn de volgende opmerkingen te maken.

- 1 Rijnland meldt wel een nauwkeurigheid van 5 cm, maar niet of dit relatief of absoluut is. Aangenomen mag worden dat met nauwkeurigheid de standaardafwijking mee bedoeld is. De precisie geldt zowel voor de ligging als de hoogte.
- 2 Onduidelijk is of de precisie geldt voor een individueel meetpunt of voor een rastercel. Een rastercel is het resultaat van een gemiddelde, dus is de precisie hoger.
- 3 Onverstandig lijkt het noemen van FLI-MAP Analyst als programmatuur waarmee de data en het beeldmateriaal moeten kunnen worden geraadpleegd. Dat is immers specifiek voor Fugro Inpark.
- 4 Niet helemaal duidelijk is of de ligging van de verschillende 'waterkeringstopografische lijnen' (buiten- en binnenkruinlijn, binnenteen) ook een precisie van 5 cm dient te hebben.
- 5 Er is geen sprake van filtering. Nergens is vermeld of en in hoeverre de hoogte die van het maaiveld moet betreffen en of en in hoeverre vegetatie, bebouwing en andere objecten moeten worden weggefilterd en of het maaiveld daar eventueel moet worden geïnterpoleerd.
- 6 Er wordt geselecteerd op opgegeven precisie. Nergens lijkt vermeld te worden hoe de opdrachtgever deze precisie controleert. Rijnland meldt dat het een ander bedrijf dan de aannemer van de laservlucht controlemetingen zal laten uitvoeren, maar op welke wijze wordt niet duidelijk. Ook de consequenties voor de aannemer blijven ongewis. De aannemer kan dus ook niet aangesproken worden op het niet voldoen aan de precisie of andere problemen met de data. Ook wordt de aannemer niet gevraagd zelf controlemetingen uit te voeren.
- 7 Het karteren van de bekleding is optioneel. Hoe verhoudt zich dat met de 5 punten die je erin de aanbesteding voor kunt krijgen?

D.3.2 RIVIERENLAND

Het aanbestedingsdocument van Rivierenland is het meest complex en dat zal niet alléén liggen aan het feit dat men een bureau bepaalde delen heeft laten opstellen vanwege de Europese aanbesteding. Enige opmerkingen.

- 1 Men vereist: "de nauwkeurigheid van de ingewonnen punten valt binnen 5 cm", in zowel x, y als z. De zinsnede "valt binnen" duidt op 3σ , terwijl men 1σ bedoelt. Bovendien heeft men een tweede zin opgenomen, waarin sprake is van de standaardafwijking van 5 cm, alsof het nieuwe informatie is.
- 2 Rivierenland specificeert het maximaal toelaatbare verschil tussen 'overlapgebieden'. Zijn dit stroken? Het is op zich een zinnige eis, maar de impliciete eis dat de aanbieder de stroken niet mag vereffen en afzonderlijk moet leveren is niet genoemd.

- 3 Rivierenland suggereert dat ongefilterd betekent “geen extra bewerkingen”, maar in het algemeen worden de uitschieters wel uitgefilterd. Voor gefilterd hanteert men nogal ongespecificeerd “maaiveld = ground”.

D.3.3 STICHTSE RIJNLANDEN

Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden heeft geen aanbestedingsdocumenten beschikbaar gesteld, maar wel een *Werkboek FLI-MAP* [17], waarin Marten Westerink een schat aan ervaringen heeft vastgelegd, zowel op het gebied van het gebruik van de data als op het gebied van ontwikkelingen en tips voor komende aanbestedingen. Onder meer zijn er een procesbeschrijving (§ 3.3, nummer 7) en gewenste specificaties (§ 3.4) opgenomen. Daarnaast is een uitgebreide evaluatie van het in 2004 uitgevoerde project opgenomen, inclusief toelichting bij wat er mis gegaan is en beter kan.

Overige opmerkingen:

- 1 Stichtse Rijnlanden maakt veel werk van een exacte specificatie van de hoogteprecisie, maar meldt niets over de planimetrische precisie. Dit blijkt gedaan vanwege de ervaring dat als aan de hoge hoogteprecisie-eis is voldaan, de planimetrische precisie ruimschoots voldoende is.

D.3.4 HOLLANDS NOORDERKWARTIER

Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier specificeert bepaalde eisen heel nauwkeurig, andere veel minder. In het later verstrekte document voor 2007 zijn verschillende aspecten verder uitgewerkt dan in het bestek voor 2005. Enige opmerkingen.

- 1 Opmerkelijk is dat men de ingewonnen gegevens tegelijk gebruikt voor een proefproject om te bezien of ze binnen INTWIS beschikbaar gemaakt kunnen worden. Het is het enige waterschap dat dit zo doet.
- 2 Hollands Noorderkwartier stelt als eis aan de systematische fout: een “maximale gemiddelde fout van 0,05 meter”. Terecht wordt hier niet van de standaardafwijking gesproken omdat systematische fouten doorgaans niet normaal verdeeld zijn. De toevallige fout is gespecificeerd met een standaardafwijking van 0,05 meter.
- 3 De genoemde hoogteprecisie betreft waarschijnlijk de individuele laserhoogtemetingen. De precisie van het resulterende rasterbestand wordt niet gespecificeerd.
- 4 In 2005 wordt nergens een precisie in ligging gespecificeerd, ook al wordt voor het orthofotobestand een resolutie van 10 cm genoemd: deze hoeft niet gerelateerd te zijn maar het kan wel. In het bestek voor 2007 gebeurt dit wel; “de plaatsnauwkeurigheid mag maximaal 25 cm afwijken ten opzichte van de fotolijnen/kniklijnen”. Dit laatste verwijst naar: “Het karteren moet plaatsvinden op basis van de orthobeelden en ingewonnen hoogtedata.”
- 5 In 2005 dient het orthofotobestand een resolutie van minimaal 10 cm te hebben; in 2007 is dat 5 cm.
- 6 Interpolatie van het gefilterde bestand wordt wel genoemd, maar niet in hoeverre.
- 7 In 2007 wordt een celgrootte van 25 x 25 cm voorgeschreven, waar dit in 2005 nog 50 x 50 cm was. Waarschijnlijk heeft dit vooral te maken met de nadruk op kleine regionale keringen in 2007.
- 8 Behalve op het gebied van attributen worden in 2005 geen geometrische eisen gesteld aan het karteringsbestand (in 2007 is dit wél het geval, zie zojuist). Je zou kunnen suggereren dat deze afhangen van de originele laserdata en dus van diens specificaties, maar deze afhankelijkheid wordt niet gelegd. Feitelijk is niet duidelijk dat de kartering op basis van de laserdata zou moeten of kunnen geschieden. In het bestek van 2007 is dit opgelost (zie zojuist).
- 9 Er is nergens sprake van controle door de opdrachtgever en dus ook niet van acceptatie van het geleverde (deel)product.

D.3.5 WETTERSKIP FRYSLÂN

Het Wetterskip Fryslân heeft een document ter beschikking gesteld dat door ARCADIS is gemaakt en een soort voorstudie is voor de aanpak van inwinning met laseraltimetrie in vergelijking met terrestrische meetmethoden: *Vergelijkingsonderzoek datainwinning laseraltimetrie vs terrestrisch meten* [2]. De studie is relatief gedegen en noemt veel van de mitsen en maren die in dit document ook genoemd worden, bijvoorbeeld op het gebied van de begrippen nauwkeurigheid en precisie. Ook staat men stil bij de principes van GPS-RTK en eerste en laatste puls van moderne laseraltimetriesystemen. Enige opmerkingen:

- 1 Men berekent heel precies de geometrische specificaties van de verscheidene producten, afhankelijk van drie verschillende vlieghoogten. Dat is dus een heel ander uitgangspunt dan van de andere opdrachtgevers, die eerder een op de informatiebehoefte gestoelde eis geven, waarbij de aannemer zelf de geschikte vluchtconfiguratie kan kiezen.
- 2 Anderzijds is dit het enige document dat een weergave van een informatiebehoeftebepaling geeft. Daarbij zijn niet alleen voor vele aspecten de eenheid, actualiteit en precisie gegeven, maar is ook een relatie gelegd met de vijf onderscheiden waterschapsprocessen veiligheidstoets, kadeschouw, keurhandhaving, beheervisie en uitvoeringsprojecten. Overigens merkt men daarover verderop op dat “na enig doorvragen blijkt dat niet alles een hoge prioriteit heeft”. Heel goed!
- 3 Het is merkwaardig dat men in dit zeer degelijk onderbouwde document enerzijds wél de in de verschillende varianten te bereiken toevallige hoogteprecisie geeft en ook nog eens de uit een informatiebehoeftebepaling gebleken gewenste precisie, maar geen woord wijdt aan de systematische fout.
- 4 Bijzonder is dat men de planimetrische precisie voor verschillende te karteren objecten geeft. Deze beweegt zich rond de 25 cm. Ook aan de kadeligging wordt die eis gesteld. Bij de hogere eis van 10 cm aan de kruinbreedte zou je daarom vragen kunnen stellen.
- 5 Ook uitzonderlijk is dat men een precisie geeft voor de taludhelling. De consequenties voor de geometrische precisie worden niet geschetst.

BIJLAGE E

OVERZICHT STANDAARDBESTEK

UITBESTEDING LASERALTIMETRIE VOOR

WATERKERINGBEHEER

Aan de hand van het bestek doen aannemers hun offertes en aan de hand daarvan doet de opdrachtgever de gunning, dus een nauwkeurig bestek is van groot belang. Daarnaast wijzen de ervaringen met laseraltimetrie uit dat bestekken zeer gedetailleerd moeten zijn, zowel om de verwachtingen van de opdrachtgever te objectiveren als om de aannemer het gewenste product te laten leveren. Het bestek wordt bovendien vaak gebruikt als basis voor het contract (zie bijlage G van dit document).

De basis van deze paragraaf wordt gevormd door de bestekken van de aan de WGL meewerkende waterschappen, alsmede de uitgebreide specificatie zoals die is opgenomen in het STOWA-document *Operationalisatie van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer*.

In dit document is vooralsnog niet meer dan een inhoudsopgave opgenomen; de uitwerking volgt na bespreking in de WGL. De lijst is enerzijds niet uitputtend en anderzijds kan daaruit een selectie worden gemaakt.

1. Omschrijving in te winnen gebied
 - Ligging van het gebied, lengte of oppervlakte, strookbreedte, afbakening aan de hand van een digitale kaart
 - Doel van het project
2. Te leveren producten
 - 2.1 Ongefilterd laserpuntenbestand
 - 2.2 Als maaiveld geclassificeerd laserpuntenbestand
 - 2.3 Ongefilterd rasterbestand
 - 2.4 Als maaiveld geclassificeerd rasterbestand
 - 2.5 Nadirfoto's en voorwaartse foto's
 - 2.6 Idem, video
 - 2.7 Orthofotobestand of orthofotomozaïeken
 - 2.8 Laserpuntenintensiteitsbestand
 - 2.9 Kartering objecten, vlakken en lijnen
3. Kwaliteitseisen en specificaties
 - 3.1 Rastergrootte geïnterpoleerd laserbestand
 - 3.2 Wijze van filteren oftewel het precieze onderscheid tussen de hierboven genoemde te leveren producten; interpolatie van weggefilterde delen
 - 3.3 Wijze van interpoleren van laserpunten naar rasterbestand
 - 3.4 Punt dichtheid
 - 3.5 Hoogteprecisie

Precisie van rasterbestand (niet van individuele laserpunten) in termen van standaardafwijking toevallige fout en maximale systematische fout

- 3.6 Planimetrische precisie van rasterbestand in termen van standaardafwijking toevallige fout en maximale systematische fout
- 3.7 Video- en foto-opnamen dienen tijdens de inwinning van de laserdata te zijn gemaakt omdat ze bedoeld zijn als hulp bij de interpretatie
- 3.8 Orthofotobestand of orthofotomozaïeken: resolutie, precisie (als 3.5 en 3.6), radiometrische en op kleur gecorrigeerd, al dan niet gelijk met laser ingewonnen
- 3.9 Vlieghoogte
- 3.10 Kartering: welke objecten, lijnen en vlakken, op basis van raster- of puntenbestand
- 3.11 Dataformaten te leveren producten
- 3.12 Onderverdeling levering in deelgebieden (bijvoorbeeld kaartbladen)
- 3.13 Medium waarop producten worden geleverd
- 3.14 AHN vereist ook specificatie oriëntering en plaats- en standbepalingssystemen
- 4. Omstandigheden bij inwinning
 - 4.1 Bladloos, laag gras, geen sneeuw, laag water, geen neerslag, weinig wind
 - 4.2 Aannemer is verantwoordelijk voor uitvoering van de vlucht, inclusief toestemming luchtverkeersleiding, enzovoort
 - 4.3 Vliegstroken en overlap (bij gebiedsdekkende inwinning)
- 5. Kwaliteitsborging
 - 5.1 Wijze van controle door de aannemer op alle onder 'kwaliteitseisen en specificaties' genoemde aspecten (zie ook bestek AHN-WZE); gedane calibratiemetingen, uitgevoerde correcties
 - 5.2 Te leveren kwaliteitsdocument
- 6. Overige bepalingen
 - 6.1 Levertijden en overige tijdsbepalingen
 - 6.2 Omvang en tijdstip deelleveringen
 - 6.3 Rapportages
 - 6.4 Overleg met opdrachtgever
 - 6.5 Verantwoordelijke personen bij beide partijen (nee, is contract)
 - 6.6 Facturering (contract?)
 - 6.7 Garantie en nazorg
 - 6.8 Vaste prijs of nacalculatie, meerwerk tarieven
 - 6.9 Boeteclausules

BIJLAGE F

OVERZICHT GUNNINGSCRITERIA LASERALTIMETRIE-AANBIEDINGEN

F.1 DOEL DOCUMENT

Het document met de gunningscriteria geeft de opdrachtgever handvatten om in een aanbestedingstraject aanbiedingen van laseraltimetrie-aanbieders zo eenduidig mogelijk te beoordelen volgens door hemzelf gestelde en op maat gemaakte criteria.

F.2 VOORSTEL INHOUDSOPGAVE

1. Inleiding
 - 1.1 Achtergrond document
 - 1.2 Gebruik document

2. Selectie
 - 2.1 Selectiecriteria en weging
 - 2.1.1 volledigheid aanmelding
 - 2.1.2 standaard verklaringen
 - 2.1.3 referentiegegevens

3. Gunningcriteria: Gunningseisen
 - 3.1 Offerte eisen en weging
 - 3.2 Kwaliteitseisen algemeen
 - 3.3 Kwaliteitseisen: hoogte-informatie
 - 3.4 Kwaliteitseisen: audiovisuele informatie
 - 3.5 Kwaliteitseisen: gekarteerde informatie
 - 3.6 Commerciële eisen

4. Gunningcriteria: Gunningswensen
Bijvoorbeeld met de volgende punten:
 - beste leverancier hoogte informatie
 - beste leverancier audiovisuele informatie
 - beste leverancier gekarteerde informatie
 - goedkoopste leverancier
 - weging criteria

5. Uitsluitingscriteria

6. Procedurebeschrijving

6.1 Selectie

6.2 Gunning

6.3 Beoordeling, waardering en berekening

6.4 Eindoordeel en keuze voor aanbieder

Zie ook de volgende documenten:

- *Aanbestedingsdocument opname waterkering Waterschap Rivierenland-190-187464.pdf*
- *050701_bestek_inmetenWK_v1.doc* van HH Rijnland
- *Programma van Eisen gegevensinwinning.doc* van HHNK
- www.aanbestedingenonline.nl
- ...

BIJLAGE G

OVERZICHT CONTRACT OPDRACHTGEVER / OPDRACHTNEMER LASERALTIMETRIE

G.1 DOEL DOCUMENT

Het doel van dit document is het aandragen van een compleet, gestandaardiseerd en op maat te maken standaard contract tussen opdrachtgever en aannemer van laseraltimetriemetingen waarin op een eenduidige manier is opgenomen wat de verplichtingen en rechten zijn van de aannemer en waarin het beoogde resultaat SMART is omschreven. Het contract moet mono-interpretabel zijn zodat er geen misverstanden kunnen ontstaan en zodat de aannemer zich gebonden voelt het beschreven werk volgens de afspraken te leveren.

G.2 VOORSTEL INHOUDSOPGAVE

Het voorstel voor de inhoudsopgave is op hoofdlijnen vermeld en niet in detail omdat vooral eerst op hoofdlijnen duidelijk moet worden tot op welk detailniveau de WGL zaken uitgewerkt wil zien. Er valt namelijk veel voor een uitgebreide overeenkomst te zeggen, maar voor een beperktere overeenkomst zijn ook argumenten aan te dragen.

Betrokken partijen

Overwegingen

1. Definities

Hoogtemetingen

Statistische termen

Aannemer

Opdrachtgever

Derden

Metingen

...

2. Algemeen

Diverse punten

3. Omschrijving werkzaamheden/product

Duidelijke omschrijving van de werkzaamheden en/of het product. SMART beschrijven.

4. Datarechten

5. Aanvang en duur van de overeenkomst

6. Wijziging van de overeenkomst

7. Tarief

8. Facturering

9. Geheimhouding

10. Aansprakelijkheid

11. Boetes

12. Overmacht

13. Tussentijdse beëindiging van de samenwerkingsovereenkomst

o.a.:

Faillissement

Surseance

Ernstige gebreken en gevolgen voor facturering

14. Toepasselijk recht en geschillen

Eerst in den minne. Nederlands recht. Kantonrechter te vestigingsplaats opdrachtgever.

Aldus in tweevoud opgemaakt en ondertekend,

Woonplaats, d.d.:

Opdrachtgever

Aannemer

Handtekening

Handtekening

BIJLAGE H

OVERZICHT CONTROLEPROCEDURE UITBESTEDING LASERALTIMETRIE VOOR WATERKERINGBEHEER

Naast een gedetailleerde specificatie van het te verwachten product, is ook een goed door-
dachte controle van het geleverde product van groot belang. Deze zou uit de volgende, nader
uit te werken stappen kunnen bestaan.

1. Controle van door de aannemer verstrekte kwaliteitsdocumenten
 - 1.1 Conformiteit met bestek
 - 1.2 Interne consistentie (kunnen de beweringen met betrekking tot kwaliteit inderdaad
gedaan worden op basis van de beschreven waarnemingen)
 - 1.3 Consistentie met de geleverde data
 - 1.4 Compleetheid van het document
 - 1.5 Uitgevoerde calibraties laser en plaats- en standbepalingsapparatuur

2. Kwalitatieve controle van het geleverde product
 - 2.1 Dekking gevraagde gebied
 - 2.2 Omstandigheden tijdens de vlucht: neerslag, windsnelheid, terreingesteldheid
 - 2.3 Strookoverlap en dwarsstroken (indien van toepassing)
 - 2.4 Compleetheid, gaten op slecht reflecterende ondergrond, niet-toegestane gaten

3. Kwantitatieve controle van het geleverde product
 - 3.1 Controle hoogteprecisie met waterpassingen of GPS-metingen over een vlak terrein. Bij
een enkele strook is een goede spreiding in dwarsrichting van belang. RWS AGI maakt
zelfs onderscheid tussen vier foutsoorten
 - 3.2 Controle planimetrische precisie aan de hand van de ligging van scherp bepaalde be-
staande objecten of aangebrachte paspunten (Fugro bij zeer hoge dichtheden: "lidar
boards") of de noklijn van zadeldaken (bestek AHN-proef ZWE)
 - 3.3 Punt dichtheid m.b.v. frequentieplaatje, ook i.v.m. resulterende inhomogene precisie van
het rasterbestand
 - 3.4 Vorm en aansluiting door strookoverlap en dwarsstroken (indien van toepassing)
 - 3.5 Vreemde effecten als houtnerfpatroon, wasbord, hoogte-effect van puntverdichting (RWS
AGI)
 - 3.6 Interpolatie laserpuntenbestand naar raster

4. Controle filtering
 - 4.1 Extremen
 - 4.2 Bebouwing
 - 4.3 Overige objecten
 - 4.4 Vegetatie
 - 4.5 Waterkeringen en waterlopen

5. Controle bijproducten
 - 5.1 Kwaliteit en compleetheid foto- en video-opnamen
 - 5.2 Orthofotomozaïek: resolutie, precisie in ligging, precisie van uitgevoerde orthorectificatie, radiometrie, kleur, compressie- en verscherpingsartefacten
 - 5.3 Juistheid uitgevoerde kartering (indien van toepassing)

BIJLAGE I

REFERENTIES

- [1] M. Akkermans en L. Amoureux, *DTM-ontwerp met FLI-MAP 400. Eindrapport pilotproject Rijksweg 2, Rijkswaterstaat AGI*, april 2007
- [2] Arcadis, *Vergelijkingsonderzoek datawinning laseraltimetrie vs terrestrisch meten, Wetterskip Fryslân*, maart 2006
- [3] P. van den Berg, P.J.L. Blommaart, J.J. Flikweert et al., *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001–2006 (VTV)*, Rijkswaterstaat DWW, januari 2004
- [4] A.E. Bollweg, M.J.E. Crombaghs, R. Brügelmann en E.J. de Min, *Wat is precisie?* (notitie), Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, juni 2001
- [5] G.B.M. Brand, H. van Dijk, S.J. Oude Elberink, R. Brügelmann en E.M.J. Vaessen, *AHN+ pilot. Kan het AHN nog beter?*, Rijkswaterstaat AGI, november 2003
- [6] G.B.M. Brand, M.J.E. Crombaghs, S.J. Oude Elberink, R. Brügelmann en E.J. de Min, *Precisiebeschrijving AHN 2002*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, juli 2003
- [7] R.G.W. Dood, R.M. van Heerd, E.J. de Min, F.M. Spruijt en J.G.M. Steenbruggen, *Kwaliteitsbegrippen-handboek*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, mei 1998
- [8] W. Epema, *Advies aan RWS voor innovatie dijkinspecties*, Rijkswaterstaat Water Innovatiebron (WINN), augustus 2005
- [9] R.M. van Heerd, E.A.C. Kuijlaars, M.P. Zeeuw en R.J. van 't Zand, *Productspecificatie AHN 2000*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, maart 2000
- [10] *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen*, Katern boezemkaden (groene versie), 2006
- [11] G.M. Moser, F.J.J. Thijs en W.S. Zomer, *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Stroomlijning van inrichting en uitvoering van inspecties*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, oktober 2005
- [12] J. Polman en M.A. Salzmänn, *Handleiding voor de Technische Werkzaamheden van het Kadaster (HTW)*, Kadaster, februari 1996
- [13] W. Silva, J.W. Stijnen, E. van Velzen en R.M. Slomp, *Rampenbeheersstrategie Overstroming Rijn en Maas. Achtergrondrapportage Veiligheid en rivierkunde*, Rijkswaterstaat RIZA, december 2005
- [14] Stuurgroep AHN, *Projectbestek AHN-2 WZE. Bijlage 1: Specificaties hoogtegegevens; bijlage 2: Kwaliteitscontrole en -borging opdrachtnemer*, Stuurgroep AHN, januari 2007
- [15] E. van Velzen, *Afleiding onzekerheid in waterstand bovenrivierengebied van Rijn en Maas (memo)*, Rijkswaterstaat RIZA, maart 2006
- [16] T.J.M. van de Ven, *Kwaliteitsdocument Laseraltimetrie Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, maart 2002

- [17] Marten Westerink, *Werkboek FLI-MAP*, Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden, april 2007
- [18] L.M.Th. Swart, *Remote sensing voor inspectie van waterkeringen*, Swartvast in opdracht van Rijkswaterstaat AGI, november 2007
- [19] W. Epema en W.S. Zomer, *Concept startnotitie toekomstvisie inspectie en monitoring*, Rijkswaterstaat DWW, Water Innovatiebron en STOWA, oktober 2005
- [20] R. van der Velden, *AHN Pilot. Evaluatie product- en proceskwaliteit*, AeroVision in opdracht van Stuurgroep AHN, augustus 2007
- [21] E. Tromp, *Analyse stabiliteit profielen 1, 3 en 6* (briefrapport), GeoDelft, september 2007