



Kwaliteitsdocument laseraltimetrie Projectgebied Westerschelde



**Kwaliteitsdocument laseraltimetrie
Projectgebied Westerschelde**

Adviesdienst Geo-informatie en ICT

november 2004

ir. I.S.W. Alkemade

Inhoudsopgave

1	Doelstelling kwaliteitsdocument	4
Deel 1: De techniek laseraltimetrie		5
2	Laseraltimetrie	6
2.1	Wat is er mogelijk met laseraltimetrie	6
2.2	Rol van de AGI bij laseraltimetrie	7
2.3	Specificaties bij levering van hoogtebestanden laseraltimetrie	8
2.4	Aanvullende eisen kustbestanden	9
3	Van ruwe lasermetingen naar digitaal hoogtemodel	11
3.1	Inwinning en verwerking van ruwe lasermetingen	11
3.2	Strookvereffening	12
3.2.1	Theorie strookvereffening	13
3.2.2	Nadelen van strookvereffening	14
3.3	Filterverwerking	15
3.3.1	Werkwijze filteren	15
3.3.2	Beperkingen van filteren	16
3.4	Interpolatie van een DHM	17
Deel 2: Controle bij de AGI		18
4	Controle bij de AGI: Domein 1	19
4.1	Statistische hoogtecontrole: validatie met behulp van referentiemetingen	19
4.2	Controle van de frequentie	20
4.3	Controle van de punt dichtheid	21
4.4	Visuele controle	22
4.4.1	Controlebestanden voor domein 1	22
4.4.2	Controle op ontbrekende data	26
4.4.3	Controle van de strookaansluiting en -overlap	26
4.4.4	Controle op extremen	27
4.4.5	Controle van planimetrie	27
4.5	Foutsoortencontrole	28
4.5.1	Beschrijving van de verschillende foutsoorten	29
4.5.2	Berekenen van de foutsoorten	30
4.5.3	Gebruik van de foutsoorten in toepassingen	31
4.5.4	Projectspecifieke eisen op de foutsoortencontrole	32
4.6	Vastleggen van de controleresultaten	33
5	Controle bij de AGI: Domein 2	35
5.1	Controlebestanden voor domein 2	35
5.2	Controle op ontbrekende data als gevolg van bewerkingen in domein 2	39
5.3	Filtering: Controle op uitschieters	40
5.4	Filtering: controle op filtering van vegetatie	40
5.5	Filtering: controle op filtering van bebouwing	41
5.6	Filtering: controle op filtering van overige objecten	41
5.7	Filtering: controle op filtering van water van de zee	41
5.8	Vastleggen van de controleresultaten	41
6	Overige controles	43

7	Overzicht referentiemateriaal	44
7.1	Referentievelden	44
7.2	Naslagwerken	44
8	Resultaten controles	46
8.1	Overzicht data	46
8.2	Overzicht leveringen	48
8.2.1	Levering 1	48
8.2.2	Levering 2	48
8.3	Resultaten domein 1 controle	48
8.3.1	Resultaten statistische hoogtecontrole	48
8.3.2	Resultaten controle van de frequentie	50
8.3.3	Resultaten van de punt dichtheidscontrole	50
8.3.4	Resultaten van de controle op ontbrekende data	52
8.3.5	Resultaten van de controle op de strookaansluiting en –overlap	53
8.3.6	Resultaten van de controle op extremen	54
8.3.7	Resultaten van de controle van planimetrie	54
8.3.8	Resultaten van de foutsoortencontrole	55
8.3.9	Toelichting op het houtnerfpatroon	56
8.4	Resultaten domein 2 controle	57
8.4.1	Resultaten van de controle op ontbrekende data in domein 2	57
8.4.2	Resultaten van de controle op uitschieters	57
8.4.3	Resultaten van de controle op filtering van vegetatie	57
8.4.4	Resultaten van de controle op filtering van bebouwing	57
8.4.5	Resultaten van de controle op filtering van overige objecten	57
8.4.6	Resultaten van de controle op filtering van water	58
8.5	Conclusies	59
8.6	Akkoordverklaring projectleider	59

1 Doelstelling kwaliteitsdocument

Laseraltimetrie is een relatief nieuwe techniek op het gebied van hoogte-inwinning, waarmee in vergelijking tot terrestrische metingen tegen lage kosten nauwkeurige gegevens omtrent de maaiveldhoogte worden ingewonnen. Daarbij wordt tevens een dichte, a-selectieve bedekking van het oppervlakte gegarandeerd.

Informatie omtrent de maaiveldhoogte is onontbeerlijk voor het beheer van onder meer kust, rivieren, wadden, dijken en polders. Het gebruik van hoogte-informatie is echter niet alleen belangrijke informatie voor waterbeheer, maar ook voor de berekening van grondverzet of als basisinformatie voor stedelijke inrichting en tracéstudies. Daarnaast is het een nuttige bron voor ruimtelijk onderzoek op het gebied van geomorfologie en archeologie. De behoefte aan actuele maaiveldhoogte-informatie is dan ook groot.

Uit testvluchten is geconcludeerd dat met laseraltimetrie een hoge nauwkeurigheid bereikt kan worden. Bij meer routinematige vluchten blijkt echter dat na vergelijking van de laseraltimetriemetingen met referentiemetingen de nauwkeurigheid soms lager uitvalt dan onder optimale omstandigheden mogelijk zou zijn. Hierbij spelen onder andere de kwaliteit van de gebruikte meetsystemen en de invloed van de atmosfeer op de laserpulsen een belangrijke rol, maar ook de gebruikte filtertechnieken en de punt dichtheid zijn van belang.

Sinds begin 2003 werkt de Adviesdienst Geo-informatie en ICT (AGI) met een longlist van voorgeselecteerde leveranciers. Uitgangspunt voor deze longlist is dat de AGI leveranciers in kan zetten die tijdens de voorselectie (of prekwificatie) hebben bewezen dat zij de beloofde kwaliteit kunnen garanderen. Daarnaast herzielt de AGI de interne werkprocessen om zijn functie als opdrachtgever en kwaliteitscontroleur beter te kunnen uitoefenen. De data die aan de AGI wordt geleverd is door de leverancier gecorrigeerd voor onregelmatigheden die zijn ontstaan tijdens de vlucht en tijdens de bewerking van de gegevens. Voor, tijdens en na de vlucht en bewerkingen worden regelmatig rapportages geleverd aan de AGI. Uit deze rapportages moet blijken dat de data van de leverancier aan de gestelde eisen voldoet. Na de levering van de bewerkte data aan de AGI worden een aantal controles uitgevoerd om na te gaan of eventuele aanwezige afwijkingen in de data binnen de vooraf gestelde specificaties vallen. In dit document worden de methoden die tijdens deze controle worden toegepast toegelicht. Daarnaast worden de resultaten van de controles uiteengezet. De AGI kan van de data die op deze manier is gecontroleerd de garantie bieden dat de data voldoet aan de gestelde kwaliteitseisen.

De doelstelling van dit kwaliteitsdocument is tweeledig: ten eerste biedt dit kwaliteitsdocument inzicht in de gebruikte techniek en de stand van zaken ten tijde van de inwinning. Ten tweede worden de kwaliteitscontroles bij de AGI en de resultaten hiervan uitvoerig beschreven. De AGI beoogt hiermee inzicht en transparantie te verkrijgen in de uitgevoerde controles. De klant kan hieruit direct afleiden of de hoogtedata aan de specificaties voldoet en dus aan de gewenste kwaliteit.

Als gevolg hiervan bestaat het kwaliteitsdocument uit twee delen:

Deel 1: De techniek laseraltimetrie;

Deel 2: De controle bij de AGI.

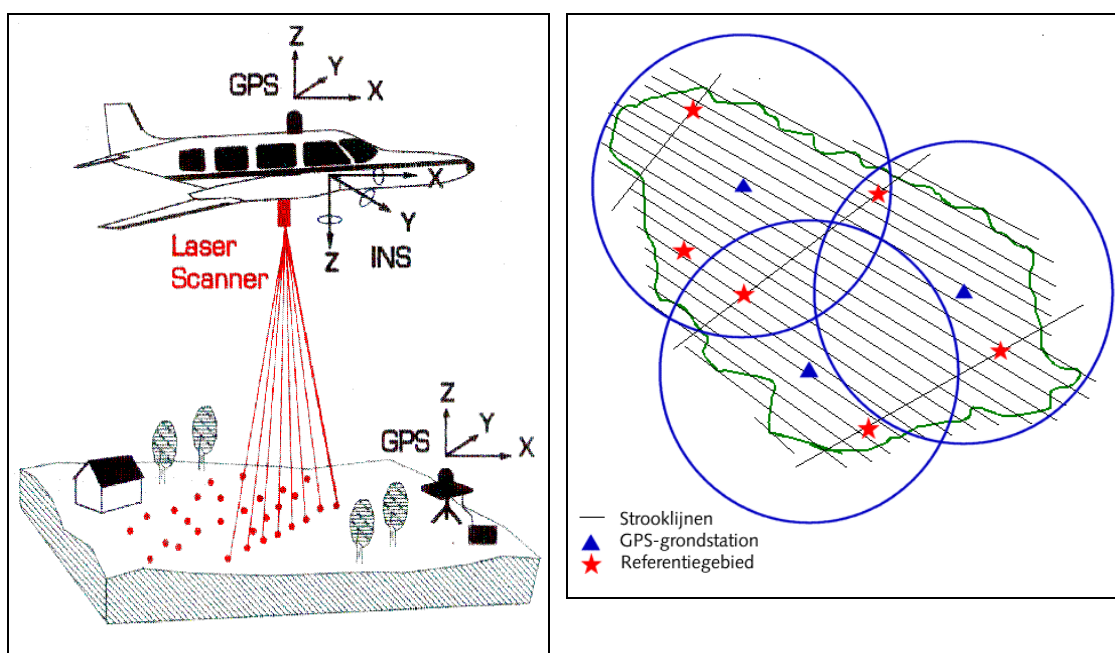
Leeswijzer: in paragraaf 8.5 zijn de conclusies van de resultaten van de controles uiteengezet. Hieruit kan snel een algemeen overzicht worden verkregen over de kwaliteit van de data en de specifieke eigenschappen.

Deel 1: De techniek laseraltimetrie

2 Laseraltimetrie

Laseraltimetrie is een techniek waarbij vanuit een vliegtuig of helikopter hoogtemetingen van het aardoppervlak worden verricht. Aan boord van het toestel worden drie verschillende metingen verricht, namelijk plaatsbepaling (met behulp van Global Positioning System (GPS)), standsbepaling van het vliegtuig (met behulp van Inertial Navigation System (INS)) en afstandsmeting tot het aardoppervlak met een smalle bundel laserlicht (laserscanner). Gelijktijdig met de vlucht worden ook metingen verricht met GPS grondstations. Door meting van het tijdsverschil tussen uitgezonden en ontvangen laserpuls kan, wanneer stand en positie van het toestel nauwkeurig bekend zijn, de terreinhoogte worden berekend. Het principe van laseraltimetrie wordt in figuur 2.1 (links) afgebeeld. In stroken van enkele honderden meters breed worden hoogtepunten gemeten van het maaiveld en alle objecten daarop, met een meetdichtheid die varieert van één punt per 16 vierkante meter tot meerdere punten per vierkante meter. Daarnaast worden er extra stroken dwars op de andere stroken gevlogen. Hierdoor ontstaat een betere configuratie van de meetopzet. Een voorbeeld van een dergelijke meetopzet wordt in figuur 2.1 (rechts) gegeven.

Metingen op vegetatie, huizen en andere objecten worden doorgaans verwijderd (gefilterd) om een bestand met alleen maaiveldhoogten over te houden. Controle van deze hoogtemetingen vindt plaats met behulp van gedetailleerde veldmetingen met GPS (referentievelden) en door gebruik te maken van de overlap van metingen in de randen van de stroken (zgn. strookvereffening). Afwijkingen tussen laser- en referentiemetingen liggen in de orde van enkele centimeters voor vlak en weinig begroeid terrein. Bij dichte en hoge vegetatie nemen de afwijkingen toe naarmate de vegetatie dichter dan wel hoger is.



Figuur 2.1: Het principe van laseraltimetrie (links) en een mogelijke meetopzet met langsstroken, dwarsstroken, referentiegebieden en GPS-grondstations (rechts).

2.1 Wat is er mogelijk met laseraltimetrie

De sterke kant van de techniek van laseraltimetrie is gelegen in de zeer hoge punt dichtheid (tot meerdere punten per vierkante meter) in combinatie met een relatief korte verwerkingstijd in vergelijking met terrestrische metingen. Daardoor kan er snel en voor een relatief lage prijs per hectare voor een groot gebied hoogtepunten worden ingewonnen. Verwerking en controle van de gegevens vindt geheel plaats in een GIS, zodat de vervaardigde digitale hoogtemodellen meteen ter beschikking komen voor diverse GIS toepassingen.

De diverse nauwkeurighedsaspecten (precisie in X, Y en Z, betrouwbaarheid) zijn een voortdurend onderwerp van onderzoek, wat samenhangt met de snelle technologische ontwikkelingen op dit gebied. Naast de genoemde nauwkeurighedsaspecten worden ook eisen gesteld aan de punt dichtheid, dekking en de filtering van het gebied. Hiervoor zijn specificaties opgesteld die in paragraaf 2.3 aan de orde komen.

Bij een opname met laseraltimetrie zorgen een drietal type objecten voor verstoringen in de geregistreerde hoogte:

vegetatie

De laserpulsen dringen niet door bladeren heen. Alleen de pulsen die geen bladeren raken treffen de grond en zullen daarmee de afstand tot de ondergrond opleveren. Het seizoen maar ook de dichtheid van het vegetatiedek zijn daarmee sterk bepalend voor het aantal pulsen wat door vegetatie heen de grond bereikt.

wateroppervlakken

De laserpulsen worden grotendeels geabsorbeerd door water. Alleen de pulsen die recht onder het vliegtuig worden uitgezonden, worden gereflecteerd. De hoogte van wateroppervlakken kunnen daardoor in reguliere projecten niet of slechts ten dele gemeten worden.

terreindiscontinuïteiten

Van objecten met verticale componenten, zoals huizen en boomstammen, zullen door de scannende beweging van de lasersensor vaak de verticale delen worden geraakt. Daarnaast bevinden zich op het terrein tijdens de vlucht objecten die slechts tijdelijk aanwezig zijn en geen deel uitmaken van het terrein (bijvoorbeeld koeien of ander vee, auto's, landbouwmachines en bouwketen). Hierdoor worden hoogten geregistreerd die voor de gewenste toepassing geen betekenis hebben. Deze verstoringen kunnen door filtering worden verwijderd uit het laserhoogtebestand.

Een belangrijk probleem bij laseraltimetrie is dat alleen de geometrie van het terrein kan worden bepaald en geen informatie over de gemeten objecten wordt verkregen. Bovendien zijn de metingen a-select: werkelijk alles wat ten tijde van de opname op het terrein aanwezig was wordt in hoogte geregistreerd. Hierdoor treden terreindiscontinuïteiten op zoals hierboven beschreven, die later door middel van filtering verwijderd moeten worden. Ten opzichte van terrestrische metingen heeft de a-selectie waarneming een groot voordeel: er worden bij de lasermetingen geen veronderstellingen gemaakt over welk punt representatief zou zijn voor een groot gebied. De veelheid aan punten in een gebied zorgt ervoor dat er een evenwichtiger hoogtemodel kan worden verkregen. Het nadeel van deze a-selectie waarnemingen is dat natuurlijke topografie zoals een slootkant etc. niet structureel wordt gemeten. Hoe hoger de punt dichtheid echter is, hoe nauwkeuriger de terreinbeschrijving wordt.

2.2 Rol van de AGI bij laseraltimetrie

De AGI (voorheen Meetkundige Dienst) is sinds 1989 betrokken bij het onderzoek naar de mogelijkheid om met laseraltimetrie hoogtegegevens in te winnen. In 1997 is gestart met het inwinnen van hoogtegegevens, met als doel een landsdekkend digitaal hoogtebestand te verkrijgen. In overleg met waterschappen en provincies werd besloten dat de toenmalige Meetkundige Dienst als beheerder en controleur van de gegevens zou fungeren, en opdrachtgever voor de feitelijke inwinning. Sinds die tijd zijn bij de AGI diverse onderzoeksprojecten gerealiseerd om de toepassingsmogelijkheden te verbreden en de kwaliteitscontroles te optimaliseren. Naast het AHN werden ook diverse andere laseraltimetrie-opdrachten uitgevoerd. Een van de belangrijkste verbeteringen is de ontwikkeling van de strookvereffening, die bij de leveranciers nu als standaardprocedure in de verwerking van de gegevens is opgenomen. Er is in de loop der jaren veel ervaring opgedaan met laseraltimetrie, en de kwaliteit van het product is dankzij verbeteringen in het meet- en bewerkingsproces toegenomen. Eind 2003 is het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) als landsdekkend bestand gereedgekomen.

De AGI speelt dus een belangrijke rol in de kwaliteitscontrole. Deze controle heeft met name betrekking op punt dichtheid en nauwkeurigheid van de metingen. De nauwkeurigheid wordt berekend door vergelijking van de laserhoogtemetingen met referentievlakmetingen, verkregen door middel van tachymetrie of GPS. Tevens vindt een vergelijking plaats tussen laserdata en al aanwezige andere (hoogte)bestanden, ter controle van de filterresultaten en de planimetrische nauwkeurigheid. Deze bestanden zijn onder andere DTB-rivieren/wegen en TOP10Vector. Dit laatste bestand kan alleen dienen als controle van de volledigheid, de vergelijking met DTB's kan ook gebruikt worden als controle op de geometrie. Wanneer beschikbaar binnen het projectgebied worden ook GBKN

bestanden gebruikt.

Na goedkeuring van de laserhoogtedata worden de verschillende eindproducten gegenereerd. Behalve een hoogtepuntenkaart met de oorspronkelijke laserwaarnemingen (basisdata) wordt ook een hoogteraster of grid gemaakt. Hoogtelijnenkaarten zijn vervolgens eenvoudig te genereren.

Naast deze eindproducten verleent de AGI, gezien de ervaring van vele jaren onderzoek op het gebied van laseraltimetrie, ook ondersteuning aan de diverse gebruikers. Denk hierbij aan projectbegeleiding, inwinning, kwaliteitscontrole en het genereren van diverse hoogteproducten. Hierbij ligt het in de lijn van verwachting om softwareapplicaties te ontwikkelen voor het uitvoeren van de taken van RWS-gebruikers op basis van de laserdata.

2.3 Specificaties bij levering van hoogtebestanden laseraltimetrie

In de loop der jaren heeft de AGI veel ervaring opgedaan op het gebied van kwaliteitsaspecten. Hierbij is het inzicht ontstaan dat de specificaties voor het AHN zoals die waren opgesteld in het convenant van 1997 niet voldoende waren om een goede kwaliteitsbeschrijving van het bestand te geven. In de loop van de jaren zijn de kwaliteitscontroles bij de AGI intensiever geworden: er werd in feite meer gecontroleerd dan de specificaties voorschreven. De ontwikkeling van strookvereffeningstechnieken heeft hier een belangrijke bijdrage aan geleverd.

Bij het opstellen van precisiespecificaties voor geo-producten is het geven van één getal vaak niet voldoende. Soms zijn er meerdere getallen nodig om verschillende foutinvloeden voldoende te kunnen beschrijven. Vooral hoort er ook vermeld te worden wat dit getal voorstelt (b.v. een standaardafwijking of een maximale waarde) en er moet onderscheid gemaakt worden naar ruimtelijke of temporele schaal van de fout. Het voorgaande geldt ook voor bestanden ingewonnen met laseraltimetrie. In het verleden is gebleken dat de AHN-specificaties (systematische hoogtefout van 5 cm en standaardafwijking van 15 cm) zoals die tot in 2003 zijn gehanteerd multi-interpretabel en niet voldoende zijn. Door de combinatie van sensoren treden fouten op met verschillende amplitude en ruimtelijke schaal. Het huidige inzicht is dat de hoogteprecisie in een projectgebied dat ingewonnen wordt met laseraltimetrie beschreven kan worden met vier foutsoorten, ieder met eigen specificaties en een ruimtelijke schaal waarop deze fouten van toepassing zijn.

De puntdichtheid is een belangrijke eis aangezien deze nauw samenhangt met de toepassing van het bestand. Voorheen werden er eisen gesteld aan de gemiddelde puntdichtheid. Het bleek dat het gemiddelde niet altijd een juist beeld gaf van de werkelijke puntdichtheid: bij bepaalde gebieden die aan de eisen van de gemiddelde puntdichtheid voldeden, bleek dat er deelgebieden waren die een aanmerkelijk lagere puntdichtheid hadden. Een puntdichtheidseis voor ieder deel van het hoogtebestand garandeert een minimum puntdichtheid, slechts voor enkele uitzonderingen wordt een lagere puntdichtheid geaccepteerd.

Daarnaast worden er eisen gesteld aan de filtering. Het filteren van metingen op bebouwing en vegetatie dient in het gehele bestand te worden uitgevoerd. Ook extremen en uitschieters (punten ver boven of onder het 'normale' maaiveld) dienen te worden verwijderd.

De AGI controleert de geleverde laserhoogtebestanden op de bovenstaande eisen. Naast de levering van de laserhoogtebestanden worden door de leveranciers vóór, tijdens en na de inwinning en verwerking ook diverse kwaliteitsrapportages geleverd. De leverancier heeft tijdens het prekwalificatietraject een kwaliteitsplan opgesteld waarin wordt ingegaan op het waarborgen van de gewenste kwaliteit en waarin is vastgelegd hoe de controle van de kwaliteit wordt uitgevoerd en aan de AGI wordt gerapporteerd. Dit kwaliteitsplan maakt deel uit van de levering van het laserhoogtebestand en de filterverwerking en is een levend document. Verbeteringen op het gebied van kwaliteitsborging worden geacht te worden opgenomen in het kwaliteitsplan. De geleverde rapportages worden ook door de AGI gecontroleerd. Uitgangspunt hierbij is het kwaliteitsplan van de leverancier.

Naast de standaard productspecificaties kunnen ook specifieke projectspecificaties worden opgesteld. In het volgende overzicht worden de voor dit project geldende specificaties uiteengezet.

Hoogteprecisie

Er worden kwalitatieve eisen gesteld voor de variatie in de precisie van de laserpunten onderling (puntruï), de aansluiting van naburige stroken aan elkaar, de vervorming van de stroken en de aansluiting van alle stroken (projectgebied) op het NAP stelsel. Hiervoor worden vier foutsoorten bepaald, die gezamenlijk de hoogteprecisie van het laserhoogtebestand beschrijven. Een gedetailleerde beschrijving van deze foutsoorten en de eisen die hiervoor gelden worden in paragraaf 4.5 behandeld.

Planimetrische precisie

De eisen aan de planimetrische precisie wordt uitgedrukt in een standaardafwijking van de verschillen met referentiebestanden. Zowel in X- als in Y-richting wordt een standaardafwijking $< 0,50$ m geëist.

Punt dichtheid

De eisen aan de punt dichtheid van het laserhoogtebestand worden door het uiteindelijke gebruiksdoel bepaald. Per project wordt zonodig een nadere eis gesteld aan de punt dichtheid. De minimumeis die aan de punt dichtheid wordt gesteld is 1 punt per 16 m^2 . Dit moet voor ieder deel van het hoogtebestand gelden. Voor gebieden met hoge of ondoordringbaar dichte vegetatie of voor gebieden die gekenmerkt worden door een zwakke reflectie van het lasersignaal (wateroppervlakten) wordt een lagere punt dichtheid geaccepteerd. Gaten in het bestand (ontbrekende data) worden niet geaccepteerd.

→ Specifieke eis voor projectgebied Westerschelde: punt dichtheid minimaal 1 punt per 4 m^2

Extremen

Het laserhoogtebestand dient vrij te zijn van extremen: punten ver boven of onder de voor het projectgebied bekende topografiehoogten.

Uitschieters

Het laserhoogtebestand dient vrij te zijn van uitschieters: zichtbare, lokaal extreem hoge of lage punten in relatie tot de directe omgeving, die derhalve geen maaiveld of topografisch object ter plaatse beschrijven. Voor deze uitschieters wordt als acceptatiegrens 1 uitschieter per 1000 hectare gehanteerd.

Filtering bebouwing en vegetatie

* Binnen de bebouwde kom (aaneengesloten bebouwing groter dan 1 km^2) hoeft vegetatie en bebouwing niet te worden uitgefilterd. Overige bebouwing moet wel uitgefilterd worden. Voor de filtering wordt een acceptatiegrens van 1 onjuist gefilterd, of niet gefilterd, object per 1000 hectare gehanteerd.

* Buiten de bebouwde kom moeten alle bruggen en viaducten worden uitgefilterd.

* Dwarsstroken worden niet gefilterd.

2.4 Aanvullende eisen kustbestanden

Daar de Westerschelde afwijkt van standaard laseropdrachten zijn er aanvullende en/of afwijkende eisen vastgesteld.

Aanvullende eisen aan referentievelden

Op elk controleveld wordt een gemiddeld hoogteverschil berekend. De eis is dat 50% van de hoogteverschillen tussen de -5 en 5 cm ligt, 67% tussen -10 en 10 cm en 95% tussen -15 en 15 cm.

Aanvullende eisen aan getijdekenmerken

Het in te winnen gebied is de gehele Westerschelde van teen dijk tot teen dijk waarin minimaal de waarden boven de -1.00 meter NAP zijn ingewonnen. Hiermee wordt niet weergegeven dat er geen waarden onder de -1.00 meter in het bestand mogen voorkomen. Alle ingewonnen droogvallende delen moeten worden geleverd! Dit kan bereikt worden door de volgende eis te stellen:

Opnamevluchten van de kust en andere getijdewateren dienen bij laag water te worden uitgevoerd. De opdrachtgever stelt vliegtabellen beschikbaar, afkomstig van RWS – Rijksinstituut voor Kust en Zee. Hierin zijn per kustvak de tijdsvensters aangegeven waarin volgens de normen van RWS gevlogen kan worden. Deze vliegperiodes zijn zowel overdag als 's nachts. Er mag niet gevlogen worden tijdens storm of andere omstandigheden die opstuwing van het zeewater langs de kust veroorzaken.

Afwijkende eisen aan controle hoogteprecisie

Om de foutensoorten (behalve 4) uit te rekenen moet een tweetal stroken gevlogen worden die aan de volgende eisen moeten voldoen:

- Strookoverlap is minstens 20 km lang.
- Strookoverlap ligt in landelijk gebied (dus niet aan kust, niet in stedelijk gebied niet in kassengebied).
- Een overlap van 50% is gewenst.
- 1 Strook vóórdat het projectgebied van die dag is gevlogen, de andere daarna.
- De 2 stroken worden in tegengestelde richting opgenomen.
- Er hoeven geen referentiegebieden in te liggen (ze kunnen dus ook per dag verschillen qua locatie).
- Locatie referentiestroken in overleg met AGI, aannemer doet een voorstel.

Een gedetailleerde beschrijving van deze foutsoorten en de eisen die hiervoor gelden worden in paragraaf 4.5 behandeld.

Aanvullende eisen aan filtering

Water van de **Westerschelde** moet worden gefilterd en te samen met de overige uitgefilterde punten geleverd te worden.

3 Van ruwe lasermetingen naar digitaal hoogtemodel

In de verwerking van ruwe lasermetingen naar een digitaal hoogtemodel onderscheiden we de stappen die bij de leverancier worden uitgevoerd en de stappen die bij de AGI worden uitgevoerd. De werkzaamheden worden verdeeld in twee domeinen, te weten:

1 Domein gegevensinwinning en geometrische verwerking

Het eindproduct van dit domein is een ongefilterd hoogtebestand, vrij van extremen, dat geometrisch is verwerkt en dat in de oorspronkelijke punt dichtheid (niet geresampled) wordt geleverd.

2 Domein filterverwerking

Het eindproduct van dit domein is een gefilterd hoogtebestand.

De domeinen kunnen door twee verschillende leveranciers worden geleverd, waarbij de leverancier voor domein 2 gebruik maakt van het goedgekeurde eindproduct van domein 1. In de meeste gevallen zullen beide domeinen door dezelfde leverancier verzorgd worden. De domeinen worden apart gecontroleerd op de in paragraaf 2.3 gestelde specificaties. De bevindingen worden opgenomen in een standaard toetsingsformulier voor ieder domein.

In de volgende paragrafen worden de verschillende stappen van ruwe lasermetingen naar digitaal hoogtemodel uiteengezet. Daarbij horen de bewerkingen van paragraaf 3.1 en paragraaf 3.2 bij het domein gegevensinwinning en geometrische verwerking en de bewerkingen van paragraaf 3.3 bij het domein filterverwerking.

3.1 Inwinning en verwerking van ruwe lasermetingen

De inwinning van de laserdata en de ruwe dataverwerking gebeurt bij de leverancier. Voordat de vlucht plaatsvindt moet de leverancier een vliegplan aanbieden aan de AGI. Het vliegplan moet garanderen dat de configuratie van vliegstroken, dwarsstroken en referentievelden optimaal is. Na goedkeuring van het vliegplan door de AGI kan er gevlogen worden.

Inwinning

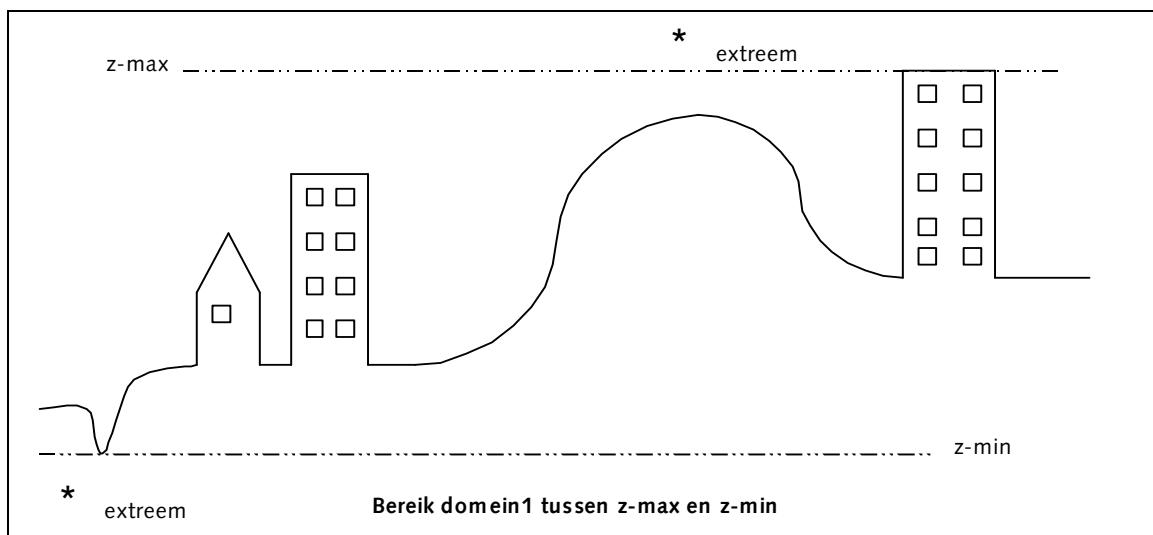
Voordat de opnamevluchten van start kunnen gaan wordt het GPS, INS en lasersysteem gecalibreerd. Dit gebeurt zowel op de grond als in een laboratorium. Tijdens het vliegen worden de GPS, INS en afstandsmetingen geregistreerd. De GPS grondstations doen tijdens de vlucht ook metingen op de grond. Tevens worden er tijdens de vlucht in het toestel calibratiemetingen van de sensoren uitgevoerd, welke niet op de grond uitgevoerd kunnen worden. Aangezien de GPS en INS sensoren een lagere meetfrequentie hebben dan de lasermetingen, moeten de toestelposities (gemeten met GPS) en de stand van het toestel (gemeten met INS) geïnterpoleerd worden om voor iedere lasermeting deze informatie te verkrijgen.

Verwerking metingen tot punten in het RD-NAP stelsel

Vervolgens worden de metingen van de verschillende systemen geïntegreerd. Deze integratie houdt in dat de GPS, INS en laserafstandsmetingen gecombineerd worden met de calibratieparameters om ellipsoïdische coördinaten in het WGS84 stelsel te krijgen. De WGS84 ellipsoïdische coördinaten worden met behulp van paspunten getransformeerd naar de Bessel-ellipsoïde van het RD-stelsel. Voor de juiste hoogte in het NAP stelsel is kennis van de plaatselijke geoïde nodig.

Verwijderen van extremen

Als gevolg van de gestelde specificaties voor domein 1 dient het laserhoogtebestand vrij te zijn van extremen: punten ver boven of onder de voor het projectgebied bekende topografiehoogten. Figuur 3.1 geeft een schematische voorstelling van een extreem hoog en een extreem laag punt.



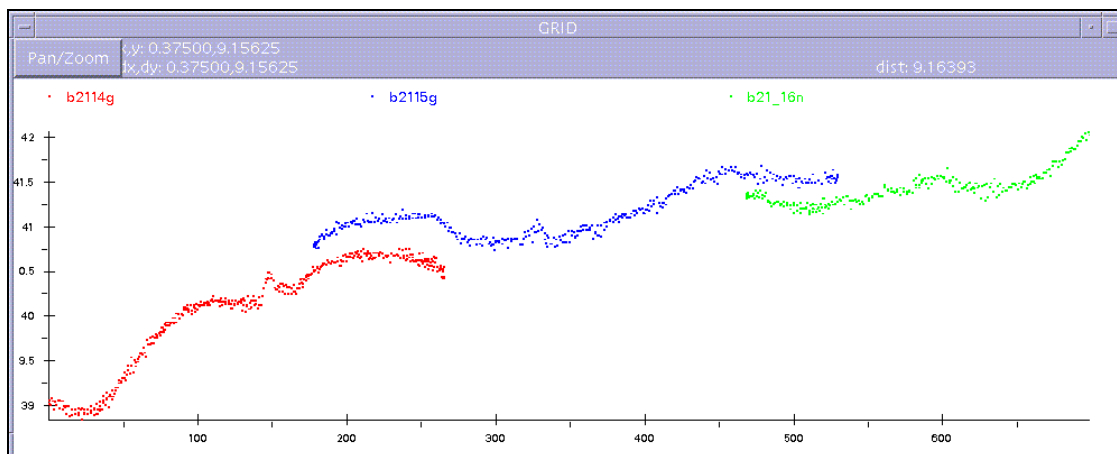
Figuur 3.1: Schematische voorstelling van een extreem hoog en een extreem laag punt.

3.2 Strookvereffening

In de laserhoogtebestanden komt het voor dat de punten in een vliegstrook allemaal een constante (hoogte)fout bevatten (offset), of omdat een strook gekanteld ligt ten opzichte van het werkelijke terrein. De kantelingen kunnen voorkomen in langs en dwarsrichting maar een strook kan ook gekenmerkt worden door een doorhang. Een combinatie van deze offsets, kantelingen en doorhangen kan zeer complex worden.

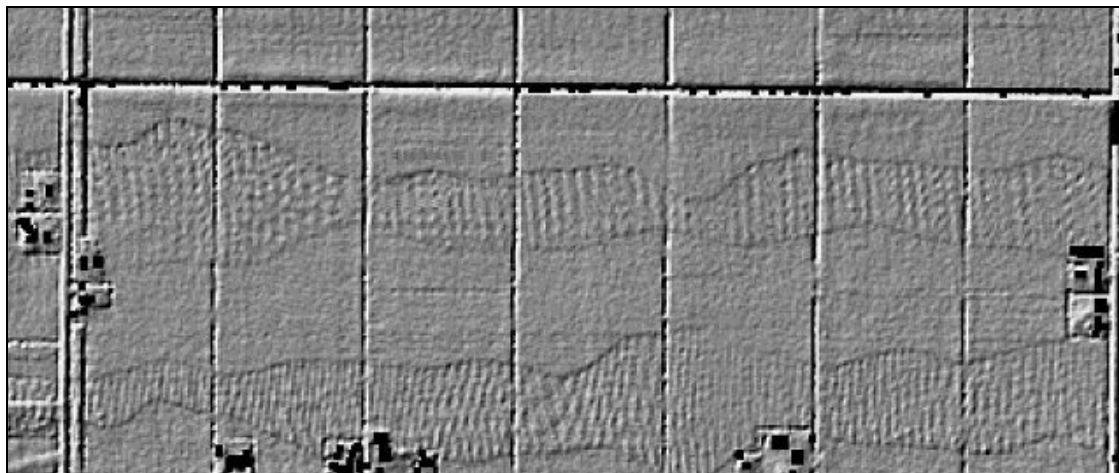
Doordat de verschillende stroken overlappen, kunnen de hoogtewaarden van beide stroken worden vergeleken in deze overlap. Het hoogteverschil kan oplopen tot enkele tientallen centimeters. De offsets en kantelingen manifesteren zich in een hoogteverschillenplot als abrupte hoogteverschillen tussen de strookranden. Deze abrupte hoogteverschillen worden ook wel "ribbels" genoemd.

Figuur 3.2 laat als voorbeeld een dwarsprofiel over drie stroken vóór strookvereffening zien. De punten hebben per vliegstrook een andere kleur.



Figuur 3.2: Dwarsprofiel over drie stroken vóór strookvereffening. Het is goed te zien dat de stroken in de overlap niet aansluiten: de punten van de blauwe stroken sluiten niet aan bij de punten van de rode en de groene strook.

Als er van de data een hillshade wordt gemaakt zijn grotere ribbels ook zichtbaar. Vooral de randen van de overlap vertonen een abrupt hoogteverschil. De overlappen zelf vertonen een grillig patroon. Een ribbel is te onderscheiden van andere abrupte hoogteverschillen (zoals dijken) doordat de ribbels precies de grenzen van de overlap volgen. In figuur 3.3 is een gebied met zeer grote ribbels afgebeeld.



Figuur 3.3: Hillshade van een gebied met zeer grote ribbels. De strookoverlappen met de grillige patronen zijn goed te herkennen.

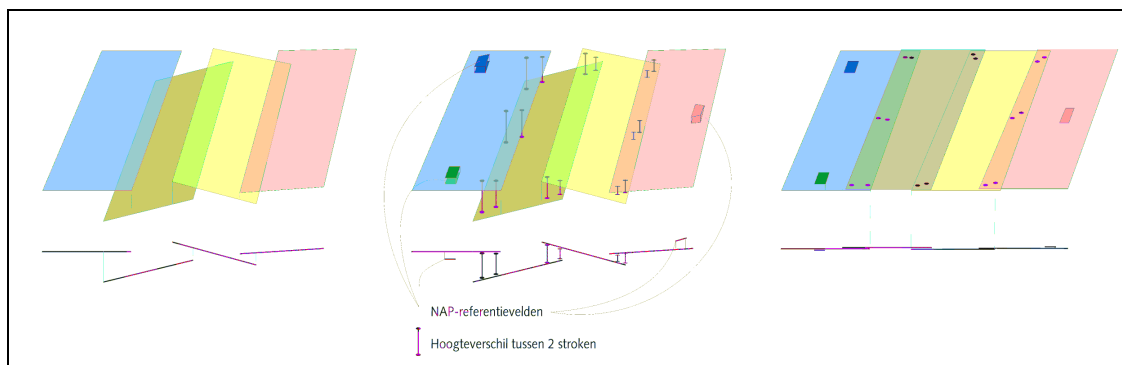
De oorzaak van deze hoogteverschillen kunnen fouten in GPS en INS (de plaatsbepalings- en standbepalingsinstrumenten) zijn. Initialisatiefouten en/of multipadeffecten (ontvangst van indirecte, weerkaatste pulsen) in de GPS metingen kunnen een offset geven in de uiteindelijke GPS berekening. Daarnaast kunnen kleine constante hoekfoutjes in het INS apparaat een kanteling veroorzaken voor de hoogtepunten dwars op de vliegrichting.

Omdat het om systematische fouten per vliegstrook gaat kan hiervoor worden gecorrigeerd door middel van een strookvereffening. Tegenwoordig wordt in de meeste gevallen de strookvereffening uitgevoerd door de leverancier.

3.2.1 Theorie strookvereffening

De strookvereffeningstheorie maakt gebruik van de samenhang van langsstroken, dwarsstroken en referentiegebieden. De correcties zijn gebaseerd op de hoogteverschillen die in de overlap van stroken kan worden bepaald: in theorie zouden overeenkomstige punten van de overlappende stroken immers dezelfde hoogte moeten hebben. De hoogteverschillen worden niet berekend aan de hand van losse laserpunten omdat die een hoge meetruis hebben (zo'n 10 tot 15 centimeter), maar aan de hand van gebiedsgemiddelden of controlegebiedjes.

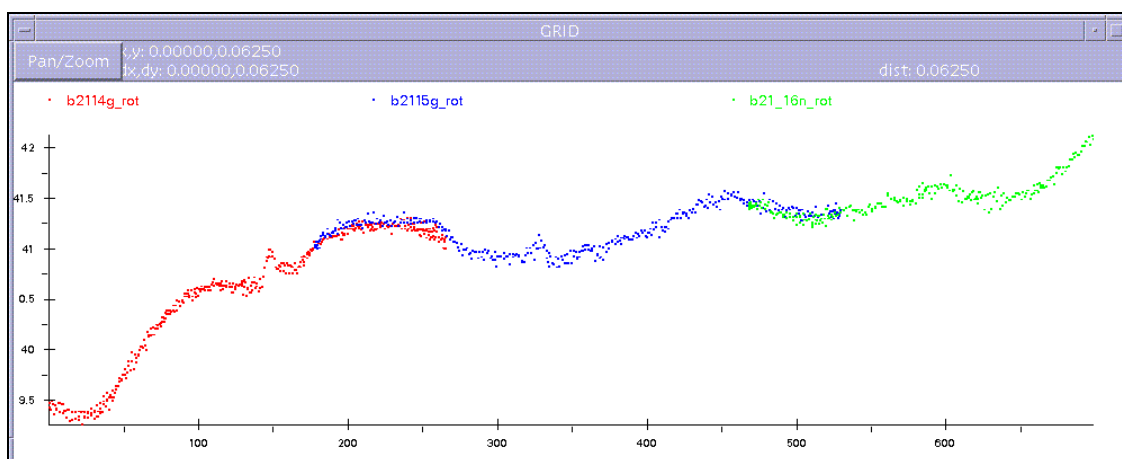
De grootte van de controlegebiedjes is afhankelijk van de punt dichtheid, maar bevat altijd ongeveer 500 losse laserhoogtepunten. De meetruis van deze laserhoogtepunten is grotendeels ongecorrigeerd, zodat bij middeling van de hoogtes de meetruis wordt uitgemiddeld. De precisie van het gemiddelde hoogteverschil is daarom zeer goed. Om de hoogteverschillen in de controlegebiedjes zo nauwkeurig mogelijk te kunnen berekenen wordt gebruik gemaakt van zo vlak mogelijke gebiedjes met zo min mogelijk begroeiing. Deze worden visueel "geprikt" in het laserhoogtebestand. De strookvereffening vindt plaats per strook met als uitgangspunt dat de gemiddelde hoogteverschillen tussen stroken zo klein mogelijk worden. Vervolgens wordt per strook een offset en tiltcorrectie berekend en toegepast. De stroken worden zo als het ware aan elkaar gerekend. Vervolgens wordt de hele strokendeken ingepast op referentievelden: bekende punten in RD-NAP. Figuur 3.4 is een schematische weergave van een strookvereffening.



Figuur 3.4: Schematische weergave van een strookvereffening. Hier zijn geen dwarsstroken afgebeeld, het gebruik van dwarsstroken zorgt voor een extra sterke configuratie doordat de dwarsstroken overlap hebben met meerdere stroken.

De verschillen die na de strookvereffening overblijven zijn een goede indicatie voor de bereikte kwaliteit in het hoogtebestand. Figuur 3.5 laat het resultaat van de strookvereffening toegepast op de stroken in figuur 3.2 zien. Doordat in de overlap van alle stroken zulke verschillen worden bepaald (alle overlappen moeten voldoen aan de kwaliteitseisen van laseraltimetrie), wordt een zeer gedetailleerd beeld van de hoogte kwaliteit verkregen.

Doordat de leverancier meestal al vereffent komen zeer grote ribbels of andere grote hoogteverschillen tijdens de controle bij de AGI eigenlijk al niet meer voor. Als er kleine hoogteverschillen of ribbels voorkomen kan overwogen worden een tweede vereffening toe te passen, al dan niet met extra referentievelden.



Figuur 3.5: Dwarsprofiel over drie stroken na strookvereffening. Het is goed te zien dat de stroken in de overlap nu wel aansluiten: de punten van de blauwe stroken sluiten aan bij de punten van de rode en de groene strook.

3.2.2 Nadelen van strookvereffening

In feite kan er een hoogtebestand worden verkregen door alleen langsstroken te vliegen. De hoogte wordt dan bepaald door de GPS en INS berekeningen. Om de hoogte te controleren worden referentievelden gebruikt. Bij de toepassing van strookvereffening worden de stroken aan de hand van de overlap naar elkaar toegerekend in een lokaal stelsel. Daarna wordt de strokendeken in hoogte opgehangen aan het NAP. Hiervoor zijn een bepaald aantal referentievelden nodig (minimaal drie). De dwarsstroken worden in de strookvereffening gebruikt om het netwerk van stroken steviger aan elkaar te kunnen rekenen. Bovendien zorgt de dwarsligging van de dwarsstroken voor een extra component in de dwarsrichting. Daarnaast zijn er extra referentievelden nodig (die niet zijn gebruikt voor de strookvereffening) om het vereffende bestand onafhankelijk te kunnen toetsen.

De strookvereffening is erop gericht om voor het gebied als totaal een betere hoogtebeschrijving te verkrijgen. Het naar elkaar toerekenen van de stroken heeft natuurlijk invloed op de hoogteligging van de afzonderlijke stroken. Omdat de uiteindelijke strokendeken wordt ingepast op

referentiegebieden blijft er altijd een relatie bestaan met de werkelijke hoogte. Over het algemeen zullen gebieden die een sterke configuratie van referentiegebieden en dwarsstroken hebben een beter resultaat opleveren. Bij een sterke configuratie is er een optimale ruimtelijke verdeling tussen langsstroken, dwarsstroken en referentiegebieden. Na het toepassen van strookvereffening zullen bepaalde stukken in het gebied een kwalitatief betere hoogtebeschrijving krijgen dan vóór strookvereffening. Daar staat tegenover dat andere stukken na strookvereffening juist een minder goede hoogtebeschrijving krijgen dan vóór strookvereffening. Over het algemeen kan gesteld worden dat de hoogtebeschrijving na strookvereffening voor het gebied *als totaal* altijd beter is.

3.3 Filterverwerking

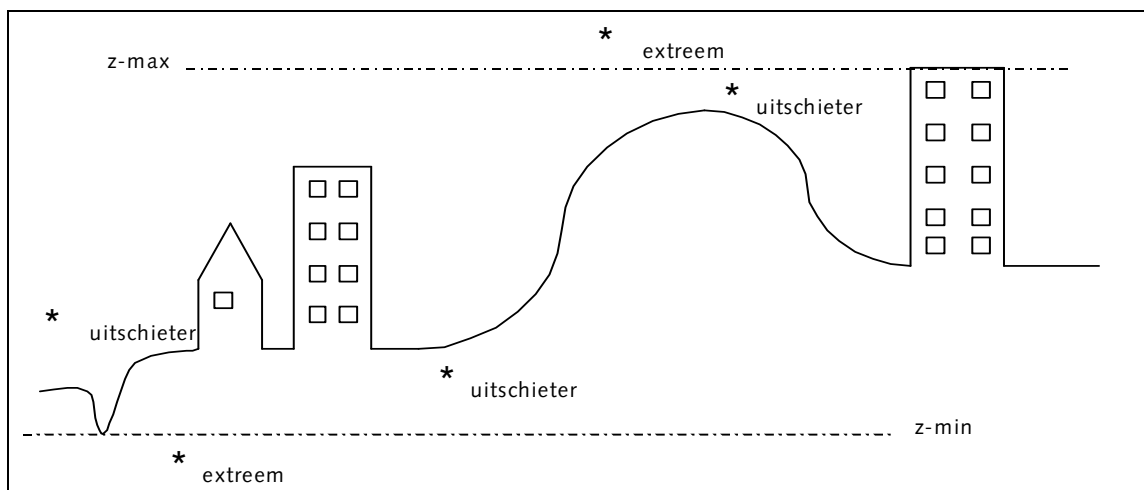
De filterverwerking wordt door de leverancier in het domein filterverwerking uitgevoerd. De laser zal bij het aftasten van het aardoppervlak op alle landschapsobjecten, zoals vegetatie en bebouwing, terugkaatsen en ook de hoogte van die vegetatie of gebouwen weergeven. Voor veel toepassingen is men echter alleen geïnteresseerd in de maaiveldhoogte, waarbij vegetatie en gebouwen verwijderd zijn en bovendien nog enkele andere specifieke objecten. De ongewenste vegetatie en objecten moeten dus verwijderd worden uit de dataset, zodat er een gefilterd bestand ontstaat (maaiveld) en een uitgefilterd bestand (alle uitgefilterde objecten). De richtlijnen voor filterverwerking zijn in de specificaties gegeven (zie paragraaf 2.3). Filtering van de ruwe laserdata levert een dataset op die direct bruikbaar is voor de beoogde doeleinden.

3.3.1 Werkwijze filteren

Het handmatig verwijderen van de hoogtegegevens die betrekking hebben op ongewenste terreinobjecten is een ondoenlijke zaak voor omvangrijke gebieden. Men heeft daarom gezocht naar berekeningsmethoden om hoogtegegevens die niet corresponderen met de gewenste terreinsituatie automatisch uit de data te verwijderen. Uitgaande van de signaelvorm van de ongewenste terreinobjecten wordt een generiek signaalmodel gemaakt van de betreffende terreinobjecten. Bebouwing bijvoorbeeld kenmerkt zich door hoge, abrupte zijwaartse sprongen in het hoogtesignaal. Gebruikmakend van deze kennis zijn filters ontwikkeld die zulke sprongen optimaal detecteren en verwijderen. Aanvullend op deze automatische detectie zal het in een aantal gevallen noodzakelijk zijn ook een handmatige of visuele bewerking uit te voeren.

Naast het filteren van gebouwen en vegetatie dienen, conform de specificaties, ook uitschieters te worden uitgefilterd. Deze uitschieters mogen niet voorkomen in zowel het uiteindelijke gefilterde bestand als het uitgefilterde bestand. Uitschieters zijn zichtbare, lokaal extreem hoge of lage punten in relatie tot de directe omgeving, die derhalve geen maaiveld of topografisch object ter plaatse beschrijven. Figuur 3.6 geeft een schematische voorstelling van een hoge en een lage uitschieter. Hierin is ook het verschil met een extreem goed te zien: een uitschieter valt qua hoogte binnen de normale z-waarden van het gebied, een extreem valt hier ver onder of boven.

Overigens kan aan de z-waarde van een punt niet direct worden afgeleid of het een extreem of een uitschieter is: in een relatief vlak gebied met lage bebouwing kan een punt met een z-waarde van 100 meter een extreem zijn. Een uitschieter kan een punt zijn dat 30 meter boven de normale z-waarde van de omgeving uitsteekt. Er moet dus altijd worden gekeken naar de hoogte van het punt ten opzichte van de hoogte van de directe omgeving.



Figuur 3.6: Schematische voorstelling van een hoge uitschieter en een lage uitschieter. De extremen zijn ook aangegeven om het verschil tussen extremen en uitschieters aan te duiden.

3.3.2 Beperkingen van filteren

Om de filterprocedure goed uit te kunnen voeren is het belangrijk om een hoge dichtheid van nauwkeurige lasermetingen te hebben. De belangrijkste beperkingen van de filtermethoden zijn te wijten aan:

1 De niet-discriminatoire eigenschappen van de filters

Filtermethoden die gekoppeld zijn aan herkenning van signaaltypes kunnen feilloos specifieke objecten wegfilteren. Een probleem ontstaat door de niet-discriminatoire eigenschap van zulke filters. Het filter verwijdert objecten met een vooraf opgestelde signaaltipe, maar kan geen onderscheid maken in ongewenste objecten die daadwerkelijk gefilterd moeten worden en objecten die dezelfde signaaltipe kennen, maar niet gefilterd mogen worden. Wanneer een filter bijvoorbeeld geoptimaliseerd is om gebouwen te verwijderen, dan zullen ook de toppen van sterk hellend terrein (bijvoorbeeld dijken) verwijderd of afgeknot worden. Door de instelparameters optimaal in te stellen, kunnen deze fouten zoveel mogelijk beperkt worden. Het maken van fouten zal echter onvermijdelijk zijn.

2 Terreinruwheid

De terreinruwheid is de mate van variatie in de terreinhoogte binnen de footprint van de laserpuls. De hoogtemeting zal beïnvloed worden door de mate van terreinruwheid. Bij de filterverwerking is dan niet altijd te bepalen of het gaat om (lage) vegetatie of een sterk in hoogte variërend terrein.

Het raadplegen van additionele informatie zorgt voor een effectiever filterverwerkingsproces. Meerdere opties zijn mogelijk:

- * Gebruik van eerder bepaalde DHM's van het gebied. Deze DHM's kunnen met een andere meetmethode zijn bepaald en/of een andere punt dichtheid hebben;
- * Gebruik van beeldmateriaal dat gelijktijdig met de laseraltimetrie vlucht werd opgenomen, zoals een video of orthofoto's. Ook andere bestanden die een opnametijd vlak voor of na de vlucht hebben kunnen gebruikt worden;
- * Gebruik van vectorbestanden voor het herkennen van bebouwing, zoals TOP10Vector, GBKN en DTB bestanden (zie ook paragraaf 4.4.5 voor het gebruik van vectorbestanden voor de controle bij de AGI).

De techniek staat echter niet stil: in de toekomst kunnen mogelijk ook andere bronnen worden ingezet, zoals computerondersteunde classificatie van multispectrale remote-sensing beelden. Hiermee kan onderscheid gemaakt worden tussen bijvoorbeeld water, vegetatie, braakliggend en bebouwd gebied.

3.4 Interpolatie van een DHM

De laserpunten worden zowel bij domein 1 als bij domein 2 aangeleverd als losse punten per vluchtstrook. Deze laserhoogtepunten worden door de AGI ingelezen waarna deze opgeslagen worden in een zogenaamd quadtreebestand. De opslag van de punten als quadtreebestand heeft als voordeel dat het verwerken van de bestanden aanzienlijk versneld wordt. De hoogtepunten in een quadtreebestand kunnen niet direct worden weergegeven op het scherm, maar worden o.a. gebruikt om te interpoleren naar een regelmatig grid. Wel kunnen er over de grids profielen worden getrokken over de quadrees, waarbij de punten langs dit profiel wel afgebeeld kunnen worden.

Na het inlezen van de laserhoogtepunten worden hiermee diverse grids gemaakt die gebruikt worden tijdens de controle. Ook de losse laserpunten kunnen gebruikt worden tijdens de controle. Nadat alle controles zijn uitgevoerd en het bestand is goedgekeurd, worden naast de basisbestanden (puntenbestanden) standaard diverse afgeleide producten gemaakt. Dit zijn de volgende hoogteproducten:

- * 5x5 meter DHM
- * 25x25 meter DHM
- * 25x25 meter MIN grid (grid met minimale hoogte)
- * 25x25 meter MAX grid (grid met maximale hoogte)
- * 25x25 meter STD grid (grid met standaarddeviatie)
- * 25x25 meter FREQ grid (frequentiegrid of grid met het aantal hoogtemetingen)
- * 100x100 meter DHM
- * 100x100 meter MIN grid (grid met minimale hoogte)
- * 100x100 meter MAX grid (grid met maximale hoogte)
- * 100x100 meter STD grid (grid met standaarddeviatie)
- * 100x100 meter FREQ grid (frequentiegrid of grid met het aantal hoogtemetingen)

Naast deze standaardproducten kunnen er, afhankelijk van de specificaties, ook andere producten worden geleverd. De interpolatiemethoden staan beschreven in de productspecificatie van het AHN en zullen daarom hier niet worden behandeld.

Deel 2: Controle bij de AGI

4 Controle bij de AGI: Domein 1

De kwaliteitscontrole van de AGI hangt nauw samen met de specificaties zoals die in paragraaf 2.3 zijn opgesteld. Het eindproduct van het domein gegevensinwinning en verwerking is een ongefilterd hoogtebestand, vrij van extremen, dat geometrisch is verwerkt en dat in de oorspronkelijke punt dichtheid (niet geresampled) wordt geleverd. De controles van domein 1 zijn dan ook gericht op de punt dichtheid, frequentie van de metingen, de hoogtenauwkeurigheid, planimetrie en extremen. Een fout in de afstelling bij plaats- en standsbepaling op de grond en in het vliegtuig is snel gemaakt en kan als consequentie hebben dat de laserdata van een vlucht horizontaal (planimetrisch) of verticaal is verschoven. Hier moet de leverancier voor corrigeren, de taak van de AGI is om onafhankelijk te controleren of de bestanden voldoen aan de vereiste kwaliteit.

Bij de domein 1 controle wordt op de volgende punten gecontroleerd:

- 1 Statistische hoogtecontrole;
- 2 Controle van de frequentie van de metingen;
- 3 Controle van de punt dichtheid van de metingen;
- 4 Controle op ontbrekende data;
- 5 Controle van de strookaansluiting en –overlap;
- 6 Controle op extremen;
- 7 Controle van de planimetrie;
- 8 Controle van hoogteprecisie aan de hand van de vier foutsoorten.

De volgende paragrafen zullen de controles en de stappen die daarin genomen worden nader beschrijven.

4.1 Statistische hoogtecontrole: validatie met behulp van referentiemetingen

In het opnamegebied worden door de AGI controlegebieden ingemeten. Deze liggen op vlak gebied met een vaste ondergrond, bij voorkeur sportvelden, soms parkeerterreinen. In een raster van ongeveer 50x50 meter wordt om de 5 meter een punt gemeten. Het referentiegebied bevat dus ca. 121 punten. Van dit gebied wordt een gemiddelde bepaald, waarna deze hoogte vergeleken wordt met de uit de laserdata afgeleide hoogte. Op deze wijze wordt een precisieschatting verkregen van de laserhoogten.

De hoogte van de controlegebieden wordt op een onafhankelijke terrestrische manier ingewonnen. Dat kan bijvoorbeeld GPS stop and go, real-time kinematische GPS of waterpassing zijn. Met behulp van omliggende NAP bouten wordt de referentiedataset nauwkeurig bepaald ten opzichte van het NAP. Het resultaat is een bestand met x,y,z-waarden.

De controlevelden worden gebruikt als input voor de berekening van de foutsoorten (zie ook paragraaf 4.5). Aan deze foutsoorten worden eisen gesteld waar de leverancier aan moet voldoen. Daarnaast kunnen de controlevelden worden gevalideerd met de laserhoogtedata om een statistische hoogtecontrole uit te kunnen voeren. Er worden geen eisen aan de leverancier gesteld: als er immers een fout is in de hoogteligging wordt deze al opgemerkt in de foutsoortencontrole (foutsoort 4b). De hoogtevalidatie wordt echter wel als controle uitgevoerd, omdat deze meer zegt over de ruimtelijke ligging van de verschillen. Mogelijke lokale 'probleemgebieden' kunnen hierdoor sneller worden ontdekt.

Om een validatie uit te kunnen voeren tussen een controlegebied en de punten uit het laserhoogtebestand worden de controlepunten geïnterpoleerd. Op de locatie van ieder controlepunt wordt op basis van de omliggende laserhoogtepunten binnen de in te stellen footprint (of zoekgebied) één waarde voor deze punten berekend. De interpolatiemethode die standaard wordt gebruikt is het gewogen gemiddelde, waarbij de wegingsfactor het kwadraat van de afstand tot het te interpoleren punt is. De standaard footprint is 8 meter, aangezien de punten om de 5 meter worden gemeten.

Per controlepunt worden de verschillen berekend met het gewogen gemiddelde van de laserpunten rond die locatie. Daarnaast worden ook statistische parameters als gemiddeld verschil, standaardafwijking van de verschillen en de root-mean-square (RMS) ofwel de standaardafwijking ten

opzichte van het gemiddelde berekend. De verschillen worden opgeslagen in een aparte file.

Naast de gemiddelde of statistische afwijking worden ook de statistische parameters gecontroleerd: een hoge standaardafwijking of een hoge RMS kunnen duiden op hoogteafwijkingen in de referentievelden (bijvoorbeeld als er een punt te dicht bij de dug-out van het sportveld is gemeten) of afwijkingen in het laserhoogtebestand. Bij grote afwijkingen wordt nader onderzocht wat de oorzaken zijn.

4.2 Controle van de frequentie

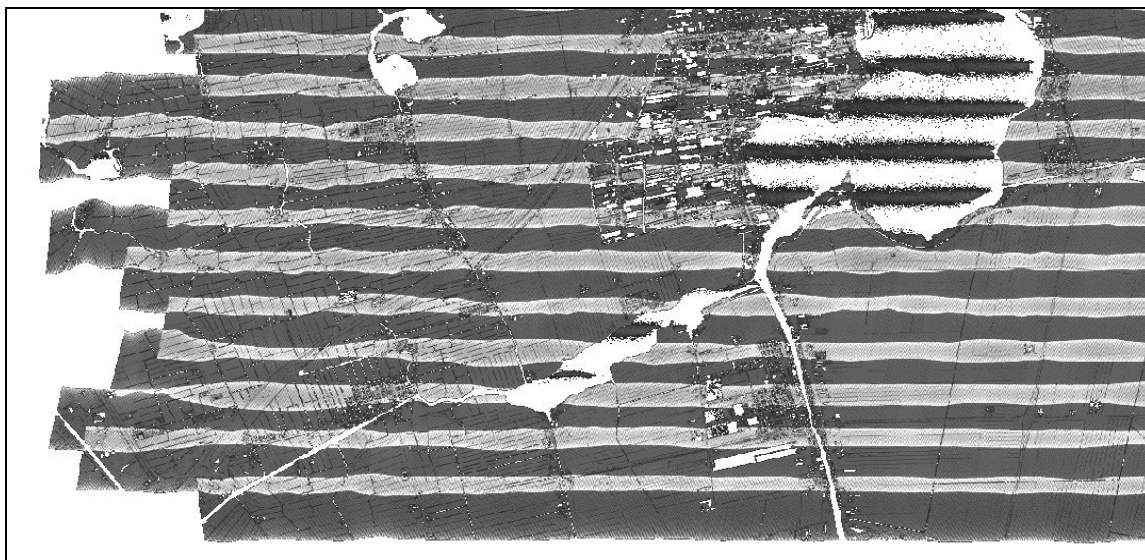
De frequentie van de metingen zegt iets over de werking van de scanner en geeft inzicht in de homogeniteit van de ingemeten laserhoogtepunten. Daartoe wordt van de losse laserpunten een frequentiegrid gemaakt: iedere gridcel krijgt een waarde die gelijk is aan het aantal laserpunten dat binnen de gestelde footprint valt. Bij een punt dichtheid van 1 punt per 4 m² worden de volgende instellingen gebruikt:

gridgrootte = 4 x 4 meter;

footprint = 4 meter;

minimaal aantal punten = 1;

maximaal aantal punten = 32000.



Figuur 4.1: Voorbeeld van een frequentiegrid. Hoe lichter het grid van kleur is, hoe hoger de frequentie. De geheel witte delen zijn no-data gebieden.

Figuur 4.1 is een afbeelding van (een gedeelte van) een frequentiegrid. Hierin is de strokenligging goed te zien. De lichtere delen in de stroken zijn de overlappende delen, deze hebben ongeveer twee keer de frequentie dan de niet-overlappende delen van de stroken. Ook is goed te zien dat boven water alleen de laserpulsen onder het vliegtuig reflecteren.

Het frequentiegrid wordt op diverse storingen gecontroleerd:

Wasborden

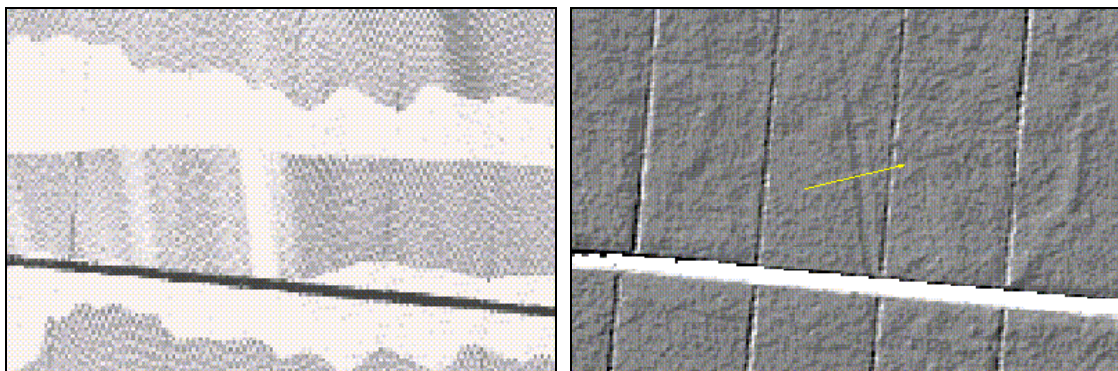
Hoogteverschillen tussen stroken hebben naast ribbels soms ook een ander gevolg: bij een bepaalde combinatie van punt dichtheid, afstand tussen de scanlijnen en gridgrootte ontstaan zogenaamde wasborden. De hoogtewaarde van de cellen van het DHM worden niet meer bepaald door een mix van punten van beide stroken maar afwisselend door de laserpunten van de ene en de andere strook. Zo ontstaat een min of meer regelmatig patroon van hoge en lage waarden met een wasbord tot gevolg. De hoogteverschillen zijn ongeveer gelijk aan het hoogteverschil tussen de stroken en kunnen makkelijk oplopen tot zo'n 15 - 20 centimeter. Omdat de wasborden dezelfde oorzaak hebben als de ribbels is er op de plaats van een wasbord ook altijd een ribbel te zien (andersom niet). Als de strookcorrectie goed is uitgevoerd zullen er zelden wasborden voorkomen.

Puntenverdichtingen

De volgende storing in de data die regelmatig voorkomt heeft niets met hoogteverschillen tussen stroken te maken. Het betreft zogenaamde puntenverdichtingen in de stroken, haaks op de vliegrichting. Puntenverdichtingen lijken te ontstaan doordat het vliegtuig met zijn neus op en neer gaat. Voor of na de verdichtingen is de punt dichtheid dan meestal lager. De verdichting is goed te zien in het frequentiegrid: je ziet dan een extra lichte baan, dwars op de strookrichting. De verdunningen (die onvermijdelijk voor en na de verdichtingen voorkomen) kun je niet zo duidelijk zien. Het belangrijkste is echter dat de hoogte op de plaats van zo'n verdichting fout kan zijn. De afwijking varieert van zeer gering tot maar liefst 20 cm! De precieze oorzaak van de afwijking is onbekend, maar het komt niet vaak voor.

In het frequentiegrid kunnen de puntenverdichtingen dus opgespoord worden, vervolgens kan in het schaduwbestand de invloed van deze puntenverdichtingen worden beoordeeld. Is er niets zichtbaar dan heeft de puntenverdichting nauwelijks invloed gehad op de hoogte.

Figuur 4.2 is een afbeelding van een puntenverdichting in het frequentiegrid en de zichtbaarheid in het schaduwbestand.



Figuur 4.2: Voorbeeld van een puntenverdichting in het frequentiegrid (links) en de zichtbaarheid daarvan in het schaduwbestand (rechts).

4.3 Controle van de punt dichtheid

De punt dichtheid geeft het gemiddelde aantal laserpunten per vierkante meter in het terrein weer voor het hele gebied van laserhoogtemetingen. De punt dichtheid die minimaal gegarandeerd kan worden is 1 punt per 16 m². Voor specifieke gebieden of op aanvraag van de klant is het mogelijk met een hogere punt dichtheid te vliegen.

De punt dichtheid van een laserhoogtebestand heeft op verschillende manieren invloed op de uiteindelijke kwaliteit van het bestand. De meest duidelijke invloed is die op de terreinbeschrijving: hoe hoger de punt dichtheid, hoe beter de terreinbeschrijving. Dit heeft tot gevolg dat objecten gemakkelijker herkend kunnen worden, waardoor de kwaliteit van de filtering toe zal nemen. Ook zal de detectie van breuklijnen in het terrein (bijvoorbeeld de voet van een dijklichaam) nauwkeuriger worden. Bij een hogere punt dichtheid zal ook de nauwkeurigheid van het 5x5 meter DHM en verdere afgeleide grids toenemen. Een mogelijk nadeel van een hoge punt dichtheid is dat de grootte van de bestanden hoog kan oplopen, wat ook de bewerkingssnelheid kan beïnvloeden.



Figuur 4.3: Voorbeeld van een punt dichtheidsgrid. Een groene kleur betekent dat de gridcel voldoet aan de punt dichtheidseis, een rode kleur betekent dat de gridcel niet voldoet aan de punt dichtheidseis.

Voor de controle van de punt dichtheid wordt een punt dichtheidsgrid gemaakt. Het uitgangspunt voor dit grid is het eerder gemaakte frequentiegrid; hierin wordt voor iedere gridcel het aantal laserhoogtepunten binnen deze cel gegeven. De instellingen van het frequentiegrid zijn dus van belang voor het punt dichtheidsgrid: de gridgrootte moet zo gekozen worden dat er een geheel aantal puntjes in vallen om de punt dichtheid goed af te kunnen beelden. In figuur 4.3 is een voorbeeld gegeven van een punt dichtheidsgrid. Door het opgeven van een de punt dichtheidseis voor het project wordt het grid weergegeven in twee kleuren: een groene gridcel betekent dat de punt dichtheid voldoet, een rode kleur betekent dat de punt dichtheid niet voldoet. Hierdoor kan snel een visuele controle plaatsvinden van de punt dichtheid van het hele gebied. Bij het maken van een punt dichtheidsgrid rekent het systeem een gemiddelde punt dichtheid uit voor het hele gebied. Dit is een goede indicatie voor de punt dichtheid van het hele gebied, maar de punt dichtheidseis geldt voor ieder deel van het bestand. Bij de berekening van de punt dichtheid voor het hele bestand zijn ook de overlappen meegenomen, waardoor het gemiddelde van het hele gebied hoger is dan in de afzonderlijke stroken zonder overlap. Daarom wordt van minimaal drie willekeurige afzonderlijke stroken ook de punt dichtheid bepaald (dus de punt dichtheid zonder overlap). De combinatie van de gemiddelde punt dichtheid, de punt dichtheid van drie afzonderlijke stroken en de visuele inspectie van het punt dichtheidsgrid waarborgen een goede controle op de punt dichtheid. Bij twijfelgebieden kan van een willekeurig gebied ook een lokale punt dichtheid worden berekend.

4.4 Visuele controle

Naast de statistische controles wordt de data ook onderworpen aan een visuele controle, waarbij onder andere wordt gekeken naar de volledigheid van de data, de strookaansluiting en –overlap en de planimetrie. Voor de controle wordt gebruik gemaakt van een aantal standaard controle bestanden. In de volgende paragraaf wordt beschreven welke bestanden dit zijn en hoe zij worden opgebouwd. Van ieder bestand is een voorbeeldfiguur toegevoegd wat hetzelfde gebied betreft.

4.4.1 Controlebestanden voor domein 1

Ruw DHM

Alle laserhoogtepunten worden geïnterpoleerd naar een regelmatig grid. Op ieder punt in het grid wordt een waarde voor de hoogte berekend op basis van de omliggende punten binnen de in te stellen footprint. Standaard is dit een 5x5 meter grid met een footprint van 8 meter, bij een hogere punt dichtheid kan een fijner grid gemaakt worden. De gebruikte interpolatiemethode is het gewogen gemiddelde. De term ruw DHM hangt samen met het feit dat er na filtering (domein 2) ook een gefilterd DHM gemaakt kan worden. Zie hiervoor paragraaf 5.1. In het ruwe DHM voor de controle van domein 1 zijn dus alle laserhoogtepunten aanwezig (behalve extremen).



Figuur 4.4: Voorbeeld van een ruw DHM

Ruwe hillshade

Uit het ruwe DHM wordt een schaduwbestand berekend met gridcelwaarden tussen de 0 en 255 welke een lichtintensiteit aangeven. Dieptewerking wordt verkregen door de z-waarde te overdrijven met een factor 2 tot 4. Deze factor is naar eigen inzicht maar moet wel consequent worden toegepast om vergelijkingen tussen bestanden te kunnen maken. Als opties kunnen het azimuth (stand van de lichtbron t.o.v. het noorden) en de altitude (hoek van de inkomende lichtstralen met het aardoppervlak) worden ingesteld. Meestal worden er twee hillshades gemaakt: één waarbij het azimuth min of meer haaks op de strookrichting staat en één waarbij het azimuth min of meer parallel aan de strookrichting staat. Het eerste bestand maakt hoogteverschillen tussen stroken (dus ook ribbels) optimaal zichtbaar en maakt tevens de meest natuurlijke indruk. In figuur 4.5a is een dergelijke hillshade afgebeeld. Het tweede bestand maakt hoogteverschillen zichtbaar als gevolg van bijvoorbeeld puntenverdichtingen. In figuur 4.5b is een dergelijke hillshade afgebeeld. De strookrichting wordt afgeleid uit het frequentiegrid.

Het bestand kan door de dieptewerking goed gebruikt worden om onregelmatigheden in het bestand snel op te sporen, bovendien geeft de hillshade een natuurlijker en duidelijker beeld van de aard van de objecten in het gebied dan een DHM. Het bestand kan echter niet worden gebruikt om de precieze locatie van objecten te meten, aangezien er een optische verschuiving plaatsvindt door de illusie van hoogte.



Figuur 4.5a: Voorbeeld van een ruwe hillshade met het azimut haaks op de stroomrichting.

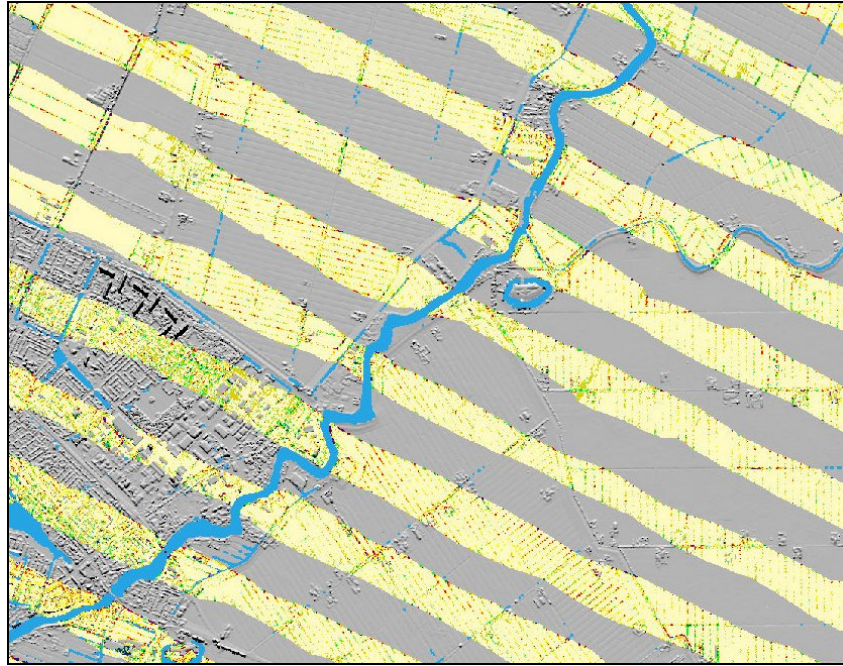


Figuur 4.5b: Voorbeeld van een ruwe hillshade met het azimut parallel aan de stroomrichting.

Verschilgrid van de strookoverlappen

Van de hoogteverschillen tussen de stroken wordt een grid gemaakt. Het grid heeft alleen waarden in de overlappen van de stroken, omdat in de niet overlappende delen geen verschillen kunnen worden berekend. Standaard is het verschilgrid een 5x5 meter grid met een footprint van 5 meter. De gebruikte interpolatiemethode is het ongewogen gemiddelde. De verschillen van het verschilgrid zijn van oorsprong in meters, maar wordt omgerekend naar centimeters omdat dit de orde van grootte van de hoogteverschillen beter benadert. Voor de weergave van het verschilgrid is een standaardlegenda beschikbaar: de verschillen worden geclassificeerd naar grootte waarbij iedere klasse een kleur krijgt. In figuur 4.5 is een voorbeeld gegeven van een verschilgrid.

Het verschilgrid wordt gebruikt voor het verkrijgen van inzicht in de relatieve ligging van de stroken. Daarnaast kunnen onregelmatigheden in de hoogteverschillen snel opgespoord worden.



Figuur 4.6: Voorbeeld van een verschilgrid van de strookoverlappen (geelkleurige banen). Als ondergrond is een hillshade gebruikt.

Ruw RMS

Hierbij wordt per footprint de standaardafwijking ten opzichte van de gemiddelde hoogte van de laserhoogtepunten binnen de footprint berekend. Standaard is dit een 5x5 meter grid met een footprint van 5 meter. In het resulterende grid worden de relatieve afwijkingen afgebeeld van de laserpunten, een geïsoleerde gridcel met een hoge RMS waarde duidt op de mogelijke aanwezigheid van een extreem punt of een uitschieter. Dit laatste komt pas bij de controle van domein 2 aan de orde. In figuur 4.7 is een RMS grid afgebeeld.



Figuur 4.7: Voorbeeld van een RMS grid met een detail waarin uitschieterende waarden duidelijk als witte puntjes in een egaal grijze ondergrond te zien zijn.

4.4.2 Controle op ontbrekende data

ontbrekende data waarvoor opnieuw gevlogen moet worden

Het gaat hier om delen die niet gevlogen zijn, gaten tussen stroken door onvoldoende overlap, water op weilanden (wat er normaal niet is), mist, te lage punt dichtheid, e.d. Er wordt zo snel mogelijk op dit onderdeel gecontroleerd want ontbrekende data kan een reden zijn om (delen van) het gebied te laten overvliegen. Er wordt gecontroleerd (met name in geval van uiterwaarden e.d.) of er niet gevlogen is met hoog water. Vliegen tijdens hoog water is niet toegestaan.

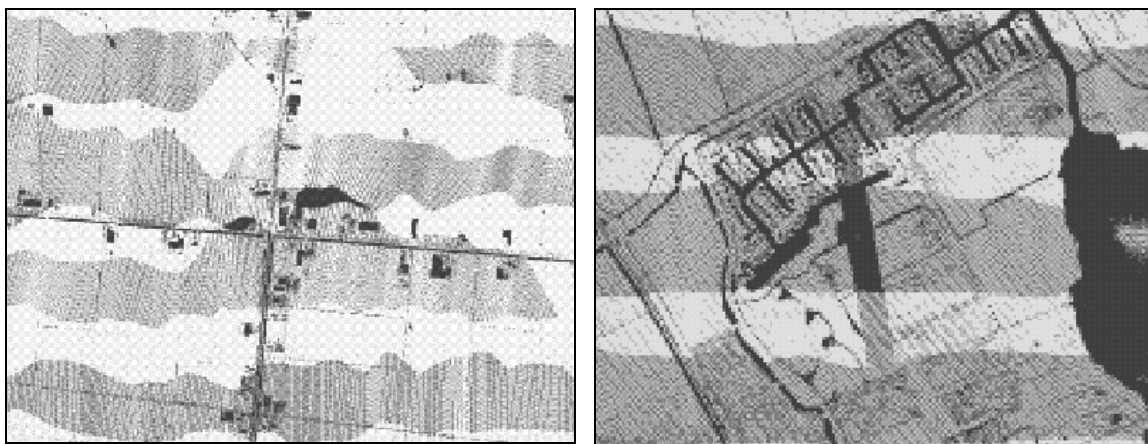
ontbrekende data die wel beschikbaar is

Soms worden bij een levering niet alle stroken geleverd, of er ontbreken delen van stroken. De ontbrekende delen zijn echter wel te leveren.

Ontbrekende data is goed te zien in het frequentiegrid omdat de ligging van de stroken zichtbaar is. Gebrek aan overlap en het ontbreken van stukken strook vallen meteen op in het frequentiegrid (zie figuur 4.8). Met behulp van de projectgrens wordt gecontroleerd of de data binnen het aangegeven gebied aanwezig is. Door middel van een contrasterende kleur van de ondergrond en het DHM kunnen de gebieden waar geen data aanwezig is gevonden worden, waarna gecontroleerd wordt of dit inderdaad om ontbrekende data gaat die wel aanwezig zou moeten zijn. Grote wateroppervlakken zoals meren, rivieren en sloten, maar ook watertanks zijn vaak gebieden zonder data, maar deze worden niet als ontbrekende data aangegeven. De reden is dat door de absorberende eigenschappen van water de hoogte van wateroppervlakken niet of slechts ten dele gemeten kunnen worden met laserpulsen. Bij een eventuele hervlucht zal deze situatie niet anders zijn.

Bij de aanwezigheid van water op weilanden en uiterwaarden (bijvoorbeeld door overstromingen of zware regenval) geldt dat er bij hervluchten op een later tijdstip wanneer de weilanden of uiterwaarden weer droog staan, er wel data kan worden ingewonnen. Deze gebieden worden wel als ontbrekende data aangegeven.

Met behulp van topografische kaarten, het TOP10 vector bestand en met luchtfoto's wordt bepaald of de ontbrekende data een vastgelegd wateroppervlak is. Als dat niet het geval is wordt het in een shapefile als ontbrekende data aangegeven.



Figuur 4.8: Voorbeeld van ontbrekende data tussen stroken (links) en een stuk strook dat ontbreekt (rechts). Beiden komen goed naar voren in het frequentiegrid.

4.4.3 Controle van de strookaansluiting en –overlap

Door diverse oorzaken zijn er vaak verschillen in hoogte tussen elkaar overlappende stroken. Dit leidt tot de zogenaamde ribbels in het DHM: abrupte hoogteovergangen op de grens van de enkele strook en de overlapzone. Met behulp van het verschilgrid kunnen deze hoogteverschillen worden gevisualiseerd door middel van kleur(verschillen) (zie ook figuur 4.6). Het gebruiken van het verschilgrid heeft twee voordelen: ook ribbels die niet zichtbaar zijn in de hillshade kunnen worden opgemerkt, daarnaast kunnen ook andere strookvervormingen worden opgemerkt. Bovendien kunnen alle hoogteverschillen ook m.b.t. hun ruimtelijke ligging worden beoordeeld. In het verschilgrid zijn ribbels herkenbaar aan de gekleurde rand aan de strookoverlappen. Aan de hand van de legenda kun je afleiden hoe groot de ribbel is.

De correcties op de hoogteligging van de stroken wordt door de leverancier gedaan. In principe mag

een domein 1 levering geen (grote) hoogteverschillen en vormfouten bevatten. Als deze wel geconstateerd worden zal de leverancier moeten corrigeren of vereffenen. De strookcorrectieprocedure kan de hoogteverschillen tussen stroken vaak niet 100% wegwerken. Er blijven dus meestal wat kleinere ribbels of hoogteverschillen over. Omdat de data in losse stroken geleverd is kan het werkelijke strookhoogteverschil bepaald worden door een profiel te trekken over de losse punten van de afzonderlijke stroken.

De overlap moet voldoen aan een minimale breedte. De eisen die hieraan gesteld worden hangen samen met de punt dichtheid van het laserhoogtebestand. Voor het uiteindelijke bestand is de overlapbreedte niet van invloed, de eisen zijn voornamelijk van belang voor de instellingen bij de controle van de foutsoorten. Algemeen gezegd moet de overlap minimaal 25 maal de gemiddelde laserpuntafstand zijn met een minimale waarde van 25 meter. Voor een laserhoogtebestand met bijvoorbeeld een punt dichtheid van 1 punt per 9 m² is de gemiddelde laserpuntafstand 3 meter, de overlap is dan minimaal $25 \times 3 = 75$ meter. De gemiddelde laserpuntafstand wordt bij voorkeur berekend aan de hand van de punt dichtheid van de niet-overlappende delen van een enkele strook. Voor de controle van de strookoverlapbreedte wordt het verschilgrid gebruikt. Naast het meten van de breedte van de smalste stukken van de overlappen, wordt ook gecontroleerd of de overlappen ook een min of meer constante overlap hebben. Als dit niet het geval is (door voortdurend heen en weer zwenken van het vliegtuig) kan dit betekenen dat de hoogteaansluiting van de stroken slecht is.

4.4.4 Controle op extremen

Door diverse oorzaken bevinden zich regelmatig punten in de ruwe data (of ongefilterde data) met een foutieve, vaak erg hoge of lage waarde (zie ook figuur 3.1). Deze punten hebben een negatieve invloed op het grid. Er kan onderscheid gemaakt worden in extremen en uitschieters. In de domein 1 controle wordt gecontroleerd op extremen, de uitschieters vallen onder de domein 2 controle. Het hoogtebestand dat geleverd is voor domein 1 mag geen enkele extreme waarde bevatten.

In feite wordt bij het inlezen van de laserhoogtepunten al gecontroleerd op het al of niet aanwezig zijn van extremen door een minimum en maximum z-waarde te gebruiken. Deze waarde wordt bepaald aan de hand van bekende hoogtewaarden van de normale topografie. Met behulp van de atlas of een bestaand DHM van het gebied kunnen deze waarden gebruikt worden bij het inlezen van de laserhoogtepunten: punten boven de maximum z-waarde en punten onder de minimum z-waarde worden dan niet meegenomen en in een aparte logfile geplaatst als verworpen. Als er veel punten worden verworpen, kan worden overwogen om de minimum en/of maximum z-waarden aan te passen.

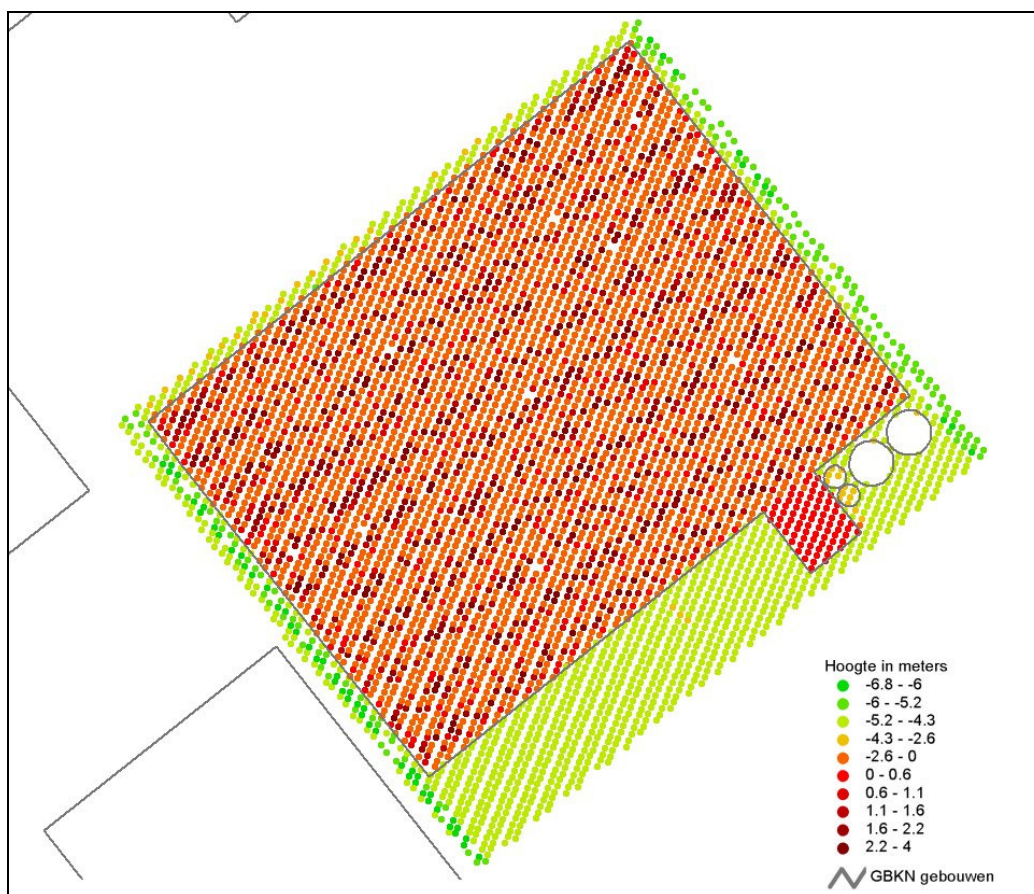
In de meeste gevallen zullen er na het inlezen van de laserhoogtepunten nog enkele extremen in het bestand voorkomen. Deze vallen die op in de hillshade, ze geven een lange smalle slagschaduw. Daarnaast wordt het RMS grid gebruikt om deze extremen op te sporen, in dit grid worden de relatieve afwijkingen afgebeeld van de laserpunten. Een geïsoleerde gridcel met een hoge RMS waarde duidt op de mogelijke aanwezigheid van een extreem punt. Bij de controle van extremen moet goed het onderscheid worden gemaakt tussen uitschieters en extremen. Algemeen gezegd is een extreem een punt dat boven of onder de normale topografie gelegen is. Als dit niet zo is, is het punt een uitschieter die pas bij de domein 2 controle aangegeven dient te worden.

4.4.5 Controle van planimetrie

Of de data planimetrisch goed ligt, wordt gecontroleerd met behulp van diverse vector bestanden, zoals GBKN, DTB en TOP10-vector. Dit laatste bestand bestaat uit meerdere onderdelen, voor de controle zijn vooral lijnen en huizen interessant. Kleine XY verschuivingen zijn goed met langgestrekte lijnen (bijvoorbeeld wegen) te controleren, een kleine afwijking zal bij een korte lijn niet zo snel opvallen, maar bij een langwerpige lijnobject uiteindelijk wel. De controle vindt plaats door in het gewenste vectorbestand, indien beschikbaar, per kaartblad met het DHM te vergelijken. Zowel in x- als y-richting wordt een nauwkeurigheid van 0,50 meter geëist.

Voor een meer nauwkeurige controle worden, verspreid over het projectgebied, een aantal laserhoogtepunten nauwkeurig vergeleken met de vectordata. Er wordt als het ware een object uit de

laserhoogtepunten geknipt, waarna de hoogte van deze losse punten met behulp van kleur wordt weergegeven.



Figuur 4.9: Voorbeeld van de controle van de planimetrie met de losse laserpunten.

In figuur 4.9 is een voorbeeld gegeven van een dergelijke controle. De lijnen zijn afkomstig uit het vectorbestand (in dit geval het GBKN). De puntjes zijn de laserpuntjes in x, y en z. De z-waarde is in kleur afgebeeld, waarbij de z-waarde is geclassificeerd in 10 klassen. Door het kleurverloop van de z-waarden van de losse laserpunten te vergelijken met de lijnen van de GBKN kan een goede inschatting worden verkregen over de planimetrische ligging van het laserbestand.

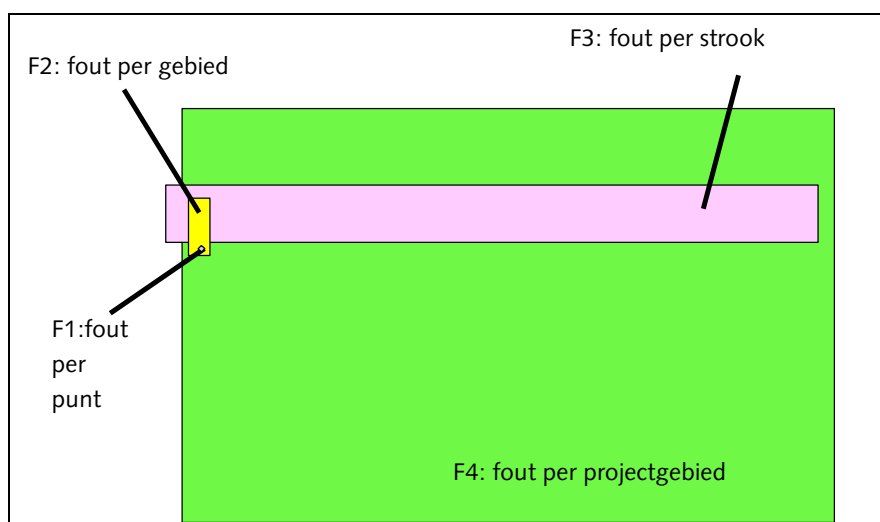
4.5 Foutsoortencontrole

Bij het opstellen van precisiespecificaties is het geven van één getalletje vaak niet voldoende. Soms zijn er meerdere getallen nodig om verschillende foutinvloeden voldoende te kunnen beschrijven. Er moet duidelijk vermeld te worden wat dit getalletje voorstelt (een standaardafwijking, een maximale waarde) en er moet onderscheid gemaakt worden naar ruimtelijke schaal.

Dat geldt ook voor bestanden ingewonnen met laseraltimetrie. Door de combinatie van sensoren, treden fouten op met verschillende amplitude en ruimtelijke schaal. Het huidige inzicht is dat de hoogteprecisie in een projectgebied ingewonnen met laseraltimetrie beschreven kan worden met 4 foutsoorten:

- F1: Fout per punt (ruis door de laserscanner)
- F2: Fout per gebied van 100 m x 500 m (ruis door GPS waarneming)
- F3: Fout per strook (combinatie GPS/INS)
- F4: Fout voor hele gebied (de aansluiting aan NAP)

In figuur 4.10 wordt aangegeven wat het beoordelingsgebied is van de vier foutsoorten.



Figuur 4.10: Voorbeeld van het beoordelingsgebied van de verschillende foutsoorten.

Per projectgebied kunnen de 4 foutsoorten verschillend zijn, afhankelijk van factoren als de gebruikte scanner, de configuratie van de stroken en de referentiegebieden en verwerkingsprocedures. Met de nieuwe kwaliteitscontrole worden deze vier foutsoorten berekend en gerapporteerd. Hierbij wordt gebruikt gemaakt van diverse softwareprogramma's.

In tabel 4.1 staan de eisen voor de hoogteprecisie van een **standaard** laserhoogtebestand. In sommige projecten kan van deze eisen worden afgeweken.¹ Afhankelijk van de wensen van de eindgebruiker en voor bepaalde toepassingen van het hoogtemodel, kunnen de precisie-eisen strenger of juist minder streng uitvallen.

Foutsoort	Toetsgrootheid	Eis	Toetsgrootheid	Eis
F1	gemiddelde [F1]	< 12 cm	maximum [F1]	< 24 cm
F2	gemiddelde [F2]	< 11 cm ²	maximum [F2]	< 31 cm ²
F3a	gemiddelde [F3a]	< 26 cm ²	maximum [F3a]	< 66 cm ²
F3b *	gemiddelde [F3b]	< 10 km	maximum [F3b] *	< 30 km
F4a	gemiddelde [F4a]	< 5 cm	maximum [F4a]	< 8 cm
F4b	gemiddelde [F4b]	< 5 cm	maximum [F4b]	< 13 cm

Tabel 4.1: De eisen die de AGI stelt aan de hoogteprecisie van een laserhoogtebestand.

* Als het gemiddelde [F3a] kleiner is dan 10 cm² dan worden er geen eisen aan [F3b] gesteld.

4.5.1 Beschrijving van de verschillende foutsoorten

Foutsoort 1

Foutsoort 1 zegt iets over de puntruismaten in de controlegebieden. Dit is een 'toevallige' fout, veroorzaakt door de meetonzekerheid van de laserafstandsmeter. Voor deze fout is niet te corrigeren, maar is door de leverancier te minimaliseren door het goed kalibreren (afstellen) van de apparatuur.

Foutsoort 2

Deze fout ontstaat door de 'ruis' in de GPS waarnemingen, die elke hele of halve seconde worden gedaan. Binnen een GPS waarneming is de gemaakte fout constant voor alle laserpunten die gedurende deze waarneming worden gemeten. In de praktijk betekent dit dat een gebied van

¹ Doordat het project Westerschelde een bijzonder projectgebied is, zijn de foutsoorten voor dit project op een andere manier bepaald. De eisen voor foutsoort 4 zijn voor dit project ook komen te vervallen. Zie ook paragraaf 2.4 en paragraaf 4.5.4.

ongeveer 500 meter (gemiddelde strookbreedte) bij ongeveer 100 meter (afstand die het vliegtuig vliegt tussen de GPS waarnemingen) een constante maar onbekende fout bevat. Tussen gebieden onderling gedraagt deze fout zich echter 'random'. Ook voor deze fout is niet te corrigeren.

Foutsoort 3

Foutsoort 3, een fout per strook, ontstaat door fouten in de GPS en INS sensoren. De strookfout kan bestaan uit kantelingen in langs- en dwarsrichting, en diverse vormfouten, bijvoorbeeld golfeffecten met een periode van 10 kilometer. Deze fout per strook is meestal constant, maar voor stroken onderling random. De strookcorrectietechnieken zijn gericht op het minimaliseren van deze fouten.

Bij de beoordeling van foutsoort 3 wordt onderscheid gemaakt in foutsoort 3a en foutsoort 3b.

Foutsoort 3a: zegt iets over de mate van doorwerking van fouten in de lengterichting van de strook.

Foutsoort 3b: zegt iets over de afstand waarin fouten in de lengterichting van de strook doorwerken.

Foutsoort 4

Foutsoort 4 is de fout van het hele deelgebied. Door de onzekerheid in de NAP referentiegebieden waarop wordt aangesloten, treedt er per deelgebied een fout op, die in theorie constant is voor het hele deelgebied, maar voor deelgebieden onderling 'random' is. Hoe sterk deze fout doorwerkt op de individuele stroken en het hele projectgebied is onder andere afhankelijk van de configuratie van het deelgebied (aantal en ligging van langs- en dwarsstroken en van referentiegebieden) en de gebruikte vereffeningsmethode. Voor foutsoort 4 kan goed gecorrigeerd worden.

Ook bij foutsoort 4 wordt onderscheid gemaakt in foutsoort 4a en foutsoort 4b.

Foutsoort 4a: zegt iets over de precisie waarmee de stroken op NAP aangesloten kunnen worden. Dit wordt voornamelijk bepaald door de meetopzet: hoe sterker de configuratie van referentiegebieden en dwars- en langstroken, hoe beter het gebied op NAP aangesloten kan worden.

Foutsoort 4b: zegt iets over de door de leverancier uitgevoerde vereffening; bij een ideale vereffening is deze fout zeer klein.

4.5.2 Berekenen van de foutsoorten

Het laserhoogtebestand wordt gecontroleerd aan de hand van een reeks van controlegebieden in de hoogtebestanden die, afhankelijk van de foutsoort, verspreid liggen in de strookoverlappen en over het gehele projectgebied.

De voor deze berekening gebruikte controlegebieden zijn vlakke gebieden, zonder bebouwing en begroeiing of met lage begroeiing (gras).

Voor foutsoort 1 maakt het niet uit waar de controlegebieden liggen. Zij zijn ongeveer 0,25 ha groot en moeten vlak zijn. Zij worden niet terrestrisch ingemeten.

Voor foutsoort 2 en 3 liggen de controlegebieden in de strookoverlappen. Zij vormen de verbindingen tussen naburige stroken. Zij zijn vlak en ongeveer 0,25 ha groot. Zij worden niet terrestrisch ingemeten.

Voor de berekening van foutsoort 4 zijn dezelfde controlegebieden als voor foutsoort 2 en 3 nodig en een aantal terrestrisch ingemeten vlakke aansluitgebieden. Deze laatste liggen verspreid over het gehele projectgebied en worden ook gebruikt voor de validatie (zie paragraaf 4.1).

De controlegebieden voor de foutsoorten 2 en 3 dienen gedefinieerd te worden in de overlap van de stroken. Voor foutsoort 1 is dat niet noodzakelijk, maar in de praktijk worden dezelfde gebieden gebruikt. In deze controlegebieden worden de (hoogte)verschillen bepaald. Het definiëren van deze controlegebieden wordt ook wel punten prikken genoemd. Deze punten moeten in de overlap liggen en moeten een (bij benadering) vlak gebied beschrijven. Voor het prikken van punten zijn gebieden nodig met een bepaald aantal punten. De gebiedsgrootte is dus afhankelijk van de behaalde punt dichtheid. Hiervoor was het eerder al van belang dat de overlap een minimale breedte heeft (zie paragraaf 4.4.3).

Als het, vanwege de aard van het projectgebied, niet mogelijk is om genoeg vlakke gebieden te vinden (b.v. voor de kustgebieden en uitgestrekte, begroeide natuurgebieden) gelden afwijkende specificaties.

In dit document wordt verder niet ingegaan op de technische berekeningen van de foutsoorten. Na de berekeningen worden voor alle foutsoorten de gemiddelde waarde en de maximale waarde in een file opgeslagen. Deze waarden zijn eenvoudig te vergelijken met de eisen die aan de foutsoorten gesteld worden.

In een aantal gevallen kan er voor foutsoorten 2 en 3 geen aparte waarden worden berekend. De wiskundige achtergrond voor de berekening van foutsoort 2 en 3 gebruikt een functie die zo goed mogelijk moet worden ingepast ('gefit') op de berekende waarden. Als de fouten 2 en 3 klein zijn, dat wil zeggen dat er geen of weinig strookvervormingen zijn, kan deze functie slecht geschat worden. De waarden van F2 en F3a en F3b kunnen dan ook slecht berekend worden. Het blijkt dat er in dat geval wel iets gezegd kan worden over de som van F2 en F3a. F3b wordt dan buiten beschouwing gelaten; als het gemiddelde van F3a kleiner is dan 10 cm², dan worden er geen eisen aan F3b gesteld.

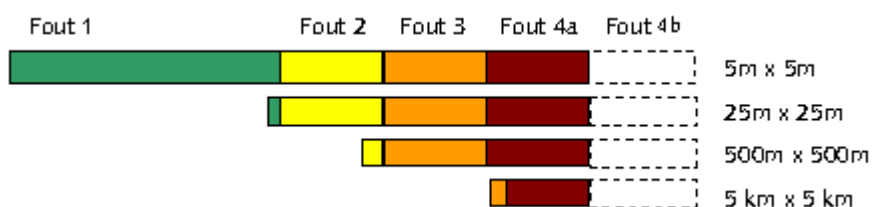
Als de resultaten van de foutsoortencontrole ruim voldoen aan de eisen, is het niet nodig de resultaten verder te analyseren of te visualiseren. In een aantal gevallen voldoet het laserhoogtebestand nét aan de eisen, of helemaal niet. In deze gevallen wordt verder onderzocht wat de mogelijke oorzaken kunnen zijn. Het kan bijvoorbeeld gebeuren dat een controlegebiedje niet in een voldoende vlak gebied is gekozen. Soms is er een ruimtelijke samenhang tussen de te hoge waarden (bijvoorbeeld veel hoge waarden in één strook).

Als na de analyse blijkt dat de data verbeterd dient te worden om aan de eisen voor de foutsoorten te voldoen, wordt de data afgekeurd waarna de leverancier de data opnieuw moet verwerken.

4.5.3 Gebruik van de foutsoorten in toepassingen

Met de berekende foutsoorten kunnen gebruikers van laseraltimetriebestanden zelf uitrekenen wat hun hoogtemodel of daarvan afgeleide grootheden, zoals b.v. gebiedsgemiddelde of volumes, qua hoogteprecisie waard zijn. Op de website van het AHN, www.ahn.nl, staat een uitgebreide gebruiksaanwijzing van het AHN. Op deze site kan meer (actuele) informatie worden gevonden over het berekenen van de foutsoorten en de toepassingen. Deze informatie is ook nuttig voor andere bestanden ingewonnen met laseraltimetrie, anders dan het AHN.

Over het algemeen kan gezegd worden dat hoe groter het gebied is, hoe dominanter foutsoort 4 (F4a en F4b) zal worden. Dit wordt verduidelijkt in figuur 4.11. Hierin is schematisch de grootte van de vier foutsoorten voor verschillende gridgroottes weergegeven. Foutsoort 4a zal niet volledig wegmiddelen, gezien de hoge correlatie van foutsoort 4a tussen aangrenzende stroken. Bij een gemiddelde hoogte van een gebied in 20 stroken zal nog 75% van foutsoort 4a overblijven. Voor fout 4b is een systematische fout die gecorrigeerd kan worden door een strookvereffening toe te passen, vandaar dat deze gestippeld is weergegeven.



Figuur 4.11: Doorwerken van foutsoorten op hoogteprecisie van gebiedsgemiddelde.

Tot nu toe wordt steeds gesproken over de *absolute fout* ten opzichte van NAP. De *relatieve fout* ten opzichte van buur-gridcellen zal kleiner zijn: de twee gridcellen bevatten voor een groot deel dezelfde systematische fout. Bij relatieve toepassingen wordt dit deel geëlimineerd.

Wij hebben net in de voorbeelden gezien dat als de gridcelgrootte (ook wel de resolutie genoemd) wordt vergroot, de precisie van de gemiddelde gridcelhoogte toeneemt. De verschillen tussen de gemiddelde gridcelhoogte en de hoogten van losse (terrein)punten kunnen echter ten gevolge van terreinvariatie groter worden: de gedetailleerdheid van de terreinbeschrijving neemt af voor grotere gridcellen. Dit effect manifesteert zich onder andere bij het optreden van scherpe overgangen in het terrein.

4.5.4 Projectspectifieke eisen op de foutsoortencontrole

Bij de foutsoortenberekening wordt uitgegaan van een standaard projectgebied. Het projectgebied van de Westerschelde is echter een bijzonder projectgebied: het wordt gekenmerkt door een langgerekte vorm, waarbij het op te nemen gebied zeer smal is. Het projectgebied leidt tot stroken die voor een groot deel uit water bestaan. Het is niet of nauwelijks mogelijk om voldoende goede controlevelden (zie paragraaf 4.5.2) te vinden.

Om toch een uitspraak te kunnen doen over de foutsoorten in zo'n bijzonder projectgebied, zijn er door de AGI specifieke eisen gesteld aan de foutsoorten en de inwinning.

Afwijkende eisen aan controle hoogteprecisie

Om de foutsoorten (behalve 4) uit te rekenen moet een tweetal stroken gevlogen worden die aan de volgende eisen moeten voldoen:

- Strookoverlap is minstens 20 km lang.
- Strookoverlap ligt in landelijk gebied (dus niet aan kustlijn, niet in stedelijk gebied niet in kassengebied).
- Een overlap van 50% is gewenst.
- 1 Strook vóórdat het projectgebied van die dag is gevlogen, de andere daarna.
- De 2 stroken worden in tegengestelde richting opgenomen.
- Er hoeven geen referentiegebieden in te liggen (ze kunnen dus ook per dag verschillen qua locatie).
- Locatie referentiestroken in overleg met AGI, aannemer doet een voorstel.

In figuur 4.12 is een schematisering van de te vliegen referentiestroken afgebeeld.



Figuur 4.12: Schematische afbeelding van de te vliegen referentiestroken.

Deze referentiestrook kan bijvoorbeeld liggen tussen het vliegveld en het projectgebied. Indien er door weersomstandigheden regelmatig slechts korte vliegperiodes ontstaan kan in overleg met de AGI worden afgeweken van het elke dag vliegen van deze referentiestroken.

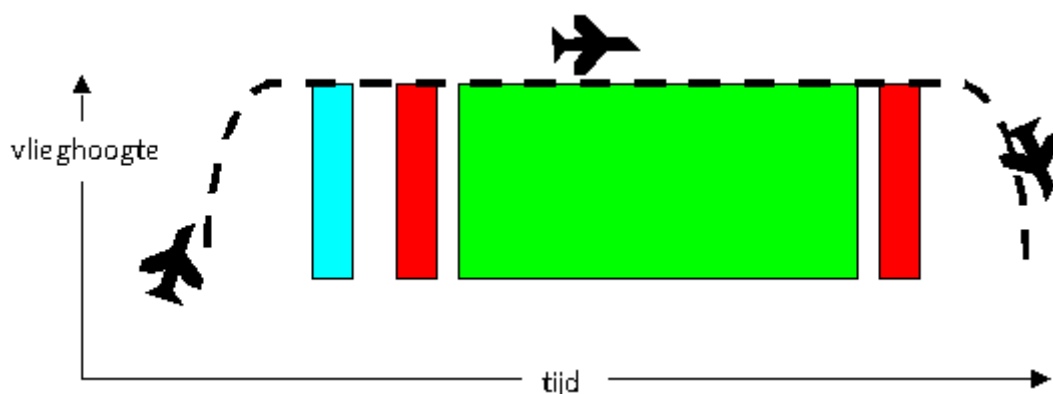
Op deze manier kan de AGI controleren of er tijdens de vlucht fouten zijn opgetreden en hoe groot de vier inwinfouten zijn. Op foutsoort 4b (de hoogteoffset) kan niet getoetst worden: het zou dan noodzakelijk zijn om per paar referentiestroken minimaal 1 referentieveld terrestrisch in te winnen. Op foutsoort 4a wordt ook niet getoetst: zoals in paragraaf 4.5.1 beschreven staat zegt foutsoort 4a iets over de configuratie van het gebied. In dit geval zegt het dus iets over de configuratie van de referentiestroken, in plaats van over de configuratie van het projectgebied zelf. Omdat de fouten uitgerekend worden aan de hand van weinig overlappen, zal er getoetst moeten worden op de maximumeisen en niet op de gemiddelde eisen. In tabel 4.2 wordt een overzicht gegeven van de eisen die gesteld worden aan de hoogteprecisie (foutsoorten) van het laserhoogtebestand Westerschelde.

Foutsoort	Toetsgrootheid	Eis
F1	maximum [F1]	< 24 cm
F2	maximum [F2]	< 31 cm ²
F3a	maximum [F3a]	< 66 cm ²
F3b *	maximum [F3b] *	< 30 km

Tabel 4.2: De eisen die de AGI stelt aan de hoogteprecisie van het laserhoogtebestand Westerschelde.

* Als het gemiddelde [F3a] kleiner is dan 10 cm² dan worden er geen eisen aan [F3b] gesteld.

In figuur 4.13 staat schematisch hoe een vlucht eruit kan zien. De aannemer voert eerst een calibratie uit (dit kan hun eigen calibratieveld zijn), daarna wordt over landelijk gebied een strook van minstens 20 km opgenomen, vervolgens (een deel van) het projectgebied, en afsluitend nog een keer de strook van 20 km in tegengestelde richting.



Figuur 4.13: Verschillende onderdelen tijdens de vlucht.

Calibratie	Referentiestrook A	Projectgebied	Referentiestrook B
Aannemer zorgt voor calibratie van GPS/INS en laser apparatuur.	Strook langer dan 20 km, landelijk gebied.	Het aantal referentievelden en GPSstations moet van tevoren bekend zijn.	Strook langer dan 20 km, landelijk gebied.
		Dwarsstroken schuin over langsstroken.	Dient te overlappen met referentiestrook A: 50% in dwarsrichting en > 20 km in langsrichting.
		Op elk controlegebied wordt 1 gemiddeld hoogteverschil bepaald.	
Eis: laat zien dat GPS/INS/Laser gecalibreerd zijn.	Eis: voldoe aan max(F1 t/m 3), samen met referentiestrook B	Eis: 50% van de gemiddelde hoogteverschillen ligt tussen -5 en 5 cm. 67% tussen -10 en 10 cm. 95% tussen -15 en 15 cm.	Eis: voldoe aan max(F1 t/m 3), samen met referentiestrook A
		Visuele controle in overlapgebieden.	

Tabel 4.3: Toelichting bij figuur 4.13. In deze tabel zijn ook de overige aanvullende eisen voor het projectgebied Westerschelde opgenomen (zie ook paragraaf 2.4).

4.6 Vastleggen van de controleresultaten

De controleresultaten van domein 1 worden tijdens en na de controle vastgelegd in een toetsingsformulier. Dit is een standaardformulier waarop de algemene gegevens van de data staan en de controleresultaten, waar nodig aangevuld met afbeeldingen van het gebied of afbeeldingen van gevonden afwijkingen. Per levering wordt zo'n formulier gemaakt, als de levering wordt afgekeurd

wordt deze aan de leverancier overlegd waarna er correcties worden uitgevoerd. De controle van de volgende levering betreft dan alleen die onderdelen die in de vorige levering niet goed waren bevonden. Het toetsingsformulier bevat ook een samenvatting, zo is in één oogopslag te zien welke onderdelen goedgekeurd zijn en welke nog niet. Tijdens de controle worden eventuele fouten aangegeven in shapefiles, ook deze worden in het toetsingsformulier genoemd zodat de leverancier gericht correcties kan uitvoeren.

Het toetsingsformulier is daarnaast een belangrijk document voor het opstellen van de resultaten van de controle zoals deze in hoofdstuk 8 van dit kwaliteitsdocument zijn opgenomen.

5 Controle bij de AGI: Domein 2

De verwerking van domein 2 behelst het filteren van het in domein 1 goedgekeurde hoogtebestand. Het eindproduct van dit domein is een gefilterd hoogtebestand. De controle van dit domein vindt enkel visueel plaats.

Omdat de klant in eerste instantie is geïnteresseerd in maaiveldhoogte moet alles wat daarboven uitsteekt worden uitgefilterd. Een uitzondering wordt gemaakt voor stedelijke gebieden groter dan 1 km². Deze bebouwde gebieden mogen ongefiterd blijven. Voor alle gebieden geldt dat er consequent gefilterd moet zijn: kleinere dorpen/steden volledig uitfilteren, grotere steden volledig ongefiterd. De uitgefilterde punten worden in een apart bestand geleverd. Helaas gaat het filteren zelden meteen goed. Algemeen geldt dat door de controleurs alle fouten worden aangegeven, hoe onbelangrijk ze soms ook lijken. De leverancier kan deze fouten dan corrigeren.

Bij de domein 2 controle wordt op de volgende punten gecontroleerd:

- 1 Controle op ontbrekende data als gevolg van bewerkingen in domein 2;
- 2 Controle op uitschieters;
- 3 Controle op filtering van vegetatie;
- 4 Controle op filtering van bebouwing;
- 5 Controle op filtering van overige objecten.

Daarnaast zullen de bestanden van het projectgebied Westerschelde ook gecontroleerd worden op correcte filtering van het water van de zee (zie ook paragraaf 2.4).

De volgende paragrafen zullen de controles en de stappen die daarin genomen worden nader beschrijven. Het is zeer belangrijk te weten dat een groot deel van de beoordeling van dit controleonderdeel berust op ervaring van de controleur. Ondanks het gebruik van verscheidene controlebestanden, is het niet altijd duidelijk of je te maken hebt met vegetatie, een huis of een ander object. Er zullen dus tijdens de controle beslissingen worden genomen die niet volgens een standaard handelwijze kunnen worden verklaard. De AGI streeft er echter naar een controleprocedure te hanteren, waarbij zoveel mogelijk procedures gestandaardiseerd zijn. De ervaring van de controleurs zal in de overige procedures bepalen wat er wordt beslist. Overigens vindt er in deze gevallen veelal overleg plaats tussen de projectleider en de andere controleurs.

Voor de controle wordt gebruik gemaakt van een aantal standaard controle bestanden die in bepaalde opzichten iets verschillen van de in paragraaf 4.4.1 genoemde bestanden. In de volgende paragraaf wordt beschreven welke bestanden dit zijn en hoe zij worden opgebouwd. Van ieder bestand is een voorbeeldfiguur toegevoegd wat weer hetzelfde gebied betreft als de bestanden voor de controle van domein 1.

5.1 Controlebestanden voor domein 2

Gefilterd DHM

Alle gefilterde laserhoogtepunten worden geïnterpoleerd naar een regelmatig grid. Op ieder punt in het grid wordt een waarde voor de hoogte berekend op basis van de omliggende punten binnen de in te stellen footprint. Standaard is dit een 5x5 meter grid met een footprint van 8 meter, bij een hogere punt dichtheid kan een fijner grid gemaakt worden. De gebruikte interpolatiemethode is het gewogen gemiddelde. De term gefilterd DHM hangt samen met het feit dat er ook een ruw DHM gemaakt kan worden. Zie hiervoor paragraaf 4.4.1. In figuur 5.1 is nu ook duidelijk het verschil te zien tussen stedelijk gebied en niet-stedelijk gebied: Het stedelijk gebied aan de linkeronderzijde is ongefiterd gebleven, de afzonderlijke huizen langs de wegen buiten het stedelijk gebied zijn uitgefilterd waardoor de (groene) achtergrondkleur te zien is.



Figuur 5.1: Voorbeeld van een gefilterd DHM (met groene achtergrondkleur).

Ruw DHM

In het ruwe DHM voor de controle van domein 1 zijn alle laserhoogtepunten aanwezig (zie paragraaf 4.4.1). Door het samenvoegen van de gefilterde en de uitgefilterde data kan er opnieuw een ruw DHM gemaakt worden voor domein 2. Dit is echter niet hetzelfde bestand als het ruwe DHM uit domein 1. Het verschil zijn de uitschieters: deze worden (als het goed is) in de verwerking van domein 2 verwijderd en mogen niet in het gefilterde noch in het uitgefilterde bestand voorkomen. Het ruwe DHM van domein 1 is bestaat dus uit de gefilterde data plus de uitgefilterde data plus de (niet geleverde) uitschieters.

Om het ruwe DHM voor domein 2 te maken worden dus eerst de gefilterde en de uitgefilterde data samengevoegd op quadtree-niveau. Daarna wordt hier een regelmatig grid van gemaakt. Standaard is dit een 5x5 meter grid met een footprint van 8 meter, bij een hogere punt dichtheid kan een fijner grid gemaakt worden. De gebruikte interpolatiemethode is het gewogen gemiddelde. Het ruwe DHM zoals dat hier omschreven zal er ongeveer hetzelfde uitzien als in figuur 4.4.

Gefilterde hillshade

Uit het gefilterde DHM wordt een schaduwbestand berekend zoals dit in paragraaf 4.4.1 beschreven wordt. Ook nu worden twee hillshades gemaakt: één waarbij het azimut min of meer haaks op de strookrichting staat en één waarbij het azimut min of meer parallel aan de strookrichting staat. In figuur 5.2a en figuur 5.2b zijn beide hillshades afgebeeld. De strookrichting is natuurlijk niet veranderd sinds de domein 1 controle.



Figuur 5.2a: Voorbeeld van een gefilterde hillshade met het azimuth haaks op de stroomrichting.



Figuur 5.2b: Voorbeeld van een gefilterde hillshade met het azimuth parallel aan de stroomrichting.

Ruwe hillshade

Uit het ruwe DHM van domein 2 wordt ook een schaduwbestand berekend zoals dit in paragraaf 4.4.1 beschreven wordt. Hiervan wordt echter alleen de eerste variant gemaakt: die waarbij het azimuth min of meer haaks op de stroomrichting staat. De ruwe hillshade zal er ongeveer zo uitzien als in figuur 4.5a te zien is.

Ruw RMS

Van de samengevoegde gefilterde en uitgefilterde bestanden wordt een ruw RMS gemaakt. Zoals al eerder opgemerkt is dit een ander ruw RMS dan in domein 1 is gemaakt. De reden hiervoor is dat uitschieters helemaal niet in het bestand mogen voorkomen (dus ook niet in het uitgefilterde bestand). Wel wordt er voor deze uitschieters als acceptatiegrens 1 uitschieter per 1000 hectare gehanteerd (zie ook paragraaf 2.3).

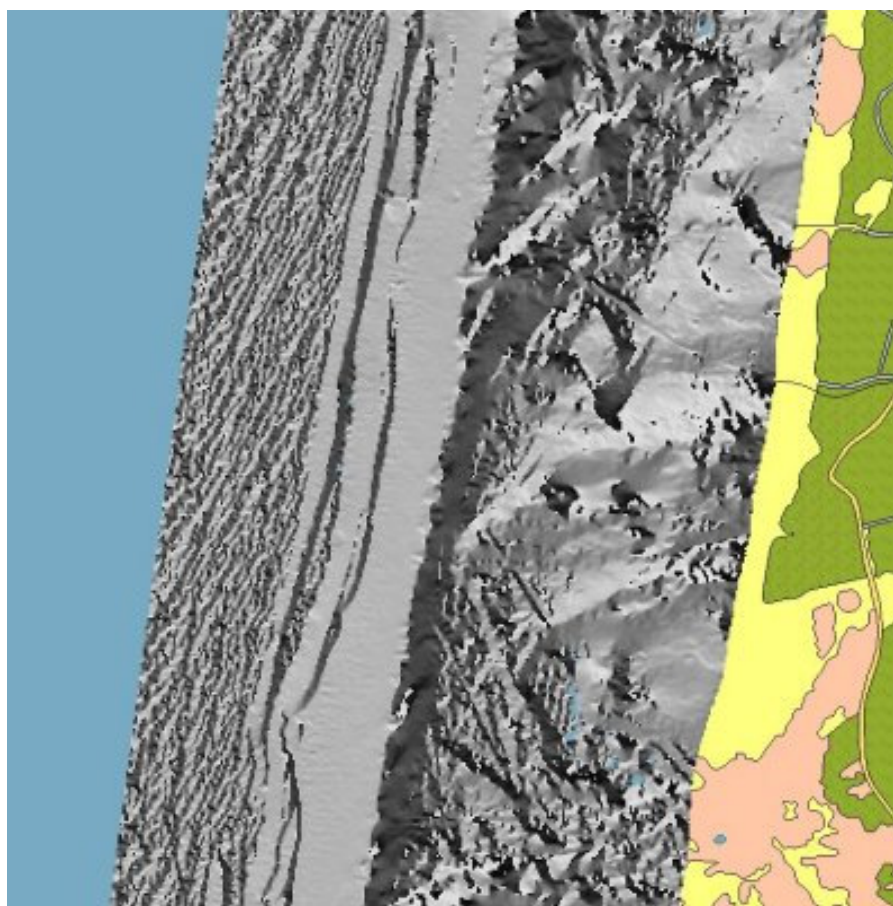
Om het ruwe RMS grid te maken wordt per footprint de standaardafwijking ten opzichte van de gemiddelde hoogte van de laserhoogtepunten binnen de footprint berekend. Standaard is dit een 5x5

meter grid met een footprint van 5 meter. In het resulterende grid worden de relatieve afwijkingen afgebeeld van de laserpunten, een geïsoleerde gridcel met een hoge RMS waarde duidt op de mogelijke aanwezigheid van een uitschieter. In figuur 4.7 is een ruw RMS grid afgebeeld.

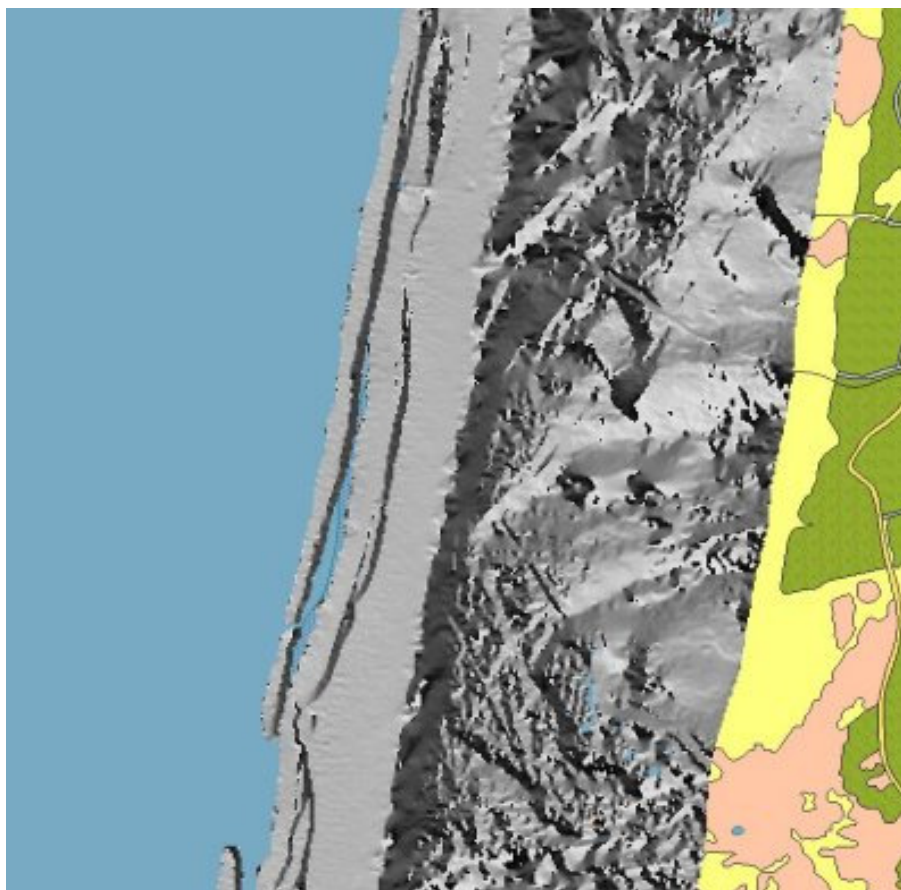
Aspectgrid

Speciaal voor het controleren of het water van de zee goed is gefilterd, wordt een aspectgrid gemaakt. Het aspectgrid is een afgeleide van het standaard DHM (ruw of gefilterd); de waarde van een gridcel hangt af van de hellingshoek van de gridcel uit het DHM. Het voordeel van een dergelijk grid is dat je in kustbestanden snel goed onderscheid kan maken tussen het strand en het water. Doordat de branding een variabele hellingshoek heeft ziet dit er heel verschillend uit dan het strand, dat (meestal) een constante hellingshoek heeft. Door een ruw aspectgrid met een gefilterd aspectgrid te vergelijken kun je controleren of het water goed is gefilterd.

In figuur 5.3a en 5.3b zijn beide types aspectgrid afgebeeld. Het betreft een deel van de kust van Noord-Holland, ten noorden van Bergen aan Zee. Het 'bobbelige' deel aan de linkerkant van figuur 5.3a is het water van de zee, in figuur 5.3b is dit verdwenen (dus goed uitgefilderd). Overigens is in figuur 5.3b ook goed te zien dat muilen op het strand ook worden gefilterd.



Figuur 5.3a: Voorbeeld van een ruw aspectgrid met als ondergrond TOP50raster.



Figuur 5.3b: Voorbeeld van een gefilterd aspectgrid met als ondergrond TOP50raster.

5.2 Controle op ontbrekende data als gevolg van bewerkingen in domein 2

Bij de domein 1 controle is er al gecontroleerd op ontbrekende data. Het gaat bij domein 1 om ontbrekende stroken, gaten tussen stroken door onvoldoende overlap, te lage punt dichtheid, hoogwater en dergelijke. Na filtering kan er echter ook data ontbreken door bijvoorbeeld verkeerd knippen, stukken niet geleverd etc. Daarom wordt bij de domein 2 controle ook gecontroleerd op ontbrekende data, maar alleen die ontbrekende data die het gevolg is van de bewerkingen in domein 2. Als de ontbrekende data al in domein 1 aangegeven is, betreft het een fout die niet in domein 2 gemaakt is. Deze fouten moeten dan niet nog eens aangegeven worden.

Behalve de gefilterde data moet ook de uitgefilterde data geleverd worden. Er wordt gecontroleerd of alle uitgefilterde data is geleverd.

Als in gebieden waar nauwelijks gefilterd hoeft te worden (weiland of akker) gaten vallen kan dat komen doordat er tijdens het vliegen water op deze velden stond. Dit is een fout die bij domein 1 opgemerkt dient te worden. Als in bossen gaten vallen kan dat zijn omdat daar veel gefilterd moest worden. Er geldt voor bos een lagere punt dichtheids-eis, maar er moet goed gecontroleerd worden of er niet te intensief gefilterd is. Buiten de stedelijke gebieden kunnen gaten vallen omdat daar veel punten zijn uitgefilterd. Deze gaten zijn onvermijdelijk.

De controle methode voor ontbrekende data in de domein 2 controle is nagenoeg hetzelfde als de methode voor de domein 1 controle. Bij de controle van ontbrekende data in domein 2 wordt de shapefile met reeds in domein 1 aangegeven ontbrekende data gebruikt zodat fouten niet tweemaal worden aangegeven. Om te kunnen controleren of ook alle uitgefilterde data geleverd is worden er visueel vergelijkingen gemaakt tussen het gefilterde DHM en het ruwe DHM.

Met behulp van de projectgrens wordt opnieuw gecontroleerd of alle data binnen het aangegeven gebied geleverd is. Door middel van een contrasterende kleur van de ondergrond, het ruwe DHM en de shapefile van de gevonden ontbrekende data in de domein 1 controle kunnen de gebieden waar in de domein 2 controle geen data aanwezig is gevonden worden, waarna gecontroleerd wordt of dit inderdaad om ontbrekende data gaat die wel aanwezig zou moeten zijn.

5.3 Filtering: Controle op uitschieters

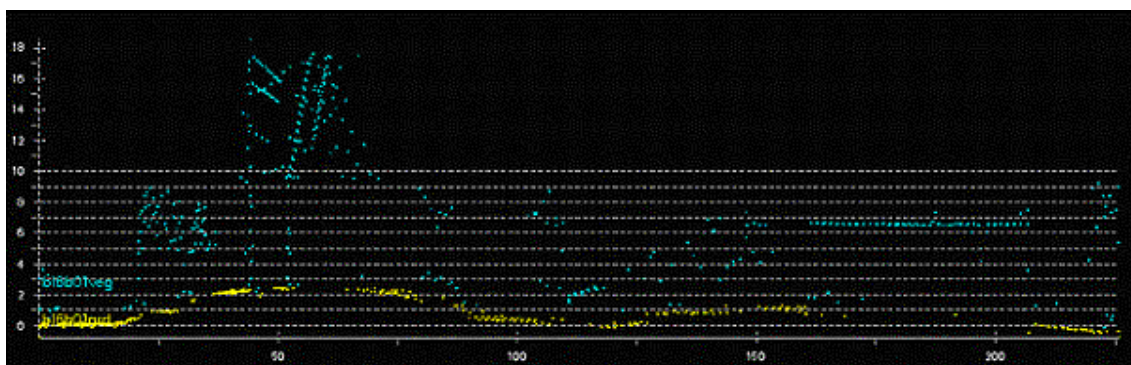
Door diverse oorzaken bevinden zich regelmatig punten in de data (ongefilterde data) met een foutieve, vaak erg hoge of lage waarde. Deze punten hebben een negatieve invloed op het DHM. Er kan onderscheid gemaakt worden in extremen en uitschieters. Extremen zijn punten ver boven of onder de voor het projectgebied bekende topografiehoogten en worden in de domein 1 controle opgespoord. In de domein 2 controle wordt er dan ook van uit gegaan dat het geleverde gefilterde bestand vrij is van extremen. In het gefilterde bestand of in het uitgefilterde bestand wat bij domein 2 geleverd wordt, kunnen dan nog wel uitschieters voorkomen, die in domein 2 worden opgespoord. Uitschieters zijn zichtbare, lokaal extreem hoge of lage punten in relatie tot de directe omgeving, die derhalve geen topografisch object ter plaatse beschrijven. Voor deze uitschieters wordt als acceptatiegrens 1 uitschieter per 1000 hectare gehanteerd.

De uitschieters hebben vaak een relatief minder groot verschil met de directe omgeving dan extremen. Daarom vallen uitschieters niet altijd op in de hillshade: ze hebben niet altijd een lange smalle slagschaduw). Het RMS grid kan wel zeer goed gebruikt worden om deze uitschieters op te sporen, in dit grid worden de relatieve afwijkingen afgebeeld van de laserpunten. Een geïsoleerde gridcel met een hoge RMS waarde duidt op de mogelijke aanwezigheid van een uitschieter. Deze gridcellen zijn zeer duidelijk te herkennen als een wit puntje in een veelal egaal grijs gekleurde ondergrond.

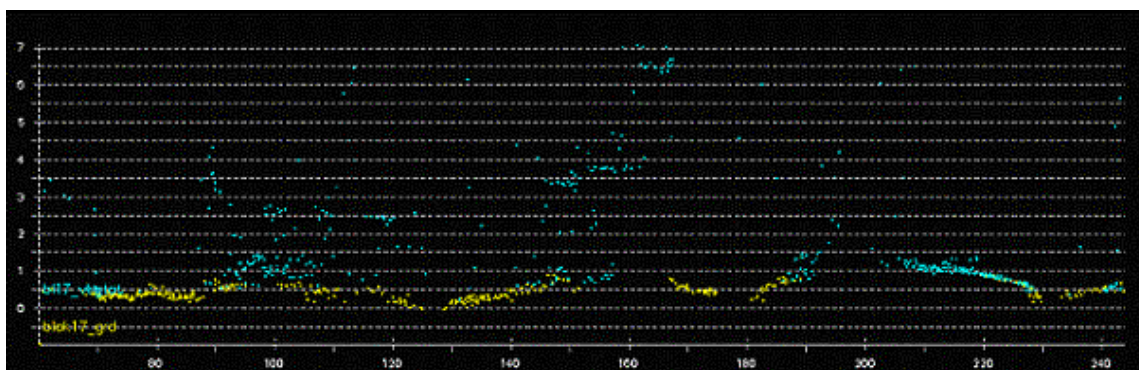
Bij de controle van uitschieters moet opnieuw goed het onderscheid worden gemaakt tussen uitschieters en extremen. In eerste instantie worden alle gevonden uitschieters aangegeven. Daarna wordt bekeken of het aantal gevonden uitschieters onder de acceptatiegrens van 1 uitschieter per 1000 hectare blijft. Als in de loop van de controle blijkt dat het aantal gevonden uitschieters de acceptatiegrens overschrijdt, zal de data hierop afgekeurd worden. De leverancier zal dan een extra bewerking uit moeten voeren om de resterende uitschieters te verwijderen. Ook als de uitschieters in de uitgefilterde data voorkomen wordt de data niet geaccepteerd, aangezien deze als basispunten ook uitgeleverd kunnen worden.

5.4 Filtering: controle op filtering van vegetatie

Hoewel hoge vegetatie zoals bomen vaak wel goed is uitgefilterd is het moeilijker om lagere en vaak dichtere vegetatie te verwijderen. In de ruwe hillshade is vegetatie herkenbaar aan het onregelmatige uiterlijk. Als er in het gefilterde hillshade nog dergelijke onregelmatigheden voorkomen kan het zijn dat dit niet-gefilterde vegetatie is. Voor de controle van filtering op vegetatie wordt het hele bestand systematisch gecontroleerd met gebruik van verschillende controlebestanden. Bij twijfelachtige filtering wordt een zogenaamd profiel getrokken over de losse puntjes (quadtree's) van de gefilterde en de ongefilterde data. Deze kunnen vervolgens worden afgebeeld in afzonderlijke kleuren. Voorbeelden hiervan zijn te zien in figuur 5.3 en figuur 5.4. Zijn er zowel lage (maaiveld) als hoge puntjes te zien in de gefilterde data dan is de vegetatie niet goed uitgefilterd. Met behulp van luchtfoto's, topografische rasterbestanden en vectorbestanden wordt gecontroleerd of het inderdaad om vegetatie gaat. Vegetatie in de grotere stedelijke gebieden (groter dan 1 km²) mag niet worden uitgefilterd.



Figuur 5.3: Voorbeeld van een correcte filtering van vegetatie en bebouwing. De puntjes in het gefilterde bestand (maaiveld) zijn afgebeeld in geel, de puntjes in het uitgefilterde bestand zijn afgebeeld in blauw.



Figuur 5.4: Voorbeeld van een te intensieve filtering van vegetatie. De puntjes in het gefilterde bestand (maai veld) zijn afgebeeld in geel, de puntjes in het uitgefilterde bestand zijn afgebeeld in blauw. Rood omcirkeld is een stukje maaiveld dat ten onrechte gefilterd is.

5.5 Filtering: controle op filtering van bebouwing

Binnen de grenzen van het stedelijk gebied (aaneengesloten bebouwing groter dan 1 km²) mag niets uitgefilterd worden. De grenzen van het stedelijk gebied worden van tevoren vastgelegd. Er wordt gecontroleerd in en rond de stedelijke gebiedsgrenzen, eventueel wordt een voorstel gedaan tot aanpassing van de stedelijke gebiedsgrenzen. Buiten de grenzen van het stedelijk gebied **moet** alle bebouwing uitgefilterd worden. Of alle bebouwing is verdwenen is het beste te zien door een vergelijking van het ruwe en het gefilterde DHM. Ook voor de controle van filtering van bebouwing wordt het hele bestand systematisch gecontroleerd met gebruik van verschillende controlebestanden. Het controleren van bebouwing is vaak lastig omdat bijvoorbeeld vuilnisbelten en andere kunstmatig opgeworpen hoogten sterk kunnen lijken op grote hallen of andere bebouwing. Er wordt dus van diverse andere bestanden gebruik gemaakt om een twijfelachtig gebied goed te classificeren. Overigens is de discussie of iets wel of niet bij het stedelijk gebied hoort voor de meeste gebruikers van ondergeschikt belang. Belangrijker is goed te weten waar wel en waar niet gefilterd is.

5.6 Filtering: controle op filtering van overige objecten

Dijken, spoor- en wegtaluds mogen niet zijn uitgefilterd. Dit zijn objecten die uitsteken boven het maaiveld en bij een volledig automatische filtering wel eens worden meegenomen. Viaducten en andere objecten die boven het maaiveld hangen behoren niet tot het maaiveld en moeten wel zijn uitgefilterd. Op deze beide objectgroepen wordt gecontroleerd. Omdat deze objecten veelal langgerekt zijn kan in de meeste gevallen worden volstaan met het controleren door de objecten in het bestand te volgen. Natuurlijk wordt tijdens de systematische controle van bebouwing en filtering wel gelet op de correcte filtering van de overige objecten.

5.7 Filtering: controle op filtering van water van de zee

Aanvullend op de standardeisen dient in de bestanden van het projectgebied Westerschelde het water van de zee te zijn gefilterd. Hiertoe worden twee aspectgrids gemaakt: een van het ruwe bestand en een van het gefilterde bestand. Door het ruwe aspectgrid met een gefilterd aspectgrid te vergelijken kan gecontroleerd worden of het water goed is gefilterd (zie ook paragraaf 5.1). In een aantal gevallen is het erg lastig te bepalen of het water goed is gefilterd, dit komt met name voor in gebieden die gekenmerkt worden door een onregelmatige overgang van water naar land of waar veel waterstromen zijn.

5.8 Vastleggen van de controleresultaten

De controleresultaten van domein 2 worden tijdens en na de controle vastgelegd in een toetsingsformulier. Dit is een standaardformulier waarop de algemene gegevens van de data staan en

de controleresultaten, waar nodig aangevuld met afbeeldingen van het gebied of afbeeldingen van gevonden afwijkingen. Per levering wordt zo'n formulier gemaakt, als de levering wordt afgekeurd wordt deze aan de leverancier overlegd waarna er correcties worden uitgevoerd. De controle van de volgende levering betreft dan alleen die onderdelen die in de vorige levering niet goed waren bevonden. Het toetsingsformulier bevat ook een samenvatting, zo is in één oogopslag te zien welke onderdelen goedgekeurd zijn en welke nog niet. Tijdens de controle worden eventuele fouten aangegeven in shapefiles, ook deze worden in het toetsingsformulier genoemd zodat de leverancier gericht correcties kan uitvoeren.

Het toetsingsformulier is daarnaast een belangrijk document voor het opstellen van de resultaten van de controle zoals deze in hoofdstuk 8 van dit kwaliteitsdocument zijn opgenomen.

6 Overige controles

Naast de controle van de data zelf worden ook een aantal andere controles gedaan. Deze hebben voornamelijk betrekking op het door de leverancier opgestelde kwaliteitsplan: in feite controleert de AGI of de leverancier alles compleet op de juiste manier aanlevert. Behalve de controle op het vliegplan hebben deze controles geen directe invloed op het uiteindelijke bestand.

Controle vliegplan

Bij aanvang van het project wordt allereerst een vliegplan opgesteld. Een vliegplan dient minimaal te bevatten:

- de opzet van de configuratie van alle vliegstroken en de aansluitgebieden, inclusief een logische strookbenaming van de vliegstroken;
- de technische specificatie van gebruikte systemen en software;
- de geplande calibratieprocedures;
- de planning van de uit te voeren laservluchten;
- de planning van de uit te voeren landmeetkundige werkzaamheden op de grond.

Het vliegplan wordt door de AGI goedgekeurd, waarna de laservluchten aan kunnen vangen.

Controle vluchtrapportage

Na afloop van de laatste vliegdag wordt de vluchtrapportage opgesteld. De vluchtrapportage bevat een samenvattend verslag van de gebeurtenissen gedurende de vliegperiode en bevat ten minste:

- een chronologisch overzicht van alle dagen waarop al dan niet is gevlogen, inclusief de motivatie waarom niet gevlogen is;
- een geografisch overzicht van vluchtgegevens, inclusief een vluchtlijnenbestand;
- een netwerkoverzicht van de gebruikte terrestrische grondslag, inclusief alle gebruikte referenties (GPS, RD, NAP) voor en tijdens de vlucht, en informatie over de uitgevoerde grondslagberekeningen, inclusief de kwaliteitsparameters.

Uit de vluchtrapportage moet blijken dat de inwinning van het hoogtebestand zodanig is verlopen, dat voldaan wordt aan de gestelde processpecificaties en dat naar verwachting de levering van de hoogtebestanden volgens de gestelde productspecificaties plaats kan vinden.

Controle verwerkingsverslag

De leverancier moet, naast het leveren van de laserhoogtebestanden, ook een rapportage van de kwaliteitscontrole van de verwerking van de hoogtebestanden leveren. Deze kwaliteitscontrolerapportage wordt in geval van domein 1 aangeduid met *hoogteverslag* en in geval van domein 2 met *filterverslag*.

Uit het hoogte- en/of filterverslag moet blijken dat de verwerking van het hoogtebestand zodanig is verlopen, dat de leverancier kan voldoen wordt aan de gestelde proces- en productspecificaties. Het hoogte- en/of filterverslag dat de kwaliteit van het hoogtebestand beschrijft moeten tegelijkertijd met het hoogtebestand worden geleverd.

Eindrapportage van het project

De eindrapportage van het project rapporteert en evalueert het verloop van het project onder andere op basis van de eerdere (kwaliteits)rapportages en de terugmeldingen van de AGI.

Voor de verschillende rapportages zijn controle- en leveringstermijnen vastgesteld, waaraan zowel de leverancier als de AGI zich dienen te houden.

7 Overzicht referentiemateriaal

In dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de materialen die ter referentie gebruikt worden bij de controle.

7.1 Referentievelden

Lokaties: sportvelden
Datum van inmeting: voorjaar 2004
Meetmethode: GPS stop and go, real time kinematische GPS of waterpassing.

7.2 Naslagwerken

TOP250raster (1:250.000), TOP50raster (1:50.000), TOP25raster (1:25.000)

datum uitgave resp. 1996, 2003, 2003
leverancier Topografische Dienst Kadaster (voorheen Topografische Dienst Nederland)

De digitale TOPraster-producten zijn afkomstig van de Topografische Dienst Kadaster. Deze functioneren tijdens de controle als ondergrond en referentie.

Bij de visuele controle van de laserdata wordt voor het betreffende gebied het overeenkomende TOP10Vector bestand over het digitale hoogtemodel heen geprojecteerd. Het bestand functioneert, afhankelijk van de schaal van het product, als ondergrond en referentie.

TOP10vector (1: 5.000 – 1:25.000)

datum uitgave 2003
leverancier Topografische Dienst Kadaster (voorheen Topografische Dienst Nederland)

De digitale TOP10vectorbestanden zijn afkomstig van de Topografische Dienst Kadaster. Deze worden door de AGI gebruikt als basisbestand voor GIS-toepassingen binnen een Arc/Info-systeem. De bestanden hebben een gesloten-vlakken structuur, opgebouwd uit gecodeerde en onderling geknoopte lijnelementen. Het schaalbereik van TOP10Vector varieert van 1:5.000 tot 1:25.000 waardoor de meeste topografie wordt afgebeeld als vlakobject. De verschillende topografische elementen binnen het bestand kunnen afzonderlijk of gecombineerd worden geselecteerd, waarbij de structuur van de data intact blijft.

Bij de visuele controle van de laserdata wordt voor het betreffende gebied het overeenkomende TOP10Vector bestand over het digitale hoogtemodel heen geprojecteerd. Op deze manier kan onder meer gekeken worden naar:

- het correct uitfilteren van bebouwing (bv. kantoren, huizen);
- het voorkomen van wateroppervlakken (bv. sloten, plassen en rivieren);
- de aanwezigheid van dijken en wegen;
- het correct lopen van waterwegen en waterbegrenzingsen;
- een eventuele verschuiving in de X- en/of de Y-richting van de data.

GBKN (1: 500 – 1:2.000)

datum uitgave inwinning 1985-2003
leverancier Landelijk Samenwerkingsverband GBKN

De Grootsschalige Basiskaart Nederland (GBKN) is de meest gedetailleerde topografische basiskaart van heel Nederland. De kaart heeft een grote schaal en is dus heel gedetailleerd. In bebouwde gebieden is de schaal 1:500 of 1:1000 en in landelijke gebieden 1:2000.

De GBKN bevat drie soorten informatie: harde topografie (b.v. gebouwen, civieltechnische kunstwerken en hoogspanningsmasten), zachte topografie (b.v. begrenzingen van wegen, waterwegen, sloten, onder- en bovenkanten van dijken en taluds, aaneengesloten begroeiing) en semantische informatie. Voor de controle van bestanden ingewonnen met laseraltimetrie is vooral de harde topografie belangrijk.

Bij de visuele controle van de laserdata wordt voor het betreffende gebied het overeenkomende GBKN bestand over het digitale hoogtemodel heen geprojecteerd. Op deze manier kan onder meer gekeken worden naar een eventuele verschuiving in de X- en/of de Y-richting van de data.

Digitaal Topografisch Bestand van de natte/droge infrastructuur (DTB-nat/DTB-droog)

datum uitgave 2000

leverancier AGI

De AGI produceert eigen Digitaal Topografische Bestanden (DTB-wegen en DTB-rivieren) en daarbij horende analoge kaarten waarin gegevens over wegen en waterwegen nauwkeurig zijn vastgelegd. Een DTB is een vector georiënteerd digitaal topografisch bestand waarin een groot aantal verschillende topografische elementen op eenduidige wijze in RD-NAP zijn vastgelegd met een generalisatieschaal van 1:1.000 voor de wegenbestanden en 1:5.000 voor de rivierenbestanden. Deze vastlegging geschiedt voornamelijk door middel van fotogrammetrie, aangevuld met terrestrische metingen in het veld. Het DTB-nat bestaat uit informatie over onder meer de exacte ligging van dijken, kades, sluizen, oevers en kribben. Het DTB-droog bestaat uit zeer gedetailleerde informatie van o.a. de ligging van wegmeubilair, zoals lantaarnpalen, verkeersborden, hectometerbordjes en geleiderailconstructie. Beide bestanden bevatten tevens hoogte-informatie van het maaiveld en bepaalde objecten.

De bladligging van een DTB komt overeen met de grootte van een TOP10vector bestand. Dit bestrijkt een gebied van 10.000 bij 6.250 meter.

Bij de visuele controle van de laserdata wordt voor het betreffende gebied het overeenkomende DTB bestand over het digitale hoogtemodel heen geprojecteerd. Er wordt gekeken naar overeenkomst van de data met het DTB op de volgende punten:

- het correct lopen van waterwegen en waterbegrenzingslijnen;
- het voorkomen van wateroppervlakken (bv. rivieren);
- een eventuele verschuiving in de X- of de Y-richting van de data.

Digitale Kleuren Luchtfotokaart van Nederland (DKLN)

datum uitgave 2000

leverancier Eurosense BV

Het DKLN is een landsdekkend bestand van luchtfoto's die opgenomen zijn op schaal 1:25.000 in de zomer van het jaar 2000 door Eurosense BV. De foto's zijn daarna gescand zijn tot een grondresolutie van 50 cm.

De Grote Provincie Atlas

datum uitgave 1996

leverancier Topografische Dienst Kadaster (voorheen Topografische Dienst Nederland)

De Topografische Dienst Kadaster levert materiaal voor De Grote Provincie Atlas op een schaal van 1:25.000. Ter controle van de data wordt gewerkt met deze atlas. In de meeste gevallen wordt echter gewerkt met de vergelijkbare TOPRasterproducten die digitaal voorhanden zijn.

8 Resultaten controles

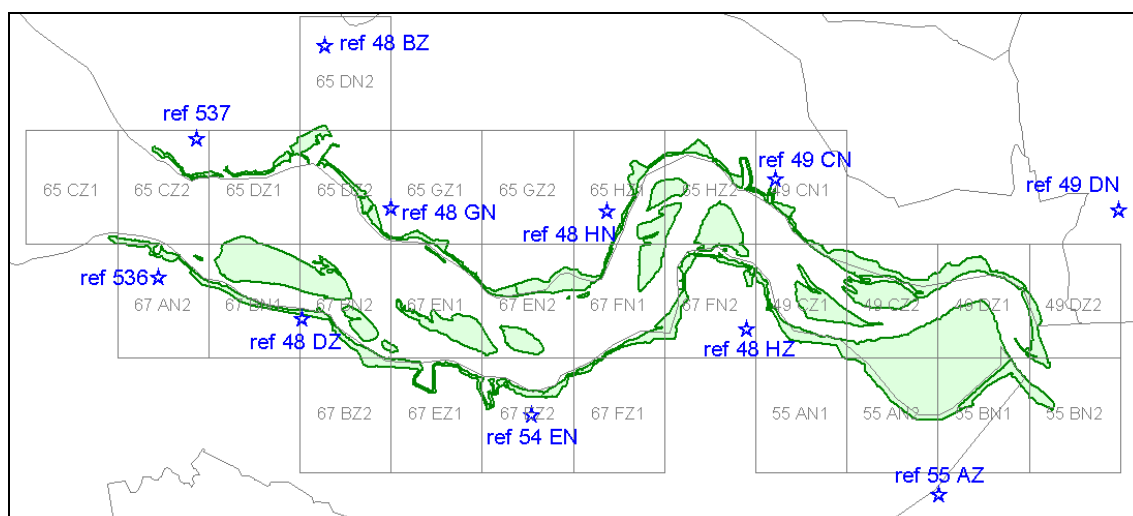
Dit kwaliteitsdocument is opgesteld voor de directie Zeeland en andere gebruikers van de laserhoogtebestanden van het projectgebied Westerschelde. In dit hoofdstuk zullen de resultaten van de controle van het projectgebied Westerschelde uiteengezet worden. In de paragrafen 8.1 en 8.2 wordt eerst een overzicht gegeven van het gebied en de leveringen. In de paragrafen 8.3 en 8.4 worden de resultaten beschreven van de leveringen.

8.1 Overzicht data

Het projectgebied Westerschelde omvat de in tabel 8.1 genoemde TOP10-kaartbladen. De gefilterde data van deze bladen zijn gecontroleerd door de Adviesdienst Geo-informatie en ICT te Delft. De levering van het projectgebied Westerschelde is niet in TOP10-kaartbladen maar in zogenaamde vakgebieden. Figuur 8.1a geeft een overzicht van het projectgebied Westerschelde.

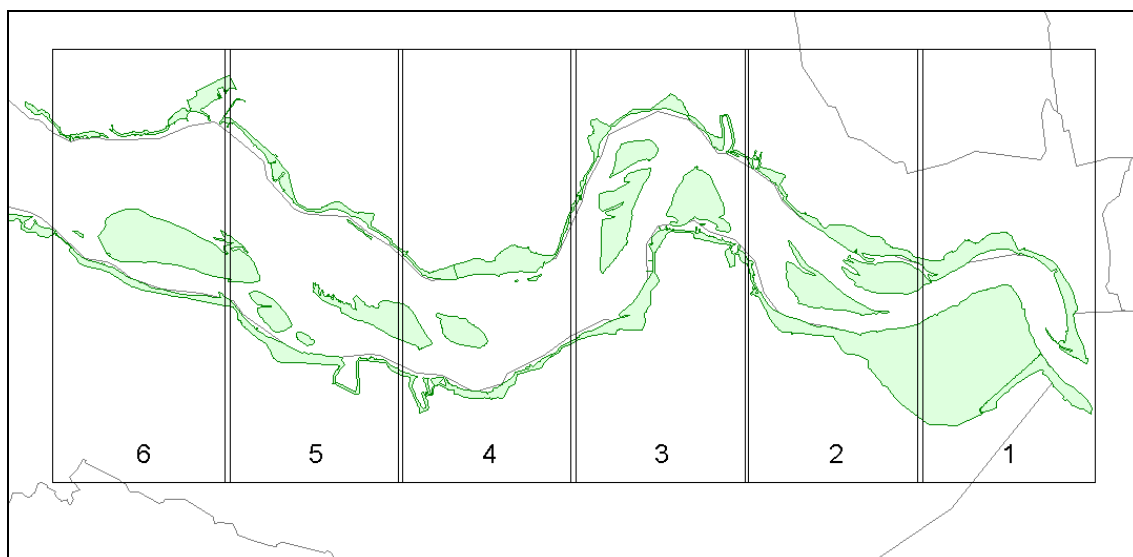
Kaartbladen (29 in totaal)								Gebiedsnaam
49 CN1	49 CZ1	49 CZ2	49 DZ1	49 DZ2	55 AN1	55 AN2	55 BN1	Westerschelde
55 BN2	65 CZ1	65 CZ2	65 DN2	65 DZ1	65 DZ2	65 GZ1	65 GZ2	
65 HZ1	65 HZ2	67 AN2	67 BN1	67 BN2	67 BZ2	67 EN1	67 EN2	
67 EZ1	67 EZ2	67 FN1	67 FN2	67 FZ1				

Tabel 8.1: Geleverde kaartbladen met hoogtedata voor Westerschelde (zie ook figuur 8.1 voor de ligging van de kaartbladen).



Figuur 8.1a: De kaartbladen van het projectgebied Westerschelde.

De data van de Westerschelde wordt uitgeleverd in zogenaamde vakgebieden, deze worden in figuur 8.1b weergegeven. De originele vakgebieden hadden andere y-coördinaten dan in deze figuur afgebeeld: dit zou echter resulteren in het verlies van data omdat het vakgebied niet het hele projectgebied zou omvatten. Daarom is voor ieder vakgebied de oost- en westgrens aangehouden, en is de noord- en zuidgrens (de maximale en minimale y-waarde) zo gekozen dat al het ingewonnen gebied binnen een kaartblad zou vallen.



Figuur 8.1b: De vakgebieden van het projectgebied Westerschelde.

De aannemer die verantwoordelijk is voor de geleverde laseraltimetriedata (inclusief de filtering) is Terra Imaging. Het gehele gebied is gevlogen in een drietal vluchten. In tabel 8.2 is aangegeven op welke dagen is gevlogen, en welke delen van het projectgebied er op die dag gevlogen zijn.

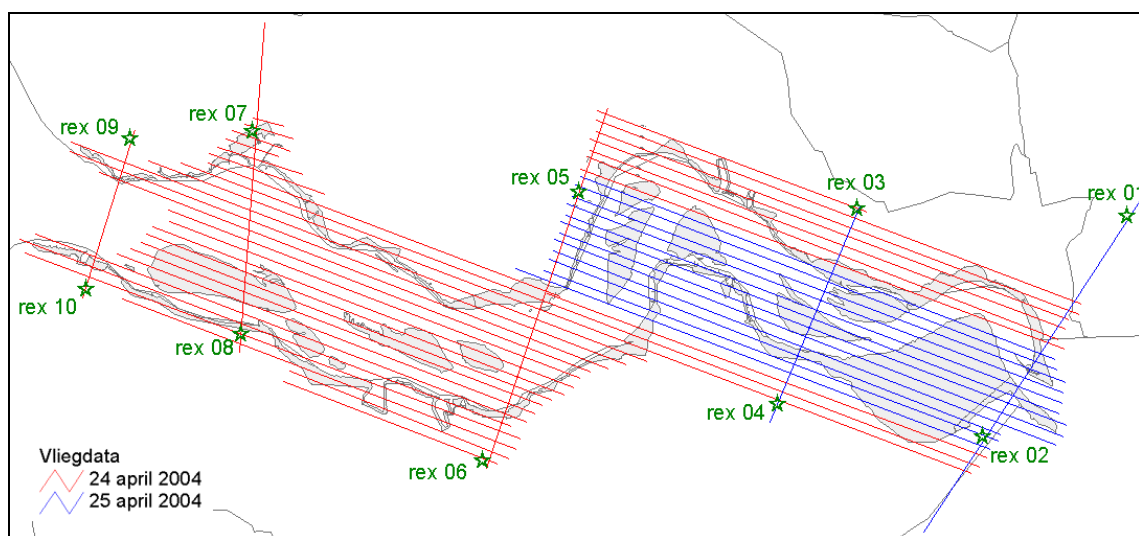
	datum	langsstroken	dwaarsstroken
1	24 april 2004	26-38	92, 93, 94
2	24 april 2004	1-7, 14-19 (westelijk), 20-25	
3	25 april 2004	8-13, 14-19 (oostelijk)	90, 91

Tabel 8.2: Vliegdata en gevlogen gebieden voor het projectgebied Westerschelde.

De 2 vluchten dekten het projectgebied volledig, zodat er geen aanvullende hervluchten nodig waren. Later tijdens de verwerking bleek in een aantal gevallen dat de scanner heel even was uitgevallen. Hierdoor ontbrak er op deze plaatsen een klein stukje van de strook (ongeveer 15 meter in strookrichting over de hele breedte van de strook). De locatie van deze ontbrekende delen is aangegeven in paragraaf 8.3.4.

De vluchten hebben plaatsgevonden tijdens laag water. De getijdevensters zijn van tevoren bepaald door RWS – Rijksinstituut voor Kust en Zee (RWS-RIKZ) en achteraf gecontroleerd. Hiermee werd gegarandeerd dat minimaal de waarden boven de –1.00 meter NAP zouden worden ingewonnen. Het blijkt dat ook lagere waarden van –1.00 meter NAP zijn ingewonnen.

In figuur 8.2 wordt een overzicht gegeven van de gevlogen stroken, de bijbehorende vliegdata en de locatie van de referentiegebieden van de aannemer.



Figuur 8.2: Overzicht vluchten met vliegdata en locatie referentiegebieden van de aannemer.

8.2 Overzicht leveringen

Allereerst wordt een kort overzicht gegeven van de leveringen van de data die bij de AGI zijn binnengekomen. Alleen de resultaten na de controle van de laatste levering worden in de rest van dit hoofdstuk besproken.

8.2.1 Levering 1

Levering 1 (domein 1 & domein 2) werd voor beide domeinen afgekeurd.

Domein 1: werd afgekeurd omdat er onregelmatigheden waren geconstateerd in enkele strookoverlappen. Daarnaast waren er vreemde houtnerfpatronen (vormfouten in de stroken, zie paragraaf 8.3.9) in de data waar te nemen. Hoewel de hoogtekwaliteit voldoende was, waren deze vormfouten duidelijk zichtbaar in het bestand. Op een drietal gebieden was door uitval van de scanner een klein stukje ontbrekende data ontstaan. De aannemer heeft dit aangegeven in de kwaliteitsrapportage.

Domein 2: werd afgekeurd omdat op diverse plaatsen vegetatie niet goed of niet voldoende gefilterd was. Daarnaast was ook de filtering van het water op enkele plaatsen niet goed uitgevoerd. Enkele schepen, die tijdens de opname op de Westerschelde voeren, waren niet uit het bestand verwijderd.

8.2.2 Levering 2

Levering 2 (domein 1 & domein 2) werd voor beide domeinen goedgekeurd, behoudens de houtnerf in domein 1.

Domein 1: door de bewerkingen van de aannemer waren de hoogteverschillen in de strookoverlappen verbeterd. De houtnerfpatronen waren niet verbeterd (zie ook paragraaf 8.3.9).

Domein 2: werd goedgekeurd omdat in deze levering de vegetatie, het water en de overige objecten juist gefilterd waren.

8.3 Resultaten domein 1 controle

8.3.1 Resultaten statistische hoogtecontrole

In tabel 8.3 zijn de resultaten van de statistische hoogtecontrole weergegeven. Sommige controlegebieden zijn meerdere keren gevalideerd (bijvoorbeeld in langs- en dwarsstroken). Het uitgangspunt bij de validaties met verschillende stroken is dat een onafhankelijke validatie kon plaatsvinden. Doordat de dwarsstroken meer dan een keer gevlogen waren, konden er meer validaties uitgevoerd worden. In figuur 8.2 is de ruimtelijke verdeling van de controlegebieden afgebeeld. In de paragrafen 2.4 en 4.5.4 worden de eisen die gesteld worden aan de hoogtevalidatie opgesomd:

Aanvullende eisen aan referentievelden

Op elk controleveld wordt een gemiddeld hoogteverschil berekend. De eis is dat 50% van de hoogteverschillen tussen de -5 en 5 cm ligt, 67% tussen -10 en 10 cm en 95% tussen -15 en 15 cm.

Naast de statistische controle heeft de AGI ook nader gekeken naar de ruimtelijke verdeling van de grootste verschillen. In de volgende tabellen zijn de resultaten van de statistische hoogtecontrole opgenomen.

naam controle gebied	locatie	kaart blad	inwin datum	soort gebied	aantal punten	gemiddelde afwijking [m]	standaard afwijking [m]	RMS fout [m]
ref48bz *	Arnemuiden	65DN2		sportveld	167	-0.088	0.019	0.090
ref48bz *	Arnemuiden	65DN2		sportveld	179	-0.051	0.025	0.057
ref48bz *	Arnemuiden	65DN2		sportveld	179	-0.069	0.024	0.073
ref48bz *	Arnemuiden	65DN2		sportveld	179	-0.020	0.025	0.032

ref48dz *	Hoofdplaat	67AN2		sportveld	190	-0.065	0.025	0.070
ref48dz *	Hoofdplaat	67AN2		sportveld	192	-0.075	0.025	0.079
ref48dz *	Hoofdplaat	67AN2		sportveld	193	-0.052	0.023	0.057
ref48dz *	Hoofdplaat	67AN2		sportveld	193	-0.064	0.027	0.067
ref48dz	Hoofdplaat	67AN2		sportveld	192	-0.022	0.030	0.037
ref48gn	Ellewoutsdijk-polder	65GZ1		weiland	188	0.060	0.029	0.067
ref48hn *	Hoedekenskerke	65HZ1		sportveld	208	-0.014	0.022	0.026
ref48hn *	Hoedekenskerke	65HZ1		sportveld	201	0.027	0.032	0.042
ref48hn *	Hoedekenskerke	65HZ1		sportveld	203	-0.064	0.032	0.072
ref48hn *	Hoedekenskerke	65HZ1		sportveld	206	-0.011	0.024	0.027
ref48hn	Hoedekenskerke	65HZ1		sportveld	206	0.037	0.020	0.042
ref48hz	Kloosterzande	67FN2		sportveld	200	0.007	0.028	0.029
ref49cn	Kruiningen	49CN1		sportveld	249	0.072	0.046	0.086
ref49dn *	Woensdrecht	49DN2		sportveld	206	0.009	0.020	0.023
ref49dn *	Woensdrecht	49DN2		sportveld	207	0.004	0.027	0.027
ref49dn *	Woensdrecht	49DN2		sportveld	206	0.026	0.017	0.031
ref49dn *	Woensdrecht	49DN2		sportveld	207	0.009	0.021	0.022
ref536 *	Breskens	67AN2		sportveld	162	-0.003	0.024	0.024
ref536 *	Breskens	67AN2		sportveld	163	-0.011	0.025	0.022
ref536 *	Breskens	67AN2		sportveld	165	-0.022	0.027	0.035
ref536 *	Breskens	67AN2		sportveld	165	-0.028	0.024	0.037
ref537 *	Vlissingen	65CZ2		sportveld	147	0.048	0.022	0.053
ref537 *	Vlissingen	65CZ2		sportveld	147	0.043	0.026	0.051
ref537 *	Vlissingen	65CZ2		sportveld	148	-0.010	0.023	0.025
ref537 *	Vlissingen	65CZ2		sportveld	148	-0.006	0.018	0.019
ref54en *	Terneuzen	67EZ2		sportveld	184	-0.033	0.023	0.040
ref54en *	Terneuzen	67EZ2		sportveld	183	-0.042	0.019	0.046
ref54en *	Terneuzen	67EZ2		sportveld	183	-0.046	0.019	0.049
ref54en *	Terneuzen	67EZ2		sportveld	178	-0.094	0.017	0.096
ref54en *	Terneuzen	67EZ2		sportveld	175	-0.102	0.021	0.105
ref54en *	Terneuzen	67EZ2		sportveld	184	-0.085	0.019	0.087
ref54en	Terneuzen	67EZ2		sportveld	184	-0.110	0.023	0.113
ref55az *	Kieldrecht	55AZ1		sportveld	142	-0.035	0.029	0.046
ref55az *	Kieldrecht	55AZ1		sportveld	140	-0.026	0.025	0.036
ref55az *	Kieldrecht	55AZ1		sportveld	140	-0.065	0.029	0.072
ref55az *	Kieldrecht	55AZ1		sportveld	138	-0.038	0.028	0.048

Tabel 8.3a: Een overzicht van alle gebruikte controlegebieden bij de validatie van de hoogte van de laserdata van het projectgebied Westerschelde. De velden gemarkeerd met * zijn gevalideerd in dwarsstroken.

Samenvatting bevindingen controles referentiegebieden AGI			
Aantal referentiegebieden: 11 waarvan 40 maal onafhankelijk gevalideerd			
Omschrijving	Totaal aantal	eis	percentage
Aantal < 5 cm	25	> 50%	63 %
Aantal < 10 cm	38	> 67%	95 %
Aantal < 15 cm	40	> 95%	100 %

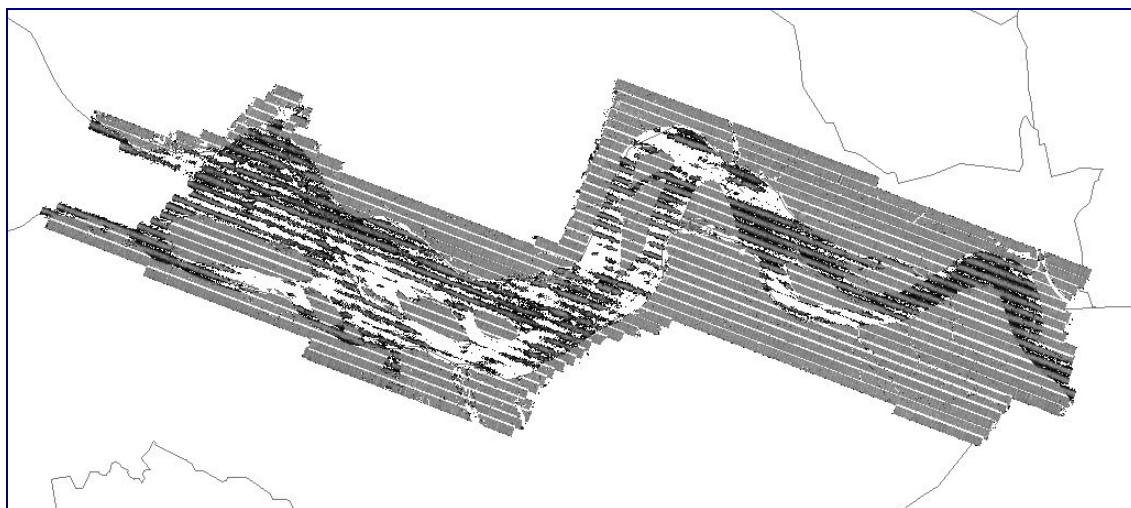
Tabel 8.3b: Resultaten statistische hoogtecontrole van het projectgebied Westerschelde

Hoewel de hoogtevalidatie aan de eisen voldoet, zijn er toch een aantal grote waarden aangetroffen voor de gemiddelde afwijking. Het betreft de referentiegebieden ref48BZ, ref 48DZ en ref54EN. De eerste twee referentiegebieden zijn gevalideerd in dezelfde dwarsstrook (ws093). Uit het hoogteverslag van de aannemer bleek dat tijdens de verwerking grote verschillen waren ontdekt tussen de betreffende dwarsstrook en de langsstroken. De aannemer heeft dit nader bekeken en geconcludeerd dat de laserdata van de langsstroken een juiste hoogteligging had en dat de laserdata van de dwarsstrook ws093 een verkeerde hoogteligging had. Dit verklaart de grote gemiddelde afwijkingen van de twee referentiegebieden ref48BZ en ref48DZ bij validatie met deze dwarsstrook. Dit wordt nog eens bevestigd door het resultaat van de validatie van ref48DZ met de langsstroken: hierbij is de gemiddelde afwijking met de langsstroken -0,022 meter.

Voor het referentieveld ref54EN valt uit de tabel af te lezen dat deze 3 keer onafhankelijk gevalideerd wordt met een verschil uiteenlopend van $-0,033$ tot $-0,046$ waarbij de RMS waarde uiteenloopt van $0,040$ tot $0,049$. Op basis hiervan zou de validatie van dit veld voldoende zijn. Hetzelfde veld wordt 4 keer onafhankelijk gevalideerd met een verschil uiteenlopend van $-0,085$ tot $-0,110$ waarbij de RMS waarde uiteenloopt van $0,087$ tot $0,113$. De hoge RMS waarde duidt op grote verschillen in de validatie van de afzonderlijke punten, waardoor kan worden aangenomen dat of het referentieveld of de laserdata geen vlak gebied representeert. Op basis van de andere 3 validaties, die binnen de eisen vallen, kan worden geconcludeerd dat de laserdata waar de laatste 4 validaties mee zijn uitgevoerd, op de locatie van het referentieveld niet een vlak gebied representeert. Dit kan meerdere oorzaken hebben, de meest aannemelijke is dat er ten tijde van de laseropnames iets op het veld heeft gestaan (een podium, een grasmaaier, wellicht een sportwedstrijd) waardoor het veld ten tijde van de opname niet vlak was.

8.3.2 Resultaten controle van de frequentie

Het ongefilterde frequentiegrid van het projectgebied Westerschelde is door de AGI visueel gecontroleerd op de in paragraaf 4.2 genoemde punten. Bij deze controle zijn in het projectgebied geen storingsen geconstateerd. In figuur 8.3 is het frequentiegrid van het projectgebied Westerschelde afgebeeld.



Figuur 8.3: Overzicht van de frequentie van de laserhoogtedata van het projectgebied Westerschelde, vóór filtering.

8.3.3 Resultaten van de punt dichtheidscontrole

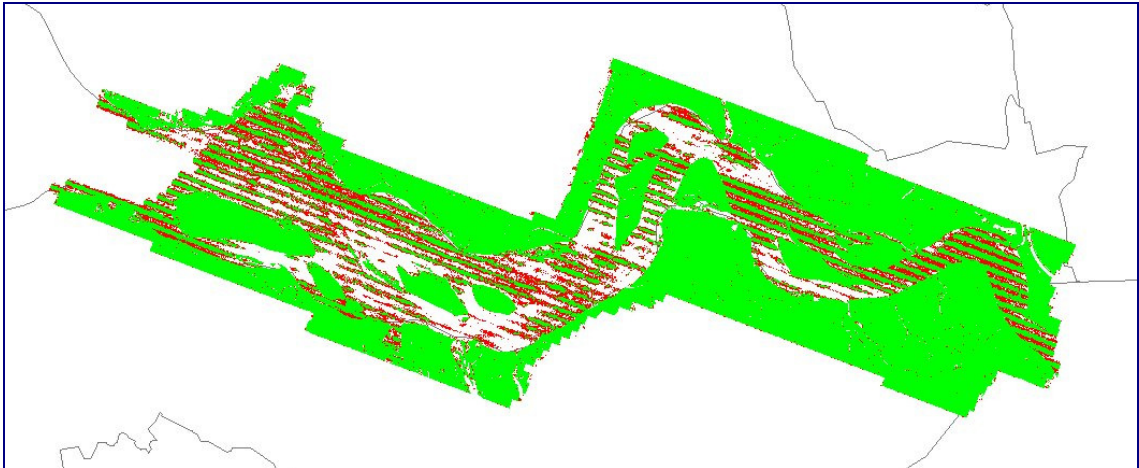
Het ongefilterde punt dichtheidsgrid is door de AGI gecontroleerd op de in paragraaf 4.3 genoemde punten. De punt dichtheidseis voor het projectgebied Westerschelde betrof minimaal 1 punt per 4 m^2 . Aan deze eis wordt ruimschoots voldaan.

In tabel 8.4 zijn de resultaten van deze punt dichtheidsmeting gegeven. De punt dichtheid is gecontroleerd voor het hele gebied, het betreft dus een gemiddelde punt dichtheid. Daarnaast is ook gecontroleerd of een enkele strook (zonder overlap) ook voldeed aan de punt dichtheidseisen. Naast deze controles is ook het punt dichtheidsgrid visueel gecontroleerd. Het betreft hier de punt dichtheid van de ongefilterde bestanden.

gebied	benaderde oppervlak	punt dichtheid ongefilterd		
		punten / m^2	1 punt per	punten / 4 m^2
projectgebied Westerschelde	50250 ha	0.48	2.08 m^2	1.92
strook ws06	1525 ha	0.42	2.38 m^2	1.68
strook ws21	2415 ha	0.45	2.22 m^2	1.80
strook ws36	1325 ha	0.45	2.22 m^2	1.80

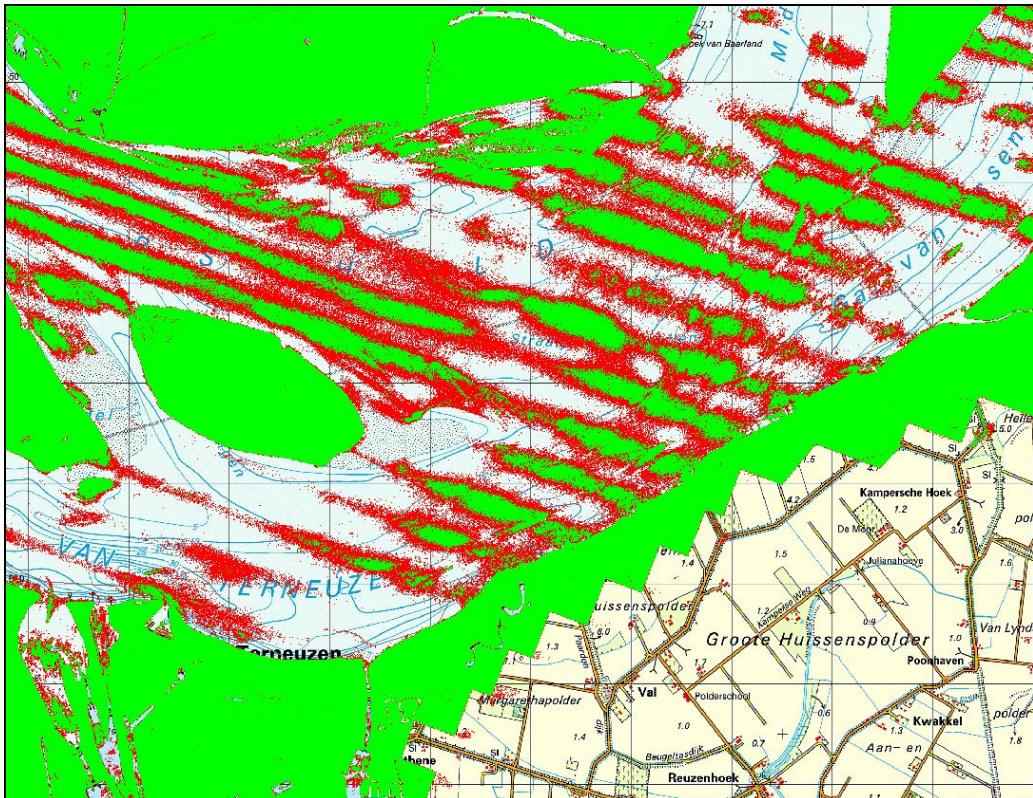
Tabel 8.4: Een overzicht van de punt dichtheid van het projectgebied Westerschelde.

In figuur 8.4a is het punt dichtheidsgrid van het projectgebied Westerschelde afgebeeld.



Figuur 8.4a: Overzicht van de punt dichtheid van de laserhoogtedata van het projectgebied Westerschelde, vóór filtering. Groen betekent voldoende punt dichtheid, rood betekent onvoldoende punt dichtheid.

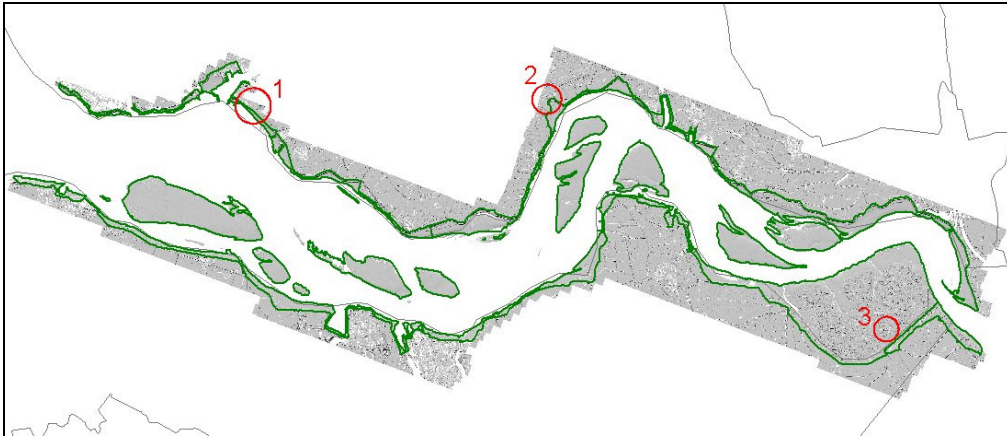
In figuur 8.4b is een detail van het punt dichtheidsgrid afgebeeld met als ondergrond TOP50raster. Het betreft een detail ten noorden van Terneuzen. Hierin is duidelijk te zien dat de rode gebieden (met een te lage punt dichtheid) watergebieden betreffen: de laserstraal heeft de eigenschap dat deze op water alleen recht onder het vliegtuig terugkaatst en geregistreerd wordt. De droge delen hebben een voldoende punt dichtheid.



Figuur 8.4b: Detail van het punt dichtheidsgrid van de laserhoogtedata van het projectgebied Westerschelde, vóór filtering. Groen betekent voldoende punt dichtheid, rood betekent onvoldoende punt dichtheid.

8.3.4 Resultaten van de controle op ontbrekende data

Het projectgebied Westerschelde is volledig dekkend gevlogen. Een gedeelte van een strook ontbrak en was ook niet gevlogen. De aannemer had dit in de bijbehorende rapportage gemeld. Het betreft een afstand van circa 15 meter in vliegrichting over de gehele breedte van de strook (circa 450 meter). De AGI heeft besloten dat er niet opnieuw gevlogen hoefde te worden, omdat het om een zeer klein gedeelte binnen de projectgrens ging (zie ook paragraaf 8.2.1). In figuur 8.5a is aangegeven om welke gedeeltes het gaat.



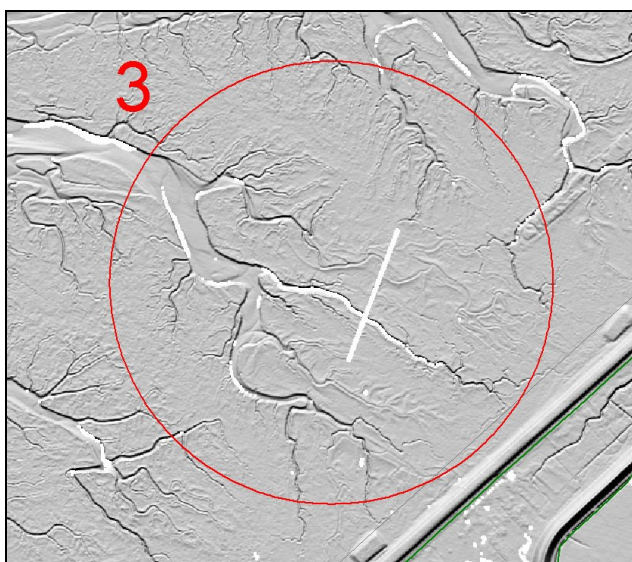
Figuur 8.5a: Lokaties van de ontbrekende data door uitvallen van de scanner in het projectgebied Westerschelde.



Figuur 8.5b: Detail van locatie 1 van ontbrekende data door uitvallen van de scanner in het projectgebied Westerschelde.



Figuur 8.5c: Detail van locatie 2 van ontbrekende data door uitvallen van de scanner in het projectgebied Westerschelde.

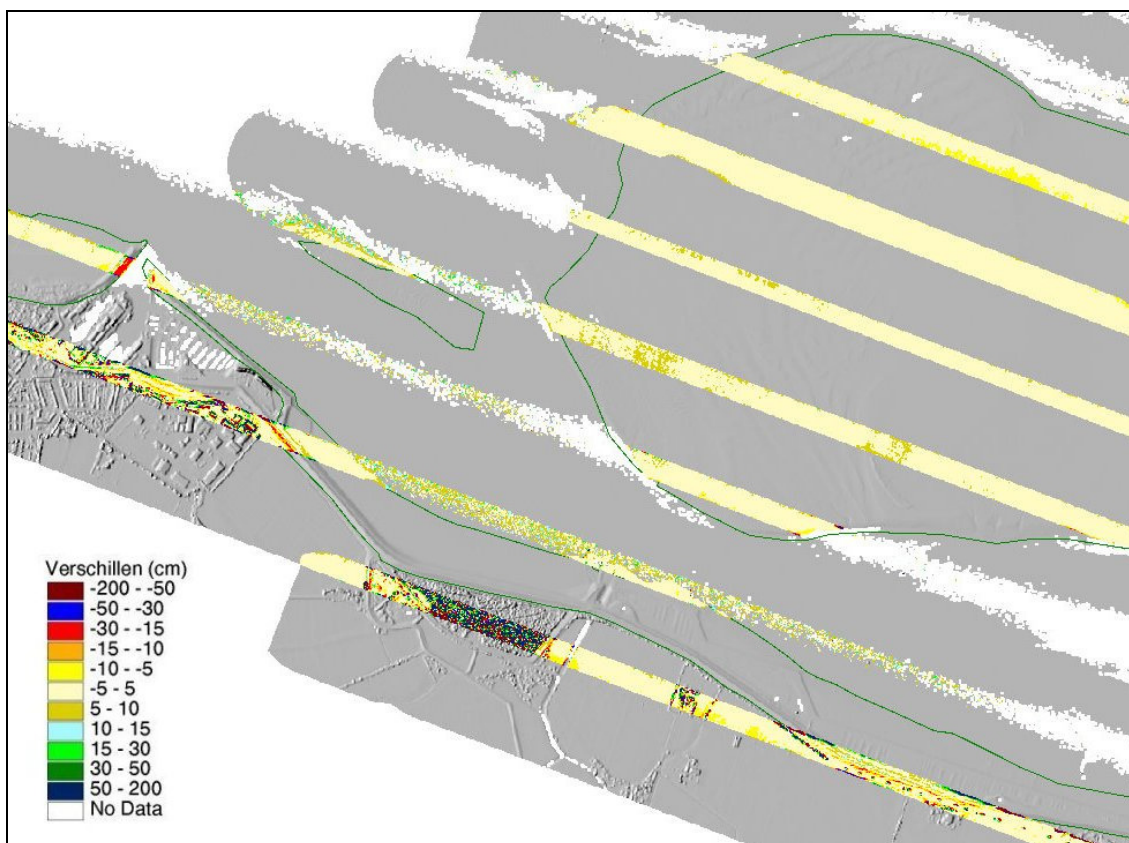


Figuur 8.5d: Detail van locatie 3 van ontbrekende data door uitvallen van de scanner in het projectgebied Westerschelde.

In het hele projectgebied kunnen wel kleine gebieden voorkomen waar geen registratie is geweest van de laserpuls. Het betreft hier wateroppervlakken of andere 'natte' gebieden, deze worden niet als ontbrekende data aangemerkt. Aangezien de meeste gebieden van het projectgebied Westerschelde een hoge punt dichtheid hebben, is er in dit projectgebied relatief veel water wél opgenomen. Tijdens de controle worden de ontbrekende delen van deze gebieden wel goed gecontroleerd om te zien of het inderdaad om water gaat.

8.3.5 Resultaten van de controle op de strookaansluiting en –overlap

De strookaansluiting en –overlap zijn visueel gecontroleerd in het verschilgrid van de overlopen. Hierbij zijn geen onregelmatigheden geconstateerd. In de figuren 8.6 is een voorbeeld gegeven van het verschilgrid van de overlopen.



Figuur 8.6: Detail van het verschilgrid van de overlappen van de laserhoogtedata van het projectgebied Westerschelde met als ondergrond een hillshade.

Over het algemeen geldt dat een lichtgele kleur van het verschilgrid aangeeft dat de verschillen tussen de stroken niet groter zijn dan 5 centimeter. In gebieden waar vegetatie of bebouwing voorkomt, zijn de verschillen groter omdat de laserpunten niet precies op hetzelfde punt betrekking hebben. Grotere verschillen zijn daar dus normaal. Ook wanneer de stroken niet op hetzelfde tijdstip zijn gevlogen kunnen er verschillen ontstaan met name in gebieden die onderhevig zijn aan eb en vloed. Boven water laat het verschilgrid van de overlappen ook grotere verschillen zien, aangezien het water geen constante hoogte heeft door golfslag. De AGI controleert met name op vlakke gebieden (zoals het strand) die in een kort tijdsbestek niet al te veel veranderen.

De overlappen zijn ook gecontroleerd op voldoende breedte. Voor het projectgebied Westerschelde gold dat, bij een minimale punt dichtheid van 1 punt per 4 m², de minimale strookbreedte 50 meter zou moeten zijn. Omdat de werkelijke punt dichtheid van het bestand hoger was dan de minimale punt dichtheid is de minimale strookoverlapbreedte kleiner dan 50 meter. Bijvoorbeeld, bij een werkelijke punt dichtheid van 0.42 punten per m² (punt dichtheid in de enkele strook zonder strookoverlappen) is de minimale strookoverlapbreedte slechts 39 meter. De strookbreedte is steekproefsgewijs gemeten over meerdere overlappen en is ruim voldoende bevonden.

8.3.6 Resultaten van de controle op extremen

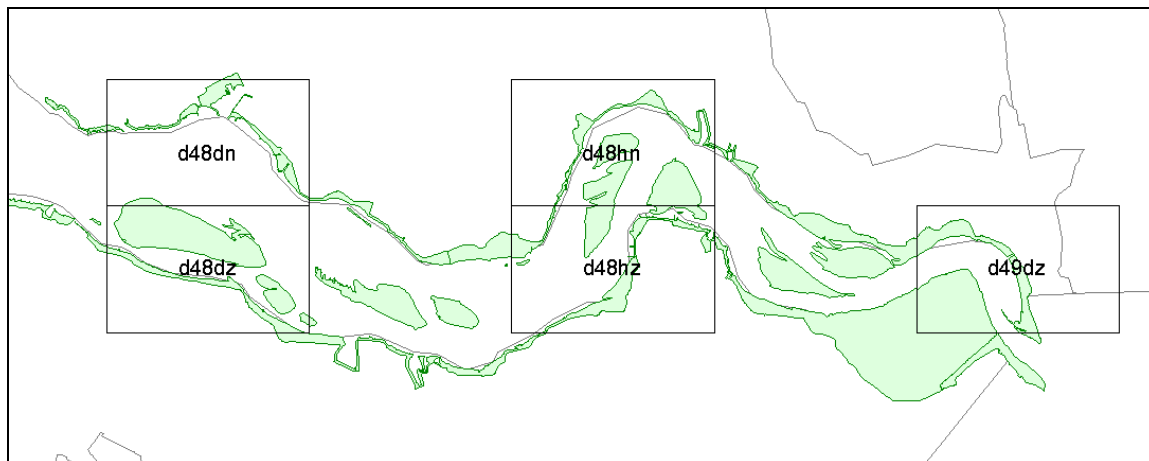
Tijdens de controle van domein 1 zijn geen extremen aangetroffen.

8.3.7 Resultaten van de controle van planimetrie

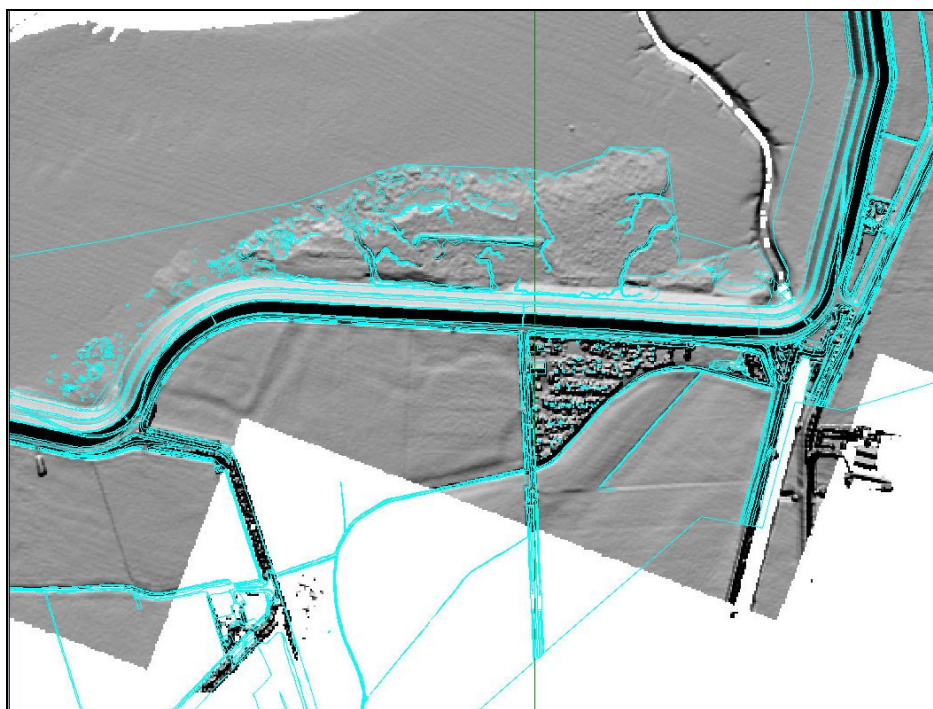
Voor de planimetrische controle van kustgebieden zijn maar weinig goede bestanden beschikbaar: er zijn in een dergelijk smal projectgebied ook maar weinig referentiebestanden voorhanden. Voor de planimetrische controle van het projectgebied Westerschelde is gebruik gemaakt van het Digitaal Topografisch Bestand (DTB). Het betreft hier een combinatie van het DTB-nat en DTB droog. Er zijn een vijftal DTB bladen gebruikt. De locaties van de controles zijn evenwichtig verdeeld over het hele

projectgebied zodat mogelijke verschuivingen in zowel x- als y-richting goed opgemerkt kunnen worden. Op basis van deze controles kan worden geconcludeerd dat er geen planimetrische verschuiving heeft plaatsgevonden.

In figuur 8.7a is de locatie van de vijf gebruikte DTB bladen afgebeeld. In figuur 8.7b is een voorbeeld gegeven van de controle.



Figuur 8.7a: Locaties van de gebruikte kaartbladen van het Digitaal Topografisch Bestand (DTB).



Figuur 8.7b: Voorbeeld van de planimetrische controle met behulp het Digitaal Topografisch Bestand (DTB).

8.3.8 Resultaten van de foutsoortencontrole

De foutsoorten worden als volgt gedefinieerd:

- F1: Fout per punt (ruis door de laserscanner)
- F2: Fout per gebied van 100 m x 500 m (ruis door GPS waarneming)
- F3: Fout per strook (combinatie GPS/INS)
- F4: Fout voor hele gebied (de aansluiting aan NAP)

Voor het projectgebied Westerschelde werden de foutsoorten op een andere wijze berekend dan in reguliere laserprojecten. Zie hiervoor paragraaf 4.5.4. De resultaten van de foutsoortencontrole zijn in

tabel 8.5 opgenomen. Het aantal referentiestrokenparen is afhankelijk van het aantal vluchten waarin het gebied is opgenomen: omdat er drie vluchten zijn geweest zijn er ook drie maal referentiestroken gevlogen en getoetst.

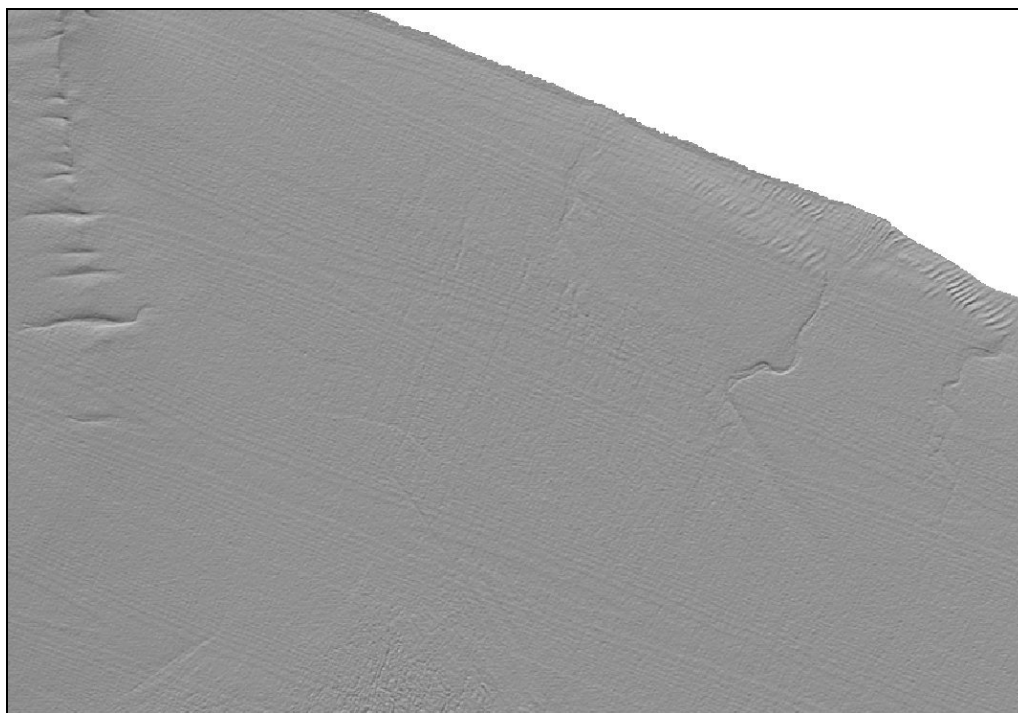
Foutsoort	Eis maximum	Resultaat 1	Resultaat 2	Resultaat 3
Foutsoort 1	< 24 cm	19.62 cm	20.79 cm	11.68 cm
Foutsoort 2	< 31 cm ²	1.61 cm ²	2.35 cm ²	8.10 cm ²
Foutsoort 3a	< 66 cm ²	0.91 cm ²	1.15 cm ²	15.83 cm ²
Foutsoort 3b	< 30 km	0.99 km	3.03 km	6.87 km

Tabel 8.5: Resultaten van de foutsoortencontrole van het projectgebied Westerschelde.

8.3.9 Toelichting op het houtnerfpatroon

Zoals eerder in paragraaf 8.2 geschetst werd, is er in het projectgebied Westerschelde sprake van vreemde houtnerfpatronen ofwel vormfouten in de stroken. Hoewel de hoogtekwaliteit voldoende was, waren deze vormfouten, afhankelijk van de gridgrootte van het bestand, duidelijk zichtbaar. De AGI had in een ander laserproject, wat vrijwel gelijktijdig met de data van de Westerschelde werd geleverd, ook een dergelijke vormfout in het laserhoogtebestand aangetroffen. In deze paragraaf wordt verduidelijkt om welk verschijnsel het gaat en wordt inzicht gegeven in de hoogteverschillen die optreden bij het verschijnsel.

In figuur 8.8 wordt een voorbeeld gegeven van het patroon zoals het zich voordoet. Het betreft een gedeelte van een droogliggend deel van de Westerschelde, 'Hooge Platen', ten westen van Breskens.



Figuur 8.8: Voorbeeld van het houtnerfpatroon. De afbeelding is de hillshade van het projectgebied Westerschelde.

Het houtnerfpatroon is door de aannemer tijdens de verwerking geconstateerd. Het is voornamelijk waar te nemen in zeer vlakke gebieden, zoals op stranden en zandbanken, en herhaalt zich in de strook. Het effect doet zich voor in het midden van de stroken.

De AGI heeft tijdens de controle van de bestanden het patroon ook waargenomen. Deze controles wezen uit dat er wel degelijk hoogteverschillen waren ter plaatse van de patronen, maar dat deze hoogteverschillen niet groter zijn dan 5 centimeter. De hoogteverschillen van het houtnerfpatroon voldoen dus aan de hieraan gestelde specificaties.

Desondanks werd in eerste instantie het projectgebied Westerschelde afgekeurd voor domein 1 omdat de houtnerven zichtbare vormfouten betroffen (zie ook paragraaf 8.2.2). Toen na gesprekken

met de aannemer bleek dat hier niet snel iets aan gedaan kon worden, heeft de AGI er bij de aannemer op aangedrongen het probleem op te lossen.

Nadere analyse van het houtnerfprobleem brengt de AGI tot de volgende conclusies:

- De houtnerfpatronen zijn zo gering dat zij geen invloed hebben op de hoogteligging van de bestanden;
- Indien er een gridgrootte van 5x5 meter of groter wordt gekozen, zijn de patronen niet tot nauwelijks zichtbaar in het bestand en zijn het DHM en een eventuele hillshade geschikt voor visuele doeleinden;
- Indien er een gridgrootte van 3x3 meter wordt gekozen, zijn de patronen niet tot nauwelijks te zien in het DHM. In de hillshade zijn de patronen wel waarneembaar indien er ingezoomd wordt (zie ook figuur 8.8). Het DHM is dus geschikt voor visuele doeleinden, de hillshade is dat alleen als er voldoende uitgezoomd is.

8.4 Resultaten domein 2 controle

8.4.1 Resultaten van de controle op ontbrekende data in domein 2

In het projectgebied is bij de laatste levering geen ontbrekende data als gevolg van bewerkingen in domein 2 aangetroffen. Zoals eerder al in de resultaten van de domein 1 controle was vermeld, waren er drie locaties waar ontbrekende data was als gevolg van het tijdelijk uitvallen van de scanner. Deze locaties zijn in paragraaf 8.3.4 aangegeven.

8.4.2 Resultaten van de controle op uitschieters

Er zijn in het projectgebied Westerschelde vijf uitschieters aangetroffen. Het maximaal aantal uitschieters dat wordt toegestaan is 1 uitschieter per 1000 ha. Bij een gebied van ongeveer 12200 ha mogen er dus maximaal 12 uitschieters in het bestand aanwezig zijn. Het vijftal uitschieters valt dus ruim binnen de eisen die aan de aannemer gesteld waren (zie ook paragraaf 5.3). Daarbij bevonden de uitschieters zich allen buiten de gestelde projectgrenzen. De uitschieters zijn niet uit het bestand verwijderd door de AGI.

8.4.3 Resultaten van de controle op filtering van vegetatie

Tijdens de controle van de eerste levering waren op enkele plaatsen kleine stukken vegetatie niet of niet volledig uitgefilterd, hiervoor is gecorrigeerd door de aannemer. Het algemene beeld dat is ontstaan tijdens de controle van de filtering van vegetatie tijdens de laatste levering is dat de vegetatie over het hele bestand zeer goed is gefilterd.

8.4.4 Resultaten van de controle op filtering van bebouwing

Tijdens de controle van de eerste levering was op enkele plaatsen bebouwing niet of niet volledig uitgefilterd, hiervoor is gecorrigeerd door de aannemer. De controle van de tweede levering wees uit dat de bebouwing binnen het projectgebied Westerschelde goed is uitgefilterd.

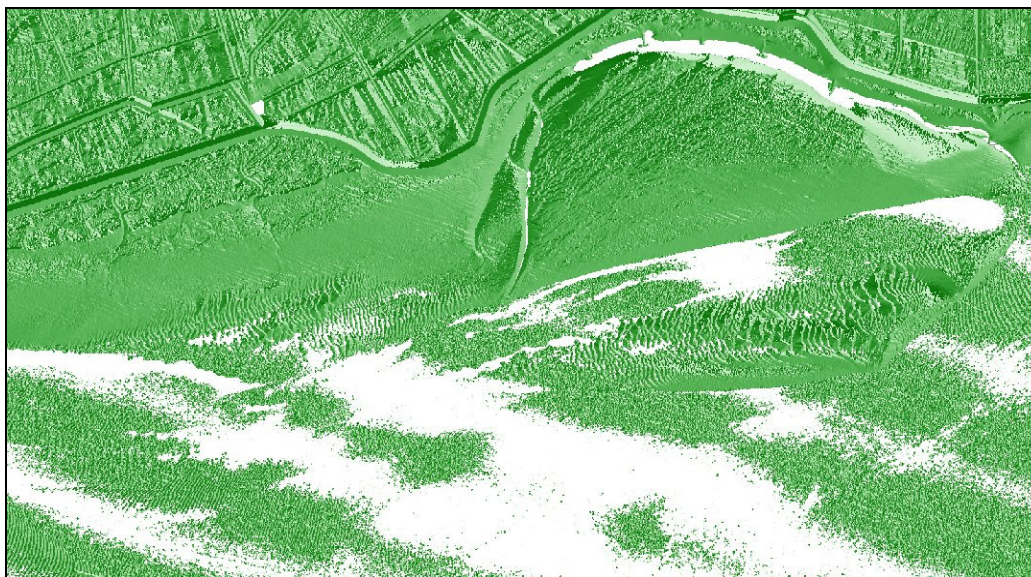
8.4.5 Resultaten van de controle op filtering van overige objecten

Er zijn tijdens de controle van de filtering van het projectgebied Westerschelde geen overige objecten aangetroffen die niet correct gefilterd zijn.

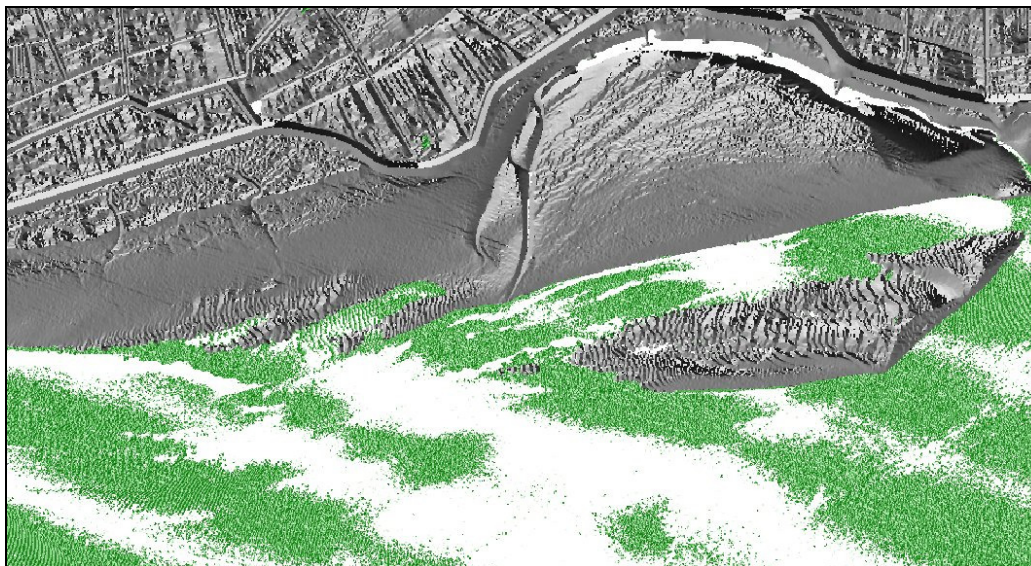
8.4.6 Resultaten van de controle op filtering van water

Zoals uit paragraaf 8.2 blijkt was het projectgebied Westerschelde bij de eerste levering (onder andere) afgekeurd op domein 2 omdat het water niet goed of niet voldoende was gefilterd. Bij de volgende levering was dat wel op de juiste wijze gebeurd.

In een aantal gevallen is het erg lastig geweest te bepalen of het water goed is gefilterd, dit komt met name voor in gebieden die gekenmerkt worden door een onregelmatige overgang van water naar land of waar veel waterstromen zijn. In de figuren 8.9a en 8.9b is een voorbeeld gegeven van zo'n gebied. Het betreft hier de 'Plaat van Baarland' en de 'Slikken van Everingen', ten zuiden van Oudelanden. In figuur 8.9a is het ruwe aspectgrid afgebeeld, de grens water/land is niet altijd goed te onderscheiden. In figuur 8.9b is het ruwe aspectgrid afgebeeld met daaroverheen het gefilterde aspectgrid, hierin is te zien dat enkele delen een scherpe water/landgrens hebben (rechtsboven) en enkele delen een onduidelijke water/landgrens (midden).



Figuur 8.9a: Aspectgrid (ruw)



Figuur 8.9b: Aspectgrid (ruw, groen) met daaroverheen het aspectgrid (gefilterd, grijs).

8.5 Conclusies

Ten aanzien van de kwaliteit van het laserbestand van het projectgebied Westerschelde kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- Het gebiedsdekkende bestand van het projectgebied Westerschelde is opgebouwd uit opnames van drie vluchten. De vluchten zijn uitgevoerd op 24 en 25 april 2004 (zie figuur 8.2). Alle vluchten zijn uitgevoerd tijdens de door de AGI aangegeven tijdvensters van laag water. Hierdoor wordt ruim voldaan aan de eis dat minimaal de waarden boven de –1.00 meter NAP zijn ingewonnen.
- De statistische hoogtecontrole wijst uit dat de hoogteligging van het projectgebied Westerschelde voldoet aan de door de AGI gestelde eisen.
- De gemiddelde punt dichtheid van het projectgebied Westerschelde is ongefilterd 0,48 punten per m² (zie figuur 8.4). Dit zijn 1,92 punten per 4 m², wat ruim voldoet aan de eis van 1 punt per 4 m².
- Voor de foutsoortencontrole waren voor het projectgebied Westerschelde projectspecifieke eisen opgesteld (zie ook paragraaf 4.5.4). De foutsoortencontrole wijst uit dat het bestand aan de eisen van de foutsoorten voldoet.
- De planimetrische precisie (precisie van x- en y-coördinaten) van het bestand voldoet aan de gestelde eisen.
- De filtering van vegetatie, bebouwing, andere objecten en water is zeer goed uitgevoerd. Er zijn nog een vijftal uitschieters aangetroffen, maar dit valt binnen de eisen. Daarbij bevonden de uitschieters zich allen buiten de gestelde projectgrenzen.
- In het projectgebied Westerschelde is er op drie locaties ontbrekende data aangetroffen als gevolg van het uitvallen van de scanner. De locatie van deze gebieden zijn in dit kwaliteitsdocument zo goed mogelijk aangegeven (zie figuur 8.5a t/m figuur 8.5d).
- In het projectgebied Westerschelde zijn vormfouten in de stroken (houtnerven) aangetroffen. Deze zijn in de bestanden aanwezig, maar voldoen aan de door de AGI gestelde kwaliteitseisen aan de hoogteligging. De AGI heeft adviezen opgesteld voor het gebruik van de bestanden voor visualisaties.
- De bij de AGI bekende lokale afwijkingen van het bestand zijn zo concreet mogelijk beschreven in dit kwaliteitsdocument, alsmede de locatie waar de afwijkingen voor kunnen komen.

8.6 Akkoordverklaring projectleider

Goedgekeurd door: L.R.A. Richardson

Datum:

Paraaf: