

Kwaliteitsdocument laseraltimetrie
Deel 1: Technische beschrijving



Kwaliteitsdocument laseraltimetrie

Deel 1: Technische beschrijving

Data en ICT Dienst

Augustus 2010

Rijkswaterstaat – DID
Afdeling DSPW

Inhoudsopgave

1	Doelstelling kwaliteitsdocument	4
	De techniek laseraltimetrie	5
2	Laseraltimetrie.....	6
2.1	Wat is er mogelijk met laseraltimetrie	6
2.2	Rol van de DID 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
	Controle bij de DID	18
4	Controle bij de DID: Hoofdtak 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 hoofdtak 1.....	22
4.4.2	Controle op ontbrekende data.....	26
4.4.3	Controle van de strookaansluiting en –overlap	27
4.4.4	Controle op extremen	27
4.4.5	Controle van planimetrie	28
4.5	Foutsoortencontrole	29
4.5.1	Beschrijving van de verschillende foutsoorten	30
4.5.2	Berekenen van de foutsoorten	31
4.5.3	Gebruik van de foutsoorten in toepassingen	32
4.5.4	Projectspecifieke eisen op de foutsoortencontrole.....	33
4.6	Vastleggen van de controleresultaten.....	34
5	Controle bij de DID: Hoofdtak 2	36
5.1	Controlebestanden voor hoofdtak 2	36
5.2	Controle op ontbrekende data als gevolg van bewerkingen in hoofdtak 2 ..	40
5.3	Filtering: Controle op uitschieters.....	41
5.4	Filtering: controle op filtering van vegetatie.....	41
5.5	Filtering: controle op filtering van bebouwing	42
5.6	Filtering: controle op filtering van overige objecten	42
5.7	Filtering: controle op filtering van oppervlaktewater.....	42
5.8	Vastleggen van de controleresultaten.....	43
6	Overige controles	44
7	Overzicht referentiemateriaal	45
7.1	Referentievelden	45
7.2	Naslagwerken	45

1 Doelstelling kwaliteitsdocument

Laseraltimetrie is een reeds beproefde 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.

Sinds begin 2003 werkt de Data- ICT Dienst (DID) met een longlist van voorgeselecteerde leveranciers. Uitgangspunt voor deze longlist is dat de DID leveranciers in kan zetten die tijdens de voorselectie (of prekwalificatie) hebben bewezen dat zij de beloofde kwaliteit kunnen garanderen. Daarnaast herziet de DID de interne werkprocessen om zijn functie als opdrachtgever en kwaliteitscontroleur beter te kunnen uitoefenen. De data die aan de DID 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 DID. 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 DID 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 DID 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 DID en de resultaten hiervan uitvoerig beschreven. De DID 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 en de controle bij de DID (algemeen);

Deel 2: Controleresultaten van het project.

Dit rapport (Deel 1) omvat de algemene, technische beschrijving van de totstandkoming van het product. Deel 2 is projectafhankelijk en beschrijft de controleresultaten van het project en de uiteindelijke kwaliteitsbeschrijving van de uit het project voortgekomen data.

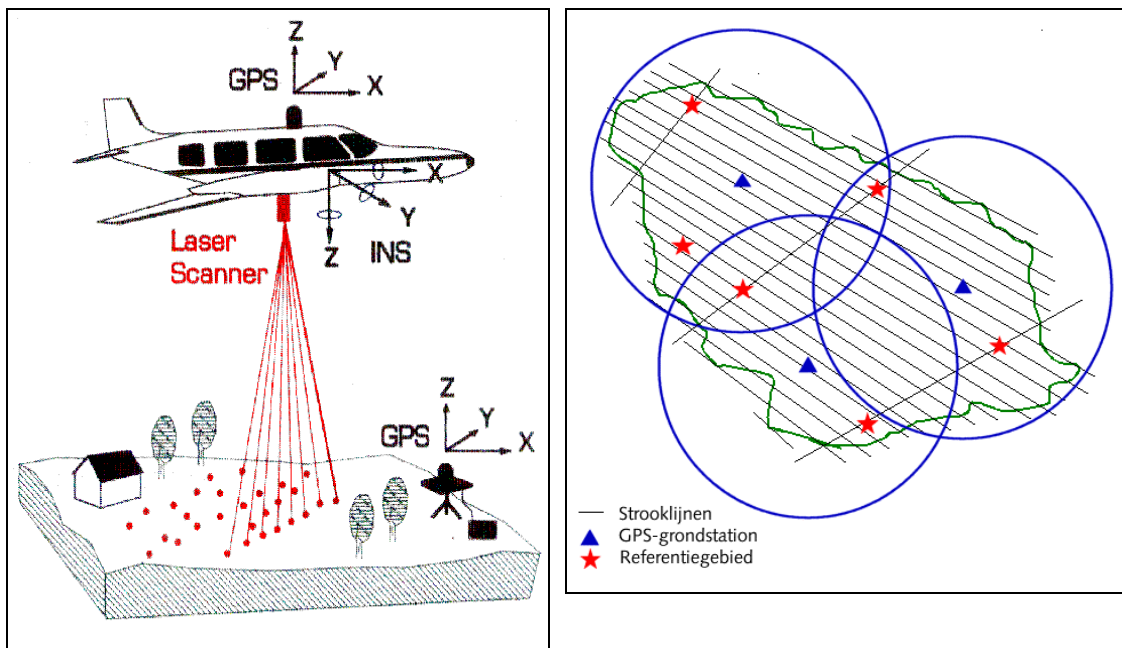
De techniek laseraltimetrie

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 DID bij laseraltimetrie

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

Naast de standaard productspecificaties kunnen ook specifieke projectspecificaties worden opgesteld.

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 zonedig een nadere eis gesteld aan de punt dichtheid. De minimumeis die aan de punt dichtheid wordt gesteld is 1 punt per 9 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.

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 waterstandsafhankelijke gebieden

Daar waterstandsafhankelijke gebieden afwijken 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 getijdekaracteristieken

Opnamevluchten van waterstandsafhankelijke gebieden dienen bij laag water te worden uitgevoerd. De opdrachtgever stelt vliegtabellen beschikbaar, afkomstig van RWS – Waterdienst of van een specifieke klant. Voor de kust 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 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 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 DID, 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

Oppervlaktewater 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 DID worden uitgevoerd. De werkzaamheden worden verdeeld in twee hoofdtaken, te weten:

1 Hoofdtak gegevensinwinning en geometrische verwerking

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

2 Hoofdtak filterverwerking

Het eindproduct van dit hoofdtak is een gefilterd hoogtebestand.

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

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 hoofdtak gegevensinwinning en geometrische verwerking en de bewerkingen van paragraaf 3.3 bij het hoofdtak 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 DID. Het vliegplan moet garanderen dat de configuratie van vliegstroken, dwarsstroken en referentievelden optimaal is. Na goedkeuring van het vliegplan door de DID kan er gevlogen worden.

Inwinning

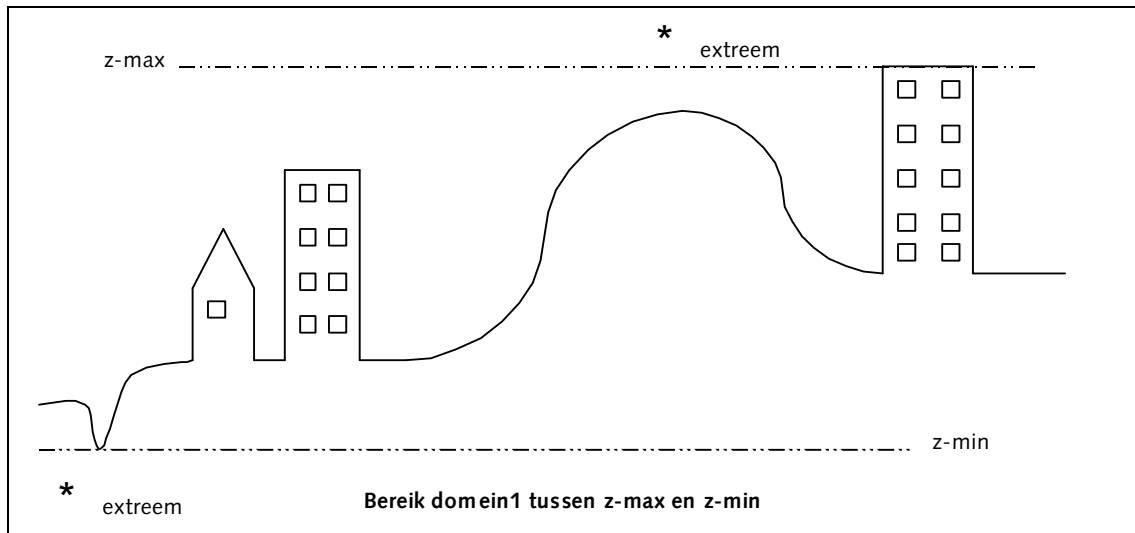
Voordat de opnamevluchten van start kunnen gaan wordt het GPS, INS en lasersysteem gecalibreerd. Dit gebeurt zowel op de grond als in een laboratorium. Tijdens het vliegen worden de GPS, INS en afstandsmetingen geregistreerd. De GPS grondstations doen tijdens de vlucht ook metingen op de grond. Tevens 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 geöïde nodig.

Verwijderen van extremen

Als gevolg van de gestelde specificaties voor hoofdtak 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.



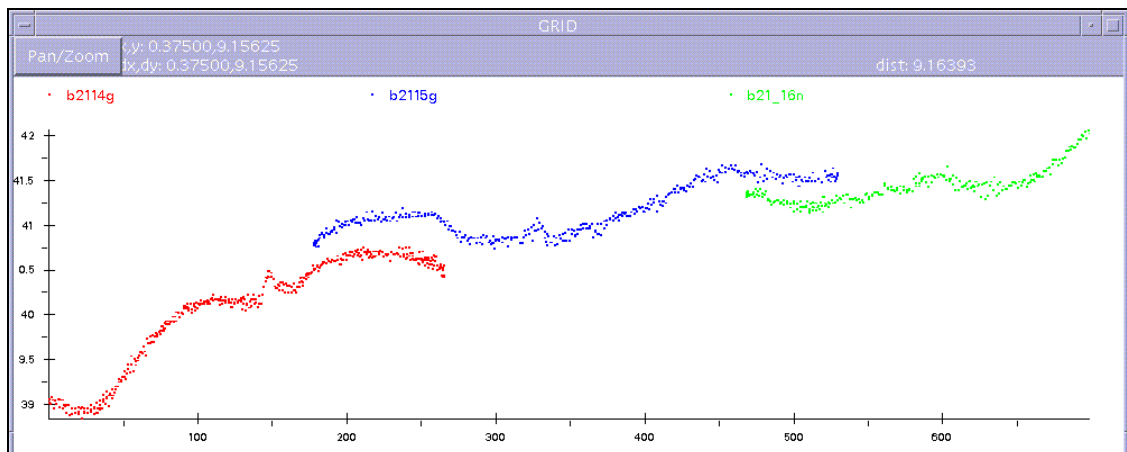
Figuur 3.1: Schematische voorstelling van een extreem hoog en een extreem laag punt.

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 doorhanging. Een combinatie van deze offsets, kantelingen en doorhangingen kan zeer complex worden.

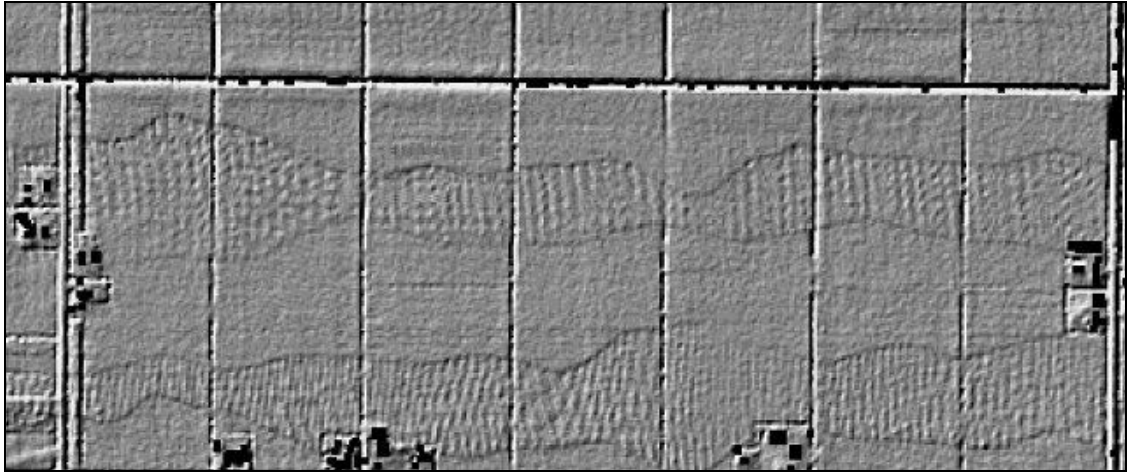
Doordat de verschillende stroken overlappen, kunnen de hoogtewaarden van beide stroken worden vergeleken in deze overlap. Het hoogteverschil kan oplopen tot enkele tientallen centimeters. De offsets en kantelingen manifesteren zich in een hoogteverschillenplot als abrupte hoogteverschillen tussen de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

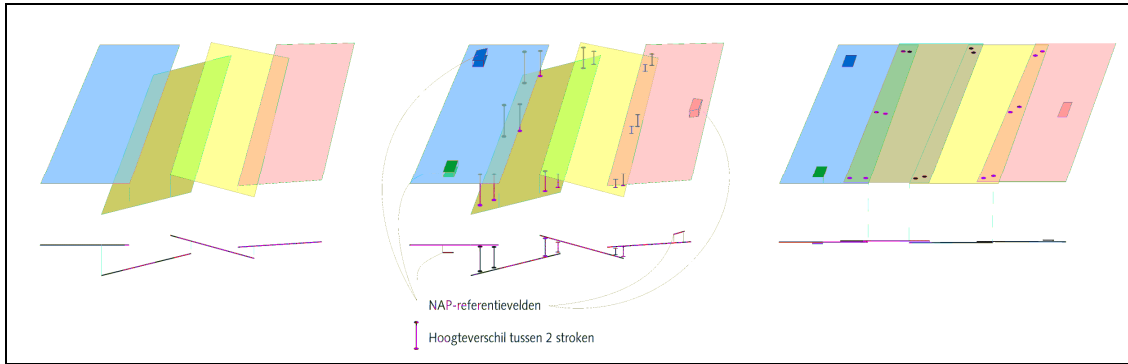
De oorzaak van deze hoogteverschillen kunnen fouten in GPS en INS (de plaatsbepalings- en standbepalingsinstrumenten) zijn. Initialisatiefouten en/of multipadeffecten (ontvangst van indirecte, weerkaatste pulsen) in de GPS metingen kunnen een offset geven in de uiteindelijke GPS berekening. Daarnaast 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.

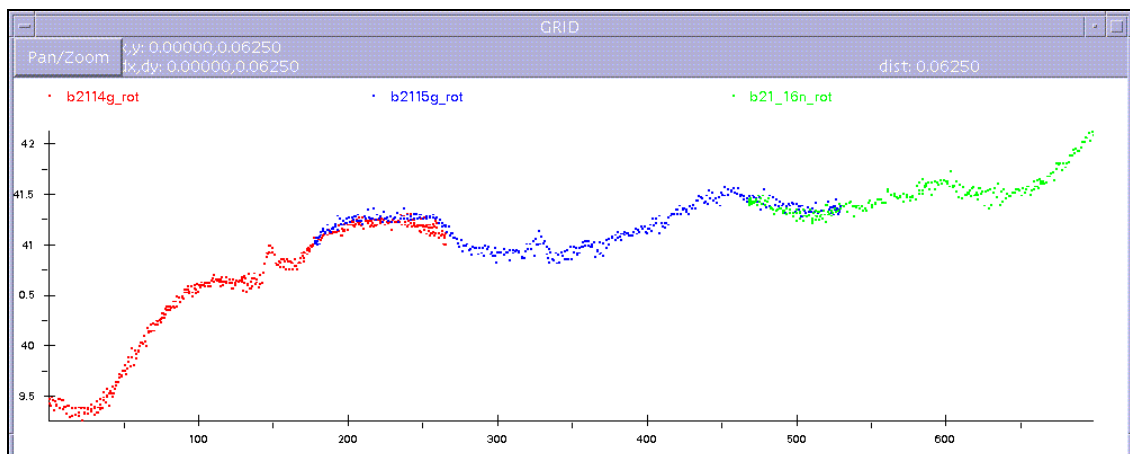
De grootte van de controlegebiedjes is afhankelijk van de punt dichtheid, maar bevat altijd ongeveer 500 losse laserhoogtepunten. De meetruis van deze laserhoogtepunten is grotendeels ongecorrigeerd, zodat bij middeling van de hoogtes de meetruis wordt uitgemiddeld. De precisie van het gemiddelde hoogteverschil 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 hoogtekwaliteit verkregen.

Doordat de leverancier meestal al vereffent komen zeer grote ribbels of andere grote hoogteverschillen tijdens de controle bij de DID 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 langstroken 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 strokendenken 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

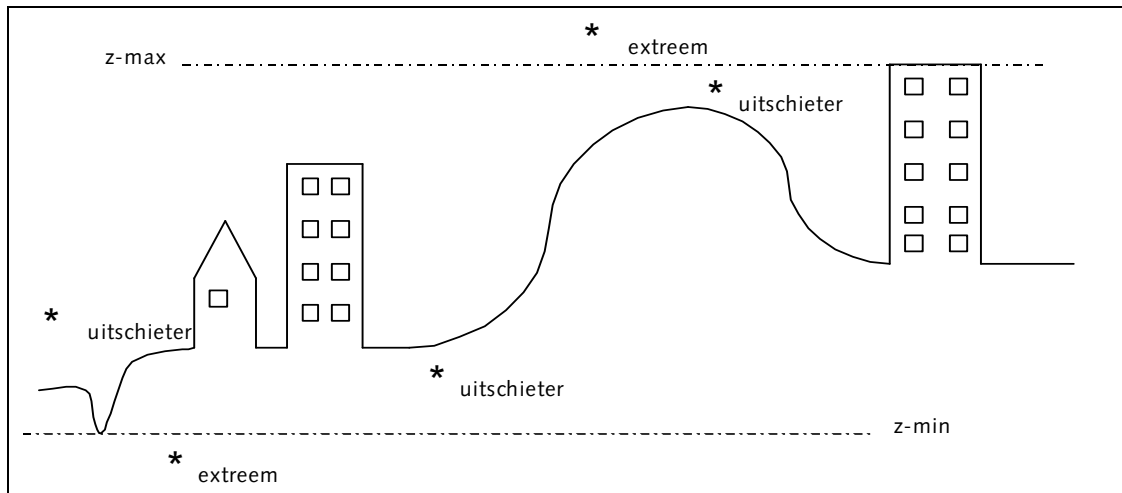
De filterverwerking wordt door de leverancier in het hoofdtak filterverwerking uitgevoerd. De laser zal bij het aftasten van het aardoppervlak op alle landschapsobjecten, zoals vegetatie en bebouwing, terugkaatsen en ook de hoogte van die vegetatie of gebouwen weergeven. Voor veel toepassingen is men 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 signaalvorm 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 signaaltypen, maar kan geen onderscheid maken in ongewenste objecten die daadwerkelijk gefilterd moeten worden en objecten die dezelfde signaaltypen 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 laseraltimetrievlucht 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 DID).

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 hoofdtak 1 als bij hoofdtak 2 aangeleverd als losse punten per vluchtstrook. Deze laserhoogtepunten worden door de DID 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 quadtrees, 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. Voor kustgebieden worden de volgende hoogteproducten geleverd:

- 5x5 meter DHM
- 20x20 meter DHM

Naast deze standaardproducten kunnen er, afhankelijk van de specificaties, ook andere producten worden geleverd. De interpolatiemethoden zullen hier niet worden behandeld.

Controle bij de DID

4 Controle bij de DID: Hoofdtak 1

De kwaliteitscontrole van de DID hangt nauw samen met de specificaties zoals die in paragraaf 2.3 zijn opgesteld. Het eindproduct van het hoofdtak gegevensinwinning en verwerking is een ongefilterd hoogtbestand, vrij van extremen, dat geometrisch is verwerkt en dat in de oorspronkelijke punt dichtheid (niet geresampled) wordt geleverd. De controles van hoofdtak 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 DID is om onafhankelijk te controleren of de bestanden voldoen aan de vereiste kwaliteit.

Bij de hoofdtak 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 DID 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 laserhoogtbestand 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

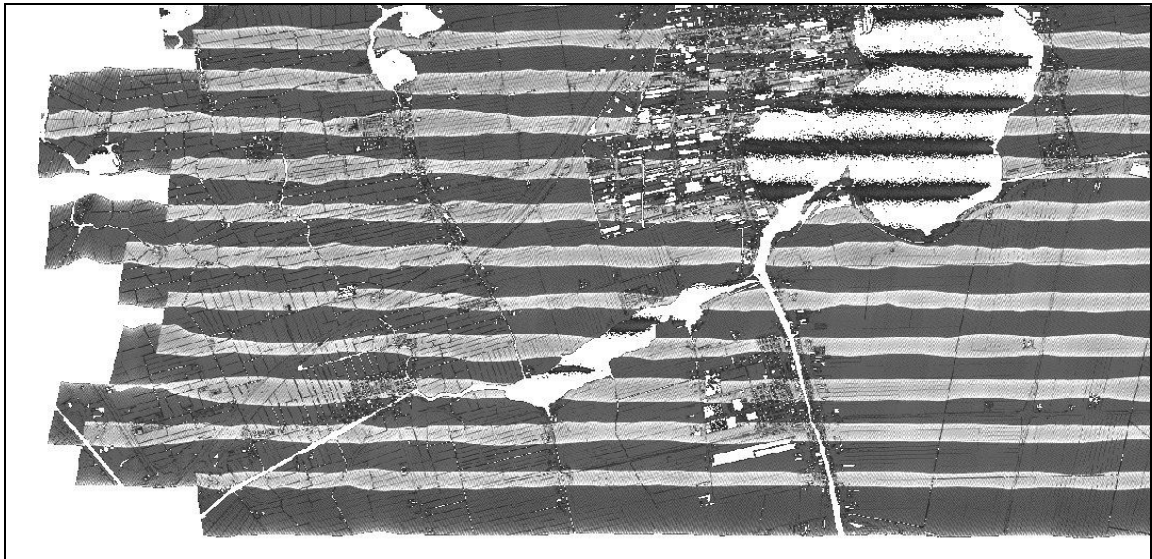
De frequentie van de metingen zegt iets over de werking van de scanner en geeft inzicht in de homogeniteit van de ingemeten laserhoogtepunten. Daartoe wordt van de losse laserpunten een frequentiegrid gemaakt: iedere gridcel krijgt een waarde die gelijk is aan het aantal laserpunten dat binnen de gestelde footprint valt. Bij een punt dichtheid van 1 punt per 6 m^2 worden de volgende instellingen gebruikt:

gridgrootte = 6×6 meter;

footprint = 6 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

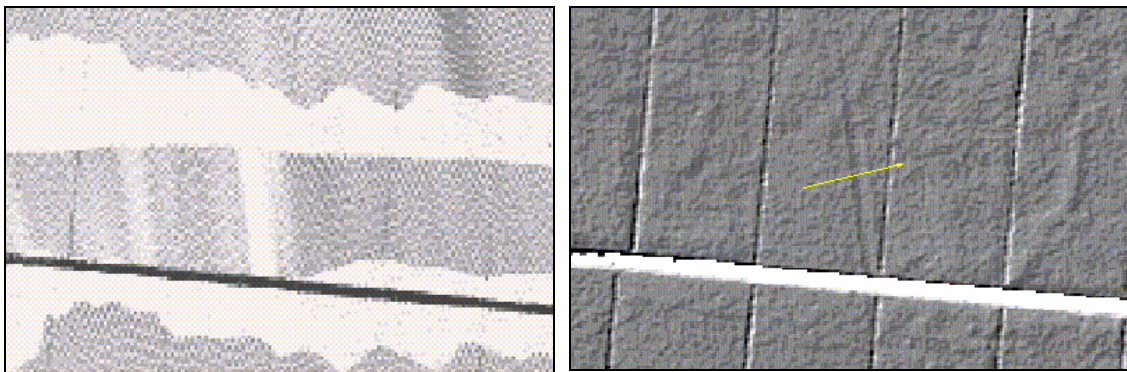
Hoogteverschillen tussen stroken hebben naast ribbels soms ook een ander gevolg: bij een bepaalde combinatie van punt dichtheid, afstand tussen de scanlijnen en gridgrootte ontstaan zogenaamde wasborden. De hoogtewaarde van de cellen van het DHM worden niet meer bepaald door een mix van punten van beide 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 zo'n grote afwijking 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 9 m², welke wordt berekend uit het ruwe databestand (gefilterde- + uitgefilterde data). Voor een juiste punt dichtheid wordt het water niet meegenomen in de berekening. 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 bewerkingsnelheid 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 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 hoofdtak 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 (hoofdtak 2) ook een gefilterd DHM gemaakt kan worden. Zie hiervoor paragraaf 5.1. In het ruwe DHM voor de controle van hoofdtak 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 azimut (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 azimut min of meer haaks op de strookrichting staat en één waarbij het azimut 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 strookrichting.

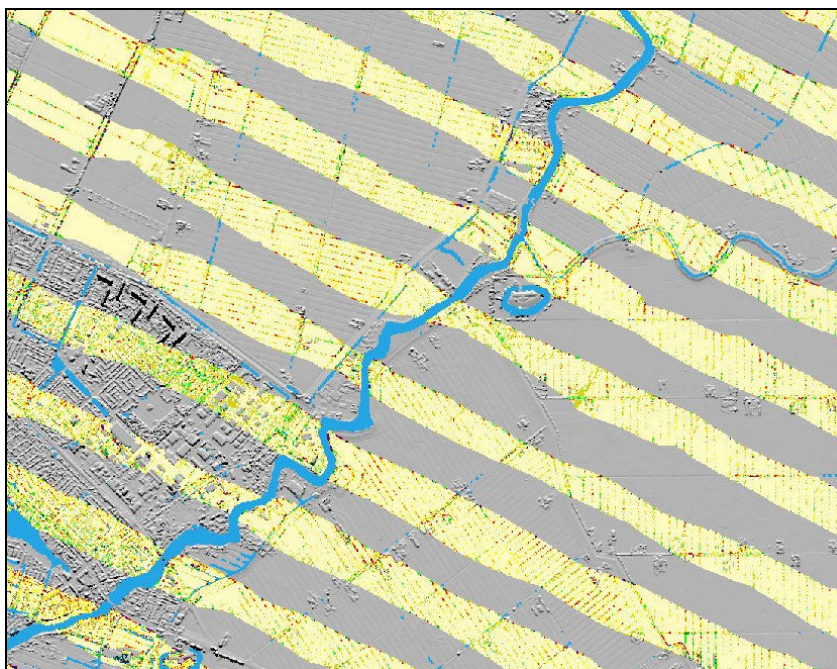


Figuur 4.5b: Voorbeeld van een ruwe hillshade met het azimut parallel aan de strookrichting.

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

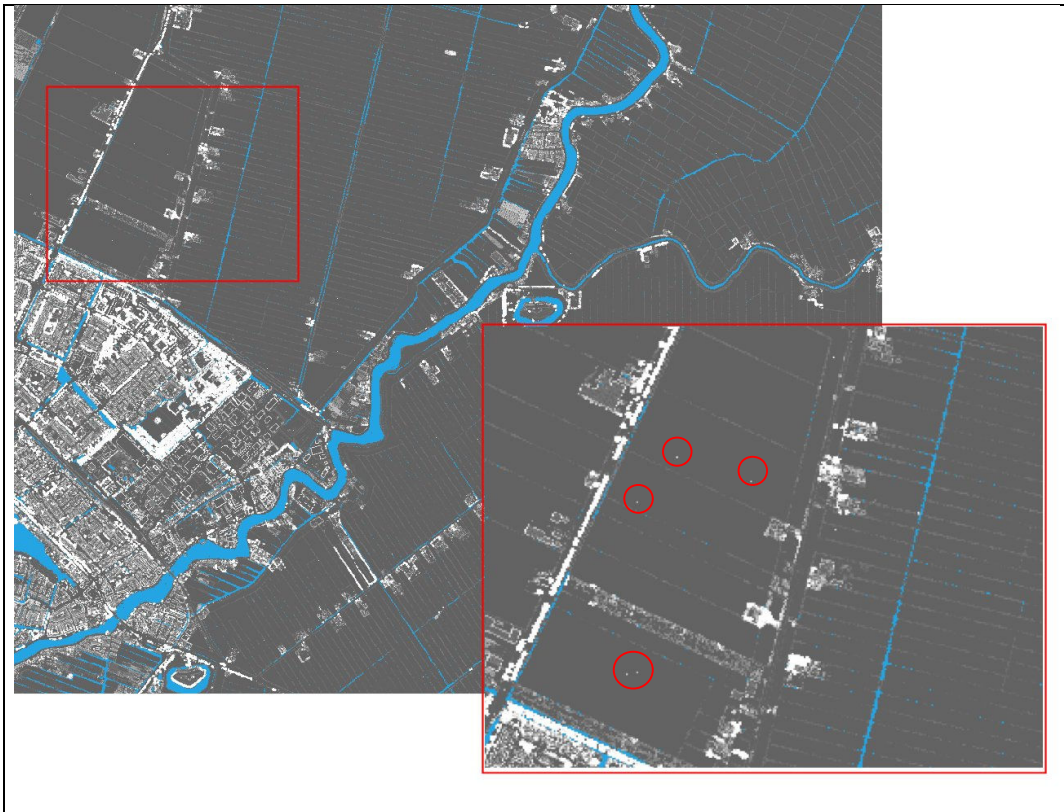
stroken. Daarnaast kunnen onregelmatigheden in de hoogteverschillen snel opgespoord worden.



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 hoofdtak 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

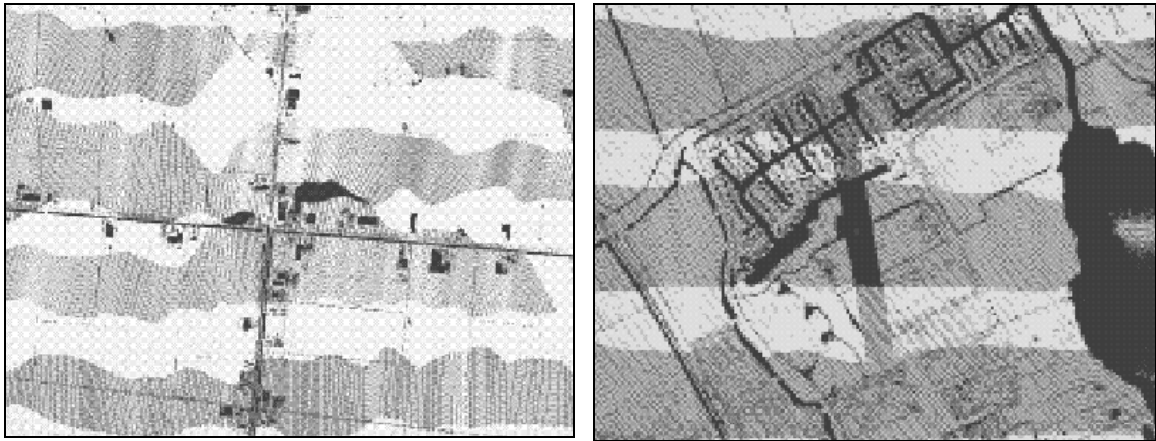
Soms worden bij een levering niet alle stroken geleverd, of er ontbreken delen van stroken. De ontbrekende delen zijn echter wel te leveren.

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 hoofdtak 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 x 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 hoofdtak 1 controle wordt gecontroleerd op extremen, de uitschieters vallen onder de hoofdtak 2 controle. Het hoogtebestand dat geleverd is voor hoofdtak 1 mag geen enkele extreme waarde bevatten.

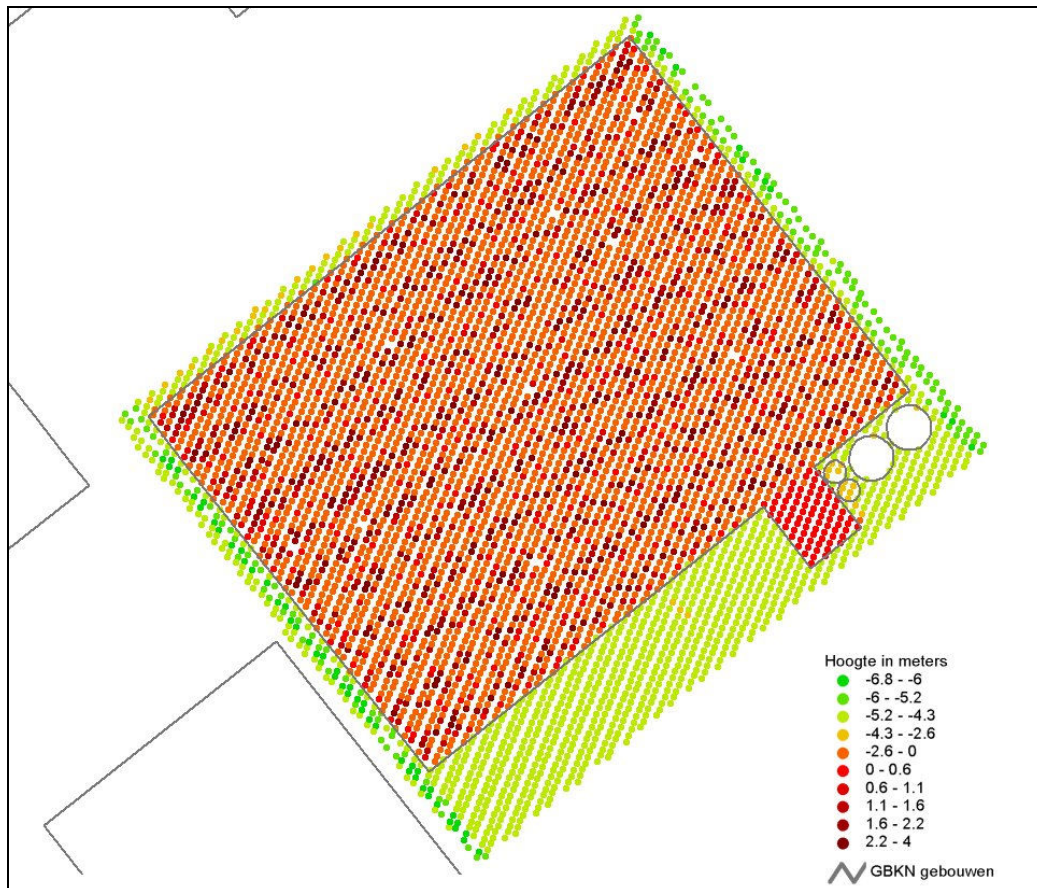
In feite wordt bij het inlezen van de laserhoogtepunten al gecontroleerd op het al of niet aanwezig zijn van extremen door een minimum en maximum z-waarde te gebruiken. Deze waarde wordt bepaald aan de hand van bekende hoogtewaarden van de normale topografie. Met behulp van de atlas of een bestaand DHM 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 dan 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 hoofdtak 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.

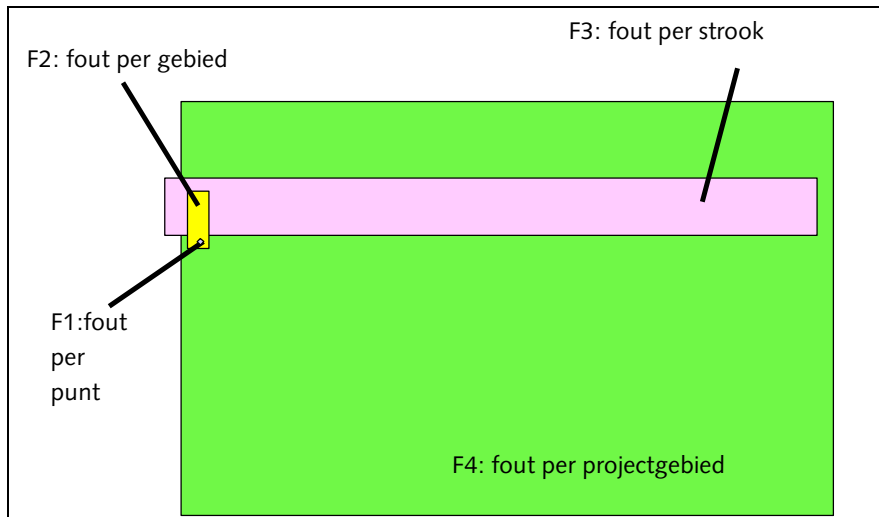
4.5 Foutsoortencontrole

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]	< 8 cm	maximum [F1]	geen
F2	gemiddelde [F2]	< 9 cm ²	maximum [F2]	< 16 cm ²
F3a	gemiddelde [F3a]	< 9 cm ²	maximum [F3a]	< 16 cm ²
F3b *	gemiddelde [F3b]	geen	maximum [F3b] *	geen
F4a	gemiddelde [F4a]	< 4 cm	maximum [F4a]	< 8 cm
F4b	gemiddelde [F4b]	< 4 cm	maximum [F4b]	< 12 cm

Tabel 4.1: De eisen die de DID 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 puntruï 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

¹ Doordat kustprojecten bijzondere projectgebieden zijn, worden de foutsoorten voor dit soort projecten op een andere manier bepaald. Zie paragraaf 4.5.4 voor de geldende eisen in kustprojecten.

laserpunten die gedurende deze waarneming worden gemeten. In de praktijk betekent dit dat een gebied van 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 vereffeningmethode. 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 langsstroken, 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.

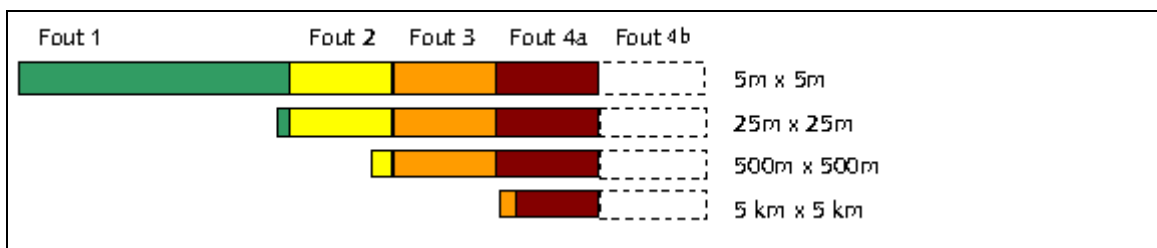
Als de resultaten van de foutsoortencontrole ruim voldoen aan de eisen, is het niet nodig de resultaten verder te analyseren of te visualiseren. In een aantal gevallen voldoet het laserhoogtebestand *nét* aan de eisen, of helemaal niet. In deze gevallen wordt verder onderzocht wat de mogelijke oorzaken 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 Projects specifieke eisen op de foutsoortencontrole

Bij de foutsoortenberekening wordt uitgegaan van een standaard projectgebied. Het waddengebied is echter een bijzonder projectgebied: het wordt gekenmerkt door een vorm waarbij het op te nemen gebied slecht toegankelijk is. Omdat de overlap tussen de stroken in de waddensee valt is het niet mogelijk controlevelden (zie paragraaf 4.5.2) te meten.

Om toch een uitspraak te kunnen doen over de foutsoorten in zo'n bijzonder projectgebied, zijn er door de DID 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 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 DID, 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.

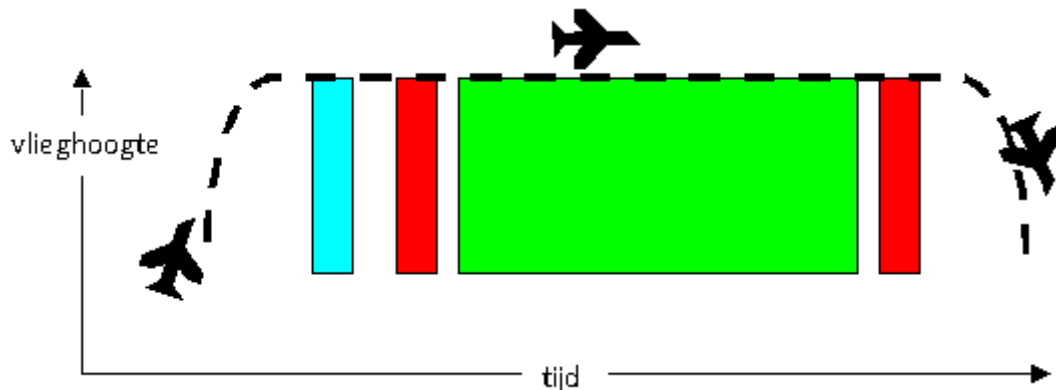
Deze referentiestrook kan bijvoorbeeld liggen tussen het vliegveld en het projectgebied. Indien er door weersomstandigheden regelmatig slechts korte vliegperiodes ontstaan kan in overleg met de DID worden afgeweken van het elke dag vliegen van deze referentiestroken. Op deze manier kan de DID controleren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

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 DID stelt aan de hoogteprecisie van het laserhoogtebestand van kustgebieden.

* 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) de kustgebieden, 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 vantevoren 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 de kustprojecten opgenomen.

4.6 Vastleggen van de controleresultaten

De controleresultaten van hoofdtak 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 die in deel 2 van het kwaliteitsdocument worden beschreven.

5 Controle bij de DID: Hoofdtak 2

De verwerking van hoofdtak 2 behelst het filteren van het in hoofdtak 1 goedgekeurde hoogtebestand. Het eindproduct van dit hoofdtak is een gefilterd hoogtebestand. De controle van dit hoofdtak 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 ongefïlterd blijven. Voor alle gebieden geldt dat er consequent gefïlterd moet zijn: kleinere dorpen/steden volledig uïlfilteren, grotere steden volledig ongefïlterd. 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 hoofdtak 2 controle wordt op de volgende punten gecontroleerd:

1. Controle op ontbrekende data als gevolg van bewerkingen in hoofdtak 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 ook gecontroleerd worden op correcte filtering van het oppervlaktewater (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 DID 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 hoofdtak 1.

5.1 Controlebestanden voor hoofdtak 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 gefïlterd 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 ongefïlterd 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 hoofdtak 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 hoofdtak 2. Dit is echter niet hetzelfde bestand als het ruwe DHM uit hoofdtak 1. Het verschil zijn de uitschieters: deze worden (als het goed is) in de verwerking van hoofdtak 2 verwijderd en mogen niet in het gefilterde noch in het uitgefilterde bestand voorkomen. Het ruwe DHM van hoofdtak 1 is bestaat dus uit de gefilterde data plus de uitgefilterde data plus de (niet geleverde) uitschieters.

Om het ruwe DHM voor hoofdtak 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 hoofdtak 1 controle.



Figuur 5.2a: Voorbeeld van een gefilterde hillshade met het azimut haaks op de strookrichting.



Figuur 5.2b: Voorbeeld van een gefilterde hillshade met het azimut parallel aan de strookrichting.

Ruwe hillshade

Uit het ruwe DHM van hoofdtak 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 azimut min of meer haaks op de strookrichting 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 hoofdtak 1 is gemaakt. De reden hiervoor is dat uitschieters helemaal niet in het bestand mogen voorkomen (dus ook

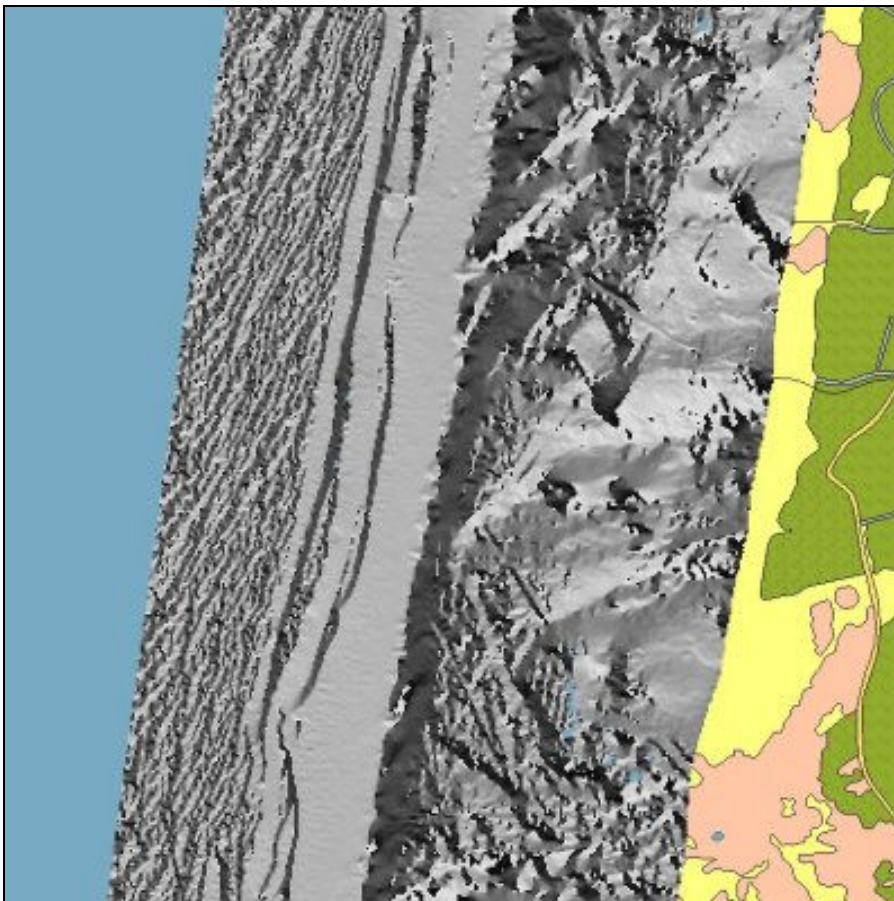
niet in het uitgefilterde bestand). Wel wordt er voor deze uitschieters als acceptatiegrens 1 uitschieter per 1000 hectare gehanteerd (zie ook paragraaf 2.3).

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 oppervlaktewater 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, bijvoorbeeld 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 uitgefilterd). Overigens is in figuur 5.3b ook goed te zien dat muien 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 hoofdtak 2

Bij de hoofdtak 1 controle is er al gecontroleerd op ontbrekende data. Het gaat bij hoofdtak 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 hoofdtak 2 controle ook gecontroleerd op ontbrekende data, maar alleen die ontbrekende data die het gevolg is van de bewerkingen in hoofdtak 2. Als de ontbrekende data al in hoofdtak 1 aangegeven is, betreft het een fout die niet in hoofdtak 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 hoofdtak 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 hoofdtak 2 controle is nagenoeg hetzelfde als de methode voor de hoofdtak 1 controle. Bij de controle van ontbrekende data in hoofdtak 2 wordt de shapefile met reeds in hoofdtak 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 hoofdtak 1 controle kunnen de gebieden waar in de hoofdtak 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

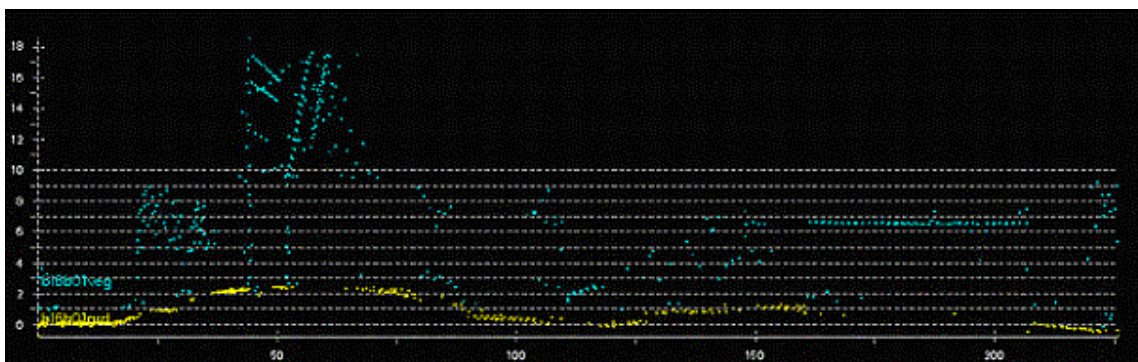
Door diverse oorzaken bevinden zich regelmatig punten in de data (ongefilterde data) met een foutieve, vaak erg hoge of lage waarde. Deze punten hebben een negatieve invloed op het DHM. Er kan onderscheid gemaakt worden in extremen en uitschieters. Extremen zijn punten ver boven of onder de voor het projectgebied bekende topografiehoogten en worden in de hoofdtak 1 controle opgespoord. In de hoofdtak 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 hoofdtak 2 geleverd wordt, kunnen dan nog wel uitschieters voorkomen, die in hoofdtak 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.

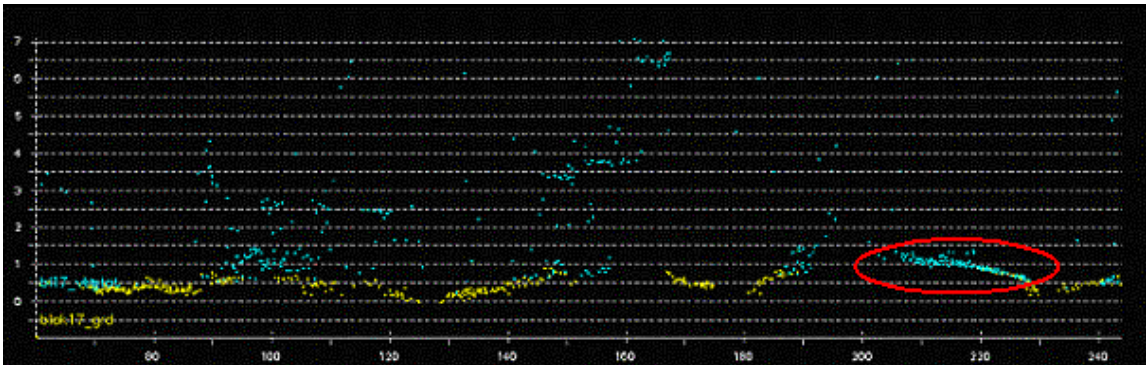
Bij de controle van uitschieters moet opnieuw goed het onderscheid worden gemaakt tussen uitschieters en extremen. In eerste instantie worden alle gevonden uitschieters aangegeven. Daarna wordt bekeken of het aantal gevonden uitschieters onder de acceptatiegrens van 1 uitschieter per 1000 hectare blijft. 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 (quadrees) 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 (maaiveld) 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 oppervlaktewater

Aanvullend op de standardeisen dient in de bestanden van het projectgebied xxxx het oppervlaktewater 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 hoofdtak 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 die in deel 2 van het kwaliteitsdocument worden beschreven.

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 DID 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 DID 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. Aan de hand van de vluchtrapportage kan worden gecontroleerd of de vluchten zijn uitgevoerd binnen de waterstandseisen vastgesteld door de Waterdienst of specifieke klanteisen.

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 kwaliteits-controlerapportage wordt in geval van hoofdtak 1 aangeduid met *hoogteverslag* en in geval van hoofdtak 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 DID.

Voor de verschillende rapportages zijn controle- en leveringstermijnen vastgesteld, waaraan zowel de leverancier als de DID 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 (indien niet beschikbaar ook parkeerterreinen)
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. 2005, 2006, 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 2007
leverancier Topografische Dienst Kadaster (voorheen Topografische Dienst Nederland)

De digitale TOP10vectorbestanden zijn afkomstig van de Topografische Dienst Kadaster. Deze worden door de DID 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 1970-2007
leverancier Landelijk Samenwerkingsverband GBKN

De Groot-schalige 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 2007
leverancier DID

De DID 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 waterbegrenzingsen;
- 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 2007
leverancier Aerodata International Surveys

Orthofotomozaïk bedekking van Nederland met resolutie 0.5m op basis van digitale luchtfotografie in true color uitgevoerd in 2007.