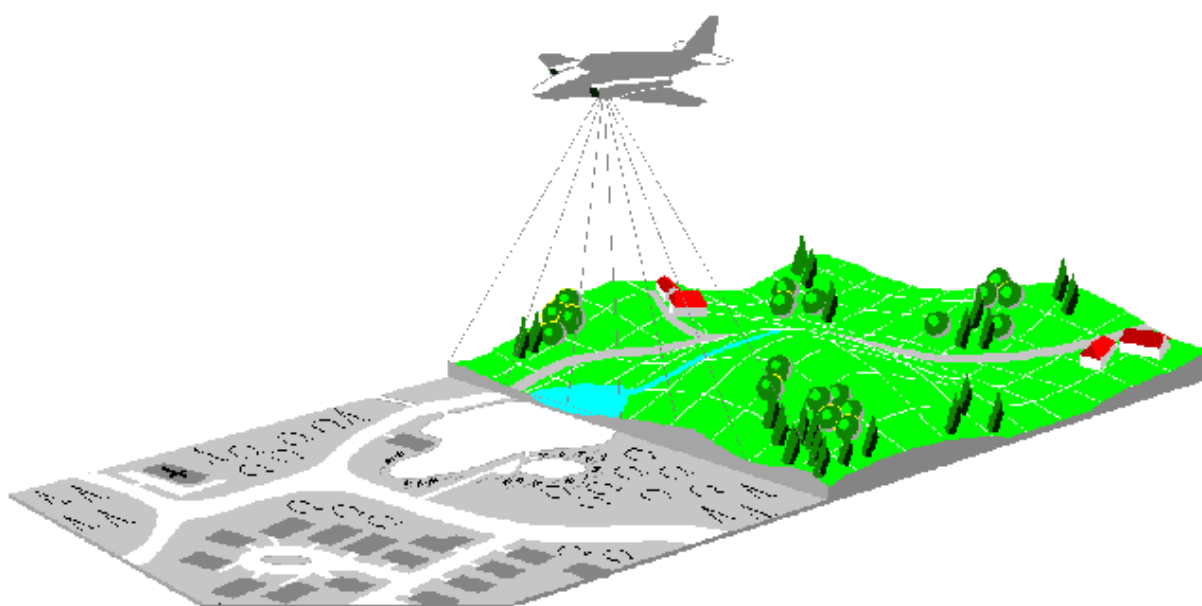


Kwaliteitsdocument Laseraltimetrie

Westerschelde en Oosterschelde



**Meetkundige Dienst van de Rijkswaterstaat
Delft**

Maart 2003

W.R. ter Borg

Inhoudsopgave

1.	Doelstelling kwaliteitsdocument	3
2.	Laseraltimetrie	4
2.1.	Wat kan met laseraltimetrie?	4
2.2.	Rol MD bij laseraltimetrie	5
3.	Van ruwe lasermetingen naar digitaal hoogtemodel	6
3.1.	Verwerking ruwe lasermetingen	6
3.2.	Filteren	6
3.3.	Beperkingen van filteren	7
3.4.	Interpolatie naar een DHM	7
3.5.	Controle van de data	9
3.6.	Validatie met behulp van referentiemetingen	9
3.7.	Controle van de punt dichtheid	10
3.8.	Visuele controle	10
3.8.1.	Vergelijking met de Grote Provincie Atlas	10
3.8.2.	Vergelijking met TOP10Vector bestanden	11
3.8.3.	Vergelijking met DTB bestanden	11
3.8.4.	Vergelijking met overige bestanden	11
3.9.	Strookvereffening	11
3.9.1.	Ribbels	11
3.9.2.	Strookvereffening	12
3.9.3.	Resultaten	12
3.9.4.	Kwaliteitsanalyse	13
3.9.5.	Nadelen	13
3.9.6.	Vervolg	13
4.	Uitvoering externe deel	14
4.1.	Opdrachtomschrijving	14
4.1.1.	Opdrachtgebied	14
4.1.2.	Vliegplan	15
4.1.3.	Vliegen/inwinning	15
4.1.4.	XYZ-ligging	16
4.1.5.	Levering door aannemer	16
5.	Controle MD	17
5.1.	Statistische vergelijking met referentiedata	17
5.2.	Punt dichtheid	18
5.3.	XY-ligging	18
6.	Verwerking	19
6.1.	Combinatie laser-lodingen	19
7.	Overzicht geleverde data	21
7.1.	Overzicht geleverde data	21
7.2.	Kaartbladen	21
8.	Overzicht gebruikt referentiemateriaal	22

1. Doelstelling kwaliteitsdocument

Informatie omtrent de maaiveldhoogte is onontbeerlijk voor het beheer van ondermeer kust, rivieren, wadden, dijken en polders en de behoefte aan actuele maaiveldhoogte-informatie is dan ook groot. Laseraltimetrie is een nieuwe techniek op het gebied van hoogte-inwinning, waarmee tegen relatief lage kosten en snelle levertijd gegevens omtrent de maaiveldhoogte worden ingewonnen en tevens een dichte bedekking van het oppervlak wordt gegarandeert.

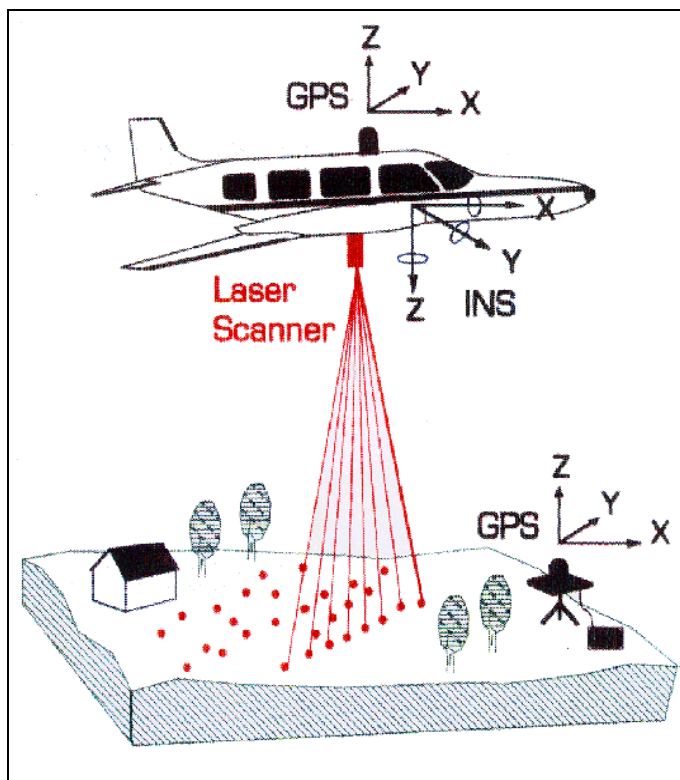
Uit testvluchten is geconcludeerd dat met laseraltimetrie een hoge nauwkeurigheid bereikt kan worden. Bij meer routinematige vluchten blijkt echter dat na vergelijking van de laseraltimetriemetingen met referentiemetingen de nauwkeurigheid soms lager uitvalt dan onder optimale omstandigheden mogelijk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

De data die aan de Meetkundige Dienst wordt geleverd is door de leverancier gecorrigeerd voor fouten die ontstaan zijn tijdens de vlucht en tijdens de bewerking van de gegevens. De Meetkundige Dienst voert hierop een aantal controles uit om na te gaan of eventuele aanwezige afwijkingen in de data binnen de vooraf gestelde grenzen liggen. In dit document worden de methoden die tijdens de controle worden toegepast toegelicht.

De Meetkundige Dienst kan van de data die op deze manier is gecontroleerd de garantie bieden dat de data voldoet aan de gestelde kwaliteitseisen.

2. Laseraltimetrie

Laseraltimetrie is een remote sensing techniek voor hoogtebepaling van het landschap vanuit een vliegtuig of helikopter. Aan boord van het toestel worden drie verschillende metingen verricht, namelijk plaatsbepaling (m.b.v. Global Positioning System), standsbepaling (m.b.v. Inertial Navigation System) en afstandsmeting tot het aardoppervlak met behulp van een laserscanner. Door meting van het tijdsverschil tussen uitgezonden en ontvangen laserpuls kan, wanneer stand en positie van het toestel nauwkeurig bekend zijn, de terreinhoogte worden berekend. Het principe van een dergelijk laseraltimetriesysteem is weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1: Het principe van laseraltimetrie.

2.1. Wat kan met laseraltimetrie?

De sterke kant van deze nieuwe techniek is gelegen in de zeer hoge punt dichtheid (tot enkele punten per vierkante meter) in combinatie met een korte verwerkingstijd, waardoor snel en voor een relatief lage prijs per ha. hoogtepunten kunnen 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. Met proef- en operationele vluchten zijn tot nu toe standaardafwijkingen tussen de 7 en 35 centimeter gevonden ten opzichte van referentiewaarnemingen. De afwijkingen worden vooral veroorzaakt door dichte vegetatie. In de meeste gevallen wordt voldaan aan de door de Meetkundige Dienst (MD) gestelde eis van maximaal 5 centimeter gemiddelde fout en maximaal 15 centimeter standaardafwijking. In tabel 1 zijn de richtlijnen weergegeven die momenteel bij de MD gelden. Deze eisen zijn echter aan verandering onderhevig. Sommige eisen zijn niet altijd goed te controleren, zoals de nauwkeurigheid in bosgebieden.

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 vinden waarnemingen niet-selectief plaats; behalve het bodemoppervlak wordt ook de hoogte van vegetatie en bebouwing gemeten. Omdat veel toepassingen gebruik maken van maaiveldhoogten moeten ongewenste waarnemingen worden verwijderd door filtering of vergelijking met topografische bestanden. Het meten van waterstanden en onderwatertopografie is met de huidige laseraltimetriesystemen nog niet mogelijk.

Terrein type	RMS fout	Systematische fout	Punt dichtheid
-Strand, duin en intergetijde gebied	0,15m	+/-0.05m	1 per 1m ²
-Grasvelden, kort gras	0.15m	+0.05m	1 per 16m ²
-Helm vegetatie, natuurlijk grasland	0.20m	+0.20m	1 per 16m ²
-Kwelder met dichte vegetatie -Gebieden met dichte struikvegetatie (in blad) -Rietvegetatie -Landbouwgewassen	0.20m	hoogte van de vegetatie	1 per 16m ²
-Gebieden met dichte struikvegetatie (zonder blad)	0.20m	+0.20	1 per 16m ²
-Harde, vlakke topografie	0.15m	+0.05m	1 per 16m ²
-Bosgebieden	0.20m	+0.10m	1 per 36m ²
-Stedelijk gebied	n.v.t.	n.v.t.	1 per 16m ²

Tabel 1 Indicatieve eisen aan de nauwkeurigheid van de lasergegevens per terreintype.

2.2. Rol MD bij laseraltimetrie

De MD is sinds 1989 betrokken bij het onderzoek naar de mogelijkheid om met laseraltimetrie hoogtegegevens in te winnen. De afgelopen 3 jaar zijn diverse onderzoeksprojecten gerealiseerd om de toepassingsmogelijkheden te verbreden en de kwaliteitscontroles te optimaliseren. De kwaliteitscontrole heeft met name betrekking op punt dichtheid en nauwkeurigheid van de metingen. De nauwkeurigheid wordt berekend door vergelijking van de lasermetingen met referentievlak-metingen, verkregen door middel van tachymetrie of GPS. Tevens vindt een vergelijking plaats tussen laserdata en al aanwezige andere (hoogte)bestanden voor controle op de resultaten van het filteren en op de juistheid van de vorm. Deze bestanden zijn bijvoorbeeld DTB-rivieren/wegen en Top10Vector. Vergelijking met dit laatste bestand kan alleen dienen als controle van de volledigheid, de vergelijking met DTBs kan tevens dienen als controle op de geometrie.

Na goedkeuring van de laserdata worden de verschillende eindproducten gegenereerd. Behalve een hoogtepuntenkaart met de oorspronkelijke laserwaarnemingen, wordt een hoogteraster gemaakt. Hoogtelijnenkaarten zijn vervolgens eenvoudig te genereren. Mogelijke toekomstige eindproducten kunnen zijn: rasterbestanden gecombineerd met peilgebieden of topografische of thematische bestanden.

Naast deze eindproducten verleent de MD, 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 software-applicaties te ontwikkelen voor het uitvoeren van de taken van RWS-gebruikers op basis van de laserdata.

3. Van ruwe lasermetingen naar digitaal hoogtemodel

In de verwerking van de ruwe laserdata naar een digitaal hoogtemodel onderscheiden we stappen die bij de aannemer worden uitgevoerd en stappen die bij de MD worden uitgevoerd.

3.1. Verwerking ruwe lasermetingen

De inwinning van de laserdata en de ruwe dataverwerking gebeurt bij de aannemer. Voordat de opnamevluchten van start kunnen gaan wordt het INS, GPS en lasersysteem gecalibreerd. Dit gebeurt zowel op de grond als in een laboratorium. Tijdens het vliegen worden de GPS, INS en afstandsmetingen geregistreerd. Tevens worden er calibratiemetingen van de sensors uitgevoerd, welke niet op de grond uitgevoerd kunnen worden. Aangezien de GPS en INS sensors een lagere meetfrequentie hebben dan de laser metingen, moeten de posities die gemeten zijn met GPS en houdingen die gemeten zijn met INS geïnterpoleerd worden om voor iedere lasermeting deze informatie te hebben.

In de meeste gridcellen zullen meer punten gemeten worden dan gewenst zijn. Door deze overtolligheid kan er onderscheid gemaakt worden tussen punten op de grond en punten op vegetatie e.d., waarbij deze laatste punten niet verder meegenomen dienen te worden in de verwerking. De ruis in de data wordt er vervolgens uitgefilterd. Vervolgens worden de metingen van de verschillende systemen geïntegreerd. Deze integratie houdt in dat de GPS, INS en laser informatie en de calibratieparameters gecombineerd worden om ellipsoïdische coördinaten te krijgen. De laserdata die tot nu toe ten opzichte van de WGS84-ellipsoïde was, wordt 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 geoiden nodig.

Door het gebruik van GPS en INS in de laseraltimetrie wordt er een hoge nauwkeurigheid van de positie in x en y verkregen. Hierdoor zullen de verschillende stroken tot zo'n 15 cm nauwkeurig op elkaar passen. Door gebruik te maken van gebouwen e.d., kan er op een verschuiving in de planimetrie gecontroleerd worden. In de overlap van twee stroken kan door middel van hoogtelijnen of dwarsprofielen een hoogteafwijking bepaald worden. De hoogten van de laserdata worden vervolgens vergeleken met de hoogten van referentiegebieden die met GPS zijn ingemeten. Hiervoor worden vlakke gebieden gebruikt, zoals voetbalvelden of parkeerplaatsen. In het geval dat de verschillen te groot zijn worden de stroken gecorrigeerd.

3.2. Filteren

De filtering is eveneens een taak van de aannemer. Voor veel toepassingen wordt een terreinrepresentatie gevraagd waarbij specifieke typen objecten verwijderd zijn. De (infrarode) 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, terwijl men in principe alleen geïnteresseerd is in de maaiveldhoogte. De ongewenste objecten moeten dan apart verwijderd worden uit de dataset.

Het handmatig verwijderen van 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 opwaartse sprongen in het hoogtesignaal. Gebruikmakend van deze kennis zijn filters ontwikkeld die zulke sprongen optimaal detecteren en verwijderen.

Filtering van de ruwe laserdata levert een dataset op die direct bruikbaar is voor de beoogde doeleinden.

3.3. 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:

- de niet-discriminatoire eigenschappen van de filters
- de terreinruwheid

Filtermethoden die gekoppeld zijn aan herkenning van signaalvormen kunnen feilloos specifieke objecten wegfilteren. Een probleem ontstaat door de niet-discriminatoire eigenschap van zulke filters. Terreinobjecten die men wel in het bestand opgenomen wil hebben, maar waarvan de signaalvorm van de hoogte overeenkomt met de signaalvorm van de ongewenste objecten, zullen ook verwijderd worden. Wanneer een filter bijvoorbeeld geoptimaliseerd is om gebouwen te verwijderen, dan zullen ook toppen van sterk hellend terrein (bv. dijken) afgeknot worden. Door onderzoek te verrichten is getracht de filters zo goed mogelijk te maken.

Het raadplegen van additionele informatie zorgt voor een effectiever proces van filteren. Meerdere opties zijn hiervoor mogelijk:

- gebruik van eerder bepaalde DHM's van hetzelfde gebied. Deze DHM's kunnen met een andere meetmethode zijn bepaald en/of een andere punt dichtheid hebben;
- gebruik van beeldmateriaal dat gelijktijdig met de laseraltimetrie vlucht wordt opgenomen, zoals een video;
- gebruik van het TOP10Vector-bestand voor het herkennen van bebouwing (zie ook 3.7.2 voor gebruik van TOP10Vectoren-bestanden bij controle door de MD);

Een toekomstige optie kan zijn:

- computerondersteunde classificatie van multispectrale remote-sensing beelden. Hiermee kan onderscheid gevonden worden tussen bijvoorbeeld water, vegetatie, braakliggend en bebouwd gebied.

3.4. Interpolatie naar een DHM

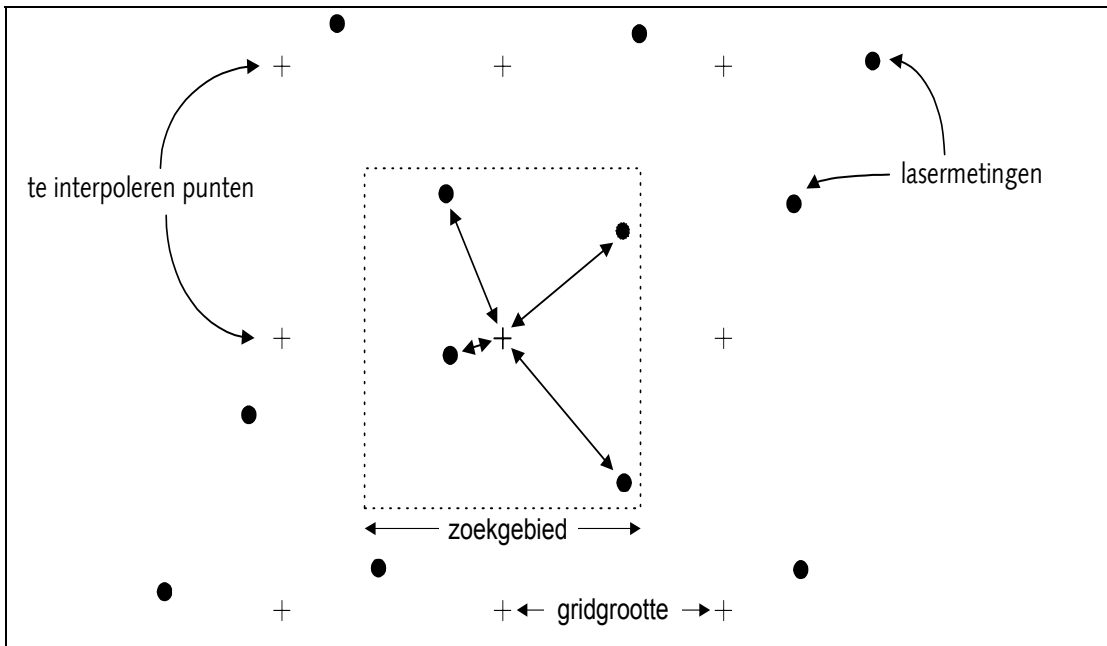
De interpolatie van de laserpunten wordt uitgevoerd bij de MD. Deze data wordt aangeleverd door de aannemer en wordt eerst gecontroleerd op punt dichtheid, verschuiving en filtering (zie 3.5). Er zijn na de goedkeuring van de basisbestanden (puntenbestanden) diverse afgeleide producten mogelijk zoals grids en terreinprofielen. Afhankelijk van de gewenste pixelgrootte van het uiteindelijke DHM vindt er gridinterpolatie plaats. Bijvoorbeeld om de 5 meter komt een punt, waarbij een zoekstraal van 8 meter gebruikt wordt. Gaten die aanwezig zijn als gevolg van filtering worden ook geïnterpoleerd. De grote gaten worden niet geheel gedicht waardoor de herkenning van dorpen e.d. nog mogelijk is.

Digitaal Hoogte Model

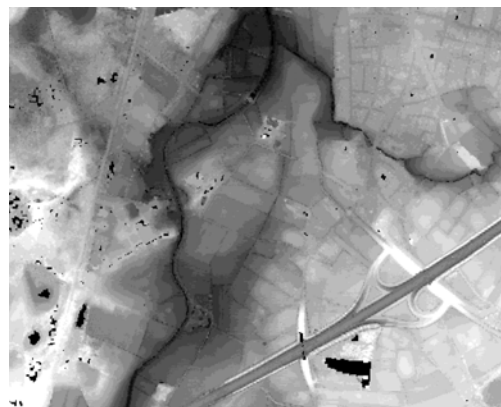
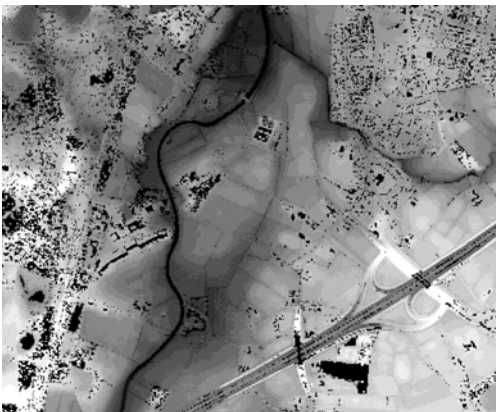
In een Digitaal Hoogte Model (DHM) is een hoogte gegeven op de snijpunten van een regelmatig, rechthoekig raster of grid. Omdat met laseraltimetrie niet exact op een regelmatige afstand wordt gemeten, wordt een DHM uit het basisbestand afgeleid door interpolatie met behulp van omliggende hoogtemetingen. De interpolatietechniek welke wordt gebruikt voor productie van DHM's is een zgn. gewogen-gemiddelde interpolatie. Het gewicht dat bij interpolatie aan omliggende metingen wordt gegeven is afhankelijk van de afstand tot het te interpoleren punt. Hieronder is de formule gegeven waarmee de hoogtes worden berekend en staat bekend onder de naam 'inverse squared distance weighting'.

$$\overline{hoogte} = \frac{\sum_{i=1}^n hoogte_i \times \frac{1}{afstand_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{afstand_i^2}}$$

Bij het interpoleren moet de waarde van twee parameters worden opgegeven, namelijk: onderlinge afstand van de te interpoleren punten (ook wel gridgrootte of resolutie genoemd) en grootte van het zoekgebied voor selectie van omliggende punten. Het zoekgebied dat hier wordt gebruikt is een vierkant om het te interpoleren punt heen. De onderstaande figuur geeft de situatie schematisch weer.



Wanneer binnen het zoekgebied geen metingen worden gevonden krijgt het te interpoleren punt geen hoogte maar een zgn. 'missing value' of 'nodata'-waarde. In de onderstaande figuur is een DHM afgebeeld in grijswaarden, waarbij wit hoog is, donker laag en zwart gridcellen met 'nodata'-waarden. Wanneer veel losse gridcellen met 'nodata'-waarden voorkomen wordt het DHM maximaal één keer opgevuld met de gemiddelde waarde van de (maximaal) acht omliggende cellen. Of dit opvullen van losse gridcellen moet plaatsvinden wordt per gebied visueel beoordeeld. Aaneengesloten gebieden met 'nodata'-waarden, met een minimale grootte van 3 bij 3 gridcellen, bijvoorbeeld wateroppervlakken zoals in de figuur hieronder, houden deze 'nodata'-waarde, zodat duidelijk is dat hier geen data is ingewonnen. Het moge duidelijk zijn dat de hoogte waarde van een gridcel derhalve geen gemeten hoogte is maar een hoogte bepaald uit de gemeten punten uit zijn omgeving.



5x5 meter DHM voor en na opvullen van losse cellen met een 'missing value' waarde

In de volgende paragrafen worden de kenmerken van de standaard DHM's beschreven.

3.5. Controle van de data

De kwaliteitscontrole van de MD heeft vooral betrekking op de punt dichtheid, nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de metingen. Een fout in de afstelling bij de stands- en plaatsbepaling op de grond of in het vliegtuig is snel gemaakt en kan als consequentie hebben dat de laserdata van een vlucht verticaal of horizontaal verschoven moet worden. Daarnaast is de filtertechniek nog sterk in ontwikkeling. De bedrijven die op dit moment laseraltimetrie uitvoeren, beschouwen de door hun gebruikte filtertechnieken als bedrijfsgeheim. Hierdoor is het alleen door uitvoerige controle mogelijk een kwaliteitslabel aan de data te hangen.

De controle bij de MD bestaat uit de volgende stappen:

- vergelijking van de lasermetingen met de referentiemetingen, veelal verkregen door GPS;
- controle op de punt dichtheid;
- analyse van de verkregen data per vlucht om systematische fouten welke gedurende de vlucht kunnen optreden, te achterhalen (controle langs overlappende stroken);
- controle op ongewenste wegfiltering van gegevens, bijvoorbeeld door te vergelijken met topografische bestanden (Top10Vector);
- vergelijking met al aanwezige hoogtebestanden, bijvoorbeeld DTB-wegen en TOPhoogteMD.

De bestanden die aan de MD geleverd worden, bevatten zowel de gefilterde als de ongefilterde data en worden door haar gecontroleerd op volledigheid en betrouwbaarheid. De controle bestaat uit een statistische controle en een visuele controle.

De statistische controle omvat twee delen. Tijdens de eerste controle worden verschillen bepaald tussen de hoogten verkregen uit laseraltimetrie data en terrestrisch ingewonnen hoogten. Deze verschillen zijn een maat voor de precisie van de data verkregen met behulp van laseraltimetrie (zie 3.6). Bij de tweede controle wordt nagegaan of de punt dichtheid van de laserdata na filtering voldoet aan de opgelegde eisen (zie 3.7). De visuele controle komt in paragraaf 3.8 aan bod.

3.6. Validatie met behulp van referentiemetingen

Om een indruk te krijgen van de algemene nauwkeurigheid van de data is het nodig om verspreid over het opnamegebied controlepunten voor de hoogte in te winnen met een onafhankelijke meetmethode.

Deze referentiegebieden worden door de afdeling TGT van de MD in heel Nederland ingemeten. De referentiegebieden liggen bij voorkeur in een vlak gebied met een vaste ondergrond, bijvoorbeeld op parkeerplaatsen of bedrijfsterreinen. Het inmeten van de gebieden gebeurt met een tachymeter en/of een GPS-ontvanger. De punten waarvan de posities en de hoogten zijn gemeten liggen in een grid van ongeveer 50 x 50 meter met een onderlinge afstand van 5 meter. Een referentiegebied bevat dus ca. 121 punten.

De ontwikkelde SISY en AHN software genereren uit de data die verkregen is met behulp van laseraltimetrie een DHM van het opnamegebied, zodat een kwantitatieve hoogtebeschrijving van het terreinreliëf wordt verkregen. De uit de laserdata afgeleide hoogten worden nu ter controle vergeleken met de hoogten van een puntenveld dat terrestrisch gemeten is in een bepaald referentiegebied. Op deze wijze wordt een precisieschatting verkregen van de laserhoogten.

Zowel de SISY als de AHN software geven de mogelijkheid om een gemiddeld verschil tussen DHM-hoogten (laser hoogten) en terrestrisch gemeten hoogten te bepalen. In het ideale geval is dit gemiddelde verschil gelijk aan 0. De hoogten verkregen uit laseraltimetrie zijn dan exact dezelfde hoogten als de hoogten die conventioneel gemeten zijn. Ten gevolge van bijvoorbeeld de kwaliteit van de gebruikte meetsystemen, de integratie van laserpulsen - GPS - INS, de invloed van de atmosfeer en de gebruikte filtertechnieken, zullen er echter kleine verschillen optreden. De MD heeft als eis gesteld dat bruikbare laserdata een gemiddeld hoogteverschil moet hebben dat kleiner is dan 5 cm. en een standaardafwijking kleiner dan 15 cm.

Met behulp van eenvoudige statistische bewerkingen kunnen de verschillen tussen de laserdata en de terrestrisch gemeten data in een histogram worden afgebeeld, en het gemiddelde en de standaard afwijking worden berekend. De verwachting is dat het histogram een gelijkmatige Gauss-

curve vertoont. Eventuele uitschieters kunnen nu nader worden onderzocht op de oorzaak van de afwijking.

3.7. Controle van de punt dichtheid

De punt dichtheid geeft het gemiddelde aantal laserpunten per vierkante meter in het terrein weer voor het gehele gebied dat is afgetast met de laserstraal. De criteria voor de bruikbaarheid van de laserdata zijn gekozen op basis van punt dichtheid. Hierbij worden de volgende uitgangspunten gebruikt:

- de nauwkeurigheid van de technieken (type laser, GPS en INS) die gebruikt worden bij laseraltimetrie;
- de meest efficiënte manier van dataverwerking;
- de toegestane vlieghoogte in Nederland ;
- de kosten.

De vereiste punt dichtheden die voor de verschillende soorten gebieden zijn vastgesteld door de MD staan vermeld in tabel 1. Voor specifieke gebieden of op aanvraag van de klant is het ook mogelijk om met een grotere punt dichtheid te vliegen.

Om een beter beeld te krijgen van de verdeling van de punt dichtheid kan deze ook op het scherm worden afgebeeld. Bij het afbeelden worden punten die boven het gestelde criterium liggen groen afgebeeld, en punten die onder het gestelde criterium liggen rood afgebeeld (zie paragraaf 5.5.2). Hierbij wordt rekening gehouden met de gefilterde objecten die plaatselijk een lagere punt dichtheid veroorzaken. Met de SISY software is het mogelijk om gebieden te selecteren en tevens de punt dichtheid te bepalen. Vervolgens kunnen probleemgebieden, dat wil zeggen de gebieden die niet aan de vereiste punt dichtheid voldoen, extra aandacht krijgen bij de latere visuele controle.

3.8. Visuele controle

Naast de statistische controle wordt de data ook onderworpen aan een visuele controle, waarbij onder andere wordt gekeken naar de volledigheid van de data en naar de kwaliteit van het gebruikte filterprogramma. Bij de controle wordt gebruik gemaakt van analoge bestanden, zoals kaarten in een atlas (zie 3.8.1), en digitale bestanden, die op het beeldscherm over het DHM worden geprojecteerd (zie 3.8.2, 3.8.3 en 3.8.4).

3.8.1. Vergelijking met de Grote Provincie Atlas

De Topografische Dienst Nederland (TDN), te Emmen, levert materiaal voor *De Grote Provincie Atlas* op een schaal van 1: 25.000. Ter controle van de data is gewerkt met bovengenoemde atlas.

Bij deze controle wordt gekeken naar:

- de compleetheid van de data;
- de aansluiting van de vluchtstroken;
- de waarneembaarheid van belangrijke topografische objecten die ook in de atlas staan;
- hoogtewaarden die moeten overeenkomen met de in de atlas vermelde hoogten (of het TophoogteMD bestand);
- de aanwezigheid van dijken en wegen;
- het correct uifilteren van hoge vegetatie (bv. bossen, boomgaarden);
- het correct uifilteren van bebouwing (bv. kantoren, huizen);
- het voorkomen van wateroppervlakken (bv. sloten, plassen en rivieren).

3.8.2. Vergelijking met TOP10Vector bestanden

De digitale TOP10Vector bestanden zijn afkomstig van de Topografische Dienst Nederland, te Emmen. Deze worden door de MD 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.

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 uifilteren 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.

3.8.3. Vergelijking met DTB bestanden

De MD 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 het XY-stelsel (RijksDriehoeknet) met NAP-hoogte (Normaal Amsterdams Peil) 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 bestand bevat ook betrouwbare topografische hoogte-elementen die het maaiveld in hoogte vastleggen. Via een apart proces is van deze hoogte-elementen ook een DHM te vervaardigen.

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.

Gekeken is naar de 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.

3.8.4. Vergelijking met overige bestanden

Indien een verschuiving in de data lijkt te zitten, worden bij de MD fotogrammetrisch huizen ingemeten. Hiermee kan een exacte planimetrische shift bepaald worden.

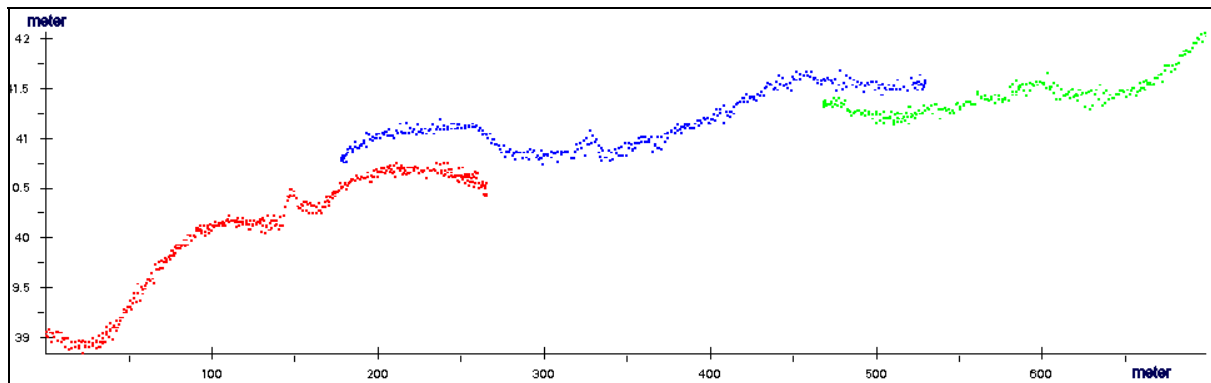
Voor kwantitatieve vergelijking van laserdata worden clear-cone metingen, die uitgevoerd worden op asfalt, gebruikt. Van verschillende snelwegen in Nederland zijn clear-cone meetbestanden bij de MD aanwezig.

3.9. Strookvereffening

3.9.1. Ribbels

Tijdens de kwaliteitscontrole van laser-bestanden door de MD worden regelmatig "ribbels" waargenomen. Als er verder wordt ingezoomd op de data en een dwarsprofiel wordt getekend, dan blijken in het gebied waar twee vliegstroken overlappen de hoogtewaarden van beide vliegstroken

te verschillen. Het hoogteverschil kan oplopen tot enkele tientallen centimeters. Per vliegstrook blijkt vaak een offset (constante hoogtefout voor alle punten van die strook) en/of een kanteling voor te komen. Zulke fouten per vliegstrook manifesteren zich in een hoogteplaatje als abrupte hoogteverschillen tussen stroken, die door de medewerkers "ribbels" worden genoemd. Onderstaand plaatje laat als voorbeeld een dwarsprofiel over enkele stroken zien. De punten zijn per vliegstrook gekleurd.



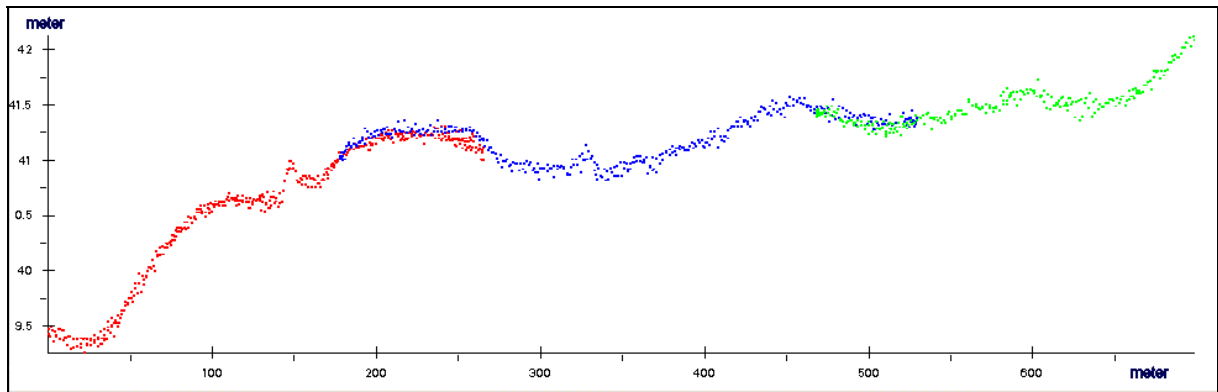
Deze fouten in de hoogtebestanden zijn er mede de oorzaak van dat nog maar weinig bestanden kunnen worden goedgekeurd. Als oorzaak van dit soort fouten in de aparte vliegstroken kunnen fouten in GPS en INS (de plaatsbepaling- en standbepalingsinstrumenten) worden aangewezen. Initialisatiefouten en/of multipad-effecten (ontvangst van indirecte, weerkaatste golfsignalen) in de GPS-metingen kunnen een offset geven in de uiteindelijke GPS-berekening, en kleine constante hoekfoutjes in het INS-apparaat geven een tilt (kanteling) voor de hoogtepunten dwars op de vliegrichting.

3.9.2. Strookvereffening

Omdat het "mooie" systematische fouten per vliegstrook betreft leek het mogelijk om deze fouten te corrigeren in de nabewerking. Daarvoor is het echter wel noodzakelijk dat de hoogtepunten apart per vliegstrook worden geleverd. Dit was geen standaarduitkomst van de verwerkingsprogrammatuur van de leveranciers, maar eind 1998 is het voor het eerst gelukt de hoogtepunten per vliegstrook te leveren. De MD is toen een onderzoek begonnen naar de mogelijkheden de offset/tilt-fouten te corrigeren. Hiervoor is prototype-software geschreven die de benodigde correcties kan uitrekenen en aanbrengen. De correcties zijn gebaseerd op de hoogteverschillen die in de overlap van stroken worden bepaald. Dit gebeurt niet voor losse punten, omdat die een vrij hoge meetruis hebben (zo'n 10-15 cm), maar voor gebiedsgemiddelden. In een gebiedje van een halve of hele hectare liggen ongeveer 500 laser-punten. De meetruis van deze punten is grotendeels ongecorreleerd, zodat de precisie van het gebiedsgemiddelde hoogteverschil heel goed is, namelijk enkele cm. Om interpolatieproblemen te voorkomen wordt gezocht naar zo glad mogelijke gebiedjes. Strookvereffening vindt plaats per strook met als uitgangspunt dat de gemiddelde hoogteverschillen tussen stroken zo klein mogelijk worden. Dit gebeurt door per strook een offset/tilt-correctie toe te staan.

3.9.3. Resultaten

Nadat in een eerste proefblok deze aanpak goed bleek te werken is ook door de andere leveranciers data in aparte stroken aangeleverd. Dit vroeg om een aanpassing van de productiesoftware van de leveranciers. Ook met de data van de overige leveranciers bleek de strookvereffeningsaanpak goed te werken. De ribbels verdwenen uit het beeld. Het volgende plaatje laat zien wat het resultaat na de strookvereffening is.



3.9.4. Kwaliteitsanalyse

De verschillen die na de strookvereffening overblijven zijn een goede indicatie voor de bereikte kwaliteit in het hoogtebestand. Doordat in de overlap van alle stroken zulke verschillen worden bepaald (al deze overlappen moeten voldoen aan de kwaliteitseisen), wordt een zeer gedetailleerd beeld van de kwaliteit verkregen. Dit biedt de mogelijkheid om heel gericht stukken data goed te keuren of af te keuren, waardoor de levertijd aan klanten verkort kan worden.

3.9.5. Nadelen

Omdat bij de strookvereffening een offset aan de stroken wordt gegeven, is extra informatie nodig om het gehele bestand aan het NAP op te hangen. De dwarsstroken worden in de strookvereffening gebruikt, om het netwerk van stroken steviger aan elkaar te kunnen rekenen. De controlevelden en dwarsstroken die tot nu toe werden ingewonnen om het bestand te controleren op juistheid, worden nu gebruikt voor de correctie waardoor de controlefunctie vervalt. Er zijn nu dus extra controlegegevens nodig om het vereffende bestand onafhankelijk te toetsen.

3.9.6. Vervolg

De leveranciers hebben ondertussen ook de software van de MD gekregen, zodat zij ook zelf kunnen profiteren van de nieuwe kennis over laseraltimetrie-data en systematische fouten per strook kunnen gaan corrigeren. Samen met de leveranciers wordt ook nagedacht over verdere verbeteringen van de gegevensverwerking.

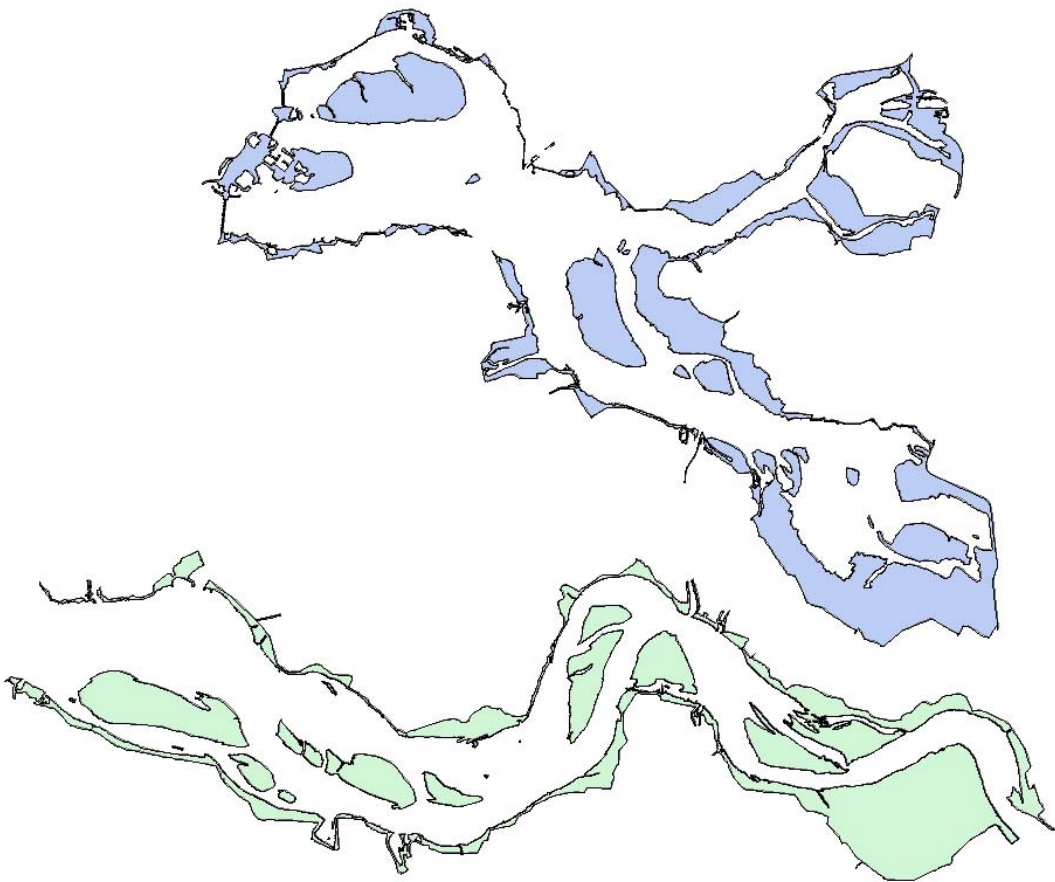
4. Uitvoering externe deel

Van vraag tot eindproduct voor de aannemer

4.1. Opdrachtschrijving

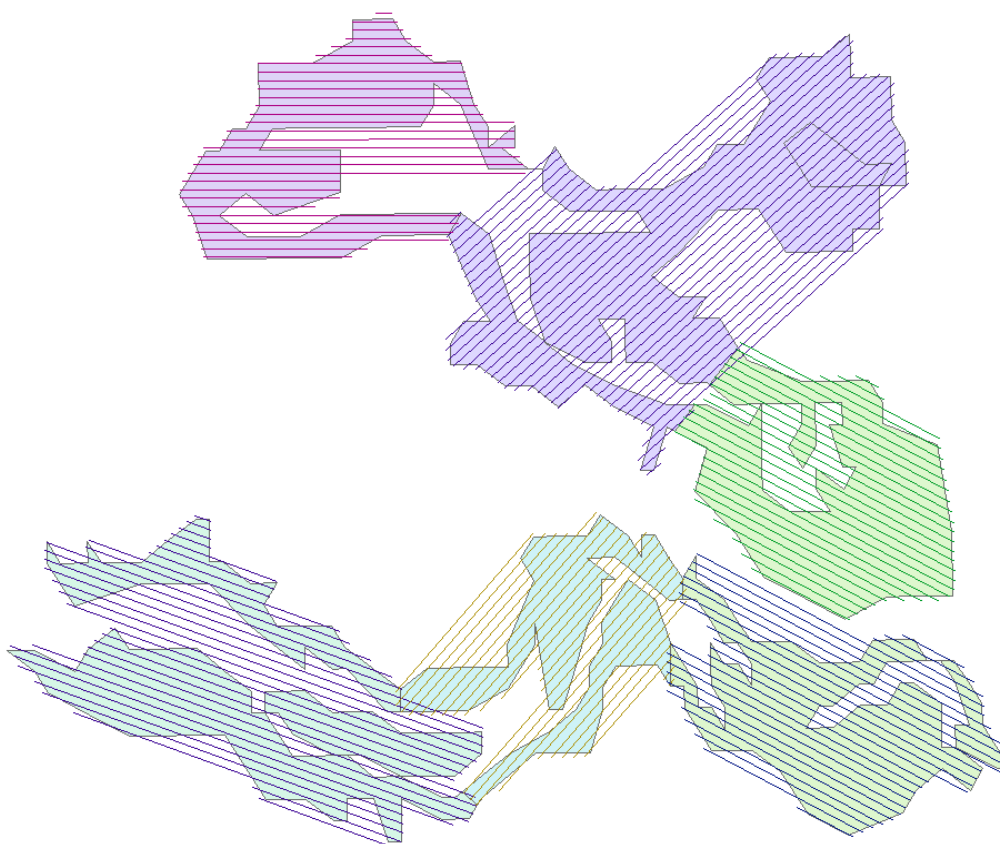
De vraagstelling voor deze opdracht is: maak een gecombineerde hoogte/dieptekaart te behoeve van het maken van een Ecotopenkaart van zowel de Westerschelde als de Oosterschelde van teen dijk tot teen dijk. Voor de "droogvallende" delen is de inwinning uitgevoerd met behulp van laseraltimetrie. Van het gehele gebied zijn lodingsgegevens aangeleverd door de opdrachtgever. Het eindproduct is een 5x5 metergrid Digitaal Hoogte Model (DHM) van teen dijk tot teendijk geleverd met voor de "droogvallende" delen laser gegevens en voor overige delen lodingsgegevens.

4.1.1. Opdrachtgebied



Met behulp van beschikbare digitale kaartbestanden is vooraf een inschatting gemaakt van de gebieden die met behulp van laseraltimetrie. Deze gebieden zijn ter indicatie aangeleverd aan de aannemer. Hiermee kan de offerte opgemaakt worden en het vliegplan worden opgesteld. Tevens zijn getijde karakteristieken geleverd om er voor te zorgen dat er binnen het juiste getijdenvenster zal worden ingewonnen.

4.1.2. Vliegplan



Het vliegplan geeft aan hoe het gebied zal gaan worden ingewonnen. Hoe stroken aansluiten (zie boven), waar referentievelden nodig voor de inpassing komen te liggen.

4.1.3. Vliegen/inwinning



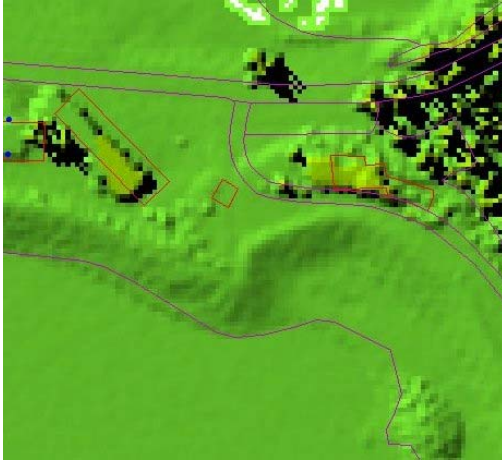
ingewonnen tussen 27-9 en 14-10 2001

ingewonnen 30-5-2002

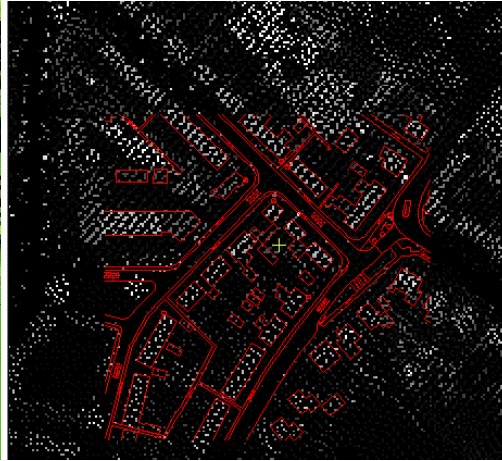
Daar er in de opdracht was opgenomen dat de vluchten voor 15 oktober 2001 moesten worden uitgevoerd is er om toch voor deze datum alles te hebben ingewonnen gevlogen met een slechte GPS configuratie. Dit heeft er toe geleid dat er in de Westerschelde een aantal stroken zijn in eerste instantie zijn afgekeurd maar na toepassing van strookcorrectie uiteindelijk zijn geaccepteerd. Voor de Oosterschelde was het niet mogelijk de stroken te corrigeren. Deze stroken zijn in overleg met opdrachtgever op 30-5-2002 overgevlogen. Om het gehele droogvallende deel van circa 27.800ha in te winnen is in totaal 95.000ha dekkend gevlogen.

4.1.4. XYZ-ligging

Tijdens de inwinning wordt de data opgeslagen in WGS-84 (het GPS-coördinaten systeem) opgeslagen. Na verwerking wordt dit bestand omgezet naar RD-NAP. De data wordt gecontroleerd op aansluitgebieden ten aanzien van de Z en inpasgebieden voor XY. De inpassing XY gaf voor Top10-vector een verschuiving van de data weer. De aanvullende uitgebreide controle met GBKN-data leerde dat de XY inpassing correct is.



Vergelijk DHM-Top10vector



Vergelijk laserdata - GBKN

4.1.5. Levering door aannemer

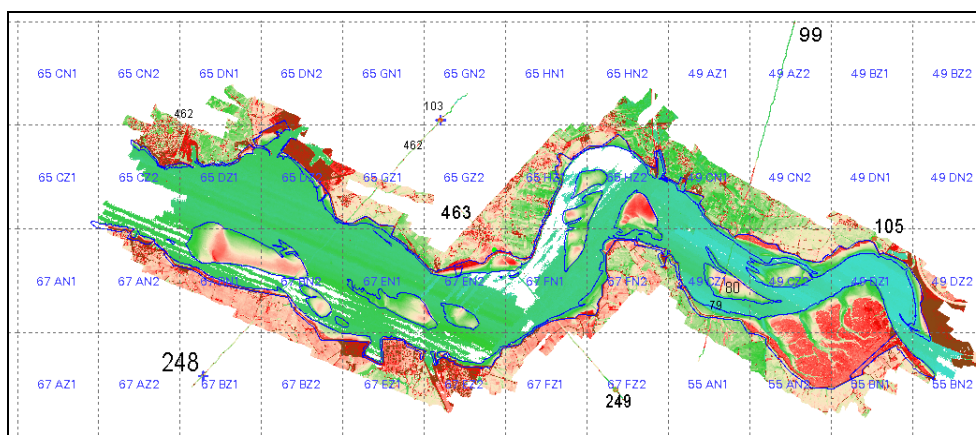
De aannemer heeft aan de Meetkundige Dienst de ingewonnen stroken als afzonderlijke bestanden geleverd. In deze bestanden zijn de ingewonnen laserpunten in RD-NAP opgenomen.

5. Controle MD

5.1. Statistische vergelijking met referentiedata

Ref nr	Kaart blad	Omschrijving	Datum inwinning	Aantal punten	Syst. fout na correctie [meter]	Standaard afwijking [meter]
ref248	67BZ1	sportveld	1-3-1999	63	0.07	0.10
ref462	65CZ2	sportveld	1-7-2001	218	0.08	0.05
ref463	67EN2	grasveld	1-7-2001	164	0.00	0.03
ref99	49AN2	sportveld	1-2-1998	100	0.00	0.04

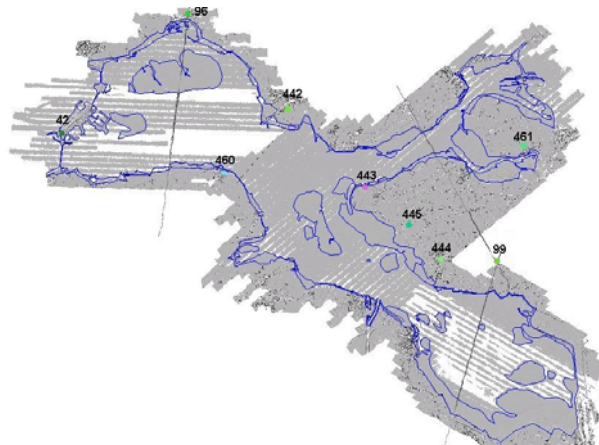
Een overzicht van de gebruikte referentiegebieden voor de hoogtevalidatie van de Westerschelde. Ref staat voor referentiegebieden die ingemeten zijn door de MD m.b.v. GPS.



Ligging van de referentiegebieden in het projectgebied Westerschelde.

Ref nr	Kaart blad	Omschrijving	Datum inwinning	Aantal punten	Syst. fout na correctie [meter]	Standaard afwijking [meter]
ref444	49AN1	sportveld	1-5-2001	155	0.02	0.03
ref445	65CZ2	grasveld	1-5-2001	235	0.07	0.06
ref460	65EN2	sportveld	1-7-2001	41	0.05	0.03
ref461	43DZ1	sportveld	1-7-2001	218	0.11	0.03
ref99	49AN2	sportveld	1-2-1998	56	0.08	0.03
ref42	65BN2	grind	5-6-1997	149	0.05	0.08
ref96	64GN2	sportveld	1-2-1998	163	0.04	0.04

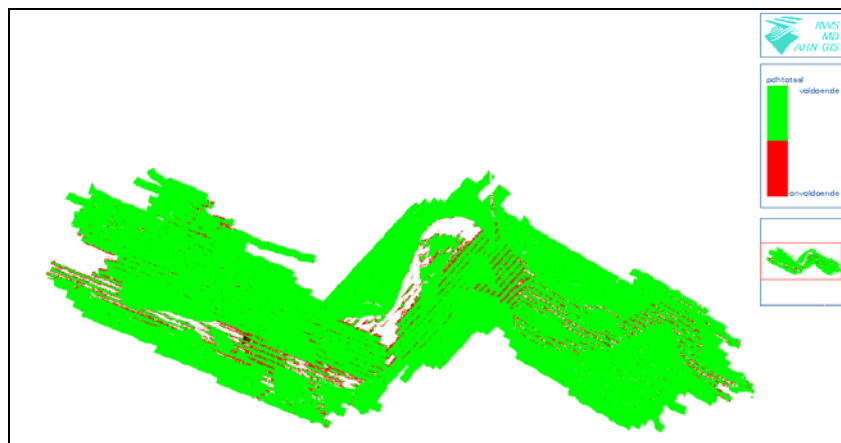
Een overzicht van de gebruikte referentiegebieden voor de hoogtevalidatie van de Oosterschelde. Ref staat voor referentiegebieden die ingemeten zijn door de MD m.b.v. GPS.



Ligging van de referentiegebieden in het projectgebied Oosterschelde.

5.2. Puntdichtheid

De gemiddelde puntdichtheid voor de projectgebieden Westerschelde en Oosterschelde bedragen 3 punten per 16 m² en voldoet hiermee aan de eis van minimaal 1 punt per 16 m².



Punt dichtheid kaart van Westerschelde. Gebieden die groen van kleur zijn hebben een punt dichtheid van meer dan 1 punt per 16 m², rode gebieden hebben een punt dichtheid van minder dan 1 punt per 16 m² wat veroorzaakt wordt door weerkaatsing op het water waardoor lagere punt dichtheid ontstaat. Voor de Oosterschelde is een zelfde kaart te maken welke het zelfde resultaat oplevert.

5.3. XY-ligging

De aannemer heeft reeds gecontateerd dat de Top10vector bestanden niet exact op de juiste plaats liggen. Controle met GBKN bestanden toont aan dat de bestanden voor XY planimetrisch goed liggen.

6. Verwerking

6.1. Combinatie laser-lodingen

Uit de laserdata is met behulp van een aspect-grid, een grid dat de geografische oriëntatie van een helling aangeeft, de scheiding tussen land en water bepaald. Op water ontstaat een duidelijk ander patroon dan op land. Op deze scheiding is de knipgrens gelegd.

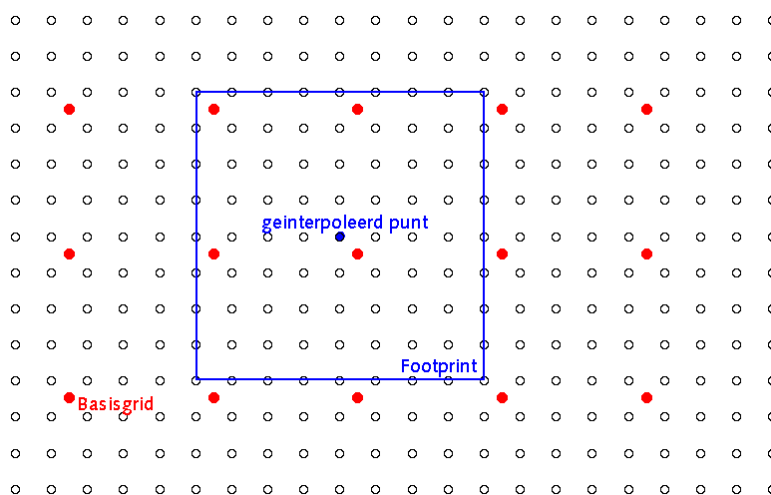


Voorbeeld aspect-grid met knipgrens

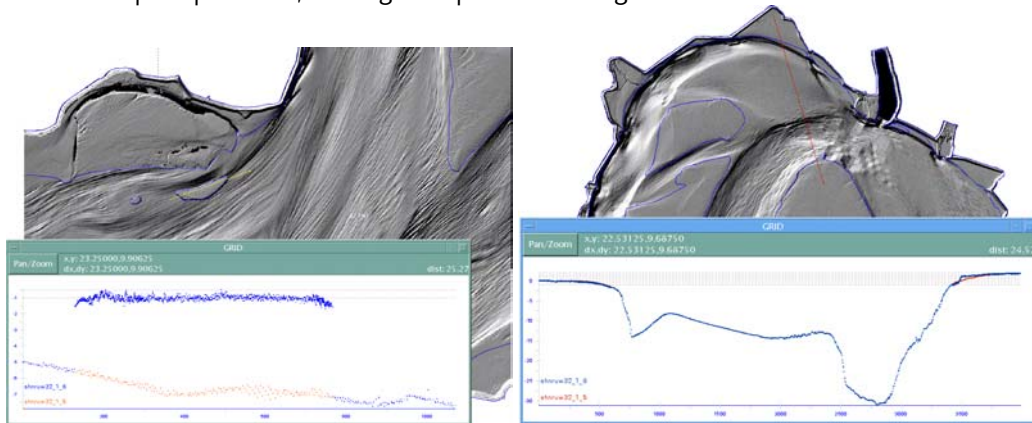
Deze knipgrens is gebruikt om uit de laserdata het water te knippen en uit de lodingen op die delen waar land is de geïnterpoleerde lodingdata te verwijderen. In hoofdstuk 3.4 is omschreven hoe vanuit laserdata een grid gebouwd wordt. RIKZ heeft voor deze opdracht een 20x20 meter grid geleverd wat een geïnterpoleerd grid is uit raailodingen. Om dit grid te kunnen samenvoegen met het laserbestand, is van het lodingen grid eerst een 5-meter grid gemaakt.

Dit is als volgt gedaan:

Van het 20x20meter grid is een ascii-xyz bestand gemaakt Van dit ascii-xyz bestand is mbv weighted-mean interpolatiemethode (footprint=40 meter) een 5x5 meter grid gebouwd. Door een footprint van 40 meter in te stellen worden alle nieuwe 5x5 meter cellen berekend uit de omliggende vier 20x20 meter gridpunten. Zie ook onderstaande figuur.



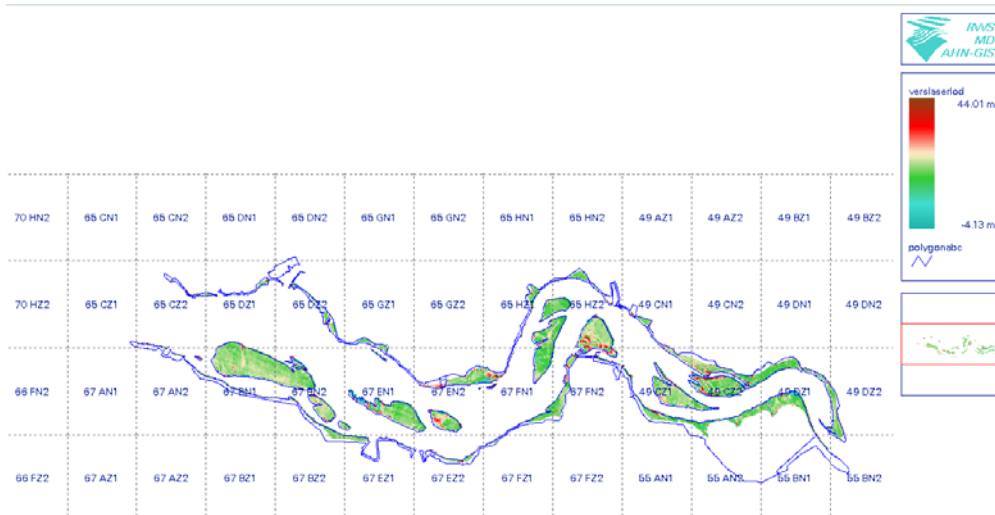
Op de overgangen van de land naar water is een duidelijk verschil tussen de gemeten laserpunten, minimaal 1 punt per 16m², en de geïnterpoleerde lodingdata te zien.



De rode lijn in het dwarsprofiel toont de lodingsdata

In het rechter voorbeeld is ook te zien dat er "onvolkomenheden" in de lodingdata aanwezig zijn door de gebruikte interpolatie methode van lodingprofiel naar lodinggrid. Deze "onvolkomenheden" zijn ook te zien in het 20x20 meter grid.

Van de verschillen tussen lodingen en laser is een verschilgrid vervaardigd.



Tevens is er een knipgrens bepaald aan teendijk landzijde, waarmee "teveel" ingewonnen data is verwijderd. De geknipte lodingsdata en laserdata zijn vervolgens samengevoegd en geknipt in 1/2 top10vector kaartbladen.

7. Overzicht geleverde data

7.1. Overzicht geleverde data

De aangemaakte grid bestanden zijn drie varianten met de zelfde kaartbladindeling met een grid grootte van 5x5 meter uitgeleverd voor zowel de Westerschelde als de Oosterschelde.

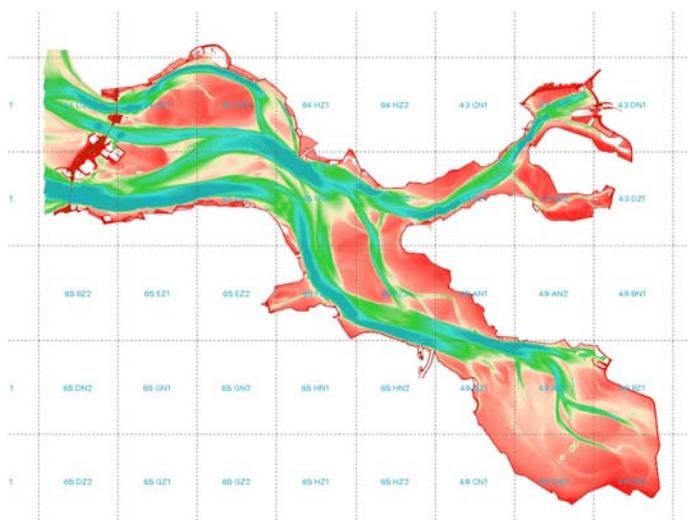
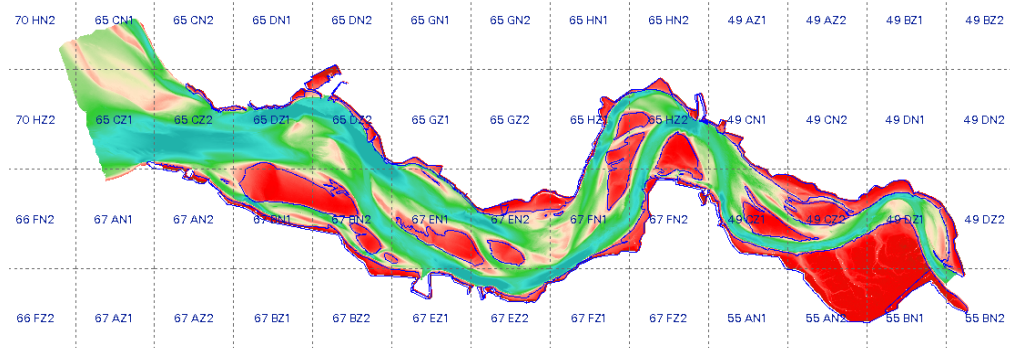
1. Arc-info bestanden laserdeel
2. Arc-info bestanden combinatie laser-lodingen
3. Arc-info bestanden verschil laser loding

Tevens zijn de gebruikte knipgrenzen als Arc-info shape files geleverd.

7.2. Kaartbladen

Gefilterde data van het volgende gebied is gecontroleerd door de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat te Delft (**Fout! Verwijzingsbron niet gevonden.1**).

Kaartbladen	Gebiedsnaam
70HN2, 70HZ2, 65CN1, 65CN2, 65CZ1, 65CZ2, 65DN1, 65DN2, 65DZ1, 65DZ2, 65GZ1, 65HZ1, 65HZ2, 49CN1, 67AN1, 67AN2, 67BN1, 67BN2, 67BZ2, 67EN1, 67EN2, 67EZ1, 67EZ2, 67FN1, 67FN2, 67FZ1, 49 CZ1, 49CZ2, 55AN1, 55AN2, 49DZ1, 49DZ2, 55BN1, 55BN2.	Westerschelde 34 bladen
64DZ2, 64GZ1, 64GZ2, 64HZ1, 43CN1, 43CN2, 43DN1, 65BN2, 65EN1, 65EN2, 65FN1, 65FN2, 43CZ1, 43CZ2, 43DZ1, 65EZ2, 65FZ1, 65FZ2, 49AN1, 49AN2, 65HN2, 49AZ1, 49AZ2, 49BZ1, 49CN1, 49CN2, 49DN1	Oosterschelde 27 bladen



8. Overzicht gebruikt referentiemateriaal

Bij controle van de gefilterde data door de MD wordt het volgende referentiemateriaal gebruikt.

Naslagwerken:

1. *De Grote Provincie Atlas*, Wolters-Noordhoff Atlasproducties Groningen, Topografische Dienst Nederland, edities 1990-1996, schaal 1: 25.000
2. *Topografische kaart van Nederland*, Topografische Dienst Nederland, schaal 1: 25.000
3. *TOP250raster*, Topografische Dienst Nederland, schaal 1: 250.000

Datystemen:

TOP10 vectorbestand, Topografische Dienst Emmen (TDN), 1994/1996

Digitaal Terrein Bestand (DTB), Meetkundige Dienst

TopHoogteMD, Meetkundige Dienst

Referentiegebieden:

Lokaties : gras/sportvelden en vlakke zandgebieden
Datum van inmeting : 1996 t/m 2001
Meetmethode : GPS stop and go, real time kinematische GPS of waterpassing

Accoord verklaring projectleider

Goedgekeurd door : W.R. ter Borg

Paraaf :

Datum : 27 maart 2003