



Remote sensing voor inspectie van waterkeringen





Remote sensing voor inspectie van waterkeringen

L.M.Th. Swart

in opdracht van

Ministerie van Verkeer en Waterstaat



Rijkswaterstaat



| | | |
|-----------------|---|--|
| Opdrachtgever | Rijkswaterstaat R.C. (Ronald) van Oort Postbus 5023 2600 GA Delft 015 275 75 75 | |
| Auteur | L.M.Th. (Rens) Swart | Swartvast |
| Klankbordgroep | S. (Stefan) van Baars S.J.F. (Stefan) Flos M. (Thijs) Trompetter H. (Heeri) Bloem E.C.P.M. (Erno) Bammens | Ad Geo/TU Delft SjF Projects and Support Waterschap Rivierenland Rijkswaterstaat IJsselmeergebied Waternet |
| Versie | 4.3.2 | |
| Status | Definitief | |
| Datum | 8 NOVEMBER 2007 | |
| Kenmerk | 602.29 | |
| ISBN | 978-90-79331-01-7 (paperback) 978-90-79331-02-4 (PDF) | |
| NUR | 950 | |
| Foto voorpagina | De kade van Polder Het Noordveen, ten noorden van Nieuwe Wetering en ten zuiden van de Haarlemmermeerpolder. (© Swartvast – Rens Swart) | |
| Typografie | Rens Swart, met gebruikmaking van de Aldus (romein en cursief) en Palatino (vet), ontworpen door Hermann Zapf | |

Advies bij innovatieve inwinning van geo-informatie

| | | |
|----------------------|-------------------|-------------------|
| Swartvast | telefoon | e-post |
| ir. L.M.Th. Swart | +31 6 28 33 45 94 | rens@swartvast.nl |
| Catharijnepoort 22 | webstek | KvK Amsterdam |
| 2152 ES Nieuw-Vennep | www.swartvast.nl | 34255085 |



Inhoudsopgave

| | |
|--|----|
| Samenvatting | 6 |
| 1 Inleiding | 9 |
| 1.1 Aanleiding..... | 9 |
| 1.2 Probleemstelling..... | 9 |
| 1.3 Doelstellingen..... | 10 |
| 1.4 Aanpak | 10 |
| 1.5 Leeswijzer | 10 |
| 2 Invalshoeken voor toepassing van remote sensing: verantwoording en leeswijzer..... | 12 |
| 2.1 Inleiding..... | 12 |
| 2.2 Karakterisering van remote sensing..... | 12 |
| 2.3 Projectvisie..... | 13 |
| 2.4 Mogelijke invalshoeken voor toepassing van remote sensing..... | 14 |
| 2.4.1 Inleiding | 14 |
| 2.4.2 De techniekgedreven ontwikkeling..... | 14 |
| 2.4.3 De informatiebehoefte van de waterkeringbeheerder | 15 |
| 2.4.4 Faalmechanismen en indicatoren | 15 |
| 2.4.5 Het inspectieproces..... | 16 |
| 2.4.6 De werkprocessen van de waterkeringbeheerder..... | 16 |
| 2.4.7 De informatiekringloop..... | 16 |
| 3 Faalmechanismen en indicatoren in relatie tot remote sensing..... | 18 |
| 3.1 Inleiding | 18 |
| 3.2 Faalmechanismen | 18 |
| 3.3 Faalmechanismen in relatie tot remote sensing..... | 20 |
| 3.4 Indicatoren en inspectieparameters | 24 |
| 3.5 Conclusie..... | 25 |
| 4 Het inspectieproces in relatie tot remotesensingtechnieken | 27 |
| 4.1 Inleiding | 27 |
| 4.2 De opdeling van het inspectieproces in vier deelprocessen | 27 |
| 4.3 De werkprocessen van de waterkeringbeheerder..... | 29 |
| 4.3.1 Het belang van aansluiting bij de werkprocessen | 29 |
| 4.3.2 Een opsomming van de werkprocessen van de waterkeringbeheerder | 29 |
| 4.3.3 De reikwijdte van het begrip inspectie..... | 32 |
| 4.4 Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen..... | 34 |
| 4.5 Casus: criteria voor laseraltimetrie volgens de inspectiedeelprocessen..... | 35 |
| 4.5.1 Werkwijze | 35 |
| 4.5.2 Geschiktheid van de procesbeschrijving voor laseraltimetrie | 36 |
| 4.5.3 Conclusies waarnemen..... | 37 |
| 4.5.4 Conclusies diagnosticeren..... | 39 |
| 4.5.5 Conclusies prognosticeren | 43 |
| 4.5.6 Conclusies operationaliseren | 44 |
| 4.5.7 Conclusies generieke voorwaarden | 44 |
| 4.6 Conclusies inspectieproces in relatie tot remote sensing | 45 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5 | Remote sensing | 48 |
| 5.1 | Inleiding..... | 48 |
| 5.1.1 | De plaats van remote sensing in dit rapport..... | 48 |
| 5.1.2 | Informatie in andere rapporten..... | 48 |
| 5.1.3 | Leeswijzer | 49 |
| 5.2 | Ontwikkelingen op het gebied van platforms..... | 49 |
| 5.2.1 | Inleiding..... | 49 |
| 5.2.2 | Satellieten | 50 |
| 5.2.3 | Vliegtuigen | 57 |
| 5.2.4 | Helikopters..... | 59 |
| 5.2.5 | Motorzweefvliegtuigen..... | 61 |
| 5.2.6 | Laagvliegende onbemande luchtvaartuigen..... | 62 |
| 5.2.7 | Langdurig hoogvliegende onbemande luchtvaartuigen..... | 66 |
| 5.3 | Ontwikkelingen op het gebied van remotesensingtechnieken..... | 69 |
| 5.3.1 | Inleiding..... | 69 |
| 5.3.2 | Luchtfoto's..... | 69 |
| 5.3.3 | Fotogrammetrie..... | 75 |
| 5.3.4 | Hogeresolutiesatellietbeelden | 78 |
| 5.3.5 | Nabij-infrarood..... | 79 |
| 5.3.6 | Thermisch infrarood | 81 |
| 5.3.7 | Laseraltimetrie..... | 83 |
| 5.3.8 | Radar en radarinterferometrie | 95 |
| 5.3.9 | Hyperspectrale beelden..... | 105 |
| 5.3.10 | Passieve microgolfradiometrie | 105 |
| 5.3.11 | Radioactiviteit..... | 106 |
| 5.3.12 | Elektrische geleidbaarheid en weerstand..... | 108 |
| 5.3.13 | Multisensorwaarnemingen | 108 |
| 5.3.14 | Mutatiedetectie..... | 110 |
| 5.4 | Kansrijke toepassing van remote sensing in het inspectieproces | 110 |
| 6 | Conclusies en aanbevelingen..... | 114 |
| 6.1 | Inleiding..... | 114 |
| 6.2 | Conclusies..... | 114 |
| 6.2.1 | Invalshoeken en visie van het projectteam..... | 114 |
| 6.2.2 | Faalmechanismen en indicatoren in relatie tot remote sensing | 114 |
| 6.2.3 | Het inspectieproces in relatie tot remotesensingtechnieken..... | 115 |
| 6.2.4 | De casus laseraltimetrie | 116 |
| 6.2.5 | Algemene conclusies rond het inspectieproces en de toepassing van remote sensing..... | 117 |
| 6.2.6 | Platforms voor inspectie waterkeringen..... | 118 |
| 6.2.7 | Remotesensingtechnieken voor inspectie waterkeringen | 119 |
| 6.3 | Aanbevelingen..... | 120 |
| | Referenties | 123 |
| A | Casus: criteria voor laseraltimetrie volgens de inspectiedeelprocessen | 127 |
| A.1 | Inleiding..... | 127 |
| A.2 | Waarnemen | 127 |
| A.3 | Diagnosticeren..... | 131 |

| | | |
|-----|--|-----|
| B | Indicatoren en inspectieparameters..... | 134 |
| B.1 | Beperkte opsomming indicatoren en inspectieparameters en relatie met faalmechanismen | 134 |
| B.2 | Kwantificering van enige geometrische indicatoren..... | 136 |

Samenvatting

Er zijn verschillende initiatieven genomen die moeten leiden tot verbetering van inspecties van waterkeringen. Deze initiatieven hebben tot doel de inrichting en uitvoering van visuele inspecties te stroomlijnen en het inspectieproces eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar te maken. In aanvulling op visuele inspecties kunnen remotesensingtechnieken ondersteuning bieden aan het op deze wijze inspecteren van waterkeringen.

Ondanks het imago van remote sensing als veelbelovend, komt het operationeel gebruik in het algemeen moeilijk van de grond. Er blijkt een kloof te gaten tussen het aanbod van remotesensingdiensten en de behoeften van de waterkeringbeheerder. Daarnaast ontbreekt bij beheerders de deskundigheid om de inzet van nieuwe technieken te beoordelen en organiseren en te laten aansluiten op het inspectieproces. Ook is niet altijd duidelijk wat de relatie is tussen hetgeen is waargenomen en faalmechanismen en inspectieparameters.

Dit rapport heeft tot doel de waterkeringbeheerder een handreiking te bieden voor de toepassing van remotesensingtechnieken in zijn processen en daarnaast aanbieders te informeren over de processen waarop de informatie toegesneden dient te zijn. Het blijkt daarbij verstandig de toepassing van remote sensing vanuit verschillende invalshoeken te bezien. Faalmechanismen vormen het geotechnisch fundament voor de waarneembaarheid van indicatoren met remote sensing. De informatiebehoefte is hierop gebaseerd. Ook het inspectieproces en de werkprocessen van de waterkeringbeheerder vormen nuttige invalshoeken voor de toepassing van remote sensing.

Eén van de manieren om het inspectieproces zuiverder te maken is de opdeling in de vier deelprocessen waarnemen, diagnosticeren, prognosticeren en operationaliseren. De elders beschreven voorwaarden aan elk van deze processtappen zijn weliswaar gericht op visuele inspectie, maar blijken een prima basis te vormen voor het stellen van criteria aan laseraltimetrie. In dit rapport is deze remotesensingtechniek, waarmee bij het waterkeringbeheer de meeste ervaring is, als casus gebruikt. Dit levert een schat aan criteria op die weliswaar soms specifiek voor laseraltimetrie zijn, maar zeer geschikt zijn als kapstok voor de toepassing van andere remotesensingtechnieken bij inspectie van waterkeringen.

Remotesensinginformatie heeft een grote potentie voor het waterkeringbeheer. Over grote oppervlakken kan in korte tijd een grote hoeveelheid vlakdekkende, uniforme informatie worden ingewonnen, die aanvullend is aan de informatie die met visuele inspectie wordt verzameld. De voor inspectie meest waardevolle informatie betreft vaak mutaties of anomalieën. Een substantieel aantal faalmechanismen is gerelateerd aan geometrische basiselementen en juist deze kunnen met fotogrammetrie en laseraltimetrie zeer goed in kaart gebracht worden. Daarbij kan de potentie van deze technieken nog verder worden benut dan nu in praktijk reeds gebeurt, leidend tot betere informatie over deze faalmechanismen. Ook de potentie van luchtfoto's is groter dan uit de huidige praktijk blijkt. Digitale luchtfotografie zorgt bovendien tegelijk voor informatie in het nabij-infrarood, die potentie biedt voor de beoordeling van vegetatie en daarmee van bekleding. Radarinterferometrie met langcoherente verstrooiers (PS-INSAR) is een zeer krachtige

techniek voor deformatiesignalering, die kan helpen te inspecteren waar dat nodig is. Het gebruik van remotesensingtechnieken kan inspectie van regionale keringen, waarover in het algemeen weinig informatie beschikbaar is, een grote stap vooruit helpen.

Laseraltimetrie heeft zich als operationele remotesensingtechniek bewezen. Niettemin worden met name de mogelijkheden tot een werkelijk vlakdekkende analyse en bepaling van zettingen, hoogteverschillen en zettingsverschillen nog onvoldoende benut. Doordat bij bijvoorbeeld de toetsing van de waterkeringen nog vaak wordt uitgegaan van profielen, wordt de enorme dichtheid van waargenomen hoogte-informatie onderbenut. Het gebruik van laserscanners die per puls meerdere reflecties vastleggen biedt nieuwe mogelijkheden ter bepaling van de invloed van vegetatie.

Satellieten hebben voor inspectie van waterkeringen een beperkte potentie, doordat ze een beperkte resolutie bieden, aan hun baan gebonden zijn en commerciële beelden kostbaar zijn. Vliegtuigen en vooral helikopters zijn de aangewezen platforms voor waterkeringen, maar vanwege de lage kosten en milieu- en geluidsbelasting is ook het motorzweefvliegtuig een aantrekkelijk platform. Voor lokale inspectie kan het onbemande luchtvaartuig (UAV) soms handig zijn. Het Vlaamse langdurig op 18 km hoogte vliegende onbemande vliegtuig PEGASUS combineert de voordelen van satellieten en vliegtuigen, zonder de meeste van hun nadelen. Ondanks het lage maximumgewicht van de instrumenten, is dit voor alle typen inspectie van waterkeringen een zeer veelbelovend platform, mede door de gerichtheid van ontwikkelaar VITO op operationele inzet. In het algemeen is de inzetbaarheid van de verschillende platforms gecorreleerd met het tijdsaspect van het type inspectie.

Het in verband brengen van faalmechanismen met de geotechnische en geometrische basiselementen van dijken als hoogte, helling, type bekleding, opbouw en grondsterkte is een compacte sleutel tot de waarneembaarheid met remotesensingtechnieken. Hierboven is al vastgesteld dat geometrische basiselementen goed waarneembaar zijn. Er bestaat een discrepantie tussen de toenemende gedetailleerdheid van de informatie aan het oppervlak van de waterkering en de sterk achterblijvende waarneembaarheid van de opbouw en ondergrond van het dijklichaam, terwijl beide even belangrijk zijn voor de stabiliteit. Niettemin kan de analyse van geometrische informatie, vervaardigd met laseraltimetrie en radarinterferometrie, leiden tot de bepaling van hoogteverschillen of zettingen die als verklikker voor mechanismen in de opbouw of de ondergrond kunnen fungeren. Daarnaast kan kennis van historische ingrepen in de opbouw en aanleg een belangrijke aanvulling vormen op de zo moeilijk waar te nemen opbouw, ondergrond en inhomogeniteit.

Minder bekende technieken als thermisch infrarood, passieve microgolfradiometrie, radioactiviteitsmetingen en geleidbaarheidsmetingen bezitten waarschijnlijk enige potentie voor de waarneming van geotechnische basiselementen. Juist omdat deze basiselementen zo moeilijk zijn waar te nemen, verdient het aanbeveling de geschiktheid van genoemde technieken nader te onderzoeken.

De vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid wordt door veel waterkeringbeheerders niet als onderdeel van het inspectieproces gezien. Anderzijds is de methodiek van de vijfjaarlijkse toetsing bij uitstek geschikt om voor waterkeringbeheerders als voorbeeld te dienen om hun inspectieproces volgens de inspectiedeelprocessen in te richten. Daarmee wordt bijgedragen aan de intentie om het inspectieproces eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar te maken. Het is denkbaar dat de methodiek van de vijfjaarlijkse toetsing in de toekomst onderdeel zal uitmaken van het reguliere inspectieproces van de waterkeringbeheerder, zowel voor de primaire als de regionale waterkeringen. Daardoor zou de wettelijk voorgeschreven vijfjaarlijkse toetsing feitelijk vrijwel een formaliteit zijn.

Het gebruik van remote sensing stelt hoge eisen aan de organisatie. De informatie ontleent zijn grote kracht aan het gebruik als basisinformatie voor verscheidene processen binnen het waterschap. Deze dient daartoe centraal en gestructureerd voor de hele organisatie te worden opgeslagen en ontsloten. Dit stelt hoge eisen aan de automatiseringsomgeving. Bovendien dienen vóór het specificatie- en aanbestedingstraject alle potentiële gebruikers binnen de organisatie betrokken te worden.

Terwijl visuele inspectie binnen het waterschap plaatsvindt, kenmerkt de inzet van remote sensing zich door uitbesteding. De casus laseraltimetrie laat zien dat het van groot belang is dat het te leveren product bij de aanbesteding uitputtend wordt gespecificeerd en dat een intensieve controle noodzakelijk is. Voor de verschillende activiteiten rond specificatie, inkoop, ontsluiting en bewerking van remotesensinginformatie zijn verschillende soorten specialisten nodig, met een opleidingsniveau dat in het algemeen hoger is dan bij visuele inspectie.

In het algemeen hebben waterkeringbeheerders onvoldoende kennis in huis om de inzet van remote sensing te beoordelen en de inkoop en verwerking geheel zelf uit te voeren. Voor operationele producten kan in het vereiste hoge en specialistische kennisniveau worden voorzien door de inhuur van externe specialisten. Er blijkt daarnaast behoefte aan een gezamenlijk kennisinstituut op het gebied van remote sensing voor waterkeringbeheer, dat kan voorzien in de kennis die operationele waterkeringbeheerders zelf niet in huis hebben, dat de spankracht heeft om innovaties te helpen ontwikkelen en beproeven en de kloof tussen vraag en aanbod van remotesensingtechnieken voor waterkeringbeheer kan helpen dichten. Voorts blijken innovatieprogramma's onmisbaar om de kloof tussen ontwikkeling en operationele inzet van remotesensingtechnieken te helpen dichten.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Naar aanleiding van de kadeverschuivingen bij Wilnis en Terbregge en de verzakking van de kanaaldijk bij Stein zijn verschillende initiatieven genomen die moeten leiden tot verbetering van inspecties van waterkeringen. In het rapport *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Stroomlijning van inrichting en uitvoering van inspecties* [43], uitgegeven in opdracht van STOWA en Rijkswaterstaat, werd onder andere geconstateerd dat er behoefte is aan

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

Geconstateerd werd tevens dat, in aanvulling op visuele inspecties, remotesensingtechnieken en in-situ-metingen ondersteuning kunnen bieden aan het verkrijgen van goede diagnoses en prognoses voor de waterkeringen. Het rapport stelt dat het gebruik van remotesensingtechnieken zal bijdragen aan integrale overzichten van profiel- en dieptegegevens van waterkeringen en aan een beter inzicht in de actuele status van waterkeringen.

Voor u ligt het eindrapport van het project *Verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie van waterkeringen*, dat Swartvast in opdracht van Rijkswaterstaat heeft uitgevoerd.

1.2 Probleemstelling

Enerzijds houdt remote sensing grote beloften in voor het waterkeringbeheer, zowel op het gebied van reeds bewezen technieken als op het gebied van nieuwe technieken (denk aan radarinterferometrie of microgolfradiometrie) of technieken met sterk geëvolueerde specificaties (denk aan laseraltimetrie). Anderzijds blijkt de inzet in praktijk vanzelfsprekend noch recht-toe-recht-aan.

Opmerkelijk is bijvoorbeeld dat met de verschijning van de rapporten *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* [43] in 2006 en de *Informatiebehoefteinventarisatie waterkeringbeheer/dijkdeformatie* [52] in 2003 de toepassing van remotesensingtechnieken geen hogere vlucht heeft genomen. Tijdens de workshop op de kennisdag waterkeringen op 9 maart 2007 (zie het verslag [51]) en in de klankbordgroep werd geconstateerd dat er een kloof is tussen aanbieders van remotesensingdata en de gebruikers bij het waterkeringbeheer. Ook in de STOWA-rapporten *Remote sensing ondersteund waterbeheer* [7] en [44] werd dit al signaleerd.

In het *projectplan* [50] van dit project worden onder meer als belemmeringen genoemd dat de eisen waaraan het product moet voldoen niet goed gespecificeerd zijn, dat het geleverde

product slechts na een zware bewerking bruikbaar is of niet aansluit op de processen van het waterkeringbeheer. Daarnaast ontbreekt de deskundigheid om de inzet van nieuwe technieken te begeleiden en te laten aansluiten op het inspectieproces. Ook is niet altijd duidelijk wat de relatie is tussen hetgeen is waargenomen en inspectieparameters en faalmechanismen.

1.3 Doelstellingen

Het project *Verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie van waterkeringen* heeft tot doel de waterkeringbeheerder een handreiking te bieden voor de toepassing van remotesensingtechnieken in zijn processen. Dit gebeurt door

1. het leggen van de relatie tussen inspectieparameters, indicatoren en faalmechanismen;
2. het opstellen van criteria waaraan remotesensingtechnieken moeten voldoen om voor een bepaald deelproces binnen het inspectieproces te kunnen worden toegepast;
3. het in kaart brengen van de werkprocessen van het waterkeringbeheer waarbij remote sensing (mogelijk) een rol speelt;
4. het opstellen van een overzicht van remotesensingtechnieken met hun eigenschappen;
5. het beoordelen van de verscheidene remotesensingtechnieken gezien de criteria;
6. het opstellen van een vooruitblik op kansrijke remotesensingtechnieken en aanbevelingen voor proefprojecten daarmee.

Deze analyse leidde tot dit rapport. Beoogd is de genoemde kloof van beide kanten te verkleinen, waardoor het projectresultaat interessant beoogt te zijn voor zowel de gebruiker als de aanbieder van remotesensinggegevens.

1.4 Aanpak

Door analyse van de inspectieprocesbeschrijving, faalmechanismen, indicatoren en remotesensingtechnieken worden relaties geschetst en uiteindelijk criteria gesteld. Het model voor het inspectieproces dat is ontwikkeld in *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Stroomlijning van inrichting en uitvoering van inspecties* [42] dient als leidraad.

Waterkeringbeheerders met ervaring met de toepassing van remote sensing zijn actief bij het project betrokken. Daarbij is in eerste instantie laseraltimetrie als casus gebruikt, omdat daarmee de meeste ervaring is. Naast gebruikers zijn kennisinstituten en aanbieders op het gebied van remote sensing of geotechniek geconsulteerd. Een analyse van de verzamelde informatie heeft geleid tot de in de doelstelling genoemde deelproducten.

1.5 Leeswijzer

Voor de bevordering van de succesvolle toepassing van remote sensing bij inspectie van waterkeringen kunnen verschillende invalshoeken worden gekozen. Deze zijn voor de aanpak van dit project bestudeerd en worden in hoofdstuk 2 beschreven. Dit hoofdstuk is feitelijk een verantwoording en is daarnaast geschikt als leeswijzer. In hoofdstuk 3 wordt het geotechnisch fundament geschetst door de beschrijving van faalmechanismen en een analyse van hun betekenis voor remote sensing. In dit hoofdstuk komen ook indicatoren en inspectieparameters aan bod. In hoofdstuk 4 staat de benadering van inspectie als proces

centraal. De relatie met de werkprocessen van de waterkeringbeheerder wordt beschreven en laseraltimetrie wordt als casus gebruikt om criteria voor het gebruik van remote sensing binnen de inspectieprocessen te stellen. In hoofdstuk 5 worden ontwikkelingen op het gebied van remote sensing en hun platforms beschreven, waarbij kansrijke ontwikkelingen voor toepassing bij inspectie van waterkeringen worden gesignaleerd. Het rapport besluit in hoofdstuk 6 met conclusies en aanbevelingen.

2 Invalshoeken voor toepassing van remote sensing: verantwoording en leeswijzer

2.1 Inleiding

Remotesensingtechnieken kunnen een belangrijke bijdrage leveren aan het beheer van waterkeringen. Er zijn vele succesvolle voorbeelden te noemen. Zeker bij nieuwe technieken, maar ook bij bestaande, is er echter een zekere weg te gaan alvorens remote sensing optimaal aansluit bij de praktijk van de waterkeringbeheerder. Zoals in de probleemstelling geformuleerd, wordt vaak een kloof ervaren tussen aanbieders van remote sensing en de potentiële gebruikers in het waterkeringbeheer.

Het team van dit project *Verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie waterkeringen* is gaandeweg tot een visie gekomen met betrekking tot de toepassing van remote sensing bij inspectie van waterkeringen. Deze wordt in § 2.3 toegelicht. Daaraan voorafgaand wordt in § 2.2 een karakterisering van remote sensing gegeven, die in dit rapport wordt gehanteerd.

De toepassing van remote sensing kan vanuit heel verschillende invalshoeken worden bevorderd. Binnen dit project worden verschillende van deze invalshoeken gehanteerd. Het verband daartussen wordt in § 2.4 gelegd.

Dit hoofdstuk is te beschouwen als een *verantwoording* van de aanpak van het project verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie van waterkeringen. Het is tevens een leeswijzer.

2.2 Karakterisering van remote sensing

Remote sensing wordt in dit onderzoek gedefinieerd als de verzameling technieken waarmee via elektromagnetische straling van een afstand op grote schaal informatie (zowel thematische als geometrische) kan worden verworven over de toestand van de waterkering. Remote sensing voor waterkeringinspecties is dus aanvullend aan visuele inspecties en sensoren in en op de waterkering ('in situ').

Bij remote sensing worden de waarnemingen ('sensing') op afstand ('remote') gedaan, zonder contact met het waar te nemen object: *teledetectie*. De genoemde 'afstand' betekent in dit onderzoek dat het om waarnemingen vanaf platforms in de lucht of in de ruimte gaat. Inzet van satellieten, vliegtuigen of helikopters zorgt in het algemeen voor de volgende karakteristieken (al zijn ze geen voorwaarde):

- waarnemingen over grote oppervlakken,
- gedaan in korte tijd,
- vanuit een anders moeilijk bereikbaar overzichtsstandpunt,
- met een uniform karakter,

- met sensoren die een andere gevoeligheidscurve voor elektromagnetische straling kunnen hebben dan het menselijke oog,
- leidend tot grote hoeveelheden data
- met een vlakdekkend karakter.

Deze karakterisering maakt duidelijk waarom remote sensing vaak gezien wordt als in potentie zeer krachtig. Binnen het waterkeringbeheer is er ruime ervaring met de inzet van sommige remotesensingtechnieken (met name luchtfotografie, fotogrammetrie en laseraltimetrie), terwijl andere technieken veelbelovend lonken.

Profielen hoeven niet meer op vaste lokaties bepaald te worden en niet meer met intensieve terrestrische technieken met een beperkt aantal meetpunten, maar kunnen praktisch overal berekend worden. Veranderingen in vegetatie kunnen grootschalig van bovenaf bepaald worden. Nauwkeurige metingen en karteringen kunnen plaatsvinden zonder allerlei niet openbaar toegankelijke terreinen te hoeven betreden. Veranderingen in het gebruik kunnen in het kader van de keur bepaald worden. Gedetailleerde hoogtemodellen helpen bij visualisatie, interpretatie in het kader van het beheer en maken instabiliteiten zichtbaar. Verzakkingen kunnen tot op de millimeter gesignaleerd worden op locaties waar ze niet verwacht werden.

Tegelijk is remote sensing maar één van de mogelijke informatiebronnen om de informatiebehoefte van de waterkeringbeheerder te vervullen. Daarnaast is het karakter van remote sensing dermate verschillend van traditionele data als bijvoorbeeld gewaterpaste profielen of visuele waarnemingen van scheuren of uittredend kwelwater, dat de toepassing om een totaal andere benadering vraagt. Niet alleen de vertaling van data (die niet specifiek voor dat doel hoeft te zijn opgenomen) naar beheersinformatie is een uitdaging op zich, ook de ontsluiting van de informatie binnen de organisatie en de inbedding in de organisatie vergt specifieke aandacht. Door de grootschaligheid is er bovendien een groot verschil tussen de initiële kosten (denk aan de kosten van een aardobservatiesatelliet) en de kosten per informatie-eenheid. Het grootschalige karakter van de data en de kosten van inwinning en verwerking maken bundeling van krachten zowel zinvol als noodzakelijk.

2.3 Projectvisie

Remote sensing kan helpen bij een effectievere inrichting en uitvoering van inspectie van waterkeringen. Het klankbordteam is gekomen tot een visie over de toepassing van remote sensing, die zich laat formuleren in de vorm van de volgende stellingen.

- De toepassing van remote sensing bij inspectie is weinig anders dan gereedschap om dat wat we al eeuwen doen te stroomlijnen.
- Met remote sensing kunnen gegevens objectief, uniform en over grote oppervlakken worden verkregen, wat ook gezien de schaalvergroting bij de waterkeringbeheerders en de toenemende aandacht voor regionale keringen noodzakelijk is.
- Remotesensinggegevens zullen altijd aanvullend blijven aan visuele inspectie. Ze kunnen heel goed gebruikt worden om locaties te signaleren waar visuele inspectie geïntensiveerd zou moeten worden.
- Enerzijds hebben remotesensinggegevens een uniek karakter (vooral door hun uniformiteit en grootschaligheid), anderzijds zijn het gegevens als alle andere, die een inkoopproces vereisen en moeten worden ontsloten voor de organisatie.

- Bij inspectie gaat het in veel gevallen feitelijk om mutatie-detectie, of het nu de hoogte, vorm, vocht of vegetatie betreft. Bij de ontwikkeling en de toepassing van remotesensingtechnieken is het goed dit in het achterhoofd te houden.
- Het gebruik van remote sensing stelt zijn eisen aan de organisatie. Andersom stellen de processen van de organisatie eisen aan de toepassing van remote sensing. Met beide moet rekening gehouden worden, wil de toepassing succesvol zijn.
- De toepassing van remote sensing moet niet opgeknipt worden langs eilandjes van afdelingen en deelprocessen. Juist remote sensing leent zich voor één organisatiebrede basis-geo-informatievoorziening.
- Kernbegrippen: uniform, integraal, generiek, grootschalig.
- Technische specificaties verouderen snel. Daarom is het verstandig ook aandacht te geven aan het proces om te komen tot het vaststellen van die specificaties.

2.4 Mogelijke invalshoeken voor toepassing van remote sensing

2.4.1 Inleiding

De toepassing van remote sensing kan vanuit heel verschillende invalshoeken worden gezien. Er is niet één manier om de toepassing van remote sensing bij inspectie van waterkeringen tot een succes te maken. Bij de ontwikkeling van remotesensingtechnieken en het selecteren daarvan en het stellen van criteria daaraan door de gebruiker is het goed deze verschillende invalshoeken te onderkennen. Een goed begrip hiervan bevordert het dichten van de kloof tussen vraag en aanbod van remotesensingtechnieken.

2.4.2 De techniekgedreven ontwikkeling

De toepassing van remotesensingtechnieken heeft zonder twijfel een sterk innovatief karakter. In het algemeen worden dergelijke technieken niet ontwikkeld door gebruikers of naar aanleiding van hun ideeën of behoeften, maar door ontwikkelaars van technologische kennis en producten, of dit nu bij kennisinstellingen of commerciële aanbieders is. De ervaring leert dat deze zogenoemde techniekgedreven invalshoek vaak resulteert in een kloof met de gebruiker. Enerzijds is innovatie zonder de techniekgedreven initiatieven van ontwikkelaars ten dode opgeschreven, anderzijds sluit het ontwikkelde product slechts zelden precies aan bij de behoeften van de gebruiker. De ontwikkelaar kent deze behoefte en de praktijk van de gebruiker in het algemeen onvoldoende.

Het is dan ook belangrijk dat al tijdens de ontwikkeling van een product door kennisinstituut of commerciële aanbieder de beoogde gebruiker wordt betrokken. Dit kan onder meer door samenwerking van een ontwikkelaar en een of meerdere gebruikers in een zogenaamd 'bouwteam'. Dit is een van de conclusies van de workshop tijdens de Kennisdag inspectie waterkeringen [51].

Ook innovatieprogramma's waarbij eindgebruikers betrokken zijn, scheppen het klimaat om tot succesvolle inzet van nieuwe technieken te komen. Recente voorbeelden zijn het proefproject 'Waarnemingstechnieken voor Inspectie van Waterkeringen' (DigiDijk), opgezet volgens de aanpak van het Nederlandse Small Business Innovation Research (SBIR) programma [63], en de testfaciliteit IJkdijk voor toepassingen van sensortechnologie [64]. Juist omdat er nog een kloof te overbruggen is alvorens nieuwe technieken voor de

eindgebruiker operationeel inzetbaar zijn, zijn innovatie- en subsidieprogramma's van groot belang.

In dit rapport wordt de technologische invalshoek niet als uitgangspunt gebruikt. Pas in hoofdstuk 5 worden de in de overige hoofdstukken gebruikte invalshoeken afgezet tegen de stand van zaken in de remote sensing.

2.4.3 De informatiebehoefte van de waterkeringbeheerder

In plaats van de net beschreven techniekgedreven invalshoek, kan ook de gebruiker als uitgangspunt worden genomen. Bij de inspectie van waterkeringen is één van de mogelijke invalshoeken dan te inventariseren hoe inspecteurs te werk gaan. Welke zaken inspecteren zij, met andere woorden, welke *inspectieparameters* bekijken zij? Het idee is dat als de informatiebehoefte in kaart gebracht is, de ontwikkeling van technieken daarop kan worden afgestemd.

Dit was precies de aanpak van de informatiebehoeftebepaling die de toenmalige Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat in 2002 samen met Infram uitvoerde. In het rapport *Informatiebehoefteinventarisatie waterkeringbeheer/dijkdeformatie* [52] is deze informatiebehoefte vertaald in inspectieparameters die gerangschikt zijn naar mate waarin deze gekwantificeerd konden worden en door waterkeringbeheerders van belang werden geacht.

Deze informatiebehoefte is een uitstekende invalshoek voor de bevordering van de inzet van remotesensingtechnieken bij inspectie van waterkeringen. Het is echter niet verstandig dit als enige uitgangspunt te nemen. Het is belangrijk de informatiebehoefte te onderbouwen met een analyse van het geotechnische fundament: de faalmechanismen. Dit kan leiden tot aanvullende inzichten en brengt ook witte vlekken aan het licht omdat de inspectiepraktijk weinig aandacht heeft voor aspecten die vanouds moeilijk waarneembaar zijn, zoals opbouw en ondergrond.

De informatiebehoefte wordt in dit rapport gezien als een uitwerking van faalmechanismen en samen met de verwante faalindicatoren genoemd in § 3.4. Voor de daadwerkelijke specificatie van de informatiebehoefte wordt hoofdzakelijk naar andere rapporten verwezen.

2.4.4 Faalmechanismen en indicatoren

Een derde invalshoek om de aansluiting van remotesensingtechnieken bij het waterkeringbeheer te beschouwen is uit te gaan van wat een waterkering moet doen: water keren. Als hij dat niet doet, dan faalt hij en in veel gevallen bezwijkt hij daarbij. Voor falen bestaan verschillende mechanismen: faalmechanismen.

De indruk bestaat dat waterkeringbeheerders vooral uitgaan van de hiervóór genoemde inspectieparameters en de verderop te noemen processen, zonder zich daarbij altijd rechtstreeks bewust te zijn van de onderliggende faalmechanismen, terwijl daarentegen geotechnici van kennisinstituten als GeoDelft en TU Delft zich juist concentreren op faalmechanismen, met inspectieparameters en processen slechts op de achtergrond. De invalshoek van de faalmechanismen is belangrijk omdat daarmee het geotechnische fundament wordt gelegd voor de andere invalshoeken en bovendien witte vlekken die mogelijk in de praktijk van het waterkeringbeheer bestaan kunnen worden gesignaleerd. Faalmechanismen worden in hoofdstuk 3 als uitgangspunt genomen.

Een faalmechanisme is op zich geen waarneming. Het mechanisme treedt aan het licht door middel van indicatoren. Deze indicatoren treden op bij een bepaalde belasting, bijvoorbeeld hoogwater. De aansluiting van remotesensingtechnieken bij het beheer van de waterkering zou dus kunnen worden geborgd door uit te gaan van in hoeverre remote sensing de indicatoren van faalmechanismen kan detecteren. In § 3.4 wordt hierbij stilgestaan. De stap van indicatoren naar inspectieparameters is niet groot en deze worden daar dan ook genoemd.

2.4.5 Het inspectieproces

Het programma *Verbetering Inspectie Waterkeringen* heeft onder meer tot doel de inrichting en uitvoering van visuele inspecties te stroomlijnen en het inspectieproces eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar te maken. Eén van de manieren om het inspectieproces zuiverder te maken is het opdelen van het inspectieproces in de vier deelprocessen waarnemen, diagnosticeren, prognosticeren en operationaliseren. Deze deelprocessen vormen een cyclus. Per deelproces kunnen de activiteiten worden beschreven, alsmede de criteria waaraan voldaan moet worden en de op te leveren resultaten. Door de onderverdeling in deelprocessen wordt het inspectieproces geobjectiveerd.

Dit is het uitgangspunt in hoofdstuk 4. Aan de hand van een casus worden de criteria die er aan de toepassing van remote sensing bij inspectie te stellen zijn uitgewerkt.

2.4.6 De werkprocessen van de waterkeringbeheerder

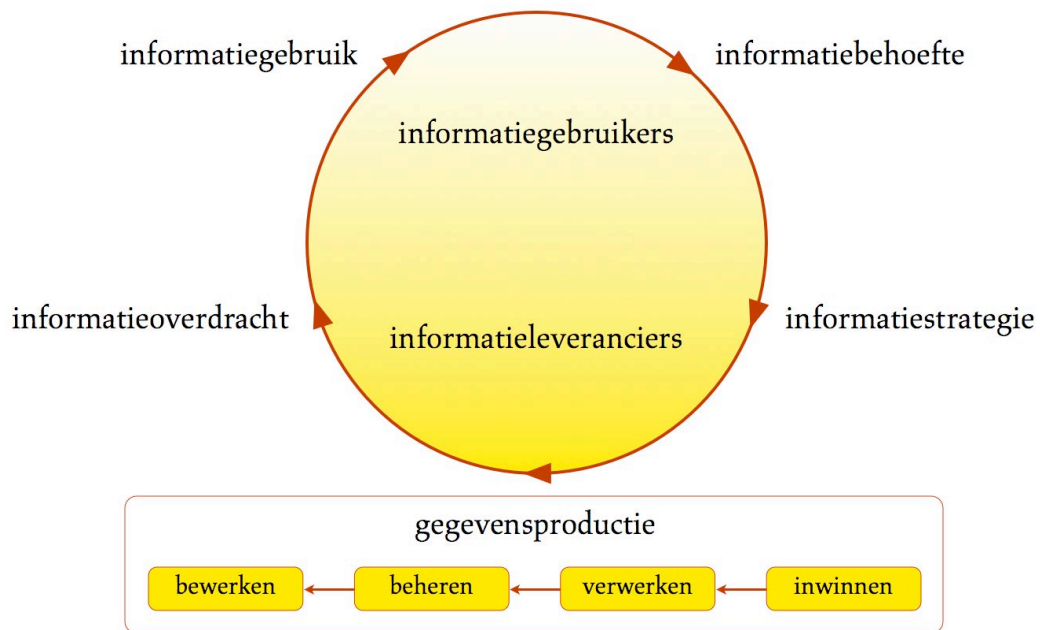
De werkzaamheden van de waterkeringbeheerder laten zich beschrijven in termen van zijn werkprocessen. Dit aspect is hierboven onderbelicht gebleven. Het zijn deze processen die leiden tot een behoefte aan informatie, waarin mogelijk met remote sensing kan worden voorzien. Daarnaast is de aansluiting op de werkprocessen de belangrijkste voorwaarde voor het slagen van de toepassing van remotesensingtechnieken, zoals ook in praktijk is gebleken.

In dit rapport wordt het inspectieproces als uitgangspunt genomen met zijn hiervoor genoemde opdeling in een cyclus van vier inspectiedeelprocessen. Dit inspectieproces is een concept dat nog niet altijd aansluit op de feitelijke werkprocessen van de waterkeringbeheerder. Omwille van de slaagkans is het essentieel de relatie tussen beide te beschrijven. Dit gebeurt in § 4.3.

In het hoofdstuk over het inspectieproces (hoofdstuk 4) komen de criteria bij elkaar die op basis van de werkprocessen, de organisatie en de inspectiedeelprocessen te stellen zijn aan de toepassing van remotesensingtechnieken.

2.4.7 De informatiekringloop

Een zesde en laatste invalshoek is die van de informatiekringloop. Cruciaal voor het slagen van de toepassing van welke techniek dan ook is dat het proces van het specificeren van de informatiebehoefte door de gebruiker, de strategie om deze informatie te



figuur 1 De informatiekringloop zoals deze bij Rijkswaterstaat wordt gehanteerd. Deze kringloop is toepasbaar voor elk primair proces, bijvoorbeeld waterkeringbeheer en -beleid. Informatiegebruikers analyseren hun informatiebehoefte. Deze wordt vervuld aan de hand van een informatiestrategie. De informatieleveranciers produceren de gewenste gegevens (met onder meer inwinning of acquisitie, verwerking en beheer) en bewerken deze tot informatie, die vervolgens wordt overgedragen aan de informatiegebruiker. De evoluerende informatiebehoefte maakt dat de cyclus gesloten wordt.

verkrijgen, de gegevensproductie en bewerking zelf en de overdracht aan de gebruiker bewust wordt doorlopen. Voor elk primair proces, bijvoorbeeld waterkeringbeheer en -beleid, is de kringloop in figuur 1 op te stellen. Dit is een gesloten cyclus omdat bij het gebruik van informatie de vraag dient te worden gesteld of deze de behoefte dekt en of een geëvolueerde behoefte geen nadere of andere informatie vereist. Zie bijvoorbeeld de toelichting van Rijkswaterstaat in de *Productcatalogus basisinformatie Rijkswateren* [45].

Het inventariseren van de informatiebehoefte is eerder als invalshoek beschreven, het stellen van criteria op basis van faalmechanismen en processen ook, maar feitelijk zijn het onderdelen van een hele informatiekringloop.

Bij Waternet hanteert men een soortgelijke benadering (zie [48]). De nadruk ligt daar op het inkoop- of data-acquisitieproces, waarvan inventarisatie, specificatie, aanbesteding, selectie, informatiebeheer en kwaliteitsborging deel uitmaken. Men heeft voor het acquisitieproces van geo-informatie een blauwdruk opgesteld, die in principe ook voor andere categorieën informatie geschikt is. De informatiebehoefte en de techniek veranderen, maar het principe van de informatiekringloop niet.

3 Faalmechanismen en indicatoren in relatie tot remote sensing

3.1 Inleiding

Zoals in § 2.4.4 uiteengezet is, is het uitgaan van faalmechanismen één van de mogelijke invalshoeken om te komen tot een effectieve toepassing van remotesensingtechnieken in het waterkeringbeheer. In § 3.2 wordt een opsomming en beschrijving gegeven van faalmechanismen en wordt de daartussen soms bestaande correlatie aangestipt. In § 3.3 wordt geanalyseerd wat er van faalmechanismen waarneembaar is en welke parameters van waterkeringen het betreft. De analyse is een sleutel tot de toepassing van remote sensing bij het waarnemen van de toestand van de waterkering en hij legt er vooral het geotechnische fundament voor. Een faalmechanisme is op zich geen waarneming. Het mechanisme treedt aan het licht door middel van indicatoren, die in de inspectiepraktijk weer worden vertaald naar inspectieparameters. Indicatoren en inspectieparameters worden behandeld in § 3.4, vooral door verwijzing naar literatuur. Deze analyse kan zowel aanbieders van remotesensingtechnieken als waterkeringbeheerders die deze technieken moeten selecteren inzicht geven in de voorwaarden voor een zo goed mogelijke aansluiting van aangeboden remotesensingtechnieken op de noden van het waterkeringbeheer. In § 3.5 worden conclusies getrokken.

3.2 Faalmechanismen

Men maakt bij het functioneren van waterkeringen onderscheid tussen falen en bezwijken. Een waterkering *faalt* als hij zijn waterkerende functie niet meer vervult. Falen treedt op als de belasting de feitelijke sterkte overschrijdt. Van *bezwijken* is sprake als de waterkering zijn samenhang verliest en in sterke mate vervormt (zoals bij bresvorming). Als een waterkering bezwijkt, faalt hij in het algemeen (hoewel de kanaaldijk bij Stein wel bezweek, maar niet faalde), maar andersom hoeft een waterkering niet beslist te bezwijken om te falen. Een te geringe hoogte, bijvoorbeeld, kan leiden tot een onaanvaardbaar grote overloop, waarbij de waterkering niet bezwijkt maar wel faalt in zijn waterkerende functie.

Op basis van een analyse van verschillende bronnen is in tabel 1 een opsomming gegeven van te onderscheiden faalmechanismen.¹

¹ Zie over faalmechanismen bijvoorbeeld *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid* [8] (VTV, 2006, katern 5, § 1.2); *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5] (DWW, bijlage C.2); het daaruit puttende rapport *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* [43] (STOWA/DWW, 2006, § 3.2) en het rapport van het binnen het programma Verbetering Inspectie Waterkeringen uitgevoerde project *Ontwikkeling gids inspectie waterkeringen. Grip op kwaliteit visuele inspectie* [56] (2007, § 5.1). De uiteindelijke opsomming in tabel 1 is hoofdzakelijk van de hand van Stefan van Baars.

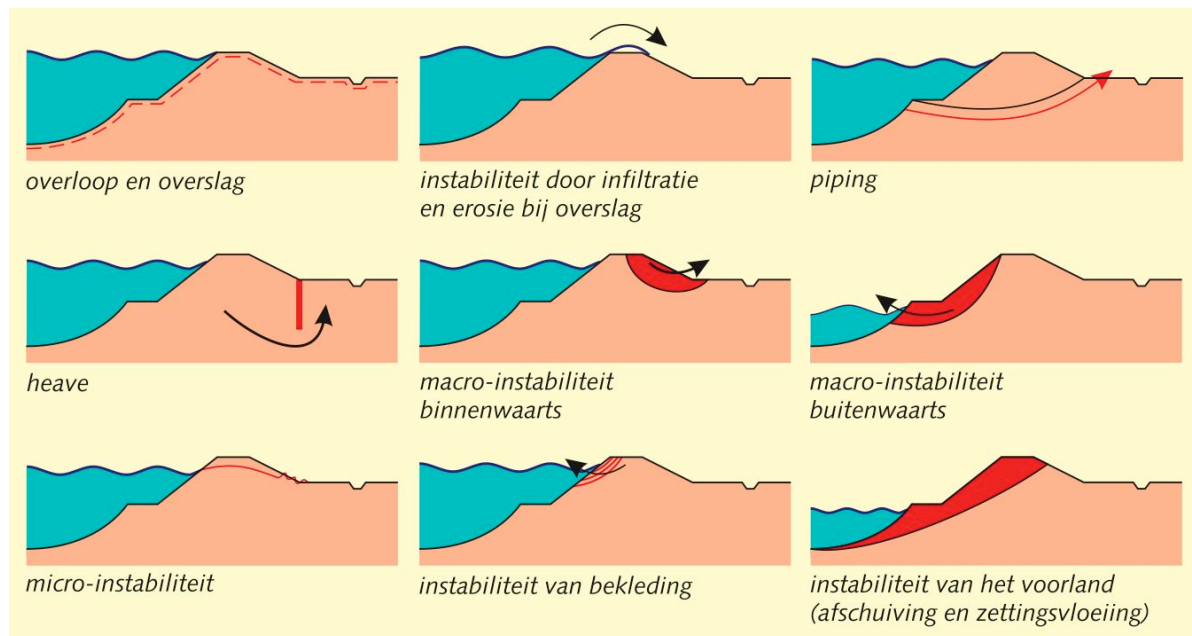
| nr | faalmechanisme | toelichting | omstandigheden |
|----|---------------------------------|--|--|
| 1 | overloop | water loopt over dijk doordat kruin lager is dan waterstand | stormvloed; hoogwater |
| 2 | overslag | golven slaan over kruin en zorgen voor een te groot overslagdebiet | stormvloed; hoogwater |
| 3 | macro-instabiliteit binnentalud | delen van dijklichaam schuiven af | langdurig hoogwater; hoge freatische lijn; beschadiging bekleding buitentalud |
| 4 | macro-instabiliteit buitentalud | delen van dijklichaam schuiven af | snelle waterstandsval; aantasting voorland |
| 5 | horizontaal afschuiven | dijk verschuift in zijn geheel | hoogwater; langdurige droogte; verandering tegendruk |
| 6 | erosie binnentalud of kruin | bekleding erodeert door overlopend water en vaak infiltratie | hoogwater |
| 7 | erosie bekleding buitentalud | bestorting of steenzetting instabiel | storm; extreme stroming; kruiend ijs; aanvaring |
| 8 | micro-instabiliteit | zand in dijk kern spoelt uit | hoogwater; ratten |
| 9 | piping | zand onder dijk spoelt uit | hoogwater |
| 10 | heave | verweken van zand achterland/uitspoelen | hoogwater |
| 11 | opbarsten | water door zandlaag drukt kleilaag achter dijk omhoog | hoogwater |
| 12 | zettingvloeiing of liquefaction | zandlagen (kust en rondom dijk) verliezen samenhang | trillingen: klappen door grote golven, aardbeving, explosie |
| 13 | beschadiging | samenhang wordt aangetast | natuur: ijsgang, omver waaien bomen, aardbeving; dier: wormen, ratten, konijnen; mens: aanvaring, explosie, sabotage, werkzaamheden, lekkende leiding, onoordeelkundig gebruik bekleding |

tabel 1 Faalmechanismen en de omstandigheden waaronder ze voorkomen.

Faalmechanismen zijn sterker gecorreleerd dan op het eerste gezicht uit deze opsomming blijkt. De faalmechanismen 1 (overloop) en 2 (overslag) kunnen leiden tot faalmechanisme 6 (erosie binnentalud of kruin) en soms tot bezwijkmechanisme 3 (macro-instabiliteit binnentalud). Daarnaast is voor het wegspoelen van zand (9, piping) het opbarsten van de klei/veenlagen (11) nodig om een opening te creëren, dus ook deze faalmechanismen zijn gecorreleerd.

Merk voorts op dat het Engelse *heave* de juiste vertaling is van *opbarsten*, terwijl de Dienst Weg- en Waterbouwkunde met *heave* iets anders bedoelt: het verweken van het achterland, uitspoelen van zand door een grondwaterstroming omhoog. Daarmee zijn in het

Nederlands de termen heave (faalmechanisme 10) en opbarsten (11) verschillende mechanismen.



figuur 2 Faalmechanismen van dijken en dammen volgens het *Voorschrift Toetsen op Veiligheid* [8]. De diagrammen komen op de volgende manier overeen met tabel 1: rij 1: 1 overloop en 2 overslag; 6 erosie binnentalud of kruin, 9 piping; rij 2: 10 heave, 3 macro-instabiliteit binnentalud, 4 macro-instabiliteit buitentalud; rij 3: 8 micro-instabiliteit, 7 erosie bekleding buitentalud, 12 zettingsvloeiing of liquefaction en 5 afschuiving. (© Rijkswaterstaat DWW)

Stefan van Baars meldt in zijn artikel *Causes and failure mechanisms of historical dyke failures in the Netherlands* [4] op basis van een historische analyse van 337 gevallen van dijksfalen dat in tweederde van de gevallen de erosie van het binnentalud, vooral door overloop en overslag, het dominante faalmechanisme was, gevolgd door beschadiging door ijsgang in 11% van de gevallen. Ijs stuwde het water op, waarna de dijk beweek, meestal door de hogere waterstand en soms door een beschadigde kruin. Dit was vooral in de 'kleine ijstijd' rond de zeventiende eeuw; door klimaatverandering en het koelwater van electriciteitscentrales is ijsvorming op rivieren vrijwel verleden tijd. Het *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5] meldt in § C.2.2 dat zowel bij de watersnoodramp van 1916 als die van 1953 het faalmechanisme overslag de belangrijkste oorzaak voor het bezwijken van de dijken was en dat de laatste tien jaar, na overlast door te veel regenval, wateroverlast door overlopend water het meest voorkwam.

3.3 Faalmechanismen in relatie tot remote sensing

Een faalmechanisme is op zich geen waarneming. Als het mechanisme daadwerkelijk plaatsvindt, treedt het op een of andere manier aan het licht. In veel gevallen zijn er *indicatoren* voor faal- of bezwijkmechanismen en daarvan kunnen weer *inspectieparameters* worden afgeleid: zie § 3.4. Deze paragraaf blijft dicht bij de faalmechanismen zelf om te analyseren welke relatie er met remote sensing te leggen is.

Faalmechanismen kunnen in verband gebracht worden met de geotechnische en geometrische *basiselementen* van dijken als hoogte, helling, type bekleding, opbouw en grondsterkte: zie tabel 2. Deze basiselementen of parameters vormen de sleutel tot de waarneembaarheid met remotesensingtechnieken.

| basiselementen → | | hoogte | helling | type bekleding | kwaliteit bekleding | opbouw dijk-kern | ondergrond | inhomogeniteit | doorlatendheid | grondsterkte |
|------------------|---------------------------------|--------|---------|----------------|---------------------|------------------|------------|----------------|----------------|--------------|
| nr | faalmechanisme | | | | | | | | | |
| 1 | overloop | ● | | | | | | | | |
| 2 | overslag | ● | ● | ● | | | | | | |
| 3 | macro-instabiliteit binnentalud | ● | ● | | | ● | ● | | ● | ● |
| 4 | macro-instabiliteit buitentalud | ● | ● | | | ● | ● | | ● | ● |
| 5 | horizontaal afschuiven | ● | ● | | | | ● | | | ● |
| 6 | erosie binnen/kruin | | ● | ● | ● | | | | | |
| 7 | erosie bekleding buitentalud | | | ● | ● | | | | | |
| 8 | micro-instabiliteit | | | ● | ● | ● | | | | |
| 9 | piping | | | | | | ● | ● | ● | |
| 10 | heave | | | | | | ● | ● | ● | |
| 11 | opbarsten | | | | | | ● | ● | ● | |
| 12 | zettingvloeiing | | | | | | ● | ● | ● | |
| 13 | beschadiging | | | ● | ● | ● | | | | |

tabel 2 Faalmechanismen en hun relatie met basiselementen van waterkeringen. Dit is een goed hulpmiddel om de inzetbaarheid van remotesensingtechnieken te beoordelen.

Op twee verschillende manieren kan remote sensing bijdragen tot de detectie van faalmechanismen:

1. door de oorzaken waar te nemen (vooraf);
2. door de gevolgen waar te nemen (tijdens of achteraf).

Nemen we als voorbeeld piping. Om de *oorzaak* te berekenen zijn, naast de waterstandsverschillen, drie indicatoren nodig:

1. ondergrond: korrelverdeling (hoe makkelijk stromen kleine korreltjes tussen de grote door?);
2. inhomogeniteit (de zwakste plek);
3. doorlatendheid.

Als deze drie indicatoren kunnen worden waargenomen, kan vooraf worden berekend of het bij een groot waterstandsverschil mis gaat. Het probleem met de eerste benadering – het waarnemen van de oorzaken – is dat de ondergrond en de doorlatendheid niet of moeilijk zijn waar te nemen met remotesensingtechnieken. De inhomogeniteit – de slechtste plek – kan mogelijk wél met remotesensingtechnieken waargenomen worden via andere

indicatoren oftewel verklikkers: bijvoorbeeld in de vorm van zettingsverschillen in de tijd of hoogteverschillen in het maaiveld. Daarmee kan de plek met de grootste kans op bezwijken mogelijk weliswaar worden opgespoord, maar of piping daadwerkelijk gaat optreden blijft ongewis.

Het *gevolg* van piping is waarneembaar door het optreden van zandkraters, natte plekken, verandering in vegetatie, een verkleurde wolk in het slotwater, uitstromend water, enzovoort. De in § 3.4 te bespreken indicatoren behoren tot deze categorie. Het nadeel van het waarnemen van het gevolg in het geval van piping is dat het pas wordt waargenomen als het mechanisme zijn schadelijke werk al doet. Het is dan al te laat om preventief op te treden.

De waarneembaarheid verschilt per faalmechanisme. In het geval van bijvoorbeeld overloop is de enige parameter uitstekend waar te nemen: de hoogte, en wel vóóraf. Bovendien heeft de remotesensingtechniek laseraltimetrie zich hiervoor reeds bewezen. In het geval van het faalmechanisme golfoverslag gaat het om de parameters hoogte, helling en type bekleding en ook deze zijn goed waarneembaar. Hiermee is, als de golfcondities bekend zijn, door waterbouwkundige ingenieurs uit te rekenen of er teveel golven overslaan.

Niet alleen de hoogte, maar ook de helling is belangrijk en goed waarneembaar. De helling bepaalt namelijk de kans op afglijden (macro-instabiliteit oftewel macro-bezwijken, 3 en 4). Daarnaast bepaalt de helling de breedte van de dijk en beïnvloedt daarmee de kans op piping en opbarsten, immers hoe flauwer de helling, hoe breder de dijk en hoe langer de kwelengte van het water onder de dijk door.

In het geval van andere faalmechanismen zijn niet alle parameters waarneembaar. De opbouw van de dijkkern (zand of klei) is niet waarneembaar, waardoor het faalmechanisme micro-instabiliteit (8) niet met zekerheid voorspeld kan worden. Als echter op een andere manier bekend is dat er zand in de kern zit, dan is het nagaan van de kwaliteit van de kleibekleding en de binnentalubbekleding goed mogelijk.

Bij enkele faalmechanismen zijn de meeste parameters niet of moeilijk waarneembaar, zoals bij macro-bezwijken (3 en 4): de opbouw van de dijkkern, de ondergrond, de doorlatendheid en de grondsterkte. Al in het *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5] (bijlage C) wordt opgemerkt dat belangrijke parameters moeilijk waarneembaar zijn. De diagnose zal moeten worden gebaseerd op de wel waarneembare parameters hoogte en helling.

Dit geeft het belang aan van kennis van de opbouw van de dijk en van historische gegevens als wijzigingen aan de dijk of bijvoorbeeld het verwijderen van een oude sluis. Dergelijke ingrepen beïnvloeden de stabiliteit van het dijklichaam en de ondergrond en historische gegevens daarover verbeteren de diagnose en prognose van de toestand van de waterkering.

Een goede methodiek voor het vooraf in kaart brengen van het risico op verschillende faalmechanismen is het waarnemen van verschillen. In de tijd gaat het om *mutatiedetectie*, in ruimte bijvoorbeeld om hoogteverschilmetingen of contrastbepalingen. Voor de geometrische parameters hoogte en helling (en ook verplaatsing) kan mutatiedetectie geschieden door afzonderlijke hoogtemetingen van elkaar af te trekken, wat niet zonder risico is gezien de fouten in de bepaling van absolute hoogten. Radarinterferometrie registreert hoogteverschillen in één keer. Zettingsverschillen – hoogteverschillen in ruimte – kunnen een goede indicatie zijn van locaties met de zwakste klei- en veenlagen. Bij grote zettingen is de kans op piping relatief gering, maar is door de slappe grond de kans op macro-instabiliteit verhoogd. Ook oude zandkreekruggen kunnen met

hoogteverschilmetingen worden opgespoord. Op dergelijke locaties zal de kans op piping verhoogd zijn, terwijl macro-bezwijken door het stevige zand als ondergrond juist minder waarschijnlijk is.

Bij Wilnis was de dijk in 2001 al eens overstroomd, waardoor een zettingsverschil optrad. De plek met de grootste verzakking heeft het meest losse en zwakke veen en dat droogt als eerste uit. Daardoor kan deze indicator van groot belang zijn.

Ook mutaties in de vorm van relatief meer dor gras, kwelplassen op het gras en beschadigde stortbekleding of steenzettingen geven een indicatie van een zwakke plek aan. Dergelijke verschijnselen geven niet beslist een indicatie dat de dijk dreigt te falen, maar geven wel aanleiding tot verhoogde waakzaamheid en een intensere visuele inspectie van die plek. Sommige indicatoren, zoals eerder genoemd voorbeeld met betrekking tot piping, met zichtbare kraters e.d., geven natuurlijk wel een rechtstreekse indicatie van falen.



figuur 3 Een nauwelijks 30 cm boven het boezempeil uitstekende boezemkade keert constant 3,60 meter water uit een duizenden hectare grote polder. Dit zijn de Drecht (peil $-0,6$ m t.o.v. NAP) en de droogmakerij de Groote Heilige-Geestpolder ($-4,2$ m NAP) in de richting van de katholieke kerk van Leimuident. (© Swartvast – Rens Swart)

3.4 Indicatoren en inspectieparameters

Een faalmechanisme is op zich geen waarneming. Het mechanisme treedt aan het licht door middel van indicatoren, bijvoorbeeld een verlaging van de kruinhoogte, ontbrekende zetstenen, slecht gras of uittredend modderwater. Deze indicatoren treden op bij een bepaalde belasting of omstandigheid, bijvoorbeeld hoogwater, of zijn waarneembaar buiten deze omstandigheid en dan als potentieel risico aanwijsbaar, bijvoorbeeld een verlaging van de kruinhoogte.

Het rapport *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* [43] somt voor verschillende typen waterkeringen de indicatoren op, onderverdeeld in zwakte-indicatoren en bezwijkindicatoren. Ze zijn afkomstig uit het *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5]. Zoals in de vorige paragraaf is opgemerkt, leveren indicatoren soms pas informatie als het faalmechanisme bezig is zijn schade aan te richten. Daarnaast zijn veel belangrijke parameters voor faalmechanismen niet of moeilijk waarneembaar, zoals de ondergrond en de opbouw van de waterkering. Men moet zich als men zich richt op indicatoren realiseren dat men slechts een deel van de noodzakelijke informatie bekijkt.

Een andere, nog praktischer vorm van grootheden die kunnen worden waargenomen om informatie over de toestand van een waterkering te krijgen, zijn *inspectieparameters*. Inspectieparameters zijn de aspecten waarnaar een inspecteur bij zijn visuele inspectie kijkt. Het rapport *Informatiebehoefteinventarisatie dijkdeformatie/waterkeringbeheer* [52] heeft deze geïnventariseerd door vraaggesprekken met 18 waterkeringbeheerders en literatuurstudie en onderscheidt 46 verschillende inspectieparameters. Dit rapport is onder meer waardevol omdat de parameters zoveel mogelijk zijn gekwantificeerd en een oordeel over de prioriteit hebben meekregen aan de hand van de mate van kwantificering en de mate waarin de parameter door de ondervraagden genoemd werd.

In bijlage B wordt ter illustratie een deel van de elders genoemde indicatoren en inspectieparameters opgesomd en in verband gebracht met faalmechanismen. Om het aanbod van remotesensingtechnieken werkelijk op de vraag af te stemmen, zouden de indicatoren moeten worden gekwantificeerd. Dit is voor een kleine selectie in § B.2 van bijlage B ook gedaan: de eisen die kunnen worden gesteld aan de geometrische indicatoren hoogte, profiel en verzakking zijn daar gekwantificeerd, gebaseerd op de veel uitgebreidere specificaties van het rapport *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53]. Een poging faalmechanismen en indicatoren te relateren aan beschikbare remotesensingtechnieken wordt gedaan in bijlage D van *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5], overgenomen in *Een overzicht van meettechnieken* [43].

Een verband tussen de begrippen ‘indicator’ en ‘inspectieparameter’ wordt in geen van de genoemde rapporten gelegd. Het lijkt of het begrip ‘inspectieparameter’ de vertaling is van wat bij inspectie zichtbaar is van een ‘indicator’ voor een faalmechanisme. Sommige indicatoren zijn aan verschillende inspectieparameters af te lezen.

In het eindrapport van het project *Grip op kwaliteit* [56] wordt het begrip *faalmodus* gekoppeld aan een faalmechanisme en daaraan zijn *beoordelingsaspecten*, zoals bijvoorbeeld erosiebestendigheid, gekoppeld (§ 6.1). Wat voor onderhavig project van belang is, is dat het rapport *Grip op kwaliteit* in bijlage 7 een zeer uitgebreide lijst met inspectieparameters bevat. De uitgebreide tabellen met inspectieparameters in het rapport *Informatiebehoefteinventarisatie dijkdeformatie/waterkeringbeheer* [52] worden in bijlage 7 van *Grip op kwaliteit* vervolledigd, ook met het oog op het opzetten van een

digitaal inspectie-ondersteunend systeem (binnen het zusterproject *Digispectie*). Daarbij is onderscheid gemaakt naar type waterkering, de zone daarbinnen en het element daarvan.

Een ander element dat het project *Grip op kwaliteit* [56] waardevol maakt voor de toepassing van remotesensingtechnieken, is dat er een uitgebreid beeldarchief is aangelegd met shadebeelden. Verwacht mag worden dat aanbieders van remotesensingtechnieken hierdoor letterlijk een beter 'beeld' krijgen van wat de beheerder nu werkelijk wil kunnen opmerken.



figuur 4 De Drechkade nabij Leimuiden naar het zuiden gezien. De polder op de voorgrond ligt tussen de Haarlemmermeerpolder en de Grootte Heilige-Geestpolder. De kade ligt op zo'n $-0,2$ m NAP, het maaiveld van de polder op $-4,3$ m. (© Swartvast – Rens Swart)

3.5 Conclusie

Voor de beoordeling van de inzetbaarheid van remotesensingtechnieken als hulpmiddel bij inspectie van waterkeringen is een goed begrip van de onderliggende faalmechanismen belangrijk (§ 3.2). Een analyse laat zien in welke mate en in welke combinatie faalmechanismen leiden tot mogelijk waarneembare aspecten (§ 3.3). Een vertaling daarvan naar indicatoren geeft aan hoe faalmechanismen aan de oppervlakte treden, terwijl inspectieparameters aangeven waar bij inspectie van waterkeringen daadwerkelijk op gelet

wordt (§ 3.4). Deze indicatoren en inspectieparameters kunnen worden gekwantificeerd om aanbieders van remotesensingtechnieken en de waterkeringbeheerders die deze technieken moeten selecteren zoveel mogelijk inzicht te geven in de voorwaarden voor een zo goed mogelijke aansluiting van aangeboden remotesensingtechnieken op de noden van het waterkeringbeheer. Daarbij kunnen de opsommingen en schadebeelden elders in de literatuur behulpzaam zijn vraag en aanbod van remotesensingtechnieken optimaal op elkaar te laten aansluiten. De bestaande opsommingen laten echter belangrijke faalmechanismen onderbelicht omdat deze moeilijk waarneembaar zijn.

4 Het inspectieproces in relatie tot remotesensingtechnieken

4.1 Inleiding

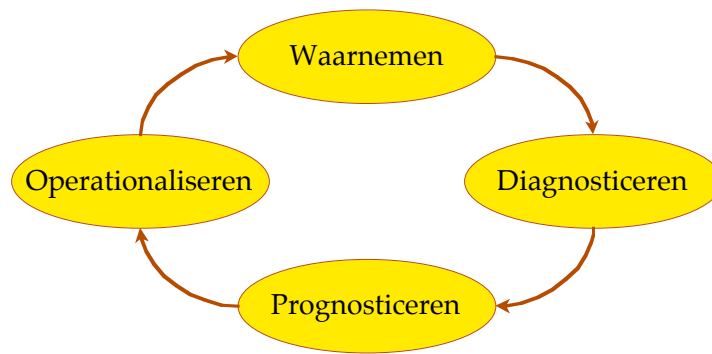
Het project *Verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie van waterkeringen* heeft tot doel de waterkeringbeheerder een handreiking te bieden voor de toepassing van remotesensingtechnieken in zijn processen. Dit rapport sluit aan bij het kader dat is ontwikkeld in het programma *Verbetering Inspectie Waterkeringen* en hanteert de opdeling van het inspectieproces in de vier deelprocessen waarnemen, diagnosticeren, prognosticeren en operationaliseren. Om hierop verderop in dit hoofdstuk te kunnen aansluiten en dit rapport zelfstandig leesbaar te maken, wordt dit in § 4.2 toegelicht. Omdat in praktijk de werkprocessen van de waterkeringbeheerder vaak een andere indeling kennen en de aansluiting bij de praktijk cruciaal is voor het slagen van het programma, worden in § 4.3 de in § 4.2 genoemde inspectiedeelprocessen gerelateerd aan de werkprocessen van de waterkeringbeheerder. In § 4.4 wordt de wijze beschreven waarop in een zusterproject de inspectiedeelprocessen zijn uitgewerkt tot een generieke beschrijving van de stappen in een gestandaardiseerd inspectieproces in de vorm van een reeks logisch geordende activiteiten, met elk hun voorwaarden.

Daarmee is het fundament gelegd voor de aansluiting van de toepassing van remotesensingtechnieken op het inspectieproces. De beschrijving daarvan in de vorm van een tabel met activiteiten en voorwaarden wordt in § 4.5 uitgewerkt voor de casus laseraltimetrie. Samen met de tabellen in bijlage A biedt dit naar verwachting een goede kapstok voor de toepassing van andere remotesensingtechnieken. In § 4.6 worden aanvullende conclusies over de toepassing van remotesensingtechnieken in het algemeen in het inspectieproces van waterkeringen geformuleerd.

4.2 De opdeling van het inspectieproces in vier deelprocessen

Het programma *Verbetering Inspectie Waterkeringen* heeft onder meer tot doel de inrichting en uitvoering van visuele inspecties te stroomlijnen en het inspectieproces eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar te maken. Eén van de manieren om het inspectieproces zuiverder te maken is het opdelen van het inspectieproces in vier deelprocessen. Dit conceptuele model wordt voor het eerst beschreven in het rapport *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Stroomlijning van inrichting en uitvoering van inspecties* ([42], § 2.2.3).

De vier deelprocessen vormen een cyclus: zie figuur 5. Per deelproces kunnen de activiteiten worden beschreven, alsmede de criteria waaraan voldaan moet worden en de op te leveren resultaten. Daarnaast is deze procesbeschrijving een hulpmiddel om te voorkomen dat in praktijk verschillende deelprocessen met elkaar verweven raken. Door de onderverdeling in deelprocessen wordt het inspectieproces geobjectiveerd.



figuur 5 De deelprocessen van het inspectieproces.

- Met het *waarnemen* begint de inspectiecyclus. Het doel van deze stap is het verzamelen van informatie over de toestand van de waterkering. Waarnemen kan door visuele inspectie, maar ook door waarnemingstechnieken als remote sensing. In het geval van remote sensing behoort de vertaling van beeld of data naar informatie tot deze processtap.
- Met de stap *diagnosticeren* wordt de waargenomen informatie vertaald in een oordeel over de toestand van de waterkering, de diagnose. Soms zijn er normen gesteld waaraan de waarneming getoetst kan worden, bijvoorbeeld in het geval van een hoogtemeting. In praktijk realiseert niet iedere waterkeringbeheerder zich het onderscheid tussen waarnemen en diagnosticeren, maar om zuivere criteria voor de stappen van het inspectieproces te kunnen opstellen is dit wel wenselijk.
- Met de stap *prognosticeren* wordt de diagnose uit de vorige stap vertaald in een oordeel over de toestand van de waterkering in de toekomst, in het bijzonder een inschatting van zijn waterkerend vermogen. Het kan bijvoorbeeld gaan om een tekortschietende hoogte.
- In de processtap *operationaliseren* worden, indien de vorige stappen dit noodzakelijk maken, beheersmaatregelen genomen. De waterkering wordt bijvoorbeeld op hoogte gebracht.

Na operationalisatie volgt weer het waarnemen om te bezien of de waterkering aan de eisen blijft voldoen. Daarmee is de inspectiecyclus rond. In principe is de richting van de cyclus rechtsonder, maar als er tijdens de uitvoering van een processtap aanvullende informatie noodzakelijk blijkt, kan worden teruggegrepen op de vorige stap.

Deze inspectiecyclus is in figuur 5 in zijn eenvoudigste vorm gepresenteerd. Feitelijk zitten er tussen de stappen toetsen. Zo levert de stap diagnosticeren een oordeel op. Door te toetsen op dat oordeel wordt de stap prognosticeren voorwaardelijk. Immers, als de waterkering volgens de diagnose voldoet, hoeft geen prognose te worden gemaakt. De cyclus is dan na twee deelprocessen rond. Mocht het deelproces prognosticeren worden verricht, dan leidt ook deze tot een oordeel, namelijk of er operationele maatregelen noodzakelijk zijn. Deze analyse strookt met een onderdeel van een WIA-diagram in figuur 5 in het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59].²

² De genoemde toetsen zijn daar echter vervangen door een toets op de noodzaak tot verbetering en een op de noodzaak tot kortetermijnonderhoud.

4.3 De werkprocessen van de waterkeringbeheerder

4.3.1 Het belang van aansluiting bij de werkprocessen

De toepassing van remote sensing is slechts kansrijk als deze aansluit bij de processen van het waterkeringbeheer. Tijdens dit onderzoek is gebleken dat er al snel een babylonische spraakverwarring ontstaat bij het hanteren van het begrip 'processen' en daarom wordt hier voor de dagelijkse werkzaamheden van de waterkeringbeheerder de term '*werkprocessen*' gehanteerd. Vaak zijn waterschappen, zeker na de recente fusiegolf, ge(re)organiseerd langs lijnen van werkprocessen.

De onderverdeling van het inspectieproces in vier deelprocessen, zoals behandeld in de vorige paragrafen, is ingegeven door de wens inspecties qua inrichting en uitvoering te stroomlijnen. Het door elkaar lopen van bijvoorbeeld het waarnemen en het stellen van de diagnose kan daarmee worden voorkomen. In de praktijk van de waterkeringbeheerder is deze onderverdeling echter nog niet herkenbaar.³ Het concept van de inspectiedeelprocessen bevindt zich op een ander abstractieniveau dan andere procesbeschrijvingen, bijvoorbeeld die van de werkprocessen van het waterkeringbeheerder of die van de acquisitie van remotesensinginformatie (bijlage C van dit rapport). Voor de aansluiting bij de waterkeringbeheerpraktijk is het verstandig de verbinding te leggen tussen de inspectiedeelprocessen uit § 4.2 en de werkprocessen. Dat gebeurt in deze paragraaf.

4.3.2 Een opsomming van de werkprocessen van de waterkeringbeheerder

In de literatuur zijn verschillende opsommingen te vinden van de werkprocessen van het waterkeringbeheer. In het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] worden verschillende inspectietypen uitgewerkt. Dit rapport laat tevens zien in hoeverre de Waterschapsinformatiearchitectuur (WIA) en de Uniformering Primaire Processen (UPP) van Rijkswaterstaat de waterkeringbeheerprocessen beschrijven. In de *Informatiebehoefteinventarisatie waterkeringbeheer/dijkdeformatie* [52] dat de toenmalige Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat met Infram onder 18 waterkeringbeheerders uitvoerde, wordt de informatiebehoefte gestructureerd met behulp van vijf onderscheiden processen.

Op grond van de inventarisatie van de literatuur en gesprekken in de praktijk, kan de volgende opsomming van te onderscheiden processen in het waterkeringbeheer worden gepresenteerd.

1 *Dagelijkse inspectie*

Globale, in het algemeen visuele inspectie, gericht op het signaleren van beschadigingen als gevolg van gebruik en onregelmatigheden als gevolg van veroudering van de kering. Meestal planmatig, soms naar aanleiding van signalen van burgers of medewerkers. Het gaat hier vooral om het inspectiedeelproces waarnemen.

³ Het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] merkt bij de audits op de feitelijk bij waterkeringbeheerders aanwezige situatie (hoofdstuk 6) op: "De indeling in deelprocessen is in de praktijk niet aanwezig."



figuur 6 De inspecteur aan het werk (© Rijkswaterstaat / STOWA / BCC; foto uit *Handleiding Digispectie*)

2 Voor- en najaarsinspectie

Uitgebreide inspectie, al dan niet gecombineerd met de schouw. De voorjaarsinspectie is gericht op het verkrijgen van informatie over de onderhoudstoestand van de waterkering (beïnvloed door de voorliggende winterperiode). De najaarsinspectie is gericht op het verkrijgen van informatie over de vraag of de waterkering voldoende veilig is. De schouw heeft eerder een handhavend karakter en vestigt mede het gezag m.b.t. de keur tegenover burgers.

3 Inspectie tijdens bijzondere omstandigheden⁴

Bijzondere omstandigheden zijn belastingomstandigheden voor de waterkeringen die afwijken van het normale patroon. Oorzaak van dergelijke omstandigheden kunnen bijvoorbeeld extreme neerslag, hoge waterstanden, extreme droogte, strenge vorst of ijsgang zijn. Dergelijke gebeurtenissen zijn niet voorspelbaar en laten zich daardoor niet vangen in de normale beleidscyclus, al is wel te voorzien dat ze voorkomen.

⁴ In het spraakgebruik heet het “onder bijzondere omstandigheden”, maar het gaat hier niet zozeer om omstandigheden die de inspectie zelf moeizaam laten verlopen, maar om de omstandigheden die het noodzakelijk maken dat de inspectie plaatsvindt: vandaar “tijdens bijzondere omstandigheden”.

4 *Inspectie tijdens calamiteiten*

Inspectie tijdens plotseling optredende gebeurtenissen met grote en vooral plaatselijke gevolgen, zoals waterkeringen die dreigen te bezwijken. Dit type inspectie valt buiten het kader van het programma Verbetering Inspectie Waterkeringen.

5 *Vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid*

De wettelijk voorgeschreven vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen is bij veel waterschappen als afzonderlijk proces geïmplementeerd. Een toetsing is vooral te beschouwen als diagnosticering en prognosticering, maar daarvoor zijn tevens waarnemingen nodig (die in de huidige praktijk soms speciaal hiervoor worden gedaan); de toetsingsuitkomst kan aanleiding voor een operationele actie zijn.

De genoemde werkprocessen 1 tot en met 5 zijn processen zoals deze binnen de organisatie worden benoemd als herkenbaar inspectieproces. Elk van deze processen is op te delen in waarnemen – diagnosticeren – prognosticeren – operationaliseren, al is deze opdeling in praktijk vooralsnog niet altijd expliciet gemaakt en ook al hebben ze elk hun eigen intensiteit en frequentie in ruimtelijke en temporele zin.

De hierna genoemde werkprocessen zijn weliswaar gerelateerd aan inspectie, maar vormen geen primair inspectieproces en laten zich niet met de inspectiedeelprocessen beschrijven.

6 *Basisinformatievoorziening*

Ten behoeve van de uitvoering van hun taken hebben waterschappen behoefte aan basisinformatie. Het verzamelen, opslaan en ontsluiten van basisinformatie wordt steeds meer door een ondersteunende afdeling voor het gehele waterschap gedaan. Daardoor wordt de basisinformatievoorziening steeds meer als afzonderlijk werkproces binnen het waterschap gezien. Dit is een werkproces dat ondersteunend is aan de primaire inspectieprocessen genoemd in 1 t/m 5. Hieronder vallen bijvoorbeeld het opstellen van de legger, het bijhouden van het beheerregister, het bijhouden van vergunningen, het laten inwinnen van remotesensingbeelden en het beschikbaar stellen daarvan aan de organisatie. Dit heeft gevolgen voor de organisatie van het inspectieproces, omdat bijvoorbeeld het organisatieonderdeel dat is belast met de periodieke inspectie of de toetsing niet zelf voor de benodigde waarnemingen zorgt. Tegelijk wordt ook steeds meer zichtbaar dat een goede basisinformatievoorziening een onverdachte meerwaarde voor de organisatie heeft: hogeresolutiebeelden of hoogtedata worden bijvoorbeeld niet alleen voor kartering en toetsing gebruikt, maar evenzeer voor handhaving en waterbeheer.

7 *Beheer en onderhoud*

Waar de verschillende typen inspectie die onder 1–4 genoemd zijn vooral het waarnemen en het diagnosticeren en prognosticeren behelzen en overeenkomen met de betreffende inspectiedeelprocessen, zijn beheer en onderhoud de activiteiten die er het gevolg van zijn. Zij vallen voornamelijk onder het inspectiedeelproces operationaliseren.

8 *Plannen, ontwerpen en realiseren*

Het grootschalige proces van aanleg, uiteenvallend in plannen, ontwerpen en realiseren van waterkeringen (WIA) is een werkproces dat binnen het inspectiedeelproces operationaliseren valt. Dijkverbetering en groot onderhoud zijn zeker geen onderdeel van inspectie, maar kunnen er wel een gevolg van zijn.

9 *Vergunningverlening en handhaving*

De keur moet worden gehandhaafd. Niet altijd heeft dit met de instandhouding van de waterkerende functie van de waterkering te maken, soms zelfs zeer indirect. Het is een

eerder juridisch dan geotechnisch aspect. Niettemin is soms de waterkerende functie in het geding en wordt er bij de schouw en dagelijkse inspectie op gelet, waardoor het gerelateerd is aan inspectie.

¹⁰ *Natuurontwikkeling*

Bij het in kaart brengen van de inspectieparameters voor de *Informatiebehoefteinventarisatie waterkeringbeheer/dijkdeformatie* [52] bleek dat ook natuurbeheer een doelstelling van inspectie kan zijn.

4.3.3 De reikwijdte van het begrip inspectie

In praktijk hanteren de waterkeringbeheerders de term ‘inspectie’ voor werkzaamheden waarbij de waterkering ‘nauwkeurig in ogenschouw wordt genomen’, conform de definitie in *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [42]. In § 4.1 van *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] worden verschillende typen inspectie onderscheiden, te herleiden tot de werkprocessen 1 tot en met 4 hiervóór.

Deze activiteiten 1–4 zouden kunnen worden benoemd als ‘inspectie in enge zin’. Het programma Verbetering Inspectie Waterkeringen hanteert weliswaar de net genoemde definitie, maar beschouwt ook processen die een rol spelen bij de uitvoering van bovengenoemde activiteiten als inspectie.

Zo is de vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid (5 in § 4.3.2) vanuit de systematiek van de inspectiedeelprocessen een *diagnosestap* en dus onderdeel van inspectie. Het inspectiedeelproces *prognosticeren* vormt ook een onderdeel van de vijfjaarlijkse toetsing: deze zit feitelijk in de voorschriften zelf. De toetsing is feitelijk de diagnosticering en prognosticeren van eerder gedane waarnemingen. Bij veel waterkeringbeheerders wordt de toetsing niet als inspectie gezien. Tegelijk worden waterkeringbeheerders bij de wettelijke toetsing meer dan bij welke inspectie ook geconfronteerd met de expliciete scheiding van de deelprocessen waarnemen en diagnosticeren. Dit effect wordt nog vergroot doordat in geen enkel ander proces de diagnosticering zo strikt en kwantitatief is uitgewerkt.

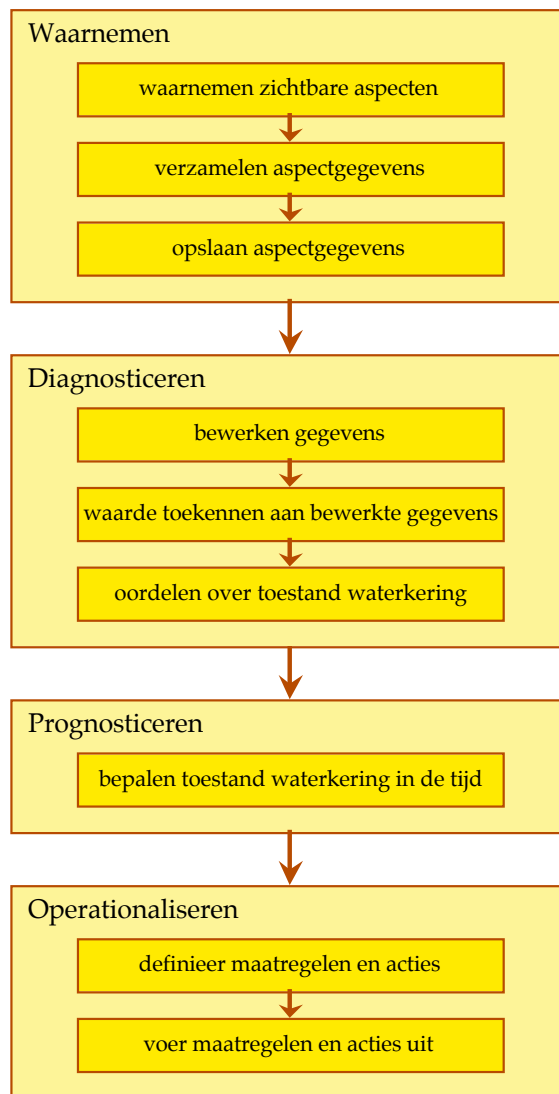
Dit maakt dat de uitvoering van de toetsing bij uitstek geschikt is om voor waterkeringbeheerders als voorbeeld te dienen om hun overige inspectieprocessen (1–4 hiervóór) ook volgens de inspectiedeelprocessen van § 4.2 in te richten. Daarmee wordt bijgedragen aan de intentie om het inspectieproces eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar te maken. Daarmee wordt het ook denkbaar dat de methodiek van de vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen in de toekomst onderdeel zal uitmaken van het reguliere inspectieproces van de waterkeringbeheerder, zowel voor de primaire als de regionale waterkeringen. Daardoor zou de wettelijk voorgeschreven vijfjaarlijkse toetsing dus feitelijk vrijwel een formaliteit worden.

Een voorwaarde voor het uitvoeren van inspectie is het beschikbaar hebben van actuele en toegankelijke basisinformatie, zoals bijvoorbeeld legger en beheerregister. Waterkeringbeheerders hebben dit veelal vaak als apart werkproces geïmplementeerd (6 in § 4.3.2), terwijl het ook als onderdeel van of ondersteunend aan inspectie kan worden gezien.

De stroomlijning van de basisinformatievoorziening en de inbedding van de vijfjaarlijkse toetsing in de reguliere inspectiepraktijk zijn er voorts mee gediend als de waarnemingen die noodzakelijk zijn voor de uitvoering van de toetsing binnen de reguliere

basisinformatievoorziening worden gedaan. Nu worden deze waarnemingen vaak nog speciaal voor dit doel gedaan.

Beheer en onderhoud (7) en plannen, ontwerpen en realiseren (8) behelzen vooral operationalisatie van eerder gedane diagnose- en prognoseresultaten. Op die wijze kunnen deze werkprocessen gerelateerd worden aan het inspectieproces. Vergunningverlening en handhaving (9) hebben maar ten dele met de waterkerende functie te maken maar handhaving wordt in het algemeen meegenomen bij inspectie. Natuurontwikkeling (10) wordt soms meegenomen bij inspectie.

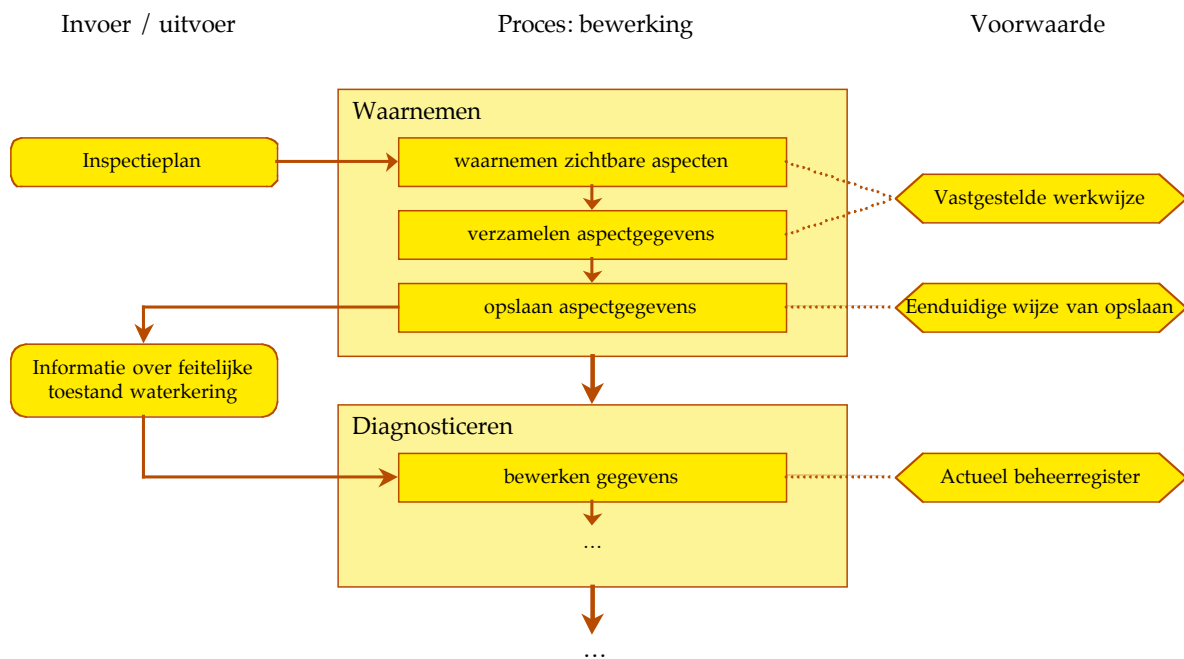


figuur 7 De indeling van het inspectieproces in deel- en subprocessen in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59].

4.4 Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen

Het project *Procesbeschrijving inspecties waterkeringen* [59] is binnen het programma Verbetering Inspectie Waterkeringen te beschouwen als een zusterproject van het onderhavige project. Het heeft tot doel de in de § 4.2 beschreven conceptuele onderverdeling van het inspectieproces in deelprocessen uit te werken tot een *generieke beschrijving* van de stappen in een gestandaardiseerd inspectieproces.

In het rapport wordt daartoe een procesbeschrijving opgesteld in de vorm van een reeks logisch geordende activiteiten. Daartoe worden eerst bestaande procesbeschrijvingen geïnventariseerd, waaronder de WIA (Waterschapsinformatiearchitectuur). Het rapport beoordeelt deze op geschiktheid en combineert ze met de opdeling van het inspectieproces in vier deelprocessen en werkt deze verder uit met enkele subprocessen: zie figuur 7. Dit mondt uit in een standaard-procesbeschrijving met voor elk deelproces invoer, uitvoer en voorwaarden. De uitvoer van een eerdere stap is de invoer van de volgende stap. In figuur 8 is het principe voor een deel van het inspectieproces weergegeven. Vervolgens wordt daarmee het inspectieproces uitgebreid en stapsgewijs beschreven, inclusief de voorwaarden. Dit gebeurt in een tabel, waarvan de structuur in tabel 3 wordt getoond.



figuur 8 In de standaard-procesbeschrijving is elk deelproces van inspectie een bewerking, waarvoor invoer nodig is. Voor de uitvoering moet aan bepaalde voorwaarden worden voldaan. De processtap levert uitvoer op die invoer is voor de volgende processtap. Dit is hier voor het eerste deel van het inspectieproces geïllustreerd.

Het rapport bevat een *generieke beschrijving*: de procesbeschrijving is onafhankelijk van het feitelijke werkproces, onafhankelijk dus van of het dagelijks inspectie, voor- en najaarsinspectie of inspectie tijdens bijzondere omstandigheden betreft. De generieke procesbeschrijving die zo is geformuleerd, moet volgens het rapport nog praktisch ingevuld

| processtap | beschrijving | checklist voorwaarden |
|------------|--------------|-----------------------|
| invoer | ... | ... |
| bewerking | ... | ... |
| uitvoer | ... | ... |
| voorwaarde | ... | ... |

tabel 3 De uitgebreide en stapsgewijze beschrijving van de stappen, inclusief de voorwaarden, worden per inspectiedeelproces in het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* gestructureerd als in deze tabel.

worden zodat de beheerder ermee uit de voeten kan. Dit is het onderwerp van een vervolgproject (zie het *Projectplan inspectieplan waterkeringen* [41]).

In § 4.5 worden de in *Procesbeschrijvingen* genoemde voorwaarden per inspectiedeelproces uitgewerkt voor de casus laseraltimetrie. In § 4.6 worden hieraan nog enige conclusies toegevoegd voor remote sensing in het algemeen.

4.5 Casus: criteria voor laseraltimetrie volgens de inspectiedeelprocessen

4.5.1 Werkwijze

Het opstellen van criteria waaraan remotesensingtechnieken moeten voldoen, willen zij helpen de inspectie van waterkeringen effectiever te maken, kan worden vergemakkelijkt door de bestudering van een casus waarmee een ruime praktijkervaring is opgedaan. Dit is het geval met laseraltimetrie.

Zoals in § 4.4 is toegelicht, is in het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] de onderverdeling van het inspectieproces in de vier deelprocessen waarnemen, diagnosticeren, prognosticeren en operationaliseren uitgewerkt tot een generieke beschrijving van de stappen in een gestandaardiseerd inspectieproces, elk met zijn eigen invoer, bewerking, uitvoer en voorwaarden. De tabelstructuur die hiervoor ontwikkeld is, is in bijlage A gebruikt om de criteria die aan het gebruik van laseraltimetrie kunnen worden gesteld in het kader van de inspectiedeelprocessen te plaatsen. De teksten in de eerste drie kolommen zijn overgenomen uit *Procesbeschrijvingen*. Daaraan zijn in de vierde kolom op basis van de ervaringen met laseraltimetrie criteria toegevoegd, refererend aan de 'checklist voorwaarden' in de derde kolom. De conclusies die daaruit voortvloeiden, worden besproken in de volgende paragrafen.

Het onderhavige project heeft sterk geprofiteerd van de inspanningen van de STOWA-werkgroep grootschalige laseraltimetrie (WGL), die voor het rapport *Operationalisatie van laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53] op basis van vele gesprekken met ervaringsdeskundigen specificaties voor een succesvolle aanbesteding van laseraltimetrie heeft opgesteld.

Een belangrijk aspect aan de ervaringen met laseraltimetrie is dat deze niet onverdeeld gunstig zijn. Feitelijk illustreert de casus laseraltimetrie niet alleen hoe een remotesensingtechniek op een operationeel niveau is gebracht en van groot belang is geworden voor verschillende werkprocessen binnen het waterkeringbeheer, maar ook dat

het geleverde product lang niet altijd goed aansluit op de precieze vraag vanuit het waterkeringbeheer en de organisatie. Juist deze moeilijkheden maken de casus interessant, omdat aan de hand daarvan de kennelijk noodzakelijke voorwaarden scherper en uitputtender kunnen worden geformuleerd.

4.5.2 Geschiktheid van de procesbeschrijving voor laseraltimetrie

De standaardbeschrijving van het inspectieproces in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] kan volgens § 4.1 van dat rapport gebruikt worden voor alle soorten inspectie die men onderscheidde (de werkprocessen 1–4 in de opsomming in § 4.3.2). Dit zijn met name visuele inspecties. Bij het bestuderen van de casus laseraltimetrie blijkt echter al snel dat het gebruik van een ondersteunende waarnemingstechniek daarmee niet zonder meer vergelijkbaar is.

Visuele inspectie is een activiteit die altijd door de waterkeringbeheerder zelf gedaan kan worden. Bij de inzet van specialistische waarneemtechnieken als laseraltimetrie is dat volstrekt niet aan de orde. Dit heeft grote consequenties voor omstandigheden en criteria voor de uitvoering van het proces. Het gaat in het algemeen om een *inkoopproces* (of algemener: *acquisitieproces*), waartoe onder meer activiteiten dienen te worden ondernomen als het opstellen van de specificaties, bestek en gunningscriteria, de aanbesteding, controle en verspreiding binnen de organisatie.⁵

Niettemin blijken de criteria zoals ze in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] ontwikkeld zijn, een prima basis te vormen voor het stellen van criteria aan laseraltimetrie. De eventueel noodzakelijke aanpassingen blijken vanzelf wel en zijn in de tabel aangegeven. Een bijvoorbeeld: de voorwaarde “personeel beschikt over voldoende hulpmiddelen voor het doen van waarnemingen en het vastleggen ervan” is duidelijk gericht op visuele inspectie, maar laat zich voor wat betreft laseraltimetrie vertalen naar eisen op het gebied van automatiseringsmiddelen voor wat betreft het eigen personeel en omdat de waarnemingen niet door eigen personeel gedaan worden vertaalt dit zich naar een uitbesteding.

De ‘vastgestelde werkwijze voor het waarnemen’ in de tabel in § A.1 van bijlage A vertaalt zich in het geval van laseraltimetrie tot het specificeren van de stappen in het inkoopproces, waartoe ook bijvoorbeeld controle behoort, plus vele aspecten die niet over de waarnemingen zelf gaan, maar over de omstandigheden en overige randvoorwaarden. De ‘beschrijving van de te verkrijgen waarnemingen’ vertaalt zich in een lijst specificaties.

Is bij de ambachtelijke visuele inspectie het waarnemen en diagnosticeren vaak nog met elkaar verweven, bij aanvullende waarnemingstechnieken als laseraltimetrie (of remote sensing in het algemeen) is dat veel minder het geval. Het gaat bij laseraltimetrie (en bij veel andere remotesensingtechnieken) om het verzamelen van basisinformatie, die door waterkeringbeheerders niet alleen voor inspectie wordt gebruikt. Naast de uitvoering van de vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid, waarbij onder meer hoogte en profiel worden vergeleken met profielen uit de legger, hetgeen als de diagnosestap van het inspectieproces kan worden gezien, wordt laseraltimetriedata ook gebruikt voor het vullen van de legger en het beheerregister. Het gaat dan in de eerste plaats om hoogtedata, maar er kan bijvoorbeeld

⁵ Een uitputtende uitwerking van de net genoemde punten is gegeven door de werkgroep grootschalig uitvoeringsproject laseraltimetrie (WGL) van stowa in het rapport *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53], waarin ook veel achtergrondinformatie over zowel de techniek als de uit oogpunt van waterkeringbeheer gewenste specificaties is te vinden.

ook een kartering op basis van de laserhoogtemetingen en de gemeten reflectie-intensiteiten worden opgenomen.

Het scheiden van waarnemen en diagnosticeren is bij remotesensingtechnieken eenvoudiger dan bij traditionele visuele inspectie omdat de inwintechiek zelf zich beperkt tot waarnemen. De hoeveelheid aspecten aan de diagnose- en prognosestappen hangt af van de toepassing, maar is in het algemeen beperkter dan de uitputtende specificatie van de waarnemingsstap. Dit blijkt voor laseraltimetrie ook uit § A.2 en § A.3 in bijlage A.

In § 4.5.3 wordt geconstateerd dat het van groot belang is dat het met laseraltimetrie te verkrijgen product zeer nauwkeurig (misschien zelfs uitputtend) wordt gespecificeerd. Deze specificaties worden gedictieerd door de precieze toepassing van het product, zowel voor het verkrijgen van basisinformatie, als om de toestand van de waterkering te kunnen diagnosticeren. In die zin dient bij het deelproces waarnemen dus vooruitgegrepen te worden naar de stap diagnosticeren. Deze terugkoppeling, die in § 4.2 al werd aangeduid, komt onvoldoende terug in het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59].

4.5.3 Conclusies waarnemen

De uitwerking van de casus laseraltimetrie in de tabellen in bijlage A, die hiervóór is toegelicht, leidt (hier voor de stap *waarnemen*) tot de volgende conclusies. In beknopte vorm zijn deze conclusies opgenomen in de conclusies van dit rapport; omwille van een hogere informatieve waarde zijn ze hieronder uitgewerkt en door kopjes toegankelijk gemaakt.

Laseraltimetrie opnemen in het inspectieplan

De invoer voor het inspectiedeelproces 'waarnemen' is het *inspectieplan*, waarin volgens het *Projectplan inspectieplan waterkeringen* [41] wordt "beschreven hoe de inspecties van alle waterkeringen ingericht en uitgevoerd zullen worden, wat ervoor nodig is [...] en wat de raming is van de daartoe benodigde middelen." De inzet van een waarnemingstechniek als laseraltimetrie zou daarom in het inspectieplan moeten worden opgenomen als een van de middelen waarmee gegevens verzameld worden, inclusief een specificatie van het op te nemen areaal, de frequentie waarmee en tijdstip waarop dit gebeurt en de daartoe benodigde middelen.

Vroege betrokkenheid belanghebbenden

Het is van groot belang dat vóór het specificatie- en aanbestedingstraject alle potentiële gebruikers binnen de organisatie betrokken worden. Het moet duidelijk worden wie (potentieel) belang heeft bij de data en met welk doel zij de data zouden willen verkrijgen. Behalve voor waterkeringbeheer hebben ook waterbeheer en in mindere mate vergunningverlening en handhaving behoefte aan precieze gegevens over hoogte of aan bijproducten als orthofotomozaïeken. De verschillende doelen waarvoor zij de hoogtedata gebruiken hebben immers consequenties voor de eisen die aan de metingen dienen te worden gesteld. Ook wordt hiermee voorkomen dat de organisatie zelf nog een bewerking op de data moet uitvoeren die niet alleen kostbaar is maar waarvoor de organisatie ook niet werkelijk is toegerust. Ook de afstemming van het moment van inwinnen op bijvoorbeeld een aanlegproject of een datarevisie kan in dit stadium worden meegenomen. Dit aspect kan worden gezien als een onderwerp dat vóór de bewerkingsstap van het inspectiedeelproces

'waarnemen' dient te geschieden en daarom is het als 'invoer' ondergebracht in de tabel in § A.1 in bijlage A.

Uitputtende specificatie

De ervaringen met laseraltimetrie wijzen uit dat het van groot belang is dat zowel het te leveren product als de omstandigheden en randvoorwaarden rond de opname en het productieproces bij de aanbesteding uitputtend worden gespecificeerd. Het blijkt dat zowel het specificatieproces bij de opdrachtgever als het productieproces bij de aannemer nog niet dermate volwassen zijn dat met een reeks functionele eisen kan worden volstaan. Door dit specificatieproces wordt de opdrachtgever gedwongen zijn verwachtingen (of beter: die van al zijn gebruikers) te objectiveren. Ook de aannemer weet daardoor beter welk product hij dient op te leveren. Verschillen van inzicht kunnen zakelijk worden afgehandeld. De specificaties die in het rapport *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53] zijn uitgewerkt, zijn puntsgewijs opgenomen in de tabel in § A.1 in bijlage A.

Controle van het product

Een apart punt van aandacht is de controle van het geleverde product. Deze blijkt beslist noodzakelijk. In het geval van laseraltimetrie is het relatief specialistisch werk te beoordelen of het geleverde product aan de kwaliteitseisen voldoet, waarbij kennis van zowel de inwintechiek als van geostatistiek onontbeerlijk zijn. Daarnaast blijkt het van belang de aannemer te laten rapporteren over de wijze waarop hij zijn kwaliteit borgt en de precisie controleert.

Opslag, ontsluiting en beheer van data

De in de tabel genoemde voorwaarde dat het personeel voldoende hulpmiddelen ter beschikking dienen te staan, is in het geval van laseraltimetrie van groot belang. Het gaat om zeer grote hoeveelheden data, die door een groot gedeelte van de organisatie gebruikt zullen worden. Als de laserpunten zelf ter beschikking worden gesteld, gaat het hierbij al snel om terabytes.⁶ De automatiseringsomgeving dient hiervoor toegerust te zijn. Het gaat daarbij niet alleen om schijfruimte, maar ook om de capaciteit van het netwerk en die van de werkstations waarop bewerkingen worden gedaan. Daarnaast moet de programmatuur actueel en geschikt zijn om deze operaties te kunnen uitvoeren.

De kracht van laseraltimetrie en de eventuele bijproducten als optische beelden of orthofotomozaïeken is dat deze voor een groot deel van de organisatie nuttig kan zijn. Het heeft bijvoorbeeld een meerwaarde vanuit een GIS direct orthofoto's en laserdata als kaartlaag over andere aanwezige data te raadplegen. Uit oogpunt van beheer en consistentie⁷ is het verstandig alle data op één plek in de organisatie op te slaan. Dit brengt echter met zich mee dat het netwerk moet zijn toegesneden op zeer grote datastromen. Daarnaast kan de data, afgestemd op het type gebruiker, gedifferentieerd worden aangeboden.

⁶ 1 TB = 1024 GB = 1.048.576 MB = 1.073.741.824 kB = 1.099.511.627.800 B.

⁷ *Consistentie* is een begrip uit de wereld van het databankbeheer: data kan het beste op één plek beheerd worden om te voorkomen dat er kopieën ontstaan waarin verschillende (niet-consistente) wijzigingen zijn aangebracht. Ook als verschillende gebruikers tegelijk dezelfde databank wijzigen, kent een goed databankbeheer regels voor het bijwerken van de centrale databank.

Specialismen en opleidingseisen

De opleidingseisen in de tabel (in § A.1 bij 'voorwaarden') zijn specifiek voor inspecteurs bedoeld. Niettemin kunnen ook aan mensen die werken met laserdata eisen worden gesteld. In het algemeen gaat het om verschillende specialisten en verschillende afdelingen. Laserdata wordt voor verschillende toepassingen gebruikt, maar waterkeringbeheerders hebben er het grootste aandeel in. Bij de specificatie is vooral kennis over de kennisbehoefte op het gebied van het profiel van waterkeringen van belang, maar ook kennis van de inwintechiek. Deze laatste kan niet altijd op dezelfde afdeling gevonden worden en kan vaak beter extern ingehuurd worden (zie verderop). Voor de aanbesteding en gunning is specifieke kennis nodig, buiten kennis van waterkeringen. Voor de bewerking en beschikbaarstelling van de data aan de organisatie zijn automatiseringsdeskundigen, met name op het gebied van GIS en CAD, nodig.

Inhuur externe specialisten

Een groot deel van de problemen met laseraltimetrie had kunnen worden voorkomen door de specificaties nog aanmerkelijk scherper en gedetailleerder te stellen dan tot dan toe al gebeurde. Hoe uitputtender echter de specificaties, hoe hoger het kennisniveau dat nodig is. Dit kennisniveau kan en hoeft vaak niet binnen de eigen organisatie aanwezig te zijn. Inhuur van externe specialisten is dan noodzakelijk. Vaak zijn adviseurs met verschillende, elkaar aanvullende specialismen gewenst, zoals op het gebied van de inwintechiek, de toepassing binnen het waterkeringbeheer of (Europese) aanbestedingsprocedures. Ook voor het uitvoeren van de controle en de terrestrische metingen die daarvoor nodig zijn kunnen specialisten worden ingehuurd, evenals voor specifieke bewerkingen van de data zoals bijvoorbeeld kartering, hoogteverschilanalyse en mutatiedetectie.

4.5.4 Conclusies diagnosticeren

De uitwerking van de casus laseraltimetrie voor de stap *diagnosticeren* in de tabel in § A.3 van bijlage A leidt tot de volgende conclusies. In beknopte vorm zijn deze conclusies opgenomen in de conclusies van dit rapport; omwille van een hogere informatieve waarde zijn ze hieronder uitgewerkt en door kopjes toegankelijk gemaakt.

Uitwerking diagnosestap voor laseraltimetrie beknopter dan waarnemingsstap

In het inspectiedeelproces *diagnosticeren* wordt de waargenomen of verzamelde informatie vertaald in een oordeel over de toestand van de waterkering. Zoals in § 4.5.2 is beschreven, is bij laseraltimetrie de waarneming duidelijk van de diagnose gescheiden. De mate waarin de diagnosestap kan worden uitgewerkt, hangt af van de toepassing van laseraltimetriedata, maar is in het algemeen beknopter dan de voor laseraltimetrie uitputtend gespecificeerde waarnemingsstap.

De diagnostiek is een complex proces. Deze complexiteit is echter eerder een gevolg van de complexiteit van diagnostiek in generieke zin, dan van aspecten die met laseraltimetrie te maken hebben.

Goed gespecificeerde waarnemingsstap vergemakkelijkt diagnose

De invoer voor de diagnosestap is de uitvoer van de waarnemingsstap, voor zover er althans bij het diagnosticeren geen aanvullende informatie wordt gebruikt. In de vorige paragraaf is al uitgebreid stilgestaan bij het belang van goed gestandaardiseerde, toegankelijke en

consistente opslag van de lasermetingen, met daarbij een arsenaal aan geschikte, actuele en toegankelijke programmatuur en andere hulpmiddelen. Als aan deze voorwaarden is voldaan, voldoet de data aan de voorwaarden voor gebruik bij de diagnostiek.

Beschikbaarheid overige data analoog aan visuele inspectie

In de diagnostiek worden niet alleen de waarnemingen gebruikt die met laseraltimetrie zijn gedaan. Terrestrische metingen en gegevens over de ondergrond en opbouw van de waterkering zijn bijvoorbeeld eveneens nodig. Daarin verschillen de voorwaarden voor de casus laseraltimetrie niet van die voor visuele inspectie.

Belang van inzicht in de relatie tussen hoogtedata en faalmechanismen

Het fundament onder de procedure en methodiek om informatie uit laseraltimetrische data af te leiden is een goed begrip van over welke faalmechanismen laserdata informatie kan geven en hoe deze informatie uit laserdata kan worden afgeleid. Het rapport *Procesbeschrijvingen* gaat uit van het toetsen van verkregen informatie aan vastgestelde technische normen, zo objectief en kwantitatief mogelijk. Zoals hieronder besproken wordt, is voor de primaire waterkeringen het *Voorschrift Toetsen op Veiligheid* [8] daarvan een gedegen uitwerking. *Procesbeschrijvingen* meldt dat, indien technische normen niet aanwezig zijn, op basis van expertise een kwalitatief oordeel geveld moeten worden.

Het is echter van belang dat men zich bij het afleiden van informatie uit bijvoorbeeld laseraltimetrische data voortdurend bewust is van de onderliggende faalmechanismen. Door de gerichtheid op normen en bijvoorbeeld de vertaling daarvan naar dwarsprofielen, bestaat de kans dat situaties die op een andere manier duiden op een dreigend falen van de waterkering niet worden opgemerkt. Zowel in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* als in de data-analysepraktijk zouden faalmechanismen een belangrijkere rol mogen spelen.⁸

Gebruik van het Voorschrift Toetsen op Veiligheid als kwantitatieve methodiek

De in *Procesbeschrijvingen* vermelde voorwaarde van een “vastgestelde procedure en methodiek voor het bepalen van de staat van de kering” bestaat voor zover het de primaire waterkeringen betreft in de vorm van het *Voorschrift Toetsen op Veiligheid* (vtv) [8]. Aan de hand van het type waterkering, de geometrie, de opdeling, de bekleding en de grondopbouw enerzijds en de belasting anderzijds is daar de methodiek van toetsing gedetailleerd uitgewerkt. De diagnostiek en de prognostiek zijn feitelijk vertaald in de daar vastgelegde normen. Niettemin is er ook in de vtv ruimte voor interpretatie en uiteindelijk voor het beheerdersoordeel.

Diagnostiek op basis van laseraltimetriedata bestaat in praktijk vrijwel volledig uit het genereren van profielen, hetzij in lengterichting van de kering over de kruin, hetzij dwars op de waterkering van teen tot teen. In het eerste geval gaat het om een hoogtemeting, in het tweede geval wordt het gegenereerde profiel met het leggerprofiel vergeleken. Beide toetsen worden uitgevoerd volgens de methodiek van het *Voorschrift Toetsen op Veiligheid*.

Nu laserdata met (veel) meer dan één meetpunt per vierkante meter kan worden opgenomen, ontstaat een waarnemingsverzameling die veel meer informatie biedt dan de

⁸ Meer informatie over faalmechanismen is te vinden in hoofdstuk 3 van dit rapport. In noot 1 werden verschillende referenties genoemd.

vtv vereist. De vtv (en de praktijk van de waterkeringbeheerder) gaat nog sterk uit van een beschouwing van profielen. Weliswaar kunnen deze op een representatief punt genomen worden, maar feitelijk wordt daarbij de dichtheid van de waargenomen informatie sterk onderbenut.⁹ De toegenomen rekenkracht staat het benutten van deze grote hoeveelheid informatie niet in de weg. Het is bijvoorbeeld mogelijk stabiliteitsberekeningen uit te voeren voor een veel groter aantal profielen, zoals ook in § 6.4 van *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53] wordt geconcludeerd.

De uitvoering van de toetsing volgens de systematiek van de vtv is volledig deterministisch, dat wil zeggen dat het stochastisch karakter van waarnemingen en modellen geen rol speelt. Weliswaar neemt de vtv bijvoorbeeld marges in acht, maar bij de berekening van de uitkomst van de toetsing spelen de beperkte precisies van de bijdragende grootheden geen rol. De kruinhoogtemarge, bijvoorbeeld, is een verschil tussen kruinhoogte en toetspeil met inachtneming van toeslagen en dit verschil mag, om twee gevallen te noemen, ten hoogste 0,3 of 0,5 meter zijn. In deze marge zitten waarschijnlijk onzekerheden verwerkt, bijvoorbeeld in het toetspeil, dat uit de met stochastische variaties behepte berekening van de hydraulische randvoorwaarden voortkomt. De toets zelf is echter volstrekt niet-probabilistisch. Dat doet eigenlijk aan het karakter van metingen en toetsen afbreuk. Binnen het project Veiligheid Nederland in Kaart (vNK) en bij het berekenen van de hydraulische randvoorwaarden wordt overigens wel een probabilistische benadering gehanteerd.

Ook voor het stellen van precisie-eisen aan laserhoogtemetingen en het beslissen over acceptatie van het geleverde product is het verstandig het stochastisch karakter van metingen in ogenschouw te nemen.

De vtv hanteert uitgebreide toetsregels voor de hoogte van de waterkering. Dit geldt niet voor de vorm van het talud, terwijl deze een belangrijke rol speelt bij bijvoorbeeld de toetsing op het overslagdebiet. Het talud wordt in de vtv minder op voorgrond gesteld dan zijn belang feitelijk zou rechtvaardigen. De hoge dichtheid van laserhoogtemetingen laat het overigens toe tamelijk gedetailleerde uitspraken te doen over het talud.

Methodiek voor primaire versus regionale waterkeringen

De in de *Procesbeschrijvingen* omschreven voorwaarden voor een vastgestelde procedure en methodiek bij de diagnose is voor primaire waterkeringen zoals opgemerkt in het *Voorschrift Toetsen op Veiligheid* gedetailleerd uitgewerkt. Dit staat in schril contrast met de diagnosticeringsmethodiek voor regionale waterkeringen. Hier wordt aan gewerkt; onlangs is de 'groene versie' van de *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, Katern boezemkaden* [37] verschenen. Er is veel meer strekkende kilometer regionale dan primaire keringen en de belastingsomstandigheden zijn vaak niet te vergelijken met die van primaire keringen, bijvoorbeeld doordat er continu water tot enkele decimeters onder de kruin tegen het dijklichaam staat (zie bijvoorbeeld figuur 3 en figuur 4).

De inzet van remotesensingtechnieken waarbij in korte tijd over een grote strekking informatie kan worden verzameld kan inspectie van regionale keringen een grote stap vooruit helpen. Verschillende waterschappen ondernemen reeds initiatieven op dit vlak.

⁹ Aan de hand van de eisen aan de hoogte en het profiel van de waterkeringen die uit de vtv zijn af te leiden en aan de hand van het geschatte variabele karakter van de feitelijke hoogte, wordt in *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53] gepoogd de minimale specificaties van laserwaarnemingen te formuleren voor wat betreft bijvoorbeeld dichtheid en precisie.

Tekortschietende kennis van ondergrond en opbouw van de waterkering

Terwijl de informatie over het oppervlak van de waterkering en bijvoorbeeld zijn met laseraltimetrie waargenomen hoogte steeds veelomvattender wordt en met een hogere dichtheid beschikbaar komt, blijft de kennis over de ondergrond en de opbouw van de waterkering summier. Feitelijk is dit een discrepantie. De hierboven aangehaalde georiënteerdheid van de VTV op profielen en onderbenutting van vlakdekkende informatie is uit dat oogpunt goed te verdedigen: er is gewoonweg onvoldoende informatie over de grondopbouw. Ook de informatie die er wel is, is qua geometrie weinig gedetailleerd en qua thematiek grof geklassificeerd. Er bestaat een discrepantie tussen de gedetailleerdheid waarmee profielen kunnen worden vastgesteld en die van de opbouw van het dijklichaam ter plekke van het profiel, terwijl beide parameters invoer zijn voor de stabiliteitsberekening van de kering.

Zoals in hoofdstuk 2 geschetst, is een mogelijk uitgangspunt voor de bestudering van potentiële en gewenste waarnemingstechnieken de informatiebehoefte van de waterkeringbeheerder. Het rapport *Informatiebehoefteinventarisatie waterkeringbeheer/dijkdeformatie* [52] doet uitgebreid verslag van een inventarisatie onder 18 beheerders. Opmerkelijk is echter dat onder de 46 onderscheiden inspectieparameters vrijwel geen parameters zitten die betrekking hebben op de grondopbouw. Dit is gezien de moeilijkheden bij de bepaling hiervan – en dus gezien de gangbare inspectiepraktijk – niet vreemd, maar laat het belang ervan onderbelicht.

Gebruik van hoogteverschillen als verklikker voor opbouw en ondergrond van de waterkering

Een gedetailleerd overzicht van de hoogte van de waterkering – en met name de deformatie – kan bijdragen tot kennis over de opbouw ervan. De hoogte en deformatie kunnen feitelijk als verklikker fungeren voor inhomogeniteiten in het dijklichaam en de ondergrond. In § 3.3 werd opgemerkt dat zettingsverschillen – hoogteverschillen in ruimte – een goede indicatie kunnen zijn van locaties met de zwakste klei- en veenlagen, die aanleiding kunnen geven tot bepaalde faalmechanismen. Ook oude zandkreekruggen kunnen met hoogteverschilmetingen worden opgespoord.

De huidige stand van de techniek laat toe deze hoogteverschil- en deformatiemetingen met hoge dichtheid en hoge precisie uit te voeren, bijvoorbeeld met laseraltimetrie of radarinterferometrie.

Het gebruik van vlakdekkende hoogte-informatie

Zoals opgemerkt is de gangbare praktijk van inspectie, althans als het gaat om de geometrie van de waterkering, gericht op profielen. Bij de bespreking van de diagnostiek in het kader van de VTV is aangegeven dat dit enerzijds een onderbenutting van de met remote sensing te verzamelen waarnemingen is, maar dat hiervoor anderzijds goede redenen aan te voeren zijn.

Niettemin kan met laseraltimetrie bij de huidige stand van de techniek een ‘vlakdekkend’ hoogtemodel van het dijklichaam worden vervaardigd.¹⁰ Zie hiervoor bijvoorbeeld de

¹⁰Wat men werkelijk onder ‘vlakdekkend’ verstaat, is onderhevig aan inflatie. Laseraltimetrie levert onregelmatig verdeelde individuele hoogtemetingen op, elk behept met zijn eigen onzekerheid. Niettemin is de dichtheid van deze metingen de afgelopen tien jaar toegenomen van 1 punt per 16 m² tot 20 of zelfs 70 punten per m². Uit deze

illustraties in figuur 38 en [53]. De grote kracht daarvan is de oppervlakte-informatiedichtheid. Deze informatie kan worden gebruikt voor het bepalen van hoogteverschillen en in het bijzonder zettingen. Daarbij moet men zich wel de beperking realiseren van de laserdata in hoogte- en planimetrische precisie. Dit geldt met name voor de oude data waarmee de deformatieanalyse door middel van verschilberekeningen wordt uitgevoerd.

Is het waterkeringbeheer en in het bijzonder de toetsing momenteel nog hoofdzakelijk georiënteerd op profielen, het is niet ondenkbaar dat in de toekomst vlakdekkende vergelijkingen van data een grotere rol gaan spelen, mogelijk gemaakt door de vooruitgang in de waarnemings- en analysetechniek. Andere waarnemingstechnieken dan laseraltimetrie, met name radarinterferometrie, kunnen daarbij een belangrijke rol spelen.

Inhuur externe specialisten

Net als bij het waarnemen, is het ook bij de diagnostiek nuttig of noodzakelijk externe specialisten in te schakelen. Vooral voor het uitvoeren van stabiliteitsberekeningen is dit reeds de praktijk. Maar ook bij het analyseren van data die met een relatief specialistische techniek als laseraltimetrie is ingewonnen, is de hulp van specialisten die de voetangels en klemmen kennen nuttig. Zeker bij het vervaardigen van hoogteverschil- of zakkingsanalyses is het niet moeilijk prachtig gekleurde non-informatie te genereren.

Vastleggen bewerking, resultaten en opvolging

Zoals in de *Procesbeschrijving* vermeld, moeten de bewerking, het analyseresultaat en de opvolging (wat gaat er met het resultaat gebeuren) worden vastgelegd. Voor het kunnen vaststellen van de kwaliteit van het eindresultaat is het noodzakelijk te kunnen teruggrijpen op de wijze waarop de data is bewerkt. Eenmaal gegenereerde profielen en de daarop gebaseerde conclusies en stabiliteitsberekeningen dienen ook te worden vastgelegd. Daarop wordt niet alleen bij prognosticering en operationalisatie voortgebouwd, maar deze informatie is ook van belang voor diagnostiek in de toekomst, die immers vaak neerkomt op mutatiesignalering en -analyse.

Specialismen en opleidingseisen

De eisen verschillen voor bewerkingen op laserdata weinig van die in de diagnosestap, maar zijn in het algemeen iets zwaarder omdat er bij diagnosticering (en de databewerking daarvoor) meer sprake is van analyse.

4.5.5 Conclusies prognosticeren

Met de stap *prognosticeren* wordt de diagnose uit de vorige stap vertaald in een oordeel over de toestand van de waterkering in de toekomst, in het bijzonder een inschatting van zijn waterkerend vermogen. In het geval van het gebruik van laserhoogtedata kan het bijvoorbeeld gaan om een tekortschietende hoogte, een te steil talud, een inzinking in de kruin of een deformatie van het talud die op termijn een risico voor het functioneren van de waterkering inhoudt.

individuele meetpunten kan een vlakdekkend hoogteraster worden vervaardigd met rastercellen met een zijde van bijvoorbeeld 50 of zelfs 25 cm.

De prognostiek verschilt van de diagnostiek doordat de opgemerkte onvoldoende hoogte of vorm niet op zich wordt beschouwd, maar wordt geëxtrapoleerd en vervolgens wordt getoetst. Voor deze extrapolatie is kennis van de opbouw en ondergrond van de kering nodig en kennis van de precieze vorm van de waterkering zoals die op verschillende tijdstippen is waargenomen en vastgelegd. Alleen dat laatste al vereist specialistische kennis op het gebied van laseraltimetrie en geostatistiek. Deze is vergelijkbaar met de eisen die er bij de diagnostiek aan gesteld zijn.

De eisen aan de analyse van de laserhoogtedata zijn echter nog zwaarder dan in de vorige twee stappen. Bij het waarnemen werd aandacht gevraagd voor het uitputtend specificeren van het vereiste laseraltimetrie-product en een gedegen kennis van zaken van de waarnemingstechniek en de verspreiding binnen de organisatie van de data. Het gaat daarbij wat betreft de metingen primair om de hoogte. Bij de diagnostiek gaat het echter vaak om hoogteverschillen. Bij de diagnose met betrekking tot de hoogte van de kruin beperkt deze zich tot een vergelijking van de hoogte met de norm of legger. Bij de vergelijking met een eerder gemeten profiel en zeker met eerder gemeten laserhoogtemetingen moet men zich, zoals in de vorige paragraaf uiteengezet, goed realiseren dat de kwaliteit van de data en de analysemethode voldoende moet zijn om conclusies op te kunnen baseren. Bij de prognostiek komt dit nog sterker naar voren, omdat het immers om extrapolatie gaat, waarbij bovendien waarschijnlijk data uit nog meer en nog oudere bronnen wordt betrokken.

Omdat de prognostiek verder geen specifieke aspecten met betrekking tot laseraltimetrie heeft, wordt deze hier niet verder behandeld. In bijlage A is de tabel uit *Procesbeschrijvingen* met betrekking tot prognosticeren niet opgenomen.

4.5.6 Conclusies operationaliseren

In de processtap *operationaliseren* worden, indien de vorige stappen dit noodzakelijk maken, beheersmaatregelen genomen. De waterkering wordt bijvoorbeeld op hoogte gebracht of het talud wordt hersteld. Bij alles is het zaak ontwerp- of gemeten profielen gestructureerd op te slaan, om daarmee de diagnostiek en prognostiek in de volgende cyclus beter te kunnen uitvoeren. Op dit punt na kent de operationalisatiestap geen aspecten die typerend voor laseraltimetriedata zijn en daarom wordt hierop verder niet ingegaan.

4.5.7 Conclusies generieke voorwaarden

In *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] zijn behalve tabellen met de beschrijving van de vier inspectiedeelprocessen en hun voorwaarden ook generieke voorwaarden opgenomen. Deze gelden voor het gehele inspectieproces.

Voor laseraltimetrie is de belangrijkste voorwaarde dat de data goed gestructureerd en toegankelijk voor de gehele organisatie beschikbaar is, niet alleen om als basisinformatie voor de gehele organisatie te dienen, maar ook als basisinformatie voor een volgende stap in de cyclus waarnemen–diagnosticeren–prognosticeren–operationaliseren. In het bijzonder dient de informatie beschikbaar te zijn in een volgende cyclus, omdat hoogtedata vooral nuttig is bij hoogteverschilanalyses.

De eisen met betrekking tot een gestructureerde centrale opslag en distributie van laserdata, de automatiseringsomgeving die daarvoor noodzakelijk is, alsmede de opleidingseisen, zijn

van toepassing op het gehele inspectieproces, maar in dit rapport vooral uitgewerkt in § 4.5.3 over het deelproces waarnemen en de bijbehorende tabel in § A.1 van bijlage A.

4.6 Conclusies inspectieproces in relatie tot remote sensing

De casus laseraltimetrie is een geschikte kapstok voor andere remotesensingtechnieken

In de voorgaande paragrafen is het inspectieproces zoals dit in het rapport *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] is uitgewerkt tot een generieke beschrijving van de deelprocessen waarnemen, diagnosticeren, prognosticeren en operationaliseren, elk met zijn eigen invoer, bewerking, uitvoer en voorwaarden, ingevuld voor de remotesensingtechniek waarmee de meeste praktijkervaring is opgedaan: laseraltimetrie. Ondanks dat *Procesbeschrijvingen* primair gericht is op visuele inspectie, blijkt de methodiek zonder veel aanpassingen uitstekend geschikt als kapstok voor een waarnemingstechniek als laseraltimetrie.

De uitwerking in de vorige paragrafen en in bijlage A lijkt op zijn beurt zeer geschikt als kapstok voor de toepassing van andere remotesensingtechnieken bij inspectie van waterkeringen. Het is zeker niet noodzakelijk de hele exercitie voor andere technieken opnieuw te doen. Door de – niet altijd positieve – ervaringen met laseraltimetrie zijn veel flessenhalzen geïdentificeerd die voor andere remotesensingtechnieken onverkort aandacht verdienen, zoals onder meer een vroegtijdige betrokkenheid van alle belanghebbenden in de organisatie bij het specificatietraject, een uitgebreide specificatie van het op te leveren product en controle daarvan, de zware wissel die de grote hoeveelheid data trekt op de automatiseringsomgeving en het gewenste inzicht in de relatie tussen faalmechanismen en potentieel uit de data te genereren informatie.

Remote sensing als basisinformatie voor de organisatie

Het programma Verbetering Inspectie Waterkeringen richt zich, zoals de naam al zegt, op de *inspectie* van waterkeringen. Remote sensing vindt echter bredere toepassing dan binnen de verschillende inspectieprocessen: het speelt ook een rol (of heeft potentie) bij andere werkprocessen die tot het domein van het waterkeringbeheer behoren, maar in het algemeen niet als inspectie in enge zin worden gezien. Bij de inkoop van remotesensingdata is het van belang deze potentie te onderkennen en zoveel mogelijk belanghebbenden binnen de organisatie te betrekken. Het is verstandig remotesensingdata en -informatie te beschouwen als basisinformatie, die centraal en gestructureerd voor de hele organisatie moet worden opgeslagen en ontsloten.

De toepassing van remote sensing heeft grote gevolgen voor de organisatie

Remotesensingdata verschilt op een aantal punten van visueel waargenomen inspectiedata. Het gaat om zeer grote hoeveelheden gegevens, die zowel voor de automatiseringsinfrastructuur als voor de benodigde menskracht grote gevolgen heeft. Ook het genereren van informatie uit de data vergt een grote expertise. Daarnaast is het data die pas optimaal benut wordt als deze als basisinformatie voor de gehele organisatie toegankelijk is en als verwerkingsfaciliteiten beschikbaar zijn. Dit vergt een grote inspanning en niet zelden een verandering van de organisatie. Remote sensing stelt zijn eisen aan de organisatie. Anderzijds stelt de organisatie ook eisen aan remote sensing, omdat de data en informatie moet aansluiten op de processen van de waterkeringbeheerder.

Complexiteit remotesensinginformatie verschilt

De complexiteit van remotesensinginformatie verschilt en daarmee ook de inspanning die met de inkoop en analyse gepaard gaat. Luchtfoto's die als achtergrond van kaarten dienen zijn eenvoudiger te specificeren dan laseraltimetriedata, terwijl bijvoorbeeld deformatiemetingen met radarinterferometrie juist complexer zijn. Gedeeltelijk is dit gecorreleerd met de volwassenheid van de techniek, gedeeltelijk is het inherent aan de techniek zelf.

Belang van inzicht in de relatie tussen remotesensingdata en faalmechanismen

Zoals ook bij laseraltimetrie is opgemerkt, is het fundament onder de procedure en methodiek om informatie uit remotesensingdata af te leiden, een goed begrip van over welke faalmechanismen de techniek informatie kan geven en hoe deze informatie uit de data kan worden afgeleid. Het is belangrijk dat ontwikkelaars en aanbieders van technieken hun aanbod afstemmen op de informatiebehoefte van de waterkeringbeheerder, gefundeerd op faalmechanismen. (Zie voor een behandeling van faalmechanismen § 3.2 en noot 1 van dit rapport; zie voor een bespreking van inspectieparameters § 3.4.)

Noodzaak van specialistische kennis, een kennisinstituut en innovatieprogramma's

Voor de succesvolle toepassing van remote sensing is in het algemeen een grote specialistische deskundigheid vereist. Op de mogelijkheid deze in te huren is al gewezen, maar het is belangrijk dat waterkeringbeheerders zelf ook over een gedegen kennisbasis beschikken (niet alleen aanbestedingen, maar ook inhuur moet worden beoordeeld). In het rapport *Procesbeschrijvingen* werd al op de mogelijkheid gewezen collega's binnen en buiten de eigen organisatie te consulteren.

Het ontbreken van een gezamenlijk kennisinstituut op het gebied van remote sensing wordt door waterkeringbeheerders als omissie ervaren. Voor laseraltimetrie poogt de stowa-Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie kennis te bundelen (zie [53]), maar dit initiatief is van voorbijgaande aard. Bij de ontwikkeling van laseraltimetrie in het algemeen en het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) in het bijzonder heeft de toenmalige Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat een cruciale rol gespeeld. Nu de opvolger van deze dienst zich niet langer als kennisinstituut profileert, ontstaat er enige zorg over een goede, onafhankelijke en op de gebruiker gerichte kennisbasis.

Ook bestaat er zorg over het van overheidswege voldoende stimuleren van de toepassing van remotesensingtechnieken. Een programma als dat van de toenmalige Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS) heeft een stimulerende rol gespeeld bij de ontwikkeling van toepassingen van innovatieve remotesensingtechnieken. Initiatieven als IJkdijk en DigiDijk,¹¹ waarbij de overheid innovatieve initiatieven voor waterkeringbeheer stimuleert, zijn zeer nuttig en dienen te worden gestimuleerd.

¹¹Het proefproject 'Waarnemingstechnieken voor Inspectie van Waterkeringen' (DigiDijk) [63] is opgezet volgens de aanpak van het Nederlandse Small Business Innovation Research (SBIR) programma, dat innovatief onderzoek op maatschappelijke thema's bij met name kleine en middelgrote bedrijven stimuleert. In april 2007 zijn door de ministeries van Verkeer en Waterstaat en Economische Zaken vijf voorstellen geselecteerd waarin bedrijven een haalbaarheidsstudie doen naar nieuwe mogelijkheden voor inspectie van waterkeringen. Twee ervan betreffen remote sensing.

Dichten van de kloof tussen vraag en aanbod van remotesensingtechnieken

In praktijk ondervinden zowel waterkeringbeheerders als de commerciële aanbieders dat vraag en aanbod niet goed op elkaar aansluiten. Dit is ook in de workshop op de Kennisdag Inspectie Waterkeringen [51] vastgesteld. Bedrijven denken een product aan te bieden waarmee de beheerders aan de slag kunnen, terwijl beheerders vaak constateren dat het product onvoldoende aansluit op hun behoeften of processen. Ook in stowa-rapport *Remote sensing ondersteund waterbeheer* [7] wordt dit al gesignaleerd. Er is een kloof tussen vraag en aanbod, die moeilijk te dichten blijkt.

Deze kloof dient van beide zijden verkleind te worden. Waterkeringbeheerders kunnen hun informatiebehoefte beter specificeren en onderbouwen en zorgen dat alle belanghebbenden binnen de organisatie daarbij betrokken zijn. Aanbieders kunnen hun aanbod beter afstemmen op de werkelijke behoefte van de waterkeringbeheerder. In praktijk blijkt soms een 'bouwteam' goed te werken: opdrachtgever en opdrachtnemer bepalen in nauw overleg de precieze vorm van het op te leveren product. Dit vergt van beide partijen veel inlevingsvermogen en bovendien veel tijd; daarnaast lijkt het principe van een bouwteam op gespannen voet te staan met aanbestedingsregels. Het is een andere benadering dan die van de uitputtende specificaties en boeteclausules.

Daarnaast kunnen bedrijven of consortia die zich gezamenlijk richten op de gehele keten van vraag naar aanbod een belangrijke rol spelen bij het verkleinen van de kloof. Een dergelijke keten is bijvoorbeeld in het Geomatica Businesspark (GBP) in Marknesse georganiseerd.

5 Remote sensing

5.1 Inleiding

5.1.1 De plaats van remote sensing in dit rapport

In dit rapport ligt de nadruk op de inpassing van remotesensingtechnieken in het inspectieproces. Daarbij gaat het met name om het gebruikmaken van het concept van de vier inspectiedeelprocessen, met het oog op het eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar maken van de inrichting en uitvoering van inspectie. Remotesensingtechnieken zelf spelen daarbij een ondergeschikte rol. De invalshoek van dit rapport is niet technologisch.

In dit hoofdstuk wordt een selectie gepresenteerd van ontwikkelingen op het gebied van remote sensing die kansrijk zijn met het oog op inspectie van waterkeringen. Remote sensing werd voor dit onderzoek in § 2.2 gedefinieerd als de verzameling technieken waarmee via elektromagnetische straling van een afstand op grote schaal informatie (zowel thematische als geometrische) kan worden verworven over de toestand van de waterkering.

De onderbouwing voor het gebruik van remotesensingtechnieken met faalmechanismen is te vinden in hoofdstuk 3. In dat hoofdstuk werden bovendien handvatten gegeven voor verschijnselen die mogelijk met remotesensingtechnieken waarneembaar zouden kunnen zijn. Bij de signalering in dit hoofdstuk van interessante ontwikkelingen wordt daarvan gebruik gemaakt. Bovendien is dit interessant voor ontwikkelaars van nieuwe technieken en de aansluiting van nieuwe technieken op de informatiebehoefte vanuit het functioneren van waterkeringen. Hoofdstuk 4 laat zien waar bij de daadwerkelijke inzet van remote sensing in het inspectieproces rekening mee moet worden gehouden. Daarbij is de casus die voor laseraltimetrie in bijlage A is uitgewerkt een voor andere remotesensingtechnieken geschikt toetskader.

Zowel de informatie in het voorliggende hoofdstuk, als de in hoofdstuk 3 en 4 genoemde informatie, kan de waterkeringbeheerder van dienst zijn bij het inkopen van remotesensingdiensten en de ontwikkelaar van remotesensingtechnieken het ontwikkelen daarvan.

5.1.2 Informatie in andere rapporten

Het *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5] bevatte reeds een overzicht van meettechnieken. Het ging daarbij niet alleen om remotesensingtechnieken. In *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* [43] werd dit nader uitgewerkt. Ook wordt er aandacht aan de mogelijke toepassing bij bepaalde faalmechanismen besteed. Genoemd rapport biedt in het algemeen bij deze meettechnieken wat meer technische achtergrondinformatie dan dit hoofdstuk, maar spreekt zich minder concreet uit over de inzetbaarheid bij waterkeringbeheer. In genoemd rapport worden ook

aanbieders genoemd en wordt in tabelvorm een oordeel gegeven over de mate van operationele inzetbaarheid.

Sommige technieken zijn nader uitgewerkt en van presentaties van aanbieders voorzien in het rapport *Inspectietechnieken voor droge veenkaden* [32]. Wijbren Epema geeft in *Advies aan RWS voor innovatie dijkinspecties* [18] een overzicht van actuele publicaties naar aanleiding van de gebeurtenissen in Stein en Wilnis en signaleert de meest kansrijke technieken. Dit advies, geschreven in het kader van Water Innovatiebron (WINN), is mede de basis voor het project IJkdijk. Regine Brügelmann heeft met haar collega's van Rijkswaterstaat AGI verschillende digitale inwinsystemen voor het product 'beheer en onderhoud hoofdwatersystemen' van Rijkswaterstaat op een rijtje gezet [12]. Dit ongepubliceerde document biedt op een overzichtelijke manier veel kennis.

Genoemde rapporten kunnen nuttig zijn voor extra informatie of een andere invalshoek. Het hier gepresenteerde hoofdstuk is hoofdzakelijk gebaseerd op algemene kennis, ervaring en literatuur, zonder daarbij uitpuittend te willen zijn. Met name worden die aspecten van remotesensingtechnieken genoemd die voor inspectie van waterkeringen als relevant en kansrijk worden gezien.

5.1.3 Leeswijzer

Dit hoofdstuk verdeelt de behandeling van remote sensing in twee delen. Er kan onderscheid worden gemaakt naar de remotesensingtechnieken zelf en de wat men noemt 'platforms' (satelliet, vliegtuig, helikopter, onbemand voertuig en dergelijke) waarvandaan deze technieken worden ingezet. In § 5.3 gaat het om remotesensingtechnieken, die vaak vanaf verschillende hoogten en platforms kunnen worden ingezet. Daaraan voorafgaand worden in § 5.2 de ontwikkelingen op het gebied van platforms beschreven, omdat de inzetbaarheid voor inspectie van waterkeringen vaak gerelateerd is aan karakteristieken van het platform, los van de remotesensingtechniek. Elk behandeld platform of techniek wordt besloten met een conclusie omtrent de toepassingsmogelijkheden voor waterkeringinspectie.

In § 5.4 wordt een synthese gepresenteerd van veelbelovende ontwikkelingen op het gebied van technieken en platforms enerzijds en faalmechanismen en geometrische en geotechnische basiselementen anderzijds. Ook wordt de kansrijkheid van het gebruik van platforms in de werkprocessen van de waterkeringbeheerder in tabelvorm gepresenteerd.

5.2 Ontwikkelingen op het gebied van platforms

5.2.1 Inleiding

Een van de meest tot de verbeelding sprekende aspecten van remote sensing is dat beelden worden ingewonnen vanaf min of meer hoog vliegende (lucht- of ruimte-) vaartuigen, met de satelliet als het summum. Omdat de waarnemingen worden gedaan vanuit het vaartuig spreekt men van het *platform* waarvandaan waarnemingen worden gedaan. Veel karakteristieken van remote sensing zijn gerelateerd aan het platform van waaraf wordt waargenomen.

In deze paragraaf wordt een globaal overzicht gegeven van deze karakteristieken van de verschillende remotesensingplatforms en de ontwikkelingen daarin. De platforms die in de

negentiende eeuw het startsein gaven voor de ontwikkeling van remote sensing, ballonnen en vliegers, worden in dit hoofdstuk niet behandeld, omdat ze in het algemeen beperkt inzetbaar zijn. Niettemin zijn er ook op dat gebied aanbieders actief.

Karakteristieken die te maken hebben met het type sensor in plaats van het platform (bijvoorbeeld: optische of radarsensoren) worden in § 5.3 besproken.

5.2.2 Satellieten

Zoals opgemerkt spreekt het waarnemen vanaf een satelliet het meest tot de verbeelding. Daartoe heeft zeker bijgedragen dat vanaf relatief 'enorme' hoogte de laatste jaren beelden met een hoge, gezien die hoogte bijna onvoorstelbare, resolutie beschikbaar komen. Bij het grote publiek heeft ook de zeer laagdrempelige en grafisch aansprekende toepassing Google Earth geleid tot een grote toename van de publieke fascinatie voor remotesensingbeelden, al zijn de zeer gedetailleerde beelden van Nederland dan niet vanuit een satelliet maar vanuit een vliegtuig opgenomen.

Waarnemingen vanuit satellieten hebben ten opzichte van vliegtuigen een aantal voor- en nadelen of genuanceerder: karakteristieken. Deze karakteristieken zijn niet algemeen geldig, maar geven de potentiële gebruiker een genuanceerder beeld van de mogelijkheden en onmogelijkheden van de opname van remotesensingbeelden vanuit de ruimte. Met de tamelijk uitgebreide behandeling van een aantal van deze karakteristieken hieronder wordt de euforie over de bruikbaarheid van het fascinerende platform tot zijn juiste proporties teruggebracht.

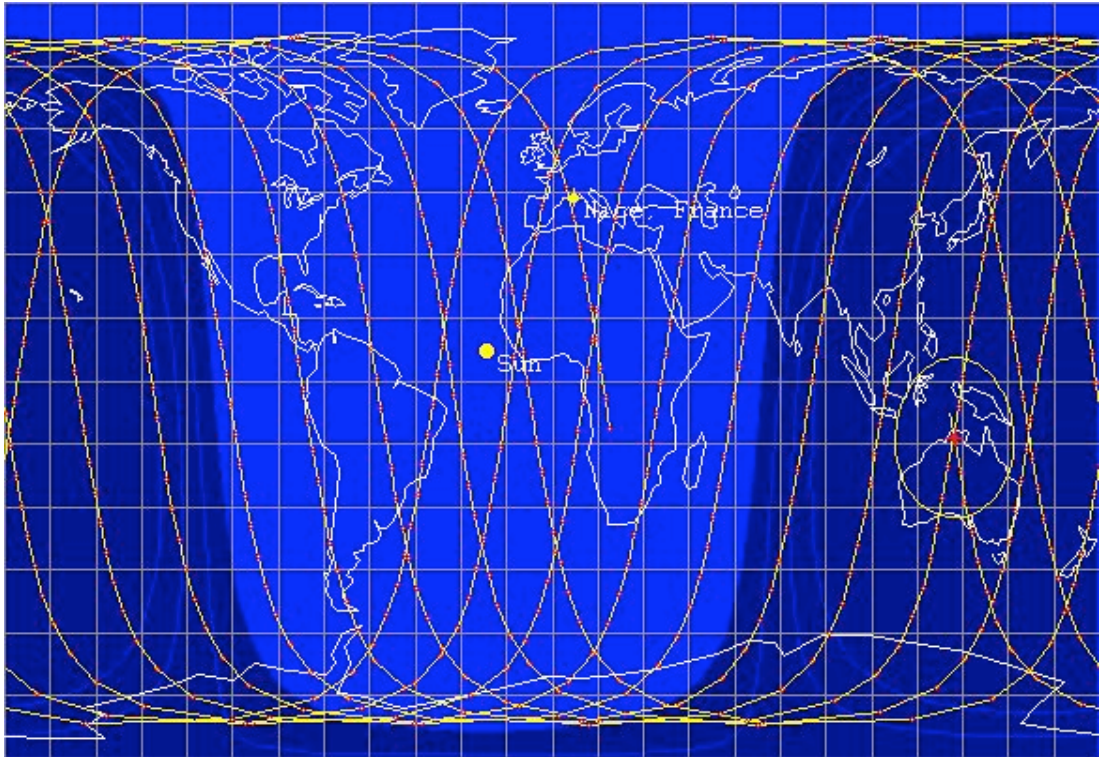
Als voor één platform geldt dat het een grootschalig overzichtsbeeld biedt, is het wel de aardobservatiesatelliet. In zeer korte tijd kan een satelliet een groot oppervlak met constante beeldkwaliteit vlakdekkend opnemen. Bovendien kan hij dat, afhankelijk van zijn baan, van bijna elke locatie op aarde, hoe ontoegankelijk via het aardoppervlak ook (zie figuur 9).

Omdat een satelliet van zo'n grote hoogte kijkt, is er in het algemeen geen sprake van vertekening of van een vertekening die zeer homogeen over het beeld is, in tegenstelling tot bij lager vliegende platforms. Bij die laatste is de invalshoek voor verschillende stroken in het beeld sterk verschillend, zoals in figuur 31 is geïllustreerd. Bij satellieten wordt in het algemeen naar waarneming pal van boven gestreefd, omdat dan de in genoemde figuur geïllustreerde omvalling afwezig is. Hogeresolutiesatellieten als IKONOS en QuickBird kunnen echter tot 26° opzij kijken omwille van de flexibiliteit: zij kunnen gericht worden naar de gewenste locatie. Daarbij treedt wél omvalling op, maar deze is over het gehele beeld vrijwel constant, waardoor de correctie eenvoudiger is dan bij bijvoorbeeld vliegtuigen. SAR-satellieten (radar) vormen een uitzondering op het algemene streven naar nadirbeelden:¹² zij kijken gezien hun beeldvormende principe altijd naar opzij.¹³

Omdat een satelliet boven de atmosfeer en het weer vliegen, heeft hij, in tegenstelling tot een vliegtuig, geen last van turbulentie. Satellieten vliegen altijd. De banen zijn niet

¹²Nadir = voetpunt, het punt recht onder een waarnemingslocatie.

¹³Zie voor een behandeling van het beeldvormende principe van SAR-systemen bijvoorbeeld *Spectral filtering and oversampling for radar interferometry* [55].



figuur 9 Een satelliet 'valt' door de wetten van de zwaartekracht in een zeer constante baan om de aarde heen. Deze baan wordt bij het ontwerp bepaald en is daarna niet of nauwelijks meer te beïnvloeden. Hierboven 10 omwentelingen van de Landsat-7-satelliet. Het lichtere gebied wordt door de zon verlicht.

alleen zeer constant, maar ook zeer nauwkeurig te bepalen. Voor geometrische toepassingen als radarinterferometrie is dit cruciaal.

Een satelliet kijkt door de gehele atmosfeer heen. Dit betekent dat de verschillende spectrale banden te lijden hebben van invloeden door de atmosfeer, zoals bijvoorbeeld absorptie. Optische satellietbeelden, bijvoorbeeld, kunnen daarvoor worden gecorrigeerd. Satellieten die met radiofrequenties werken, zoals GPS- en radarsatellieten, hebben last van de ionosfeer.

De baan van een satelliet is niet alleen zeer constant, maar ook niet of nauwelijks te beïnvloeden. Een satelliet 'valt' in een natuurlijke baan om de aarde heen. Voor een kleine wijziging in de baan is brandstof nodig, die maar zeer beperkt aan boord kan zijn. Hoe lager satellieten vliegen, hoe eenvoudiger het is een hoge resolutie te bereiken (dit geldt natuurlijk voor alle platforms), maar hoe meer ze in de bovenste lagen van de atmosfeer terechtkomen. Dit leidt tot wrijving, waardoor de satelliet naar de aarde dreigt te vallen; correctie kost brandstof en deze is maar beperkt aan boord. Dit bepaalt voor een deel de levensduur van een satelliet.

Een beperking van satellietssystemen kan zijn dat zij een tamelijk lage overkomstfrequentie hebben. Het patroon van waar een satelliet over het aardoppervlak komt is vast en wordt bepaald door zijn baan: het *grondspoor* (zie figuur 9 en figuur 10). Tijd en plaats van overkomst zijn niet te beïnvloeden. Na een aantal omwentelingen herhaalt zich de baan. Het kan weken duren alvorens een bepaald spoor opnieuw wordt gedekt: ofwel het patroon van overkomsten is heel dicht en het duurt weken alvorens een

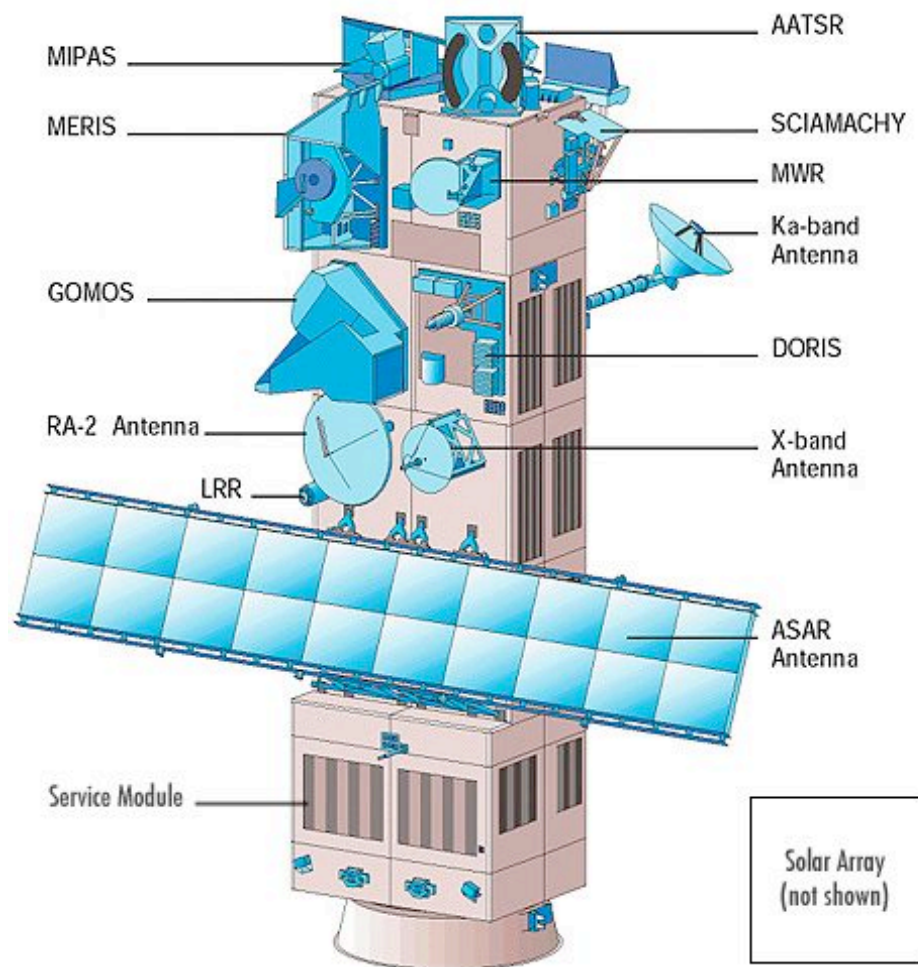


figuur 10 Een satelliet kent een vast patroon van waar hij over het aardoppervlak passeert. Daarbij is het patroon ofwel dicht maar de overkomstfrequentie laag, ofwel ijl maar de overkomstfrequentie hoog. Hierboven het spoor van de ERS, die eens per 35 dagen zijn baan herhaalt.

satelliet opnieuw verschijnt boven een bepaald punt boven het aardoppervlak, ofwel de satelliet kent een hoge overkomstfrequentie maar de grondsporen zijn honderden kilometers van elkaar verwijderd.

Dit betekent dat de geadverteerde overkomstfrequentie moet worden gerelativeerd. De zichtbaarlicht-hogeresolutiesatelliet IKONOS bijvoorbeeld [33] komt eens per drie dagen over. Aan de hand van de omlooptijd van 98 minuten, de breedtegraad van Nederland en de herhalingsfrequentie van 3 dagen kan worden berekend dat de grondsporen hier maar liefst 560 km uit elkaar liggen. En dat terwijl het zwad (de breedte van de opgenomen strook) slechts 11–14 km breed is! IKONOS laat zich op bestelling richten, maar neemt dus zeker niet eens per 3 dagen het aardoppervlak met hoge resolutie op; het is eerder 45 maal zo weinig, of als met waarneming vanuit de klimmende en die vanuit de dalende baan rekening gehouden wordt, 22 keer zo weinig. Omdat er bovendien bewolking kan voorkomen, kan Nederland niet vaker dan een keer of drie per jaar in zijn geheel door IKONOS worden opgenomen met de geroemde resolutie van een meter.

Wel worden waarnemingen tegenwoordig op het laatste moment afgestemd op de voorkomende bewolking en daarnaast kunnen ook andere hogeresolutiesatellieten worden ingezet, zoals Quickbird met een resolutie tot 60 cm.



figuur 11 ENVISAT (ter grootte van een autobus) heeft een arsenaal aan verschillende sensoren aan boord, die niet alle tegelijk gebruikt kunnen worden, wat de operationele inzet beperkt. (© Europees Ruimtevaartagentschap ESA)

De oplossing voor de beperking in waarneem mogelijkheden door vaste satellietbanen lijkt een satelliet die op één punt boven het aardoppervlak stil lijken te staan: de *geostationaire* satelliet. Een satelliet doet dit als hij even hard om de aarde draait als de aarde om zijn as draait. De zwaartekracht dicteert daarvoor een hoogte van 35.785 km boven zeeniveau op de evenaar én een plek pal boven diezelfde evenaar. Het hoeft geen betoog dat dit voor hogeresolutiewaarnemingen van waterkeringen geen ideale omstandigheden zijn.

Satellieten kunnen wat operationaliteit betreft in twee categorieën ingedeeld worden: onderzoekssatellieten en commerciële satellieten. Van oudsher is onderzoek de drijvende kracht achter aardobservatiesatellieten. Daarbij is het doel meestal mede de haalbaarheid te onderzoeken van een bepaalde maatschappelijke toepassing. Niettemin zijn niet-commerciële satellieten slechts moeizaam voor operationeel gebruik geschikt. Een satelliet als bijvoorbeeld de Europese ENVISAT (zie figuur 11) heeft een arsenaal aan sensoren aan boord, waarvan de beelden zowel voor wetenschappelijk gebruik als voor operationeel gebruik besteld kunnen worden. Niet alle sensoren kunnen echter tegelijk gebruikt worden, wat de operationele inzet beperkt. Daarnaast hebben sommige sensoren verschillende

modi,¹⁴ waardoor ze vele kunstjes kennen en voor vele doeleinden geoptimaliseerd zijn. Maar ook die modi sluiten elkaar onderling uit. Er is dus concurrentie tussen de bestellers van alle mogelijke beelden, waardoor je er in principe nauwelijks op kunt rekenen te krijgen wat je wilt. Grote Europese onderzoeksprogramma's vanuit ESA hebben bijvoorbeeld voorrang boven een paar incidentele beelden voor olie-opsporing of land-water-scheiding en voor commercieel bestelde beelden gelden weer andere regels. Bemiddeling van een bedrijf als Geoserve kan hierbij helpen, maar in het algemeen is een niet-commerciële satelliet niet betrouwbaar voor een operationele dienst.

Daar staat tegenover dat de beelden wel goedkoop zijn. Wetenschappers betalen voor een ENVISAT-SAR-beeld soms slechts € 25; dezelfde beelden worden commercieel verkocht voor rond € 400. Soortgelijke beelden van de commerciële Canadese RADARSAT kosten € 3000.

Verschillende satellieten kunnen zichzelf richten op de gewenste locatie. Zoals opgemerkt is dit bij bijvoorbeeld IKONOS ook noodzakelijk omdat het beeldspoor veel smaller is dan de afstand tussen de grondsporen. Waar een dergelijke satelliet naar kijkt, is tevoren te bestellen. Dit betekent opnieuw concurrentie van verschillende gebruikers. Optische satellieten hebben last van wolken en steeds meer wordt op het laatste moment de satelliet gericht op het meest wolkenloze stuk atmosfeer.

De beste garantie op operationele toepasbaarheid van een satelliet is een zo eenvoudig mogelijk systeem, geheel geoptimaliseerd voor één toepassing. Een dergelijke taakgerichte satelliet komt echter alleen van de grond als voor die nauwe toepassing ook draagvlak en daarmee voldoende momentum en geld is. Bij weersatellieten lukt dit uitstekend, bij bijvoorbeeld 'bodembewegingssatellieten' ligt dat veel moeilijker.

Een groot nadeel van satellieten ten opzichte van andere platforms zijn de zeer hoge initiële kosten, die kunnen oplopen tot tientallen miljoenen euro's. Deze zijn alleen op te brengen als op Europese of wereldwijde schaal alle betrokkenen de koppen bij elkaar steken. Dit past bovendien bij het grensoverschrijdende grootschalig type informatie dat satellieten opleveren en bij de hoogspecialistische kennis die bij de bouw en operatie noodzakelijk zijn. Uiteindelijk kan dit leiden tot minder hoge *operationele* kosten. Binnen Europa bestaan hiervoor verschillende initiatieven.

In Nederland heeft het *Actieplan Ruimtevaart* [1] tot doel de inspanningen van de vele bij ruimtevaart betrokken instanties – van wetenschap, ruimtevaartindustrie tot meteorologische en andere eindgebruikers – zoveel mogelijk te bundelen om de economische slagkracht te vergroten en de operationele inzet effectiever te maken. Aardobservatie, waarover deze paragraaf handelt, is overigens slechts een onderdeel van ruimtevaart.¹⁵ Een onderdeel van dit plan is het ontwikkelen van *business cases*, die de kosten en baten beschrijven van het gebruik van ruimtevaartgegevens voor een specifieke

¹⁴Het radarinstrument ASAR kan bijvoorbeeld waarnemen in image mode, alternating polarisation mode, wide swath mode, global monitoring mode en wave mode, ieder met zijn eigen instellingen en resolutie. Deze en veel achtergrondinformatie over satellietbeelden is te vinden in het *ESA ASAR product handbook* [19].

¹⁵Aardobservatie is een van de categorieën in het operationele gebruik van ruimtevaart. Andere categorieën daarin zijn navigatie en telecommunicatie. Naast het operationele gebruik is er nog het wetenschappelijke gebruik van ruimtevaart, volgens [49] te verdelen in astrofysica, planeetonderzoek, gravitatieonderzoek, atmosfeer- en klimaatonderzoek en microgewichtonderzoek. Verder spelen aanbieders van infrastructuur nog een rol bij ruimtevaart: lanceervoertuigen, satellieten, internationaal ruimtestation. Kortom, aardobservatie is maar een klein deel van ruimtevaart.

aardse toepassing, op basis waarvan investeringsbeslissingen zouden kunnen worden genomen. Voor de casus waterbeheer is een dergelijke kostenbatenanalyse uitgewerkt [6].

Behalve bij de ontwikkeling van aardobservatiesystemen, is het ook voor *operationele toepassing* nodig de keten van satelliet naar gebruikersinformatie te implementeren en stroomlijnen. Het toenmalige programma van de Beleidscommissie Remote Sensing (BCRS), dat in 2000 ophield te bestaan, had tot doel dat te stimuleren. Een van de doelstellingen van het in Marknesse gevestigde Geomatica Businesspark is bedrijven te laten samenwerken om tot een optimale keten van instrumentatie naar voor de gebruiker operationeel bruikbare informatie te komen. Door dit op Europees niveau na te streven, wordt de slaagkans van de operationele toepassing vergroot.



figuur 12 Het Europese programma Global Monitoring for the Environment and Security (GMES) beoogt operationele diensten gebaseerd op aardobservatiedata op te zetten.

De Europese Unie ontwikkelt voor verschillende toepassingsgebieden een dergelijke keten binnen het programma Global Monitoring for the Environment and Security (GMES, zie [21] en figuur 12), waarbinnen verschillende sporen lopen voor operationele diensten op het gebied van onder meer rampenbestrijding, landgebruik, oogstvoorspelling en mariene monitoring. In juni 2007 werd het contract getekend voor de bouw van de eerste speciaal voor het GMES-programma ontwikkelde satelliet, Sentinel-1 (zie figuur 13 en [3]): een teken dat niet de techniek of de wetenschap, maar het operationele gebruik ten behoeve van milieu en veiligheid voorop staat. De nadruk ligt daarbij op de levering van informatieproducten in plaats van satellietbeelden, op zo effectief mogelijke



figuur 13 De Sentinel-1, de eerste satelliet speciaal gebouwd voor het Europese programma voor monitoring ten behoeve van milieu en veiligheid (GMES). Deze moet in 2011 worden gelanceerd. (© ESA – P. Carril)

dekking van geografisch belangrijke gebieden, een hoge overkomstfrequentie en een zeer snelle beschikbaarheid van de informatie voor de eindgebruiker na overkomst van de satelliet. In Nederland speelt het Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart (NIVR) een coördinerende rol. Wereldwijd stimuleert de Group on Earth Observations het integreren van afzonderlijke aardobservatiesatellieten tot één Global Earth Observation System of Systems (GEOSS, [25], [26]).

Conclusie satellieten voor inspectie waterkeringen

Satellieten blinken uit door hun overzicht van enorme gebieden, weinig vertekening en een constante, ongestoorde baan. Voor waterkeringbeheer is het belang van satellieten beperkt, doordat ze vanwege hun hoogte maar een beperkte resolutie bieden. Daarnaast kunnen ze vanwege hun baan niet elk gebied op elk moment waarnemen. Het verkrijgen van het gewenste beeld is bij de meeste satellieten lastig, doordat met vele gebruikers moet worden geconcurrereerd en de diensten niet zijn ingesteld op operationeel gebruik. De potentie voor operationeel gebruik is veel groter bij commerciële satellieten, maar daarvan zijn er weinig en de beelden zijn erg kostbaar.

Satellietbeelden kunnen in principe vanwege het overzicht dat ze bieden een rol spelen bij het optimaliseren van processen: in gebiedsdekkende beelden van grote gebieden kunnen verschijnselen worden gesignaleerd die nadere bestudering verdienen. Deze verfijningsstap kan vervolgens geschieden door beelden met een hogere resolutie te bestuderen, bijvoorbeeld van vliegtuigen, of door de situatie in het veld visueel te inspecteren.

Niettemin is ook voor deze werkwijze van een grof maar gebiedsdekkend overzicht naar een fijn lokaal 'beeld' de resolutie van satellieten in het algemeen te gering voor gebruik bij het waterkeringbeheer. Een uitzondering hierop vormt de radarinterferometrie (§ 5.3.8).

Het is niet uitgesloten dat in de toekomst taakgerichte satellieten beschikbaar komen die zich wél lenen voor operationeel gebruik ten behoeve van het waterkeringbeheer. Mogelijk kunnen dan bijvoorbeeld optische hogeresolutiesatellieten concurreren met luchtfoto's (zie § 5.3.2).

Er is geen ander platform dat om verschillende redenen zo noopt tot nationale en internationale samenwerking als aardobservatiesatellieten. Te allen tijde moet het bouwen van taakgerichte operationele satellieten en het ontwikkelen van diensten daarvoor worden bevorderd binnen grote internationale samenwerkingsverbanden, zoals bijvoorbeeld GMES. Omdat de nadruk hierbij ligt op de operationele maatschappelijke toepassing en het belang van waterkeringbeheer maatschappelijk duidelijk is, liggen hier kansen, ondanks de op dit moment voor waterkeringbeheer veelal te geringe resolutie van satellieten.

5.2.3 Vliegtuigen

Het klassieke platform voor remote sensing is het vliegtuig. Remotesensingbedrijven hebben speciale vliegtuigen met navigatie- en standbepalingsapparatuur en gaten in de buik voor de waarneemapparatuur.

Het vliegtuig heeft als voordeel dat het flexibel inzetbaar is: het vliegt over het gebied dat je wilt op het moment dat je wilt. Het is taakgericht, locatiegericht en stuurbaar.

Aan het gebruik van een vliegtuig kleven enkele nadelen, die voor de opkomst van de overige in dit hoofdstuk genoemde platforms hebben gezorgd. De inzet van een vliegtuig is zeer kostbaar, zowel door het vliegtuig zelf als door het personeel. De enige uitzondering hierop is het vervaardigen van een generiek product door het vliegen van een groot gebied, dat vervolgens aan verschillende afnemers kan worden verkocht. Dit gebeurt bijvoorbeeld voor gewone luchtfoto's (zie § 5.3.2).

Een vliegtuig is gevoelig voor het weer, met name voor turbulentie. Dit maakt niet alleen het vliegen lastig, maar zorgt ook voor instabiliteit tijdens de opname van het beeld en voor het schommelen van de vliegstrook. In het geval van laseraltimetrie schommelt de strook in dwarsrichting door het draaien om de lengte-as van het vliegtuig (*rol*, *roll*), maar ook het op en neer gaan van de neus (*stampen*, *pitch*) heeft een belangrijk effect: in de strook laserpunten ontstaan daardoor gebieden met hogere en lagere punt dichtheden. Satellieten hebben hiervan geen last, maar vliegen voor veel toepassingen en technieken te hoog.

Doordat vliegtuigen ten opzichte van satellieten laag vliegen, is de kijkhoek voor elk beeldpunt anders. Punten waar het vliegtuig pal over vliegt, vertekenen niet; punten aan de randen van de vliegstrook vertonen 'omvalling', een vertekening naar buiten (zie figuur 15 en figuur 31). Voor de correctie hiervan (*orthorectificatie*) is extra informatie nodig. Als een beperkte vertekening belangrijk is, bijvoorbeeld voor de vervaardiging van orthofoto's (zie § 5.3.3), dient hoger gevlogen te worden (hetgeen de resolutie beperkt) of dient alleen het middelste deel van een strook gebruikt te worden. Beide opties werken kostenverhogend.

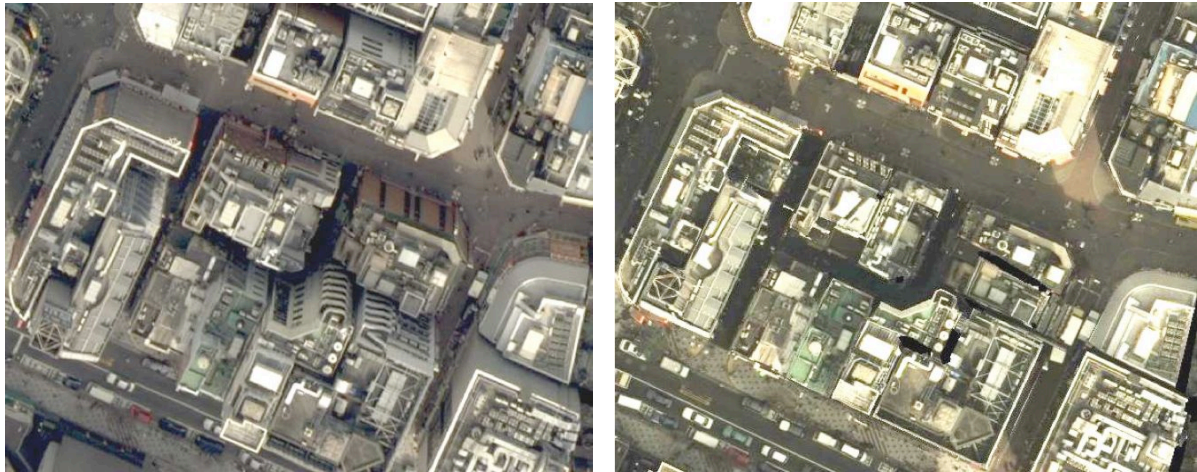


figuur 14 Tweemotorige waarneemvliegtuigen; op de voorgrond een Fairchild Merlin IIIA, een turboprop. De heren sjouwen een Vexcel UltraCam-D digitale fotogrammetrische camera. (© Aerodata International Surveys)

De relatief hoge snelheid van het platform ten opzichte van het aardoppervlak beperkt de resolutie en in het geval van laseraltimetrie de punt dichtheid (dit laatste wordt bij helikopters besproken, § 5.2.4). Doordat de lichtgevoelige sensor voldoende lang belicht moet worden, kan er bewegingsonscherpte ontstaan als gevolg van de voorwaartse beweging van het vliegtuig. Daartoe zijn voor bepaalde toepassingen camera's met een optomechanische correctie-inrichting nodig: *forward motion compensation* (FMC). De sensor wordt daarbij tijdens de opname zo bewogen dat de vliegbeweging wordt gecompenseerd. Alleen kostbare luchtcamera's kennen een dergelijke inrichting.

Doordat een vliegtuig een minimale snelheid nodig heeft om in de lucht te blijven, is dit genoodzaakt een min of meer vloeiende baan te vliegen. Dit betekent dat het grillige structuren als kleine waterkeringen niet zonder meer kan volgen. Dit kan het vliegen van meerdere stroken noodzakelijk maken, hetgeen kostenverhogend werkt. Helikopters kennen deze beperking niet.

De operationele inzet van vliegtuigen kent nog twee beperkingen. In de eerste plaats is men afhankelijk van de luchtverkeersleiding. Zeker rond Schiphol is dit een probleem, want luchtopnamen hebben bepaald geen hoge prioriteit. Omdat men voor luchtfoto's en zeker fotogrammetrische opnamen vanwege het weer, het daglicht en de begroeiing maar een zeer beperkt aantal vliegdagen per jaar heeft, is dit een ernstige beperking.



figuur 15 Links: doordat verder naar de rand van het beeld niet loodrecht naar beneden gekeken wordt, vallen gebouwen om in de kijkrichting: 'omvalling'. Geografisch liggen dak en plint op hetzelfde punt, maar in het beeld verschuift het dak. Bovendien wordt daardoor een deel van het maaiveld afgedekt. Met extra informatie kan dit worden gecorrigeerd: 'true' orthorectificatie (rechts). Zie ook figuur 31. (© K. Yamada en M. Oda, Japan)

Een tweede beperking is dat de minimale vlieghoogte die men boven stedelijk gebied met een eenmotorig vliegtuig in acht dient te nemen aanmerkelijk groter is dan met een tweemotorig toestel.¹⁶ Hetzelfde geldt voor een helikopter. Voor opnamen met een zeer hoge resolutie of, in het geval van laser, een hoge punt dichtheid, is dit soms een beperking. De inzet van een tweemotorig vliegtuig verhoogt de kosten.

Conclusie vliegtuigen voor inspectie waterkeringen

Het vliegtuig is hét platform voor remote sensing. Enkele karakteristieke eigenschappen zorgen voor nadelen, die ruimte laten voor de opkomst van de overige in dit hoofdstuk genoemde platforms.

5.2.4 Helikopters

Een vliegtuig heeft een minimale snelheid nodig om in de lucht te blijven. Aan een helikopter kleeft die beperking niet. Voor waarnemingen die gedaan worden volgens lijnen dwars op de vliegrichting, zoals laseraltimetrie en optische scanners, betekent dit dat de dichtheid van de waarnemingen toeneemt als de vliegsnelheid afneemt. Dit is de belangrijkste reden dat voor laseraltimetrie met hoge punt dichtheid, zoals noodzakelijk voor waterkeringen, de helikopter op dit moment het favoriete platform is. De waarneemtechniek ontwikkelt zich echter snel en de meetsnelheden nemen toe, zodat vliegtuigen morgen kunnen wat tot vandaag alleen met helikopters mogelijk was.

Een ander voordeel van een helikopter is dat hij vrijwel overal kan landen en opstijgen, waardoor hij flexibeler is dan een vliegtuig, bijvoorbeeld bij het snel van boord halen en verwerken van de opgenomen data. De kosten van een helikoptervlieguur zijn vergelijkbaar met die van een tweemotorig turbopropvliegtuig.

¹⁶ Dit is omdat men bij uitval van één motor nog veilig een noodlanding buiten het stedelijk gebied moet kunnen maken.



figuur 16 Een helikopter met het laseraltimetriesysteem in een rek. Twee GPS-ontvangers op masten aan weerszijden zorgen voor een betere positie- en standbepaling. Het GPS-baisstation op de grond zorgt voor een differentiële positiebepaling. (© Fugro-Inpark)

Een nadeel van een helikopter is dat het platform nog sterker dan een vliegtuig te maken heeft met bewegingen: rol (roll, om de lengte-as), stamp (pitch, de neus gaat omhoog en omlaag) en gier (yaw, de neus gaat naar links en rechts). Voor de correcte bepaling van waar bijvoorbeeld een laserpuntje de grond bemeten heeft, is daarom een snelle en accurate positie- en standbepaling cruciaal. Dit geschiedt met GPS (mogelijk zelfs met twee ontvangers) en een INS (inertiaal navigatiesysteem). Bij het in het Nederlandse coördinatenstelsel brengen van de meetpunten en met name de calibratie daarvan moet met de eigenaardigheden van deze systemen rekening worden gehouden.

Conclusie helikopters voor inspectie waterkeringen

Waterkeringen zijn relatief smalle stroken waarvoor informatie met hoge dichtheid gewenst is. Ondanks de nadelen van de hogere kosten en verminderde stabiliteit, zijn helikopters hiervoor bij uitstek geschikt vanwege hun lage mogelijke vliegsnelheid en minimale vlieghoogte. Waarneemsystemen ontwikkelen zich echter richting hogere resoluties en bij gelijkblijvende eisen zullen in de nabije toekomst ook vliegtuigen aan de dichtheids- en resolutie-eisen kunnen voldoen.

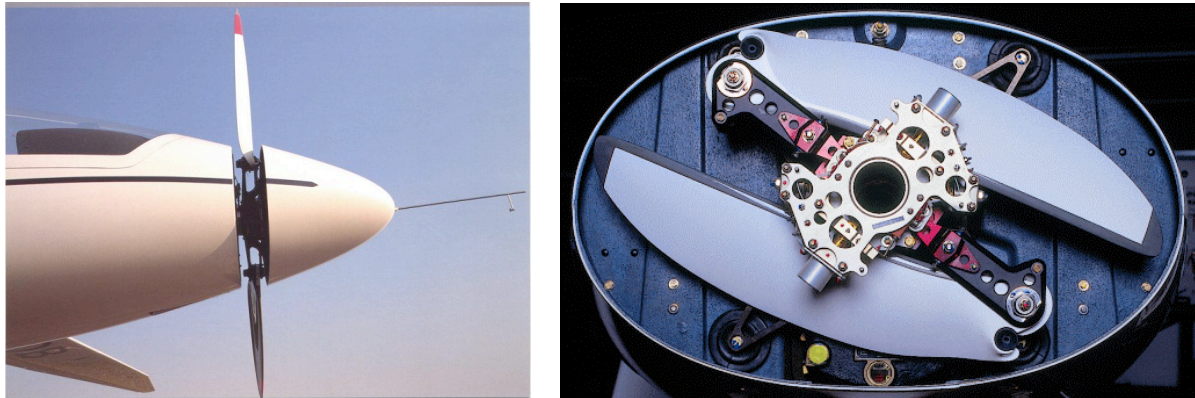
5.2.5 Motorzweefvliegtuigen

Een bezwaar van vliegtuigen en helikopters zijn hun hoge operationele kosten. Deze maken de effectieve inzet van remote sensing voor operationele processen soms minder kansrijk. Voor verschillende toepassingen wordt daarom de inzet van motorzweefvliegtuigen ontwikkeld. De vlieggkosten daarvan zijn veel lager dan van traditionele vliegtuigen, maar dat is niet het enige voordeel. Ze kunnen relatief langzaam vliegen: zie wat over de voordelen daarvan bij helikopters is gemeld (§ 5.2.4). Motorzweefvliegtuigen kunnen zonder motor vliegen (zie figuur 18) en ook met motor is hun geluidsbelasting gering. Ze hebben een zeer kleine glijhoek en kunnen met weinig energie lang in de lucht blijven. Daarnaast hebben ze genoeg aan een beperkte ruimte om op te stijgen en te landen en kunnen ze gedemonteerd worden en in een oplegger worden vervoerd. Dat maakt ze zowel goedkoop als flexibel.

Een nadeel van het motorzweefvliegtuig is de beperking in ruimte, gewicht en elektrisch vermogen voor de mee te voeren waarneemsystemen en randapparatuur.



figuur 17 Een motorzweefvliegtuig boven Berlijn. (© Stemme)



figuur 18 De propellor van de Stemme S10VT (links) kan in de neuskegel opgevouwen worden (rechts een vooraanzicht), waardoor het zweefvliegtuig optimaal aerodynamisch presteert. (© Stemme)

Een voorbeeld van de inzet van een motorzweefvliegtuig is het in kaart brengen in het kader van het verdrag van Malta van gebieden met een mogelijk archeologische waarde. VB Ecoflight zet bij dit proefproject, dat in het kader van Ruimte voor Geo-informatie (RGI) plaatsvindt, een motorzweefvlieg in met systemen voor luchtfotografie en radioactiviteitsmetingen (zie [20] en § 5.3.11). TNO Defensie en Veiligheid bouwt een compacte en goedkope MinisAR (zie § 5.3.8 en [28]) en test die onder een motorzweefvliegtuig, vanwege de genoemde voordelen, maar vooral als voorstudie voor de uiteindelijke toepassing in een licht onbemand vliegtuig.

Conclusie motorzweefvliegtuigen voor inspectie waterkeringen

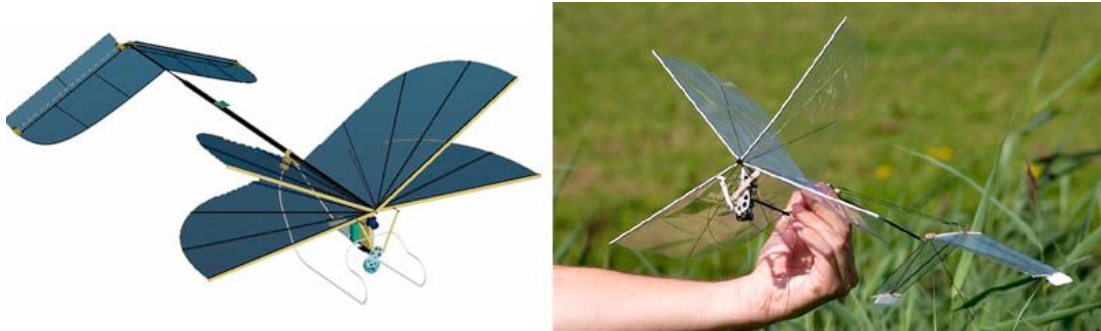
Vanwege de lage operationele kosten, lage milieu- en geluidsbelasting en flexibele inzetbaarheid verdient het aanbeveling de inzet van motorzweefvliegtuigen bij inspectie van waterkeringen nader te onderzoeken, ook al lijkt de omvang en het gewicht van de gebruikelijke waarneemapparatuur een beperking.

5.2.6 Laagvliegende onbemande luchtvaartuigen

Nog lager vliegend, kleiner, lichter en goedkoper dan de hiervoor genoemde vliegtuigen, helikopters en motorzweefvliegtuigen zijn onbemande luchtvaartuigen. Deze *unmanned aerial vehicles* staan bekend onder hun acroniem UAV. In deze paragraaf wordt 'laagvliegend' toegevoegd om ze te onderscheiden van de hoogvliegende onbemande luchtvaartuigen die in § 5.2.7 behandeld worden.

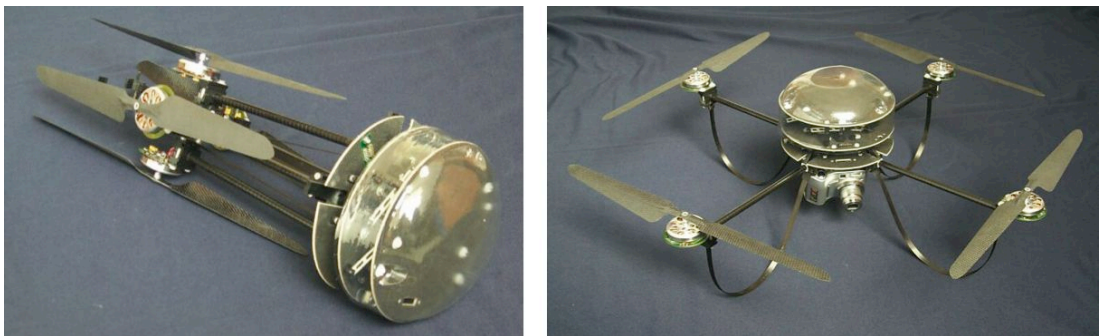
UAV's bestaan in de vorm van vliegtuigen, helikopters en – veel minder gebruikelijk – ballonnen en vliegers en kunnen allerlei afmetingen hebben.

Een qua schaalgrootte absoluut minimum, en daarom ook eerder Micro Aerial Vehicle (MAV) genoemd, is de aan de TU Delft ontwikkelde DelFly (zie figuur 19). De DelFly II vliegt met door een krukas aangedreven op- en neergaande vleugels en herbergt een microcamera die onder meer wordt gebruikt om het apparaatje te stabiliseren. Hij is niet groter dan 30 cm en weegt 16 gram [15]. Deze miniaturisatie is een interessante ontwikkeling, die op zich niet tot een op korte termijn operationeel inzetbaar product leidt, maar wel het testplatform is voor allerlei technologische ontwikkelingen die op den duur tot innovatieve operationele producten kunnen leiden.



figuur 19 De lichtgewicht DelFly I, die vliegt zoals vogels en insecten dat doen en een kleine camera aan boord heeft. (© DelFly, TU Delft)

Een ander klein luchtvaartuig is het door IGI in Kreuztal ontwikkelde experimentele opvouwbaar helikoptertje met vier rotors, dat minder dan een kilogram weegt en een 7 Mpixelcamera aan boord heeft. Zie Grimm en Jensen [23] en figuur 20.



figuur 20 De minder dan een meter grote en een kilogram zware experimentele helikopter met vier rotors, GPS en INS en een 7 Mpix digitale consumentencamera. (© IGI Kreuztal)

Aan de bakermat van de remote sensing staat de vlieger. Er zijn verscheidene semiprofessionele aanbieders van luchtfotografie per vlieger, ook wel KAP genoemd (kite aerial photography). In tegenstelling tot nogal eens door jeugdervaringen gevormde oordelen, is de vlieger tamelijk betrouwbaar en stabiel. Met de ingewikkelde maar zeer stabiele Cody is reeds meer dan een eeuw militaire ervaring; de parafoil (ook wel 'vliegende matras' genoemd), uitgevonden door Jalbert in de jaren 1960, is stokloos en ontwikkelt een grote stijgkracht. Men is voor vliegerwaarnemingen afhankelijk van de windsterkte en windrichting, maar de kosten zijn laag en er is, in tegenstelling tot bij UAVs met kleine verbrandingsmotortjes, geen geluidsoverlast.

Werkelijk van belang met het oog op de operationele inzetbaarheid, meer dan de net genoemde min of meer exotische luchtvaartuigen, is de UAV die op een doorontwikkeling van de modelhelikopter is gebaseerd. Ook in Nederland zijn er verschillende aanbieders, waaronder Miramap, dat met E-producties samenwerkt (zie figuur 22), en Delft Dynamics.

Alle UAV's hebben het voordeel dat ze snel inzetbaar zijn doordat ze achter in een bestelbus passen en naar een specifiek gebied vervoerd kunnen worden en daar voor zeer lokaal gebruik kunnen opstijgen om van relatief geringe hoogte kleine gebieden met een



figuur 21 Een parafoil heeft een grote stabiliteit en draagvermogen en geen frame. Een luchtanker zorgt voor extra stabiliteit. De camera is radiografisch bedienbaar. (© Merryl Martin Owen)

hoge resolutie te kunnen opnemen. De kleine omvang en het feit dat er geen mensen aan boord zijn maakt dat dit platform de zeer grote belangstelling van militairen geniet.

UAV's kunnen op twee manieren worden ingezet. Bij het op afstand besturen door een operateur op de grond is zichtcontact in het algemeen noodzakelijk, wat een beperking is. Ook kunnen ze automatisch ('autonoom') worden bestuurd. Dit vergt, omdat de menselijke intelligentie voor besturing dan moet worden geautomatiseerd, een kostbaar besturingssysteem (denk aan kruisraketten), tenzij het niet meer behelst dan een tevoren geprogrammeerd vluchtpad over bekend gebied, dat het vliegtuigje met GPS-plaatsbepaling dient vast te houden.

De geringe omvang en laadvermogen maakt het moeilijk hooggekwalificeerde waarneemapparatuur mee te nemen. Dit is één van de redenen dat naar miniaturisatie gestreefd wordt, bijvoorbeeld bij de ontwikkeling van MinisAR door TNO Defensie en Veiligheid [28].



figuur 22 De onbemande helikopter van E-producties en Miramap, waarmee van lage hoogte snel gedetailleerde beelden kunnen worden gemaakt. (© Miramap)

UAV's kunnen worden beschouwd als laagvliegende vliegtuigen, maar in sommige opzichten zijn ze beter te beschouwen als hoogvliegende ogen. Miramap voerde een RGI-project uit waarbij de mogelijkheid werd gedemonstreerd een calamiteuze (bijvoorbeeld verkeers-) situatie van boven snel geometrisch vast te leggen. In opdracht van Rijkswaterstaat AGI liet Miramap zien dat een laagvlegend onbemand platform snel fotogrammetrische opnamen met hoge resolutie kan maken van een klein gebied [27]. Een belangrijk voordeel daarbij was in dit geval dat gevaarlijke of de doorstroming belemmerende situaties met landmeters langs de snelweg worden voorkomen. Delft Dynamics voert een project uit in samenwerking met het Innovatietestcentrum van Rijkswaterstaat DWW om vanuit een gestabiliseerde onbemande helikopter verkeersbeelden van boven een snelweg op te nemen en te analyseren [10].

Conclusie laagvliegende onbemande luchtvaartuigen voor inspectie waterkeringen

Waterkeringen zijn relatief lange smalle stroken waarvoor informatie met hoge dichtheid gewenst is. Onbemande luchtvaartuigen zijn minder geschikt voor dagelijkse en periodieke inspectie vanwege de lengte van de waterkeringen en de gewenste hoge beeldkwaliteit. UAV's kunnen wél interessant zijn bij calamiteiten, doordat ze zowel snel inzetbaar zijn als een klein gebied met hoge resolutie kunnen waarnemen. Een belangrijke beperking daarbij kan het weer zijn: calamiteiten gaan niet zelden gepaard met slecht weer. Denkbaar is ook dat onbemande helikopters kunstwerken vanaf ontoegankelijke posities in kaart brengen.

Andere uavs dan mini-helikopters zijn vooral interessant als platform voor technologische ontwikkelingen op het gebied van miniaturisatie, stabilisatie en besturing, die in de toekomst zouden kunnen bijdragen aan operationele producten.

5.2.7 Langdurig hoogvliegende onbemande luchtvaartuigen

Er is, naast de hiervoor genoemde platforms, nog een vermeldenswaardig platform. Dit is evenals de laagvliegende UAV onbemand, maar vliegt juist op grote hoogte. Bovendien zijn deze platforms erop ingericht langdurig op eigen kracht in deze bovenste lagen van de atmosfeer te verblijven. Ze worden daarom High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles genoemd: HALE-UAVS. Voor allerlei soorten onderzoek en militaire toepassingen zijn dergelijke luchtvaartuigen ontwikkeld in heel verschillende verschijningsvormen. Omdat er hiervan in De Nederlanden echter slechts één serieus voorbeeld is, wordt hieronder uitsluitend dit platform behandeld.

In opdracht van de Vlaamse regering ontwikkelt VITO, het Vlaamse Instituut voor Technologisch Onderzoek, een onbemand luchtvaartuig voor aardobservatie vanaf een hoogte van 14 tot 20 kilometer. Het initiatief is tevens onderdeel van het programma van de Europese Commissie en ESA voor monitoring van het milieu en veiligheid GMES (zie einde § 5.2.2). Bij het ontwikkelen van het systeem lag de nadruk op de succesvolle integratie van bestaande technologieën en minder op de ontwikkeling van nieuwe technologieën. Dit moet leiden tot een snelle en effectieve realisatie van een platform tegen relatief veel lagere kosten dan de HALE-UAVS die elders met zeer grote budgetten ontwikkeld zijn. De nadruk is daarbij komen te liggen op lichtgewicht, óók voor de sensoren. Het geïntegreerde systeem van sensoren, luchtvaartuig, besturingssystemen, grondcontrolestation en dataverwerking heeft men PEGASUS gedoopt.¹⁷

Voor het platform is men een samenwerking aangegaan met Verhaert Space en QinetiQ. Het ontwikkelde luchtvaartuig MERCATOR is een motorzweefvliegtuig met een spanwijdte van 18 meter, waarvan de vleugels geheel bedekt zijn met zonnecellen. Het heeft twee elektromotoren die het indien nodig op hoogte houden. 's Nachts worden de instrumenten uitgeschakeld om alleen de motoren te voeden en daalt het vliegtuig tot 15 km, de hoogte waarvoor het geoptimaliseerd is; bij dageraad vliegt het terug naar 18 km hoogte. Het gevaarte weegt 32 kilogram. Bij de zonnecellen, een soort folie die tegelijk de vleugel huid vormt, lag de nadruk niet op de gebruikelijke vermogensopbrengst per vierkante meter, maar op het gewicht per vierkante meter. De vermogensopbrengst is omstreeks 1 kW. Gezien de intensiteit van het zonlicht zou MERCATOR zonder veel voorzorgen op breedtegraden rond de evenaar kunnen vliegen, maar voor onze noordelijke breedte wordt er een zwaar beroep gedaan op efficiënte opslag van energie. De lithium-accu's zijn ondergebracht in het geraamte van koolstofvezel en moeten een temperatuur van -70°C kunnen weerstaan: dit is de grootste uitdaging van het project. Het vliegtuig is ontworpen op verdeling van massa en krachten, zodat het geraamte zo licht mogelijk kan zijn. De nuttige lading vormt geen aerodynamische belasting en zit in een buis op de neus met een diameter van slechts 12 cm.

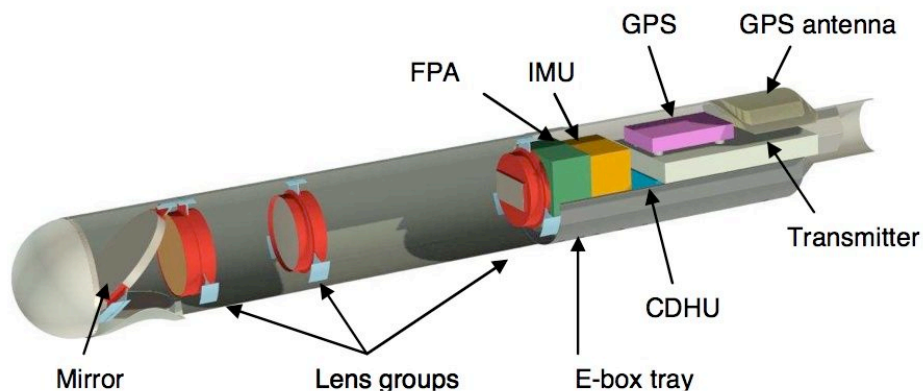
¹⁷PEGASUS staat voor Policy support for European Governments by Acquisition of information from Satellite and UAV-borne Sensors.



figuur 23 Een prototype van het langdurig hoogvliegende onbemande vliegtuig MERCATOR, met een spanwijdte van 18 meter en een gewicht van 32 kg, maakt een proefvlucht. De instrumenten komen in de buis voorop en mogen niet meer dan 2 kg wegen. (© VITO)

Het PEGASUS -systeem combineert de voordelen van satellieten met die van vliegtuigen en heeft anderzijds nauwelijks de nadelen van beide platforms. Met satellieten deelt het de voordelen van weinig turbulentie en langdurige beschikbaarheid. Het vliegtuig wordt met een ballon verticaal gelanceerd tot een hoogte van 15 kilometer, hetgeen niet alleen geen startbaan en andere vliegveldfaciliteiten noodzakelijk maakt, maar ook tot minder problemen met de luchtverkeersleiding leidt. Vervolgens kan het autonoom maanden in de lucht blijven, op hoogten waar het geen last heeft van het weer (hoge windsnelheden komen voor rond 10 km) en van het immer toenemende luchtverkeer en alle regels die daarvoor gelden. De vliegsnelheid is laag, waardoor het platform flexibel over het gewenste spoor kan worden gevlogen. Als het eenmaal in de lucht is, kan het onafgebroken waarnemen tegen veel minder kosten dan een vliegtuig, doordat zowel de vlieggasten als de personeelskosten lager zijn. Het is daarom bij uitstek een geschikt platform voor monitoring.

De belangrijkste beperking van MERCATOR is het zeer lage gewicht dat de nuttige lading mag hebben. Voor het huidige toestel is dit zo'n 2 kilogram; als MERCATOR na succes wordt opgeschaald tot 30 meter of meer, is 5 tot 10 kilogram haalbaar. Het waarneminstrumentarium moet passen in de buis van 1 meter lengte en 12 cm diameter en mag niet meer vermogen dan 50 Watt verbruiken. Er is geen opslagfaciliteit aan boord: alle data wordt direct naar het grondstation gestraald. Het vliegtuig moet binnen 170 km van het grondstation blijven.



figuur 24 De multispectrale sensor en de andere systemen in de nuttige lading van PEGASUS moeten passen binnen de 1 meter lange neusbuis van 12 cm. (© VITO)

Aan de hand van de gebruikersspecificaties wordt om te beginnen een multispectrale sensor ontwikkeld die past binnen de randvoorwaarden van het systeem. Van Achteren et al. [60] lieten zien welke afwegingen daarbij moeten worden gemaakt. Het gaat onder meer om de signaalruisafstand, de pixelgrootte op de grond, bewegingsonscherpte en thermisch gedrag. Het multispectrale systeem heeft een panverscherpte grondresolutie van 30 cm vanaf een hoogte van 18 km, 10000 x 1200 pixels en een zwad van 3 km breed. Als beperking noemt VITO de geringe bedekking, gezien de hoge resolutie en lage vliegsnelheid. De smalle strook is voor waterkeringen echter geen nadeel. De multispectrale camera weegt nauwelijks 600 gram.

Uiteindelijk worden in de komende jaren ook een laseraltimeter, een infraroodcamera, een hyperspectrale sensor en een SAR-systeem ontwikkeld. Dat dit laatste een uitdaging is, mag wel blijken uit het feit dat TNO Defensie en Veiligheid een MinisAR ontwikkelt voor gebruik in een laagvliegend onbemand platform die niet meer dan 50 kg mag wegen ... Omdat het benodigde vermogen van een actief remotesensingsysteem toeneemt met de vierde macht van de hoogte, zal ook het beschikbaar elektrisch vermogen een nauwelijks te overwinnen obstakel zijn.

PEGASUS is de naam van het project of systeem, niet van het platform (dat heet MERCATOR). PEGASUS omvat óók de ontvangst en verwerking van data naar informatie en de ontsluiting per internet voor eindgebruikers, conform de doelstellingen van het GMES-programma. Daarmee is het voor eindgebruikers ook werkelijk veelbelovend.

Aan het PEGASUS-project is ruime aandacht geschonken tijdens het VITO-symposium *The future of remote sensing*, oktober 2006 in Antwerpen. Zie [14], [17], [38] en [60].

Conclusie langdurig hoogvliegende onbemande luchtvaartuigen voor inspectie waterkeringen

Inspectie van waterkeringen vereist een relatief hoge resolutie, een smalle lange strook en zou zeer profiteren van een intensieve monitoring, of het nu maandelijks, dagelijks of incidenteel is. Satellieten en vliegtuigen hebben elk hun nadelen en PEGASUS lijkt inderdaad hun voordelen te combineren zonder de meeste nadelen en een geschikt monitoringsplatform te zijn.

Vanwege de omvang van de instrumenten en het benodigde vermogen voor een actief systeem op deze hoogte, lijken laseraltimetrie en SAR nauwelijks haalbaar. Optische sensoren in zichtbaar licht, infrarood en hyperspectraal lijken dit echter wel. De resolutie is maar net voldoende en het VITO-team moet nog bewijzen dat het werkelijk kans ziet hooggekwalificeerde instrumenten met zo'n extreem laag gewicht en omvang te bouwen.

Gezien de voortgang en inspanningen die VITO op dit gebied laat zien en de daadwerkelijke gerichtheid op het bedienen van de eindgebruiker, kan PEGASUS voor het waterkeringbeheer als een zeer veelbelovend platform worden gekwalificeerd.

5.3 Ontwikkelingen op het gebied van remotesensingtechnieken

5.3.1 Inleiding

In de vorige paragraaf ging het om de karakteristieken van de verschillende platforms waarvandaan remotesensingwaarnemingen worden gedaan. De karakteristieken die uitsluitend te maken hebben met de waarnemingstechniek worden in deze paragraaf behandeld. Het gaat alleen om de remotesensingtechnieken die volgens de afbakening in § 2.2 onder remote sensing begrepen worden.

In deze paragraaf worden verschillende remotesensingtechnieken kort beschreven, waarbij nauwelijks op de technische achtergrond wordt ingegaan. Gedeeltelijk kan het rapport *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* [43] als aanvulling worden gebruikt en de in het navolgende gegeven referenties kunnen ter verdieping dienen. Indien mogelijk worden enkele voorbeelden genoemd die een indruk van de toepassingsmogelijkheden geven. Per techniek wordt besloten met een oordeel over de toepasbaarheid voor inspectie van waterkeringen.

5.3.2 Luchtfoto's

De oudste toepassing van remote sensing is nog steeds het meest gebruikt en wijdst verspreid: luchtfotografie. Luchtfoto's worden voor vele toepassingen gebruikt. Als overzicht- of achtergrondplaatje worden er geen hoge eisen aan gesteld. Beelden als in Google Earth maken daarvoor ruim voldoende indruk. Als de beelden werkelijk bruikbaar moeten zijn in een GIS en exact over bijvoorbeeld terrestrisch ingewonnen data moeten vallen, moeten ze geometrisch aan zwaardere eisen voldoen. Dan nog is voor eenvoudige toepassingen een eenvoudige geometrische correctie voldoende, ook gezien de beperkte terreinhoogtevariatie in Nederland. Als er hogere eisen worden gesteld, komen we in het domein van de fotogrammetrie (zie § 5.3.3). In de beelden moet dan daadwerkelijk gemeten kunnen worden en dit stelt hoge eisen aan de optiek en constructie van luchtcamera's.

Een analoge fotogrammetrische camera neemt op op grootformaat film. De vast uitgevoerde optiek voldoet aan zeer hoge eisen; de vertekeningparameters worden nauwkeurig berekend. Bij de opname worden randmerken meegefotografeerd. De film wordt na ontwikkeling gescand door speciale scanners. Deze scanners kunnen opnieuw vertekening introduceren.



figuur 25 De Vexcel UltraCam-D digitale fotogrammetrische camera beeldt 86 megapixels af, terwijl zijn opvolger de UltraCam-X er zelfs 216 miljoen opneemt. (© Vexcel Imaging GmbH)

Bij vliegtuigen is steeds meer sprake van de overstap van analoge naar digitale luchtcamera's. Digitale camera's bestaan in de vorm van beeld- (vlak-) en lijncamera's. De laatste nemen lijnen op die door de 'rol' van het vliegtuig ieder apart geometrisch moeten worden gecorrigeerd. De Leica ADS40 lijnscanner kijkt echter wel zowel naar voren, onderen (nadir) als achteren, waardoor er voor elke lijn 'overlap' is. De Vexcel UltraCam-vlakcamera's daarentegen nemen in één keer een beeld op. Een aardig inzicht in de karakteristieke voor- en nadelen van lijn- en vlakcamera's ontstaat aan de hand van de notitie *Frame camera (UCD) versus 'Push-brooming'* [36], ondanks dat dit als een commercieel pamflet van de hand van de Vexcel tegen de lijnscanner van Leica gezien kan worden. Ook het artikel *Ultracam-D: understanding some noteworthy capabilities* [35] van de hand van de Vexcel-werknemers Franz Leberl en Michael Gruber biedt een aardig inzicht in de opkomst van de digitale luchtfotografie.

Moderne camera's als de Vexcel UltraCam-D en Leica ADS40 nemen beelden op met een breedte van 11.500 resp. 12.000 pixels, waarbij de Vexcel een vlak afbeeldt met een hoogte van 7.500 pixels en de Leica een lijnscanner is. De UltraCam-D (zie figuur 25; hij is ook te zien bij het vliegtuig in figuur 14) heeft dus 86 Mpixels en zijn opvolger UltraCam-X zelfs 216 Mpixels. Afhankelijk van de vlieghoogte is een pixelafmeting van 2 cm mogelijk.

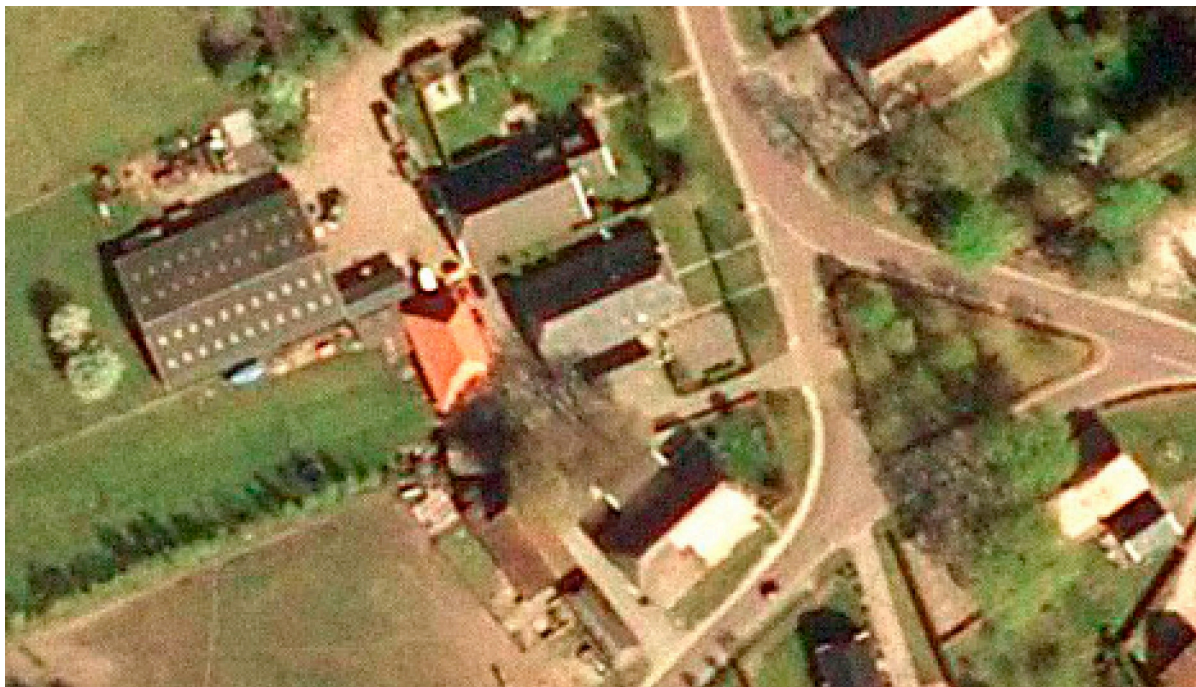
In figuur 26 is een deel van een luchtfoto met een resolutie van 4 cm afgebeeld, gemaakt met de Vexcel UltraCam-D. De uitsnede is zo gekozen dat de afbeelding een resolutie van 300 pixels per inch heeft, de voor drukwerk maximaal zinvolle resolutie. Om te tonen wat dit nu werkelijk betekent voor wat er op een dergelijke foto zichtbaar is, is in figuur 27 een uitsnede afgebeeld die viermaal vergroot is. Dan nog gaan er 29,5 pixels à 4 cm in een centimeter. De compressieartefacten van het met jpeg gecomprimeerde bestand gaan in dit geval storen. In figuur 29 is een soortgelijke exercitie te zien: een deel van het in het voorjaar van 2007 voor de gehele Benelux ingewonnen luchtfotobestand met een resolutie van 40 cm, met in figuur 28 een viermaal vergrote uitsnede.



figuur 26 Voorbeeld van een luchtfoto met 4 cm resolutie: de haven van Marken. Deze is hierboven op de voor drukwerk maximaal zinvolle 300 pixels per inch afgebeeld. Zie ook de uitsnede in figuur 27.
(© Aerodata International Surveys)



figuur 27 Een detail van de luchtfoto uit figuur 26 met een resolutie van 4 cm, viermaal vergroot tot 75 ppi (29,5 pixels/cm), geeft een indicatie van wat bij deze resolutie nog zichtbaar is. De jpeg-compressie-artefacten overheersen de beeldruis; dergelijke beelden kunnen ook minder sterk gecomprimeerd worden, waardoor de netwerk- en opslagvereisten navenant hoger worden. (© Aerodata International Surveys)



figuur 28 Een detail van de luchtfoto uit figuur 29 met een resolutie van 40 cm, viermaal vergroot tot 75 ppi, geeft een indicatie van wat bij deze resolutie nog zichtbaar is. (© Aerodata International Surveys)



figuur 29 Een deel van 'aerogrid® NL 2007': Ees (Drenthe). Dit begin 2007 voor de gehele Benelux ingevlogen luchtfotobestand heeft een resolutie van 40 cm. Hierboven een vergroting tot de voor drukwerk maximaal zinvolle 300 ppi. Zie ook de uitsnede in figuur 28. (© Aerodata International Surveys)

Digitale luchtcamera's hebben een aantal voordelen ten opzichte van analoge. Ze maken op dezelfde manier gebruik van zeer hoge kwaliteit optische systemen, hoewel alles vanwege het kleine sensorformaat een stuk kleiner is. Het productieproces kan korter zijn doordat de film niet meer ontwikkeld en gescand hoeft te worden en het ontbreken van de scanstap zorgt niet meer voor kwaliteitsverlies. Opmerkelijker voordelen zijn echter het groter dynamisch bereik: de elektronische sensoren zijn gevoeliger dan film en kunnen dieper doortekende opnamen maken of onder ongunstiger lichtomstandigheden gebruikt worden. Het dynamisch bereik gaat richting 12 bit per kanaal, terwijl conventionele systemen na scanning nauwelijks tot 8 bit komen. Een ander groot voordeel is dat naast het rode, groene en blauwe kanaal ook het nabij-infrarood wordt opgenomen, wat extra mogelijkheden toelaat (zie § 5.3.5).

Luchtfoto's dienen, zeker voor fotogrammetrische toepassingen (§ 5.3.3), bij een heldere atmosfeer en een constante belichting door de zon te worden opgenomen. Samen met de eisen aan vegetatie (hoog of juist niet) beperkt dit het aantal vliegdagen sterk.

Door de verschillende invalshoeken voor punten onder het vliegtuig en aan de rand van de strook treedt er omvalling op (zie figuur 15). Afhankelijk van de toepassing kan dit betekenen dat hoger gevlogen moet worden of dat alleen het centrale deel van de opgenomen strook kan worden gebruikt. Door de veel hogere positie hebben hogeresolutiesatellietbeelden hier minder last van, tenzij de satelliet niet over het gewenste gebied vliegt en opzij moet kijken. Luchtfoto's vertonen lichtafval naar de randen en ook dat nadeel is minder aanwezig bij satellietbeelden. Deze lichtafval moet samen met eventuele kleurafwijkingen worden gecorrigeerd vóór afzonderlijke opnamen tot een mozaïek worden samengevoegd.

Luchtfoto's die als bijproduct van fotogrammetrische hoogte-opnamen ontstaan, zijn door hun zeer hoge beeldkwaliteit erg aantrekkelijk. Luchtfoto's die als bijproduct bij laseraltimetrie ontstaan, zijn in het algemeen minder interessant. Deze foto's worden in het algemeen vanaf een lagere hoogte genomen en vertonen dus grotere omvalling, er moeten meer foto's worden samengevoegd om het gebied te dekken met alle nadelen van dien en de camera's waarmee tijdens een laservlucht foto's worden gemaakt zijn middenformaat camera's die lang niet de optische kwaliteit en beeldafmeting hebben van de hierboven beschreven fotogrammetrische luchtcamera's.

Luchtfoto's zijn kostbaar. Er zijn verschillende aanbieders die heel Nederland invliegen en delen daarvan verkopen vanaf de plank, wat een aanzienlijke besparing voor de gebruiker betekent. Zo heeft Aerodata in april 2007 dankzij het goede weer de gehele Benelux kunnen inwinnen met een pixelgrootte van 40 centimeter (de zojuist besproken figuur 29), hetgeen een relatief consistent beeld geeft. Bekend is ook hun levering ten behoeve van Google Earth. Slagboom en Peeters is begonnen in 2006 en 2007 heel Nederland te vliegen met een resolutie van 10 cm [57] en daarnaast zijn er nog verscheidene andere aanbieders actief.

Conclusie luchtfoto's voor inspectie waterkeringen

Luchtfoto's zijn voor waterkeringbeheerders een nuttige informatiebron, vooral ter oriëntatie en ter controle. Ze kunnen goed gebruikt worden voor vergunningverlening en handhaving en zijn uitstekend ingangsmateriaal voor mutatiedetectie (zie § 5.3.14). Ook ter verificatie van andere informatiebronnen, zoals bijvoorbeeld laseraltimetrie, zijn ze nuttig. Willen ze daadwerkelijk voor inspectie gebruikt worden, dan is een hoge resolutie en een hoge actualiteit noodzakelijk en dat maakt ze kostbaar omdat ze dan waarschijnlijk speciaal

voor de inspectie moeten worden ingevlogen. Dan nog zijn bijvoorbeeld scheuren door hun kleine breedte nauwelijks op luchtfoto's te onderscheiden.

Veel meer dan wat met visuele inspectie te zien is, is niet zichtbaar op luchtfoto's, maar het andere standpunt en het overzicht kunnen meerwaarde hebben. Landsdekkende luchtfoto's die vanaf de plank gekocht kunnen worden, zijn beslist aantrekkelijk, hoewel voor inspectie hun resolutie beperkt is. Digitaal opgenomen luchtfoto's bevatten het nabije infrarood en dat is zeker waardevol (zie § 5.3.5). Ondanks dat luchtfoto's kostbaar zijn, kunnen ze het qua kosten, beschikbaarheid, kwaliteit en resolutie voorlopig makkelijk winnen van hogeresolutiesatellietbeelden (zie § 5.3.4).

5.3.3 Fotogrammetrie

Als luchtfoto's gebruikt worden voor kartering of het vervaardigen van hoogtemodellen, spreekt men van fotogrammetrie. Het behelst het meten in luchtfoto's van zeer hoge geometrische kwaliteit: zie wat er in de vorige paragraaf over luchtfotocamera's opgemerkt werd. Voor karteringswerk en het vervaardigen van hoogtemodellen worden twee luchtfoto's vanuit verschillende posities genomen, die vervolgens tegelijk worden bekeken. Tot voor kort gebeurde dat in een analoog stereouitwerkingsinstrument, waarbij de twee fotografische platen in de stand geplaatst werden die ze bij het nemen van de opnamen hadden. De operateur kijkt door een zoeker en ziet beide beelden tegelijk. Hij kan door het stereo-effect driedimensionaal meten en karteren (zie figuur 30). De laatste tijd zijn hiervoor digitale uitwerkingsinstrumenten in opkomst, die dit proces in software doen. De komst van digitale luchtcamera's maakt dit proces nog eenvoudiger. Ondanks de vervolmaking van digitale matchingtechnieken, blijft echter de laatste stap, de driedimensionale kartering, het handwerk van de operateur met een goede stereovisie.

Voor het aan elkaar rekenen van afzonderlijke opnamen is een nauwkeurige positie- en standbepaling noodzakelijk. Dit geschiedt door in het terrein paspunten te leggen en terrestrisch in te meten. Met behulp van deze bekende zwartwitte vliegschijven kunnen door triangulatie en blokvereffening de oriënteringsparameters van de foto's worden bepaald. Deze zijn nodig om het 3D-model te genereren waarin gemeten wordt. Met de komst van differentiële GPS en hoognauwkeurige inertiaal navigatiesystemen (INS) zijn minder paspunten in het terrein nodig, waardoor het proces minder kostbaar wordt en minder tijd in beslag neemt, maar voor nauwkeurige fotogrammetrie blijven meetpunten op het aardoppervlak noodzakelijk.

Het bepalen van de exacte stand van de fotografische plaat tijdens de opname en het zien van diepte door het stereoeffect van twee naastgelegen opnamen betekent dat er zowel in de breedte van de vliegstrook als in de lengte overlap moet zijn. Voor de dwarsoverlap is minimaal 60% overlap vereist, voor de langsoverlap 10%. Dit feit plus het feit dat het stereouitwerken een zeer arbeidsintensieve taak is (die om die reden vaak in Oosteuropese of Aziatische landen wordt gedaan) maakt dat fotogrammetrische uitwerking vrij kostbaar is. Vanwege de vele stappen is – nog los van het wachten op het gunstige vliegseizoen – de doorlooptijd voor fotogrammetrische opnamen relatief lang.

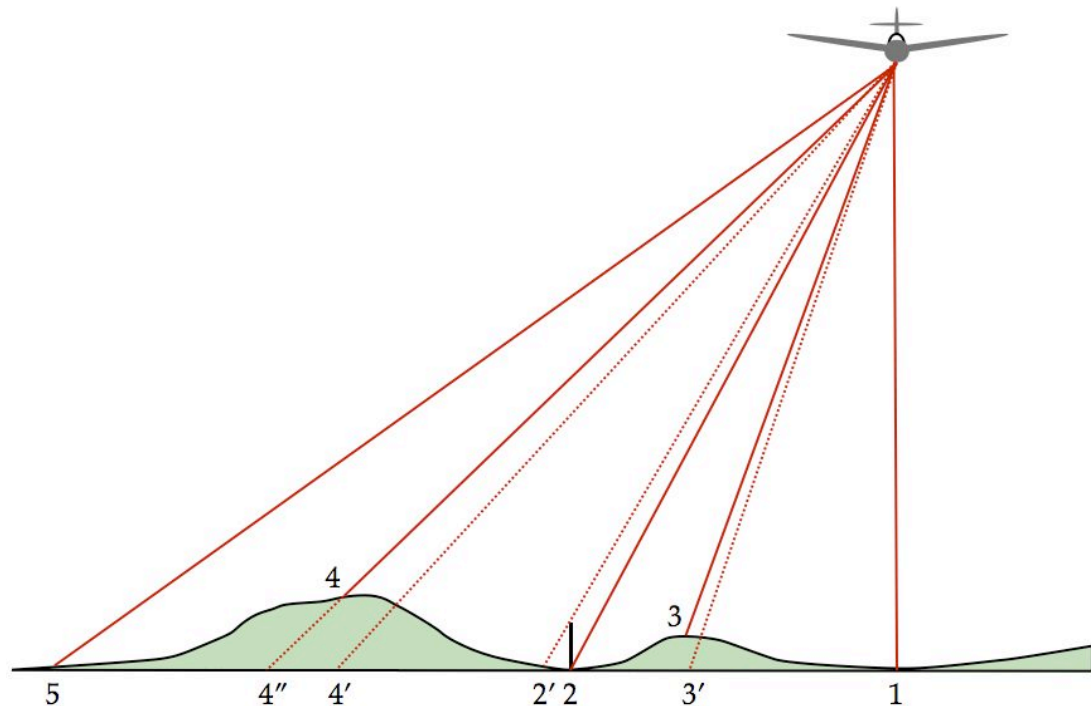


figuur 30 Een operateur bezig met het uitwerking van een fotogrammetrische opname in een analoog uitwerkingsinstrument. (© Rijkswaterstaat Adviesdienst Geo-informatie en ICT)

Daar staat tegenover dat er nog steeds geen enkele techniek nauwkeuriger is dan fotogrammetrische kartering, op landmeten na althans. Voor het Digitaal Topografisch Bestand (DTB) van alle in beheer zijnde gebieden en objecten gebruikt Rijkswaterstaat fotogrammetrie. De specificaties liggen al jaren vast: voor harde topografie is de maximale standaardafwijking van de precisie in ligging 5 cm, in hoogte 9 cm [46]. Tot voor kort kon daar met bijvoorbeeld laseraltimetrie niet aan gedacht worden, hoewel Rijkswaterstaat AGI recentelijk een studie heeft laten uitvoeren waarbij met laseraltimetrie met zeer hoge punt dichtheid en veel controlepunten zelfs de nog strengere eisen voor DTM-ontwerp werden gehaald: 7,5 cm in ligging, 2,5 cm in hoogte [2].

Een voordeel van fotogrammetrische kartering door een operateur is dat hij het beeld kan interpreteren, waardoor hij bijvoorbeeld in staat is de juiste lijnen te identificeren of in staat is de topografie door de vegetatie heen te zien. Dit is ook de reden dat de nv De Scheepvaart, die de Vlaamse kanalen beheert en exploiteert, na een vergelijkende studie van verschillende aanbieders voor fotogrammetrie gekozen heeft om de kanalen in kaart te brengen.

Uit luchtfoto's met een hoge geometrische kwaliteit kunnen, met behulp van het hoogtemodel dat bepaald is met fotogrammetrie of met bijvoorbeeld laseraltimetrie, *orthofoto's* vervaardigd worden. Foto's (vrijwel) recht naar beneden genomen (nadirfoto's) zijn nog niet geschikt om over een kaart of geografische data gelegd worden (in een GIS bijvoorbeeld) omdat ze vertekeningen bevatten. Zie figuur 31. Objecten die



figuur 31 Door de variërende kijkhoek vanuit het vliegtuig is een luchtfoto niet direct geometrisch bruikbaar. Punt 4 ligt hoger dan 1, 2 en 5 en wordt daarom afgebeeld in de richting van de zichtlijn: op 4'', terwijl zijn geografische positie 4' is. De verplaatsing wordt groter naarmate het punt verder naar de rand van het beeld ligt. Het object in punt 2 vertoont omvalling, zoals ook in figuur 15 getoond wordt. Als de hoogte bekend is, kan hiervoor worden gecorrigeerd: orthorectificatie. (© STOWA WGL / Swartvast – Rens Swart)

niet pal onder het vliegtuig liggen worden vanuit het camerastandpunt schuin bekeken. Als het terrein niet vlak is, betekent dat dat ze zich op de fotografische plaat naar binnen (als ze relatief laag liggen) of buiten (als ze relatief hoog liggen) verplaatsen. De punten 1, 2 en 5 in figuur 31 komen in de foto op de plek waar ze horen. Punt 4 ligt hoger dan 1, 2 en 5 en wordt daarom afgebeeld in de richting van de zichtlijn: op 4'', terwijl zijn geografische positie 4' is. De verplaatsing wordt groter naarmate het punt verder naar de rand van het beeld ligt. Het object in punt 2 vertoont omvalling, zoals ook in figuur 15 getoond wordt.

Uit een luchtfoto kan een orthofoto worden vervaardigd door voor elk punt een correctie toe te passen voor de hoogte van het terrein. Als de terreinhoogte van punt 4 bekend is, kan een verschuiving worden toegepast zodat het punt in plaats van op 4'' op 4' terecht komt. In het algemeen wordt het beeld vervolgens nog in een geografisch coördinatenstelsel gebracht, waardoor het in bijvoorbeeld een GIS onder andere data kan worden gelegd.

Bij *true* orthofoto's is niet alleen voor hoogteverschillen op maaiveld gecorrigeerd, zoals bij gewone orthofoto's, maar zijn ook gebouwen rechtgezet. Hiervoor zijn behalve een hoogtemodel van het terrein ook de hoogten van de gebouwen nodig. Voor het DTB van Rijkswaterstaat zijn deze aanwezig en worden ook *true* orthofoto's vervaardigd.

Conclusies fotogrammetrie voor inspectie waterkeringen

Voor de legger is kartering met tamelijk hoge precisie nodig. Fotogrammetrie is altijd nog de meest nauwkeurige wijze van karteren, zeker voor harde topografie. Als bijproduct heeft

het kwalitatief en geometrisch zeer goede lucht- of orthofoto's. De precisie voor zachte topografie zoals gras en hogere vegetatie is minder. Laseraltimetrie is dan een concurrerend alternatief, dat bovendien in het algemeen goedkoper is, maar geen zeer hoge kwaliteit foto's als bijproduct heeft.

5.3.4 Hogeresolutiesatellietbeelden

Met de komst van IKONOS in 1999, met een resolutie van het panchromatische (zwart/wit-) beeld van 1 meter (zie de *IKONOS imagery product guide* [33]), werden satellieten ook aantrekkelijk als alternatief voor kostbare luchtfoto's. Er zijn inmiddels verschillende hogeresolutiesatellieten, waaronder Quickbird met een pixelgrootte van 60 cm, en met de GeoEye-1 in 2008 is een pixelgrootte op de grond mogelijk van 41 cm panchromatisch (zwart/wit) en 1,65 m multispectraal, voor niet-Amerikanen te converteren naar maximaal 0,5 meter. In § 5.2.2 werden de voor- en nadelen van het gebruik van satellieten beschreven. Pieter Bresters en Dian Jansen van de toenmalige Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat beschreven in 2001 de eigenschappen van hogeresolutiesatellietbeelden, maakten een vergelijking met luchtfoto's en bestudeerden de mogelijke toepassingen voor Rijkswaterstaat [11].

Weliswaar is de geometrische kwaliteit door het hoge opnamestandpunt goed, het verkrijgen van een hogeresolutiebeeld op het gewenste moment van het gewenste stukje Nederland is nog niet eenvoudig. In § 5.2.2 werd al uitgelegd dat een resolutie van 1 meter en een overkomstfrequentie van eens per 3 dagen nog niet betekent dat het mogelijk is van het gehele beheergebied een opname met een resolutie van 1 meter te verkrijgen of dat een waterkering eens per 3 dagen kan worden opgenomen. Als men tevoren bestelt, kan er méér dan als men een beroep op archiefdata moet doen, maar men moet daarbij concurreren want de satelliet kan maar één spoortje van 11 kilometer binnen zijn grondspoorafstand van honderden kilometers bekijken. Bovendien kan bewolking roet in het eten gooien.

De hier besproken optische satellietbeelden hebben weliswaar voor satellieten een extreem hoge resolutie (veel satellietensensoren hebben een resolutie tussen 30 en 1200 meter), maar de resolutie is voor nauwkeurige identificatie en kartering beperkt, zoals de vergelijking van figuur 32 met figuur 29 en zeker met figuur 26 duidelijk maakt. In *Remote sensing in het waterbeheer* [44] concludeerde Waterschap Regge en Dinkel dat IKONOS-beelden voor de handhaving van de keur een te geringe resolutie hebben. Bovendien zijn de kosten relatief hoog. Natuurlijk zijn de kosten van speciaal gevlogen luchtfoto's ook hoog, maar men heeft dan een hogere resolutie en het alternatief van luchtfoto's van de plank (§ 5.3.2) is zonder meer aan te bevelen als ze aan de gewenste specificaties voldoen.

Bij het verkrijgen van hogeresolutiebeelden voor het gewenste gebruiksdoel kan bijvoorbeeld Geoserve van dienst zijn: zij hebben contacten met alle leveranciers en hun bemiddeling wil nog wel eens helpen. NEO biedt een andere dienst: zij produceren een landsdekkend beeld met een resolutie van 1 meter uit alle beschikbare beelden van verschillende hogeresolutiesatellieten, opgenomen op verschillende momenten en met verschillende resoluties. In het algemeen kan een groot gebied niet vaker dan enkele keren per jaar worden opgenomen en dan zal men nog met 10% bewolking genoeg moeten nemen.



figuur 32 Een IKONOS-beeld van Venetië met een resolutie van 1 meter (panchromatisch verscherpt kleurenbeeld) met linksonder een uitsnede driemaal vergroot. (© GeoEye)

Conclusie hogeresolutiesatellietbeelden voor inspectie waterkeringen

De bijna mythische proporties ten spijt, is het nut van hogeresolutiesatellietbeelden voor inspectie van waterkeringen beperkt. Het is moeilijk het gewenste product van het gewenste gebied op het gewenste tijdstip te verkrijgen. Daarnaast is voor inspectie de resolutie te laag en zijn de kosten hoog. Luchtfoto's zijn te verkiezen, zeker als volstaan kan worden met foto's van de plank van de leverancier.

5.3.5 Nabij-infrarood

Het nabij-infrarood is een kleurenband met golflengten net langer dan het zichtbare rood. De infrarode band leent zich goed voor het bestuderen van de gezondheid van vegetatie. Bladgroen reflecteert nabij-infrarood goed, terwijl bijvoorbeeld camouflagegroen geschilderde objecten dat niet doen. Door een beeld te bekijken waarbij de infrarood band in rood wordt afgebeeld, ontstaat een kleureninfraroodbeeld (CIR) of falsecolourbeeld. Gebieden die daarin felrood worden afgebeeld, bevatten veel gezond bladgroen, terwijl gebieden die minder fel rood zijn, tot zelfs blauwgrijs aan toe, duiden op minder gezonde vegetatie (zie figuur 33). Uit de intensiteit van de rode en nabij-infrarode spectrale banden kan de genormaliseerde vegetatie-index (NDVI) berekend worden, die een directe maat voor de fotosynthetische activiteit geeft.



figuur 33 Rechts een typisch kleureninfraroodbeeld, overeenkomend met het gewone RGB-beeld links. In een kleureninfraroodbeeld (CIR) is het infrarode kanaal toegekend aan het rood. Gezonde vegetatie reflecteert nabij-infrarood sterk, minder gezonde vegetatie is fletsrood tot blauwgrijs. (© TopoSys)

Het nabij-infrarood heeft nog twee interessante eigenschappen. Water absorbeert ook het infrarood sterk, waardoor het zwart oogt. Water met zwevende deeltjes erin echter reflecteert nog enigszins en oogt donkerblauw. Daarnaast hebben beelden die worden gemaakt met langere golflengten, en dus bijvoorbeeld wél het nabij-infrarood bevatten maar niet het blauw, minder last van verstrooiing door microscopische deeltjes in de atmosfeer, waardoor ze minder heilig en contrastrijker ogen.

Conclusie nabij-infrarood voor inspectie waterkeringen

Het nabij-infrarood kan enige informatie geven over de toestand van de grasmat en andere vegetatie, die van belang is voor de sterkte van de bekleding. Daarbij moet wel met hoge resolutie zijn waargenomen. Nu bij de moderne digitale luchtcamera's ook het nabij-infrarood wordt opgenomen (zie § 5.3.2), zouden de mogelijkheden van het betrekken van het nabij-infrarode kanaal bij inspectie nader moeten worden onderzocht. Ook hogeresolutiesatellietbeelden bevatten het nabij-infrarood, maar in het algemeen is de resolutie daarvan nog te beperkt om voor het bestuderen van de grasmat interessant te zijn.

Het nabij-infrarood kan ook helpen bij het in kaart brengen van water, met name sloten die afsteken tegen het grasland. Op plekken waar teensloten kroos bevatten, kan kwelwater het kroos opzij laten drijven. Hoewel dit een nogal uitzonderlijke toestand is, is dit in het kleureninfraroodbeeld te zien als een donkere plek. Een toestand die naar verwachting vaker voorkomt is verkleurd slootwater door gronddeeltjes die door kwel worden meegevoerd. Ook de vraag of nabij-infrarood dergelijke kleurverschillen in het water met voldoende ruimtelijke en spectrale resolutie kan waarnemen, verdient nadere aandacht.

5.3.6 Thermisch infrarood

Alle objecten stralen met een golflengte die karakteristiek is voor hun temperatuur. Temperaturen rond kamertemperatuur zorgen voor warmtestraling in het thermisch infrarood, een golflengte die enkele malen langer is dan die van zichtbaar rood licht.¹⁸

Er is niet veel ervaring met sensoren voor het thermisch infrarood met hoge resolutie. Waterwatch maakt kaarten van het verdampingstekort of het neerslagoverschot ('droogtekaarten') en de gewasgroei van Nederland op basis van een algoritme dat uit onder meer satellietbeelden en neerslagmetingen gebruikt: zie het STOWA-rapport *Remote sensing ondersteund waterbeheer* [7]. Dit SEBAL-algoritme heeft de grond- of gewassoort niet nodig. Het maakt gebruik van de energiebalans op basis van onder meer thermisch-infraroodbeelden. Hiervoor worden de satellieten Landsat 7 en Aster gebruikt. Deze hebben een resolutie van 30 meter. Op basis hiervan worden kaarten gemaakt die waterschappen reeds gebruiken voor hun peilhandhaving.

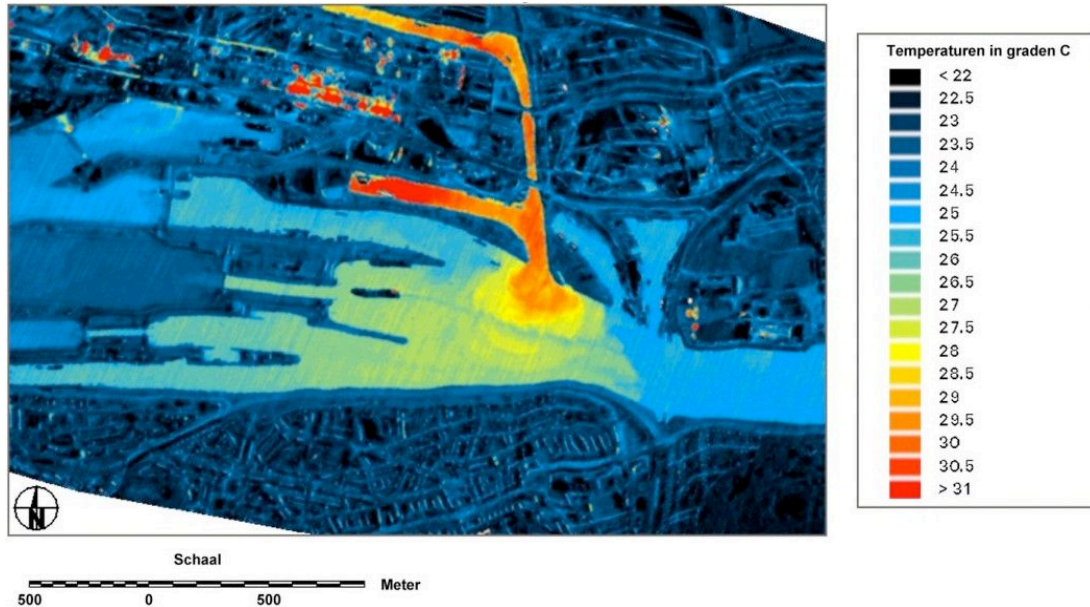
Waterwatch heeft naar aanleiding van de verdroging van veengronden eens een kaart gemaakt van de droogte van veenweidegebieden, maar de droogte hiervan heeft niet een heel directe relatie met de omringende veendijken. Met de interpretatie hiervan moet men dus voorzichtig zijn.

Het is uiteraard mogelijk met een vliegtuig met een thermisch-infraroodscanner over een waterkering te vliegen, waarmee een veel hogere resolutie wordt bereikt. Niettemin is de interpretatie daarvan niet eenvoudig omdat er veel invloeden meetellen, net als bij de hierna te bespreken kwelwatertemperatuur. In figuur 34 is de lozing van warm koelwater in het iets koudere water van het Noordzeekanaal uitstekend te zien.

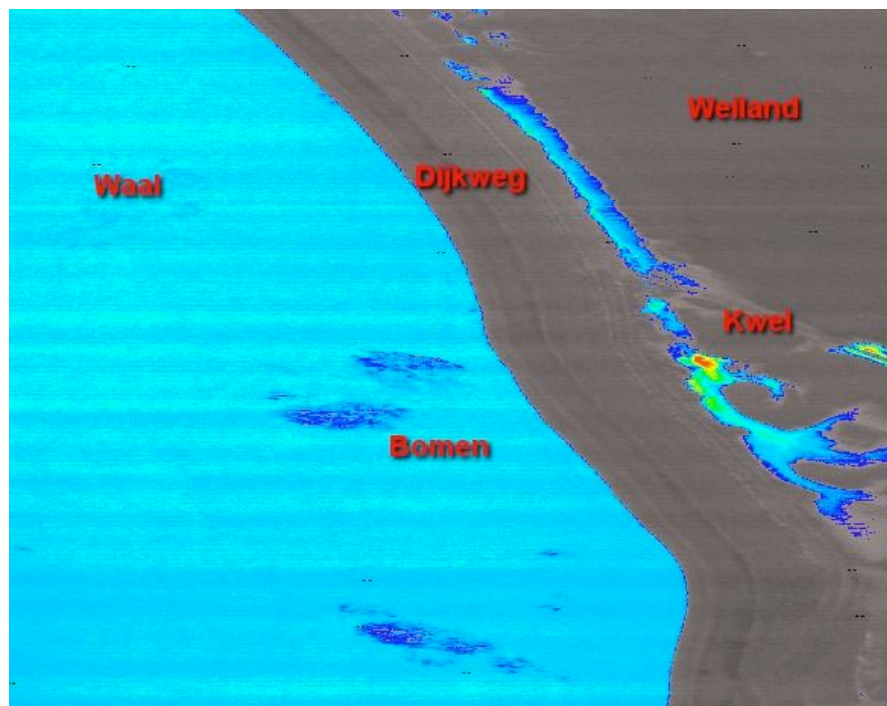
In principe moet kwelwater in het thermisch infrarood zichtbaar zijn als de temperatuur van het omringende land duidelijk anders is dan die van het water. In figuur 35 is dit duidelijk het geval: door de invallende vorst is het land en het oppervlak van het rivierwater relatief koud, terwijl de diepere lagen van het rivierwater nog warm zijn. Het zijn deze lagen die onder de dijk doordringen en als warme kwel zichtbaar worden in het thermisch infrarood.

Niettemin zijn vaak de condities veel minder gunstig. Weliswaar is thermisch infrarood geen zichtbaar licht en dus kan ook 's nachts gevolgen worden, maar bewolking en waterdamp in de lucht verstoren het beeld. Belangrijker nog zijn talloze thermische signalen die het lastig maken significante kwelwaterstromen zichtbaar te maken. In *Inspectietechnieken voor droge veenkaden* [32] is een artikel opgenomen waarin Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier hun teleurstellende ervaringen met thermisch infrarood beschrijft. De selectie van het moment van waarnemen is belangrijk: er moet een redelijk temperatuurverschil te verwachten zijn tussen het oppervlak van het land of de kwelsloot en het te verwachten kwelwater. En dan nog bleken kwelplekken die de inspecteurs reeds kenden niet in het beeld herkenbaar en andere signalen bleken loos alarm ...

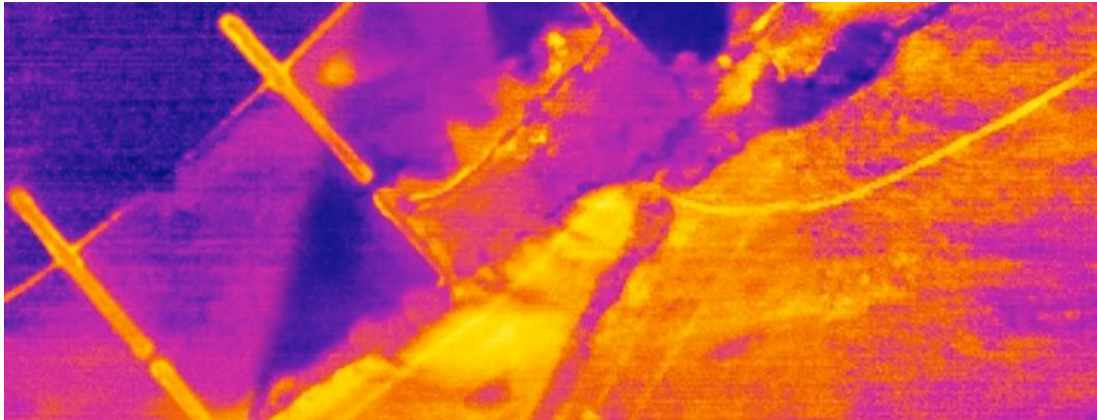
¹⁸ Als een object zeer heet is, is het 'roodgloeiend'; als het nog heter wordt, wordt het 'witheet'.



figuur 34 Met een thermisch-infraroodscanner is koelwater van 31°C te zien dat in het Noordzeekanaal bij Velzen wordt geloosd, dat 25°C is. Ook het zog van een schip is in de warmwaterpluim zichtbaar. (© Rijkswaterstaat AGI en Noordzee)



figuur 35 Tijdens het hoogwater van de Waal, begin 1995, is op deze thermisch-infraroodopname bij Nieuwaaal kwelwater zichtbaar. Alle pixels in het beeld met een temperatuur hoger dan 5 graden zijn in kleur weergegeven van donkerblauw (koud) naar rood (warm). Duidelijk zijn de kwelbronnen zichtbaar als rode "pitten" in het beeld. Dat het kwelwater (rood) een hogere temperatuur heeft dan het wateroppervlak van de Waal is het gevolg van invallende vorst na een periode van zacht weer; het wateroppervlak is reeds afgekoeld terwijl het diepere water dat onder de dijk doordringt nog een hogere temperatuur heeft. Ook is zichtbaar hoe het kwelwater vanaf de bron naar rechtsonder stroomt en langzaam afkoelt van rood naar zwart-wit. (© Rijkswaterstaat)



figuur 36 Een thermische scanner is een van de sensoren waarmee Miramap zijn multisensorproject voor monitoring van waterkeringen uitvoert in het kader van het SBIR-project Digidijk.
(© Miramap)

Tot nu toe leidt de inzet van thermisch infrarood voor kweldetectie hoogstens tot een bevestiging van reeds bij de inspecteurs bekende kwelplekken en niet tot signalering van onbekende plekken.

Een van de vijf winnaars van een aanbesteding voor innovatieve inspectietechnieken in het kader van het SBIR-programma Digidijk (zie noot 11 op pagina 46) is Miramap. Een thermische scanner is een van de sensoren waarmee Miramap zijn multisensorproject voor monitoring van waterkeringen uitvoert. In figuur 36 is een warmtebeeld te zien dat in dit project is opgenomen.

Conclusie thermisch infrarood voor inspectie waterkeringen

Thermisch infrarood is in principe geschikt voor vochtdetectie. Met het bestuderen van vochtverschillen met de voor waterkeringen noodzakelijke hoge resolutie, dat wil zeggen vanuit vliegtuigen en dergelijke platforms, is nog weinig ervaring.

Thermisch infrarood zou zich in principe moeten lenen voor kweldetectie. Er moet aan vele thermische voorwaarden worden voldaan wil kwel zichtbaar zijn. De weinige ervaringen met kweldetectie stellen teleur. Niettemin is het aan te bevelen met een uitgebreidere studie een definitievere uitspraak te doen over de potenties van thermisch infrarood.

5.3.7 Laseraltimetrie

Laseraltimetrie, in het buitenland vaak LiDAR,¹⁹ is voor het Nederlandse waterkeringbeheer de remotesensingtechniek met de meeste uitstraling. Vanwege de potentie voor een relatief effectieve inwinning van gegevens voor de wettelijk voorgeschreven toetsing van de primaire waterkeringen en de noodzaak de legger compleet te hebben, hebben vele waterkeringbeheerders hun waterkeringen ermee in kaart gebracht en vele zullen nog volgen. Een aanbeveling is dan ook overbodig. In deze paragraaf worden enige ontwikkelingen geschetst en wordt stilgestaan bij potenties die laseraltimetrie naast het huidige gebruik heeft.

¹⁹LiDAR staat voor light detection and ranging, naar analogon met radio detection and ranging (RaDAR).

Laseraltimetrie staat op dit moment in het middelpunt van de belangstelling. Dit heeft met twee ontwikkelingen te maken.

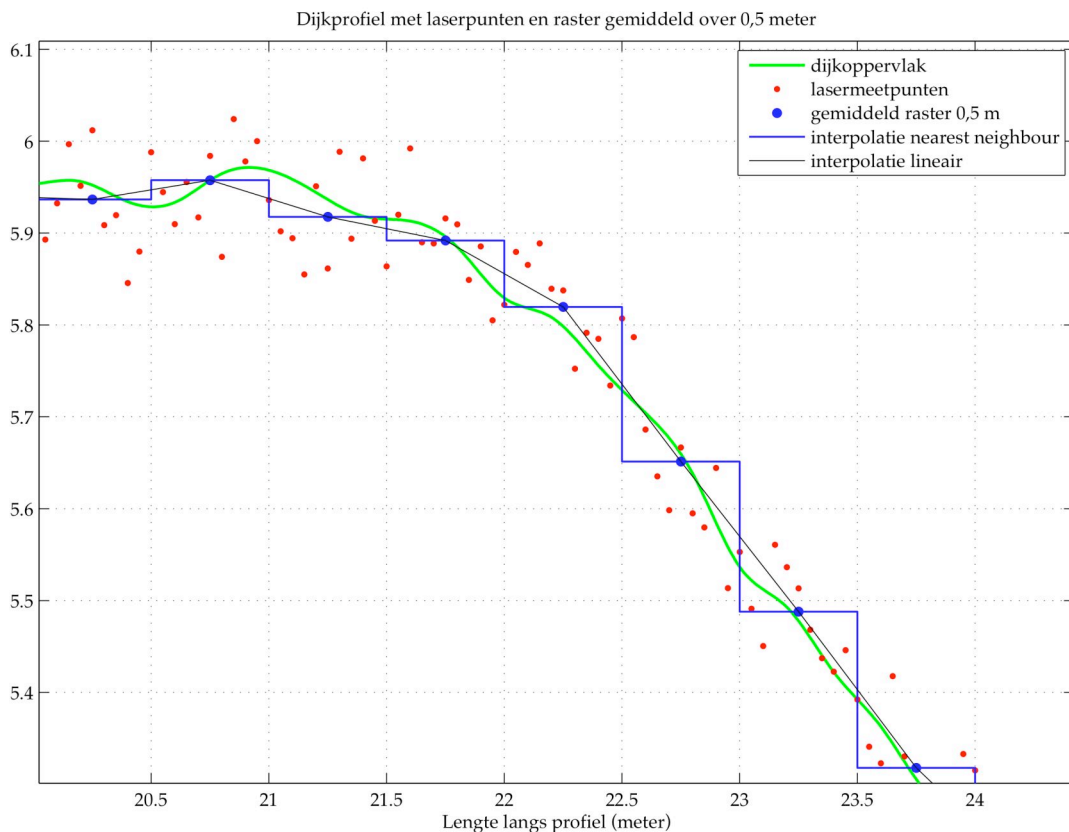
In de eerste plaats wordt in opdracht van STOWA in 2007 een project uitgevoerd door de Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie (WGL). Vanwege de genoemde potentie voor hun informatiebehoefte hebben vele waterkeringbeheerders aanbestedingen gedaan – of zijn van plan dat te doen – voor inwinning met laseraltimetrie. De WGL streeft naar stroomlijning van het specificatie- en aanbestedingsproces, opdat niet elk waterschap opnieuw het wiel hoeft uit te vinden en de beschikking krijgt over een volledig op het waterkeringbeheerproces toegesneden product. In het kader hiervan is een rapport in de maak dat uitgebreid stilstaat bij de ontwikkelingen op het gebied van laseraltimetrie, maar met name de voor laseraltimetrie voor waterkeringbeheer noodzakelijke specificaties analyseert en vaststelt. Daarbij wordt in de bijlagen veel achtergrondinformatie over geostatistiek en andere begrippen gegeven. Hier wordt dan ook naar dit rapport *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer. Ontwikkelingen, gewenste specificaties, procesbeschrijving en evaluatie AHN-2-proef* [53] verwezen.

In de tweede plaats ontwikkelt het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) zich naar een landsdekkend bestand dat ook voor waterkeringbeheerders bruikbaar is. Tot voor kort was de punt dichtheid van dit bestand voor waterkeringbeheer volstrekt onvoldoende, waardoor waterkeringbeheerders met geheel andere specificaties zelf aanbestedingen voor hun waterkeringen deden. In het voorjaar van 2007 voerde de Stuurgroep AHN met het Waterschap Zeeuwse Eilanden (WZE) een proef uit, waarbij het gehele areaal met de hogere specificaties werd ingewonnen die de marktontwikkelingen mogelijk maken. Tevens werd daarbij de opdrachtgever- en controlestructuur gewijzigd. De WGL is betrokken geweest bij de evaluatie van de specificaties en heeft hun geschiktheid voor gebruik voor waterkeringen getoetst. In oktober 2007 besloot de Stuurgroep AHN vanaf 2008 een 'AHN-2' te laten vervaardigen volgens grosso modo de specificaties van de proef in Zeeland.

Met laseraltimetrie voor waterkeringbeheer wordt de looptijd en daarmee de hoogte gemeten van 10 tot 50 laserpunten per vierkante meter. Om deze dichtheid te bereiken en, indien niet gebiedsdekkend ingewonnen wordt zoals bij het AHN, de loop van de waterkering te kunnen volgen, wordt vanuit een tamelijk langzaam vliegend platform gemeten, tot nu toe vooral de helikopter (zie figuur 16). Door een zeer nauwkeurige differentiële plaatsbepaling met GPS en een inertiaal navigatiesysteem (INS) en een zeer nauwkeurige looptijdbepaling van de terugverstrooide laserpuls, kan een hoogtemodel worden vervaardigd met een hoge precisie. De originele lasermeetpunten, die vanwege de onregelmatige structuur en de hoeveelheid data voor de meeste bewerkingen ongeschikt zijn, worden gemiddeld zodat een raster met hoogtewaarden ontstaat.

Voor harde topografie, zoals asfalt, dient de standaardafwijking van de hoogte van de rastercel maximaal 5 cm te bedragen en de systematische fout maximaal 5 cm. Dit komt min of meer neer op een maximale totale fout in de hoogte van 20 cm.²⁰ Voor vegetatie en andere zachte topografie is deze fout groter. Ook de precisie in ligging is van groot belang, met name voor verschilberekeningen.

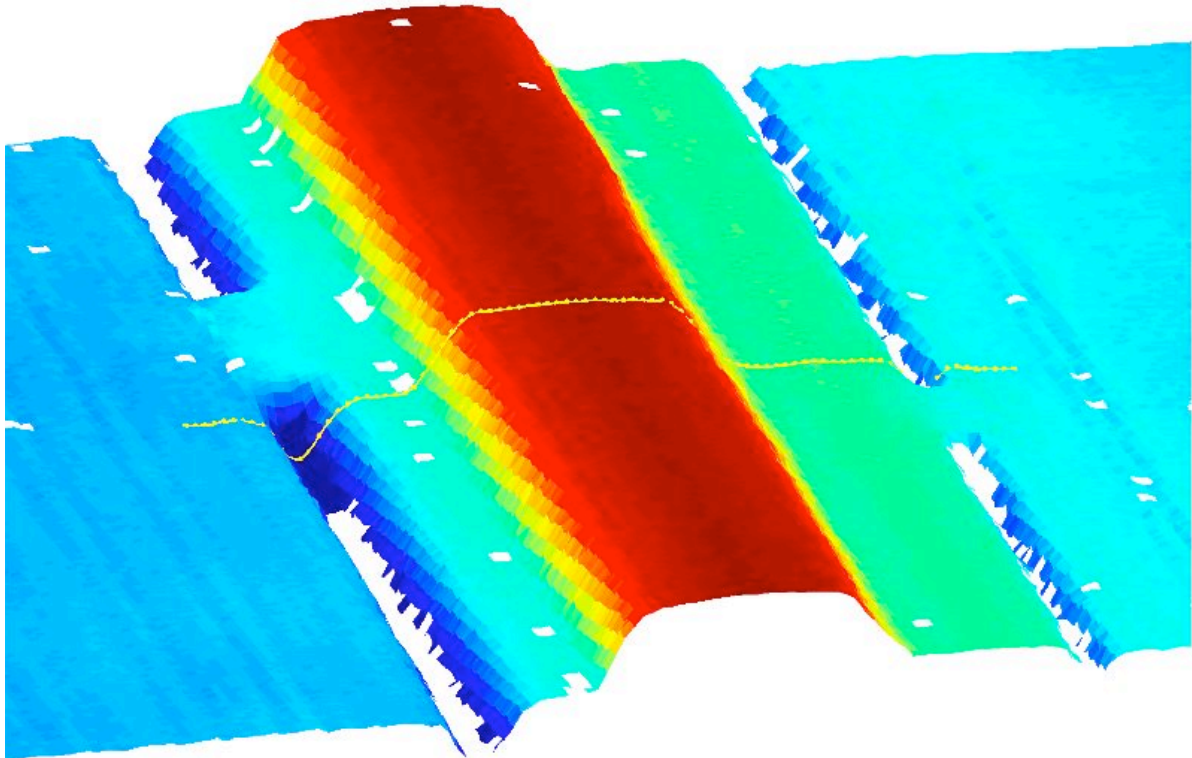
²⁰ Aangenomen dat de hoogtebepaling van de laserpunten normaal verdeeld is, is de maximale afwijking (99,7%) $3\sigma = 15$ cm als de standaardafwijking van de toevallige fout $\sigma = 5$ cm is. De systematische fout is niet normaal verdeeld; als deze wordt gespecificeerd door hieraan een maximum te stellen van 5 cm, komt de maximale totale fout in de hoogtebepaling dus op 20 cm.



figuur 37 Een demonstratie van wat een laserscanner meet op een theoretisch dijkprofiel (groen). De laserpunten (10 punten per 50 cm) zwermen rond het werkelijk oppervlak vanwege hun standaardafwijking van 5 cm. De laserpunten worden per rastercel van 50 cm gemiddeld (blauwe punten). De hoogteprecisie van het raster is door deze middeling groter, waarbij men zich moet realiseren dat het werkelijke terrein bepaald niet vlak is en de laser dus niet 10 maal hetzelfde meet. Hierbij komt ook het begrip idealisatieprecisie om de hoek kijken. Het profiel is uit het raster te reconstrueren door interpolatie, waarbij een lineaire interpolatie het meest voor de hand ligt. (© STOWA WGL & Swartvast)

Door het toenemend aantal meetpunten per vierkante meter kan de rastercel kleiner worden. In 2007 is door de Werkgroep Grootchalige Laseraltimetrie vastgesteld dat de rastergrootte van 50 cm die bij de proef AHN-WZE wordt gebruikt in bijna alle gevallen voldoet voor waterkeringbeheer: voor primaire en de meeste regionale waterkeringen is een dergelijk hoogtemodel gedetailleerd genoeg. Voor de 'kleine' regionale waterkeringen, zoals kades met een waterkerende hoogte van omstreeks een meter of minder of lage zomerdijken, in totaal naar schatting 20% van de regionale waterkeringen, is een kleinere rastercelgrootte gewenst. Het hoogteraster van 50 cm werd in de proef AHN-WZE overigens berekend uit laserdata met een dichtheid van gemiddeld 10 pt/m², wat niet alleen maar net voldoende was maar die ook nogal onregelmatig verdeling van de punten liet zien.

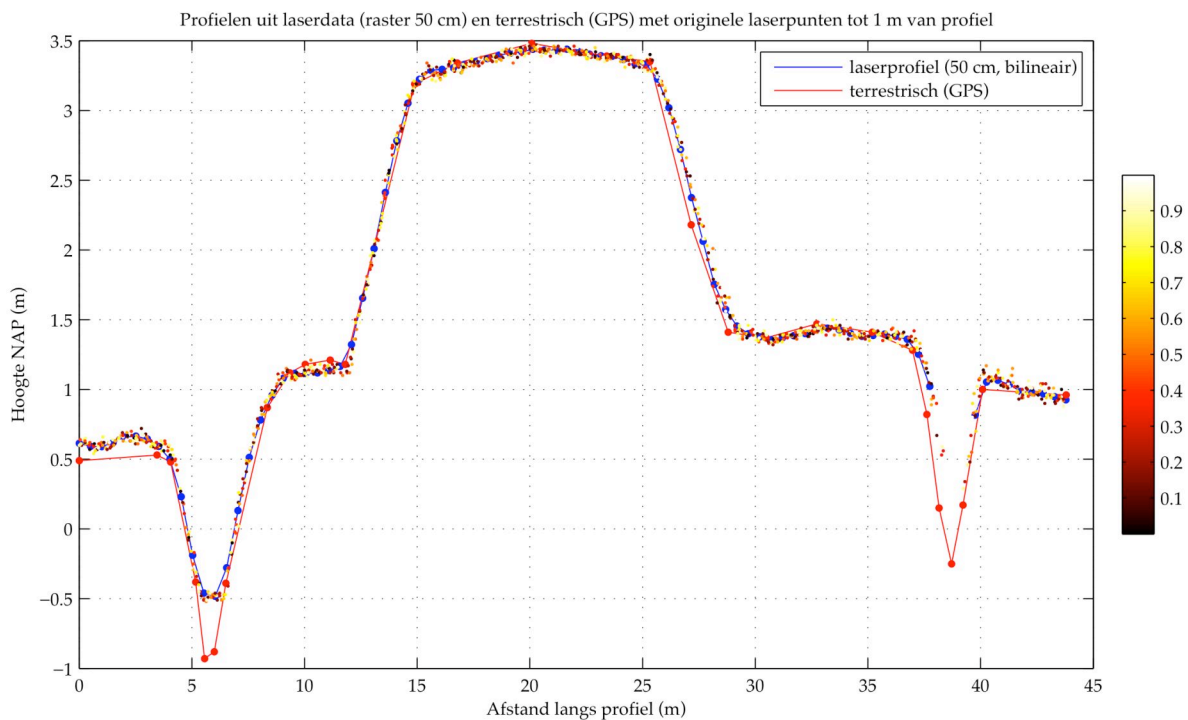
Een indruk van wat de laserscanner meet op een theoretisch dijkoppervlak met de net genoemde precisie is gegeven in figuur 37. Men ziet daar ook wat de precisie van de laser tot gevolg heeft én dat ook rekening moet worden gehouden met de idealisatieprecisie: het dijkoppervlak is niet glad, laat staan recht.



figuur 38 Een vogelvluchtpresentatie van een binnendijk in Noord-Beveland, ingewonnen met laseraltimetrie in het kader van de proef van de Stuurgroep AHN met Waterschap Zeeuwse Eilanden. Alle hoogtewaarden zijn met een factor 2 overdreven. De dijk is 2–2,5 meter hoog. Zichtbaar is de 'betegeling' door het hoogteraster van 50 cm, inclusief gaten waar er geen enkel lasermeetpunt in de rastercel viel. De gele lijn is de locatie van het terrestrisch gemeten profiel. (© STOWA WGL & Swartvast; data Stuurgroep AHN)

De Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie heeft van de Stuurgroep AHN, het Waterschap Zeeuwse Eilanden (WZE) en de aannemer de beschikking gekregen over de data rond enige terrestrisch (met GPS-RTK) bepaalde profielen van waterkeringen. Een vogelvluchtopname van het 50cm-hoogteraster van een 2,5 meter hoge binnendijk is in figuur 38 te zien. Deze geeft een redelijke indruk van de dichtheid waarmee het raster de waterkering representeert. Vanwege de relatief lage punt dichtheid van gemiddeld 10 punten per vierkante meter en de niet erg homogene puntspatiëring zijn er soms rastercellen waarbinnen niet één lasermeetpunt valt. Deze zijn zichtbaar als witte gaten.

Over het in figuur 38 geel aangeduide omstreeks 44 meter lange profiel is een vergelijking gemaakt tussen de door WZE terrestrisch gemeten punten en het 50cm-raster. In figuur 39 is het totale profiel weergegeven, in hoogte sterk uitgerekt om de verschillen te kunnen zien. In figuur 40 is de kruin afgebeeld. Hierin zijn niet alleen het door de landmeter gemeten profiel en het profiel dat uit de laserrasterdata is geïnterpoleerd weergegeven, ook de originele laserpunten zijn afgebeeld. Door deze te kleuren naar de afstand (tussen 0 en 1 meter) tot de profiellijn, wordt een indruk verkregen van in hoeverre de laserdata variatie vertoont en in hoeverre dit wordt herkend in het laserprofiel en in dat van de landmeter.

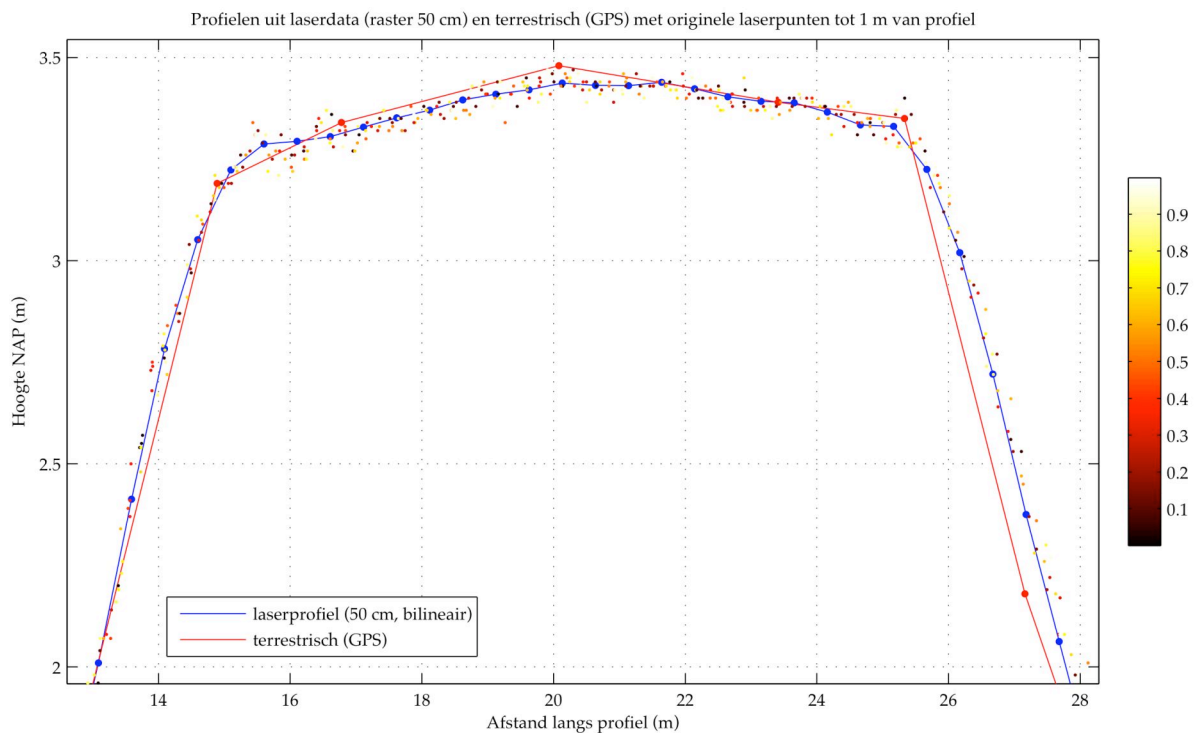


figuur 39 Het in hoogte uitgerekte 44 meter lange profiel van de waterkering uit figuur 38. Getoond zijn de terrestrische metingen (rode punten), de interpolatie door het laserraster van 50 cm (blauw) en de originele lasermeetpunten. (© STOWA-WGL & Swartvast; data Stuurgroep AHN en Waterschap Zeeuwse Eilanden)

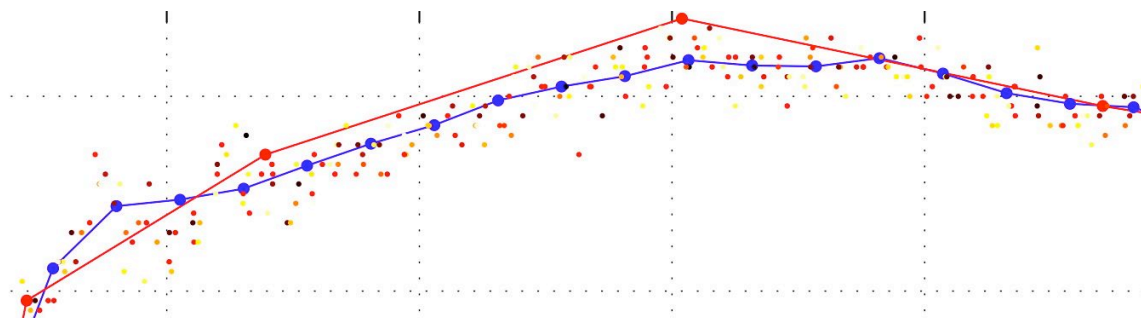
Met laseraltimetrie wordt aanzienlijk dichtere data verkregen dan de landmeter heeft gemeten. De landmeter meet echter punten die hij in het terrein als representatief beoordeelt; de laser kan dit niet. Waarom er dan toch verschillen tussen beide meetmethoden zitten, is zonder nadere analyse niet te zeggen. De laserdata is in maart ingewonnen, dus het gras was nog kort. Als de laserdata bij de oplevering is goedgekeurd, mag men aannemen dat deze binnen de specificaties is. In figuur 42 is nog beter te zien dat er afwijkingen tussen beide data kan zitten. Rond de teensloot in figuur 42 kunnen dit niet anders dan systematische afwijkingen zijn, waarvan de oorsprong echter onduidelijk is.

Daarnaast is uit figuur 42 duidelijk dat een landmeter ook de slootdiepte en het slootwaterpeil in het profiel meeneemt. Deze zijn noodzakelijk voor onder meer de stabiliteitsberekening. GeoDelft heeft in deze berekeningen met de door WGL verstrekte profielen laten zien dat de laserprofielen uitstekend geschikt zijn; de stabiliteit verschilde tussen beide inwinmethoden niet noemenswaardig. Het laserprofiel is eerder beter dan minder goed dan het terrestrische profiel doordat het de waterkering nauwkeuriger volgt. Bij het gebruik van laserprofielen zullen echter het waterpeil en de slootdiepte altijd handmatig aan de data moeten worden toegevoegd, terwijl de landmeter ze gewoon meeneemt. Zie *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53].

De technische ontwikkeling van laseraltimetrie maakt onder meer een hogere punt dichtheid en een hogere precisie mogelijk. Door deze factoren komt niet alleen een gedetailleerd hoogtestand beschikbaar, maar is de data ook geschikt als basis voor

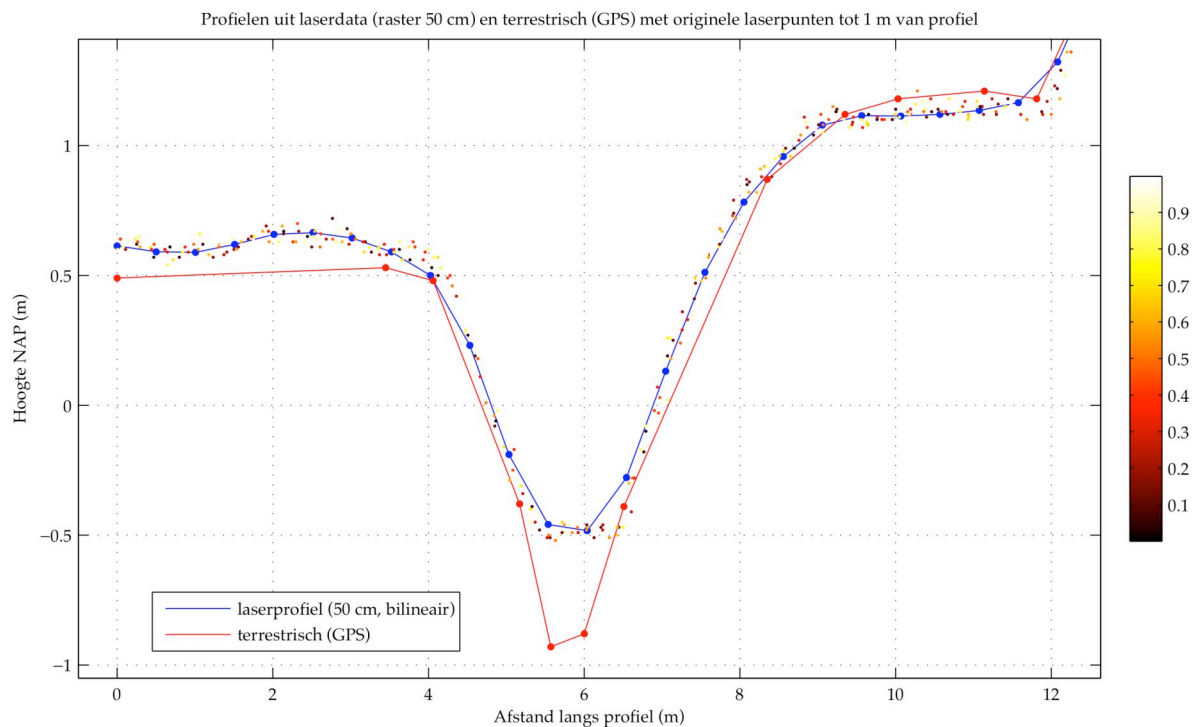


figuur 40 Het in hoogte uitgerekte profiel van de kruin van de waterkering uit figuur 38. Getoond zijn de terrestrische metingen (rode punten), de interpolatie door het laserraster van 50 cm (blauw) en de originele lasermeetpunten. Deze laatste zijn kleurgecodeerd: donkerrode punten liggen vrijwel op het profiel, lichtgele liggen er bijna een meter vandaan. (© STOWA-WGL & Swartvast; data Stuurgroep AHN en Waterschap Zeeuwse Eilanden)



figuur 41 Detail van figuur 40. De kleurgecodeerde originele laserpunten, waaruit het raster berekend is, zijn duidelijk zichtbaar.

kartering. Daarbij wordt de hoogtedata gebruikt, bijvoorbeeld door met speciaal gereedschap kniklijnen te bepalen in de laserpunten, maar de beschikbaarheid van de intensiteit van de laserpunten (zie figuur 44) en optische beelden vergemakkelijken de kartering en verhogen de kwaliteit. Vanwege de eisen waaraan de kartering in x en y moet voldoen, is een hoge punt dichtheid noodzakelijk. Dit betekent dat een lage vliegsnelheid en/of een geringe vlieghoogte noodzakelijk zijn. Dit verhoogt de kosten aanzienlijk. In het algemeen worden voor deze toepassing helikopters ingezet. Met nog hogere laserpulsfrequenties kan mogelijk in de toekomst weer met het vliegtuig als platform worden volstaan.

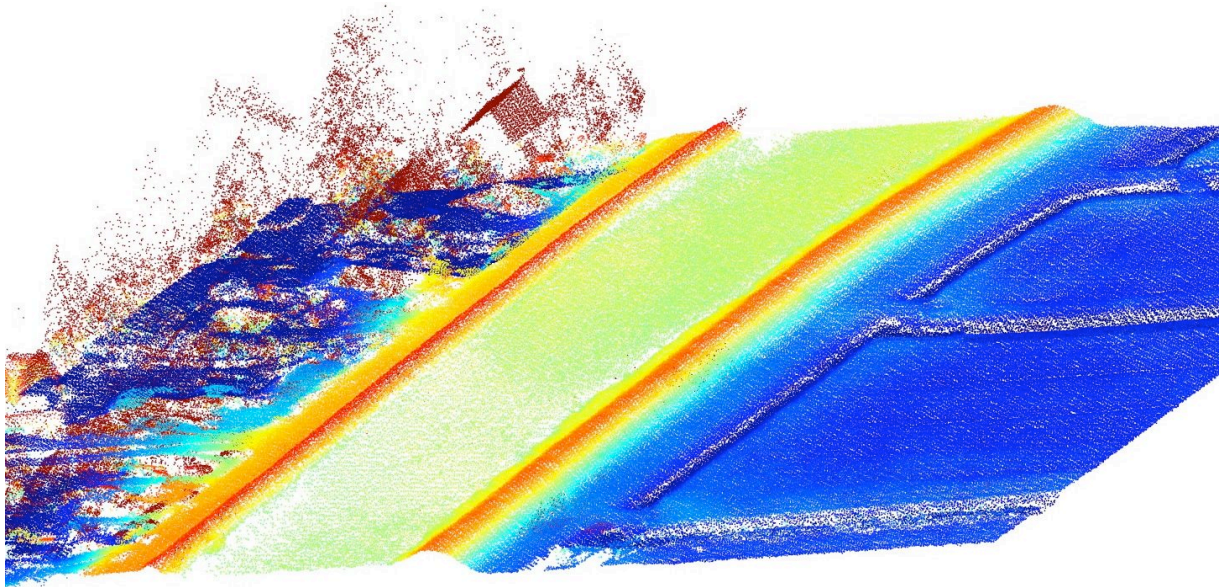


figuur 42 Het in hoogte uitgerekte profiel rond de teensloot van de waterkering uit figuur 38. Getoond zijn de terrestrische metingen (rode punten), de interpolatie door het laserraster van 50 cm (blauw) en de originele lasermeetpunten, kleurgecodeerd voor de afstand tot het profiel. Het weiland links ligt systematisch 10 cm hoger dan wat de landmeter mat, de berm rechts 5 cm lager. Zonder nadere analyse is niet te zeggen waardoor. De landmeter meet ook het waterpeil en de slootbodem, wat met laserscanning niet kan doordat de laser niet door het water kan kijken en meestal wegreflecteert op het wateroppervlak. (© STOWA WGL & Swartvast; data Stuurgroep AHN en Waterschap Zeeuwse Eilanden)

kartering. Daarbij wordt de hoogtedata gebruikt, bijvoorbeeld door met speciaal gereedschap kniklijnen te bepalen in de laserpunten, maar de beschikbaarheid van de intensiteit van de laserpunten (zie figuur 44) en optische beelden vergemakkelijken de kartering en verhogen de kwaliteit. Vanwege de eisen waaraan de kartering in x en y moet voldoen, is een hoge punt dichtheid noodzakelijk. Dit betekent dat een lage vliegsnelheid en/of een geringe vlieghoogte noodzakelijk zijn. Dit verhoogt de kosten aanzienlijk. In het algemeen worden voor deze toepassing helikopters ingezet. Met nog hogere laserpulsfrequenties kan mogelijk in de toekomst weer met het vliegtuig als platform worden volstaan.

Rijkswaterstaat heeft recentelijk een proef laten uitvoeren waarbij werd onderzocht of het zeer nauwkeurige hoogtemodel dat noodzakelijk is na het ontwerp van een nieuw wegvak, met laseraltimetrie, in plaats van terrestrisch of met fotogrammetrie, is in te winnen. Het rapport *DTM-ontwerp met FLI-MAP 400. Eindrapport pilotproject Rijksweg 2* [2] laat zien dat, bij een punt dichtheid van gemiddeld 74/m² en voldoende controlepunten in het terrein, een standaardafwijking van beter dan 2 cm in hoogte haalbaar is.

Een andere technologische ontwikkeling is dat laserscanners in staat zijn per uitgezonden puls meerdere reflecties (*returns*) te registreren. Men kan zo onderscheid maken tussen de reflectie van een boomtop (de eerst ontvangen reflectie) en die van het maaiveld eronder (de laatste); zie figuur 45. Dit maakt een betrouwbaarder bepaling van de maaiveldhoogte mogelijk (zie figuur 46). Daarnaast is het geschikt om de vegetatiehoogte te karteren, wat

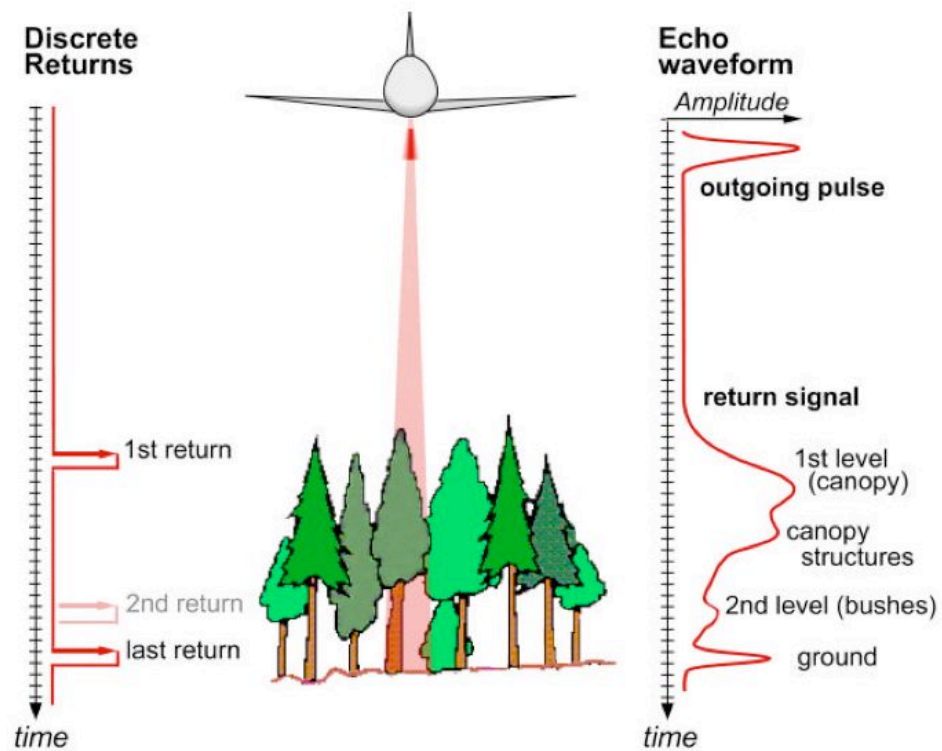


figuur 43 Een vogelvluchtaanzicht van 630.000 naar hoogte gekleurde laserpunten van de kade van de polder Beetskoog in de buurt van Hoorn. De punt dichtheid is, mede door overlappende stroken, gemiddeld 29,6 pt/m². De kruin van deze kade, die niet veel breder dan één meter is, ligt op omstreeks +0,15m NAP; de polder rond -1,80m. (© stowa WGL & Swartvast; data Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier).

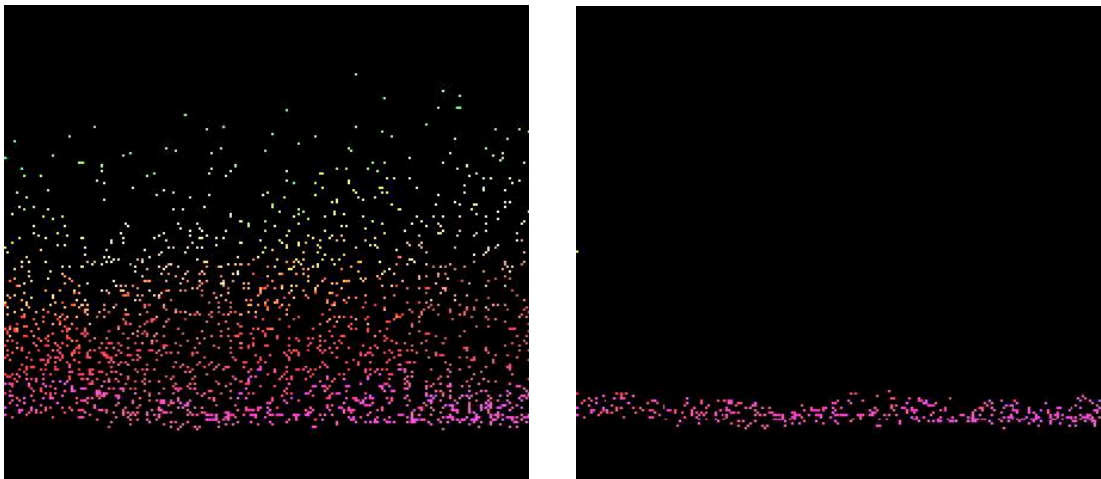


figuur 44 Van de intensiteit van de reflectie van elk individueel laserpuntje kan een intensiteitsbeeld worden vervaardigd. Een dergelijk beeld kan helpen bij de uitvoering van de kartering omdat deze exact dezelfde data laat zien als het hoogtemodel. (© Fugro Inpark, FLI-MAP 400).

door Rijkswaterstaat bijvoorbeeld wordt gebruikt om de hydraulische ruwheid van de uiterwaarden te bepalen in verband met de hydraulische randvoorwaarden. Bovendien kan



figuur 45 Moderne laseraltimetriesystemen kunnen meerdere reflecties van één laserpuls opnemen (links). Daardoor kan het maaiveld beter bepaald worden en kunnen vegetatie of andere topografie geïdentificeerd worden. De nieuwste ontwikkeling is een scanner waarbij de volledige vorm van de reflectie wordt opgenomen (rechts). (© IGI Kreuztal, Riegl)

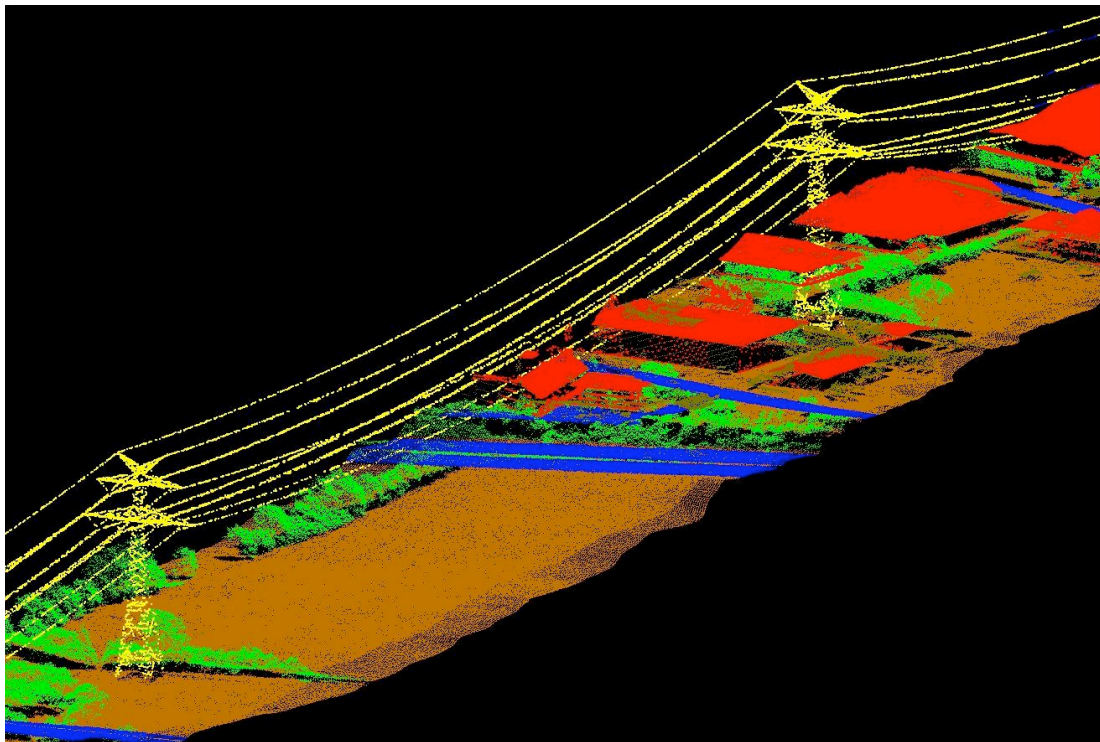


figuur 46 Bij hoge punt dichtheden vallen er voldoende laserreflecties door de vegetatie op het maaiveld om het onderscheid tussen vegetatie en maaiveld te kunnen maken. Het gebruik van laserscanners die meerdere reflecties per puls opnemen maakt dit nog beter mogelijk. Rechts het na filtering geselecteerde maaiveld. (© Fugro-Inpark, FLI-MAP 400)

met meerdere reflecties per puls, nog beter dan alleen met een hogere punt dichtheid, aan classificatie worden gedaan (zie figuur 47).

De nieuwste laserscanners zijn in staat niet alleen enkele reflecties per puls vast te leggen, maar de gehele golfvorm van de reflectie, waarmee een nog beter inzicht ontstaat in de topografie die voor de reflectie zorgt (zie figuur 45 rechts). Daarnaast kunnen ze, in tegenstelling tot de huidige systemen, al een puls uitzenden vóór de reflectie van de vorige is ontvangen. Sommige systemen meten ook een kleur in de buurt van het laserpunt en bijna alle systemen zijn uitgerust met meedraaiende videocamera's en digitale fotocamera's.

In het rapport *Laseraltimetriedata met hoge punt dichtheid voor rivierbeheer* [9] heeft Rijkswaterstaat AGI in 2004 veel van de mogelijkheden en beperkingen van laseraltimetrie geanalyseerd. Hierin worden toepassingen beschouwd, de rol van vegetatie, precisie, kosten en baten van terrestrische versus laseraltimetrische metingen en voorbeelden getoond. In *Height texture of low vegetation in airborne laser scanner data and its potential for DTM correction* [22] heeft de TU Delft voor Rijkswaterstaat AGI de al dan niet te corrigeren invloed van vegetatie geanalyseerd.

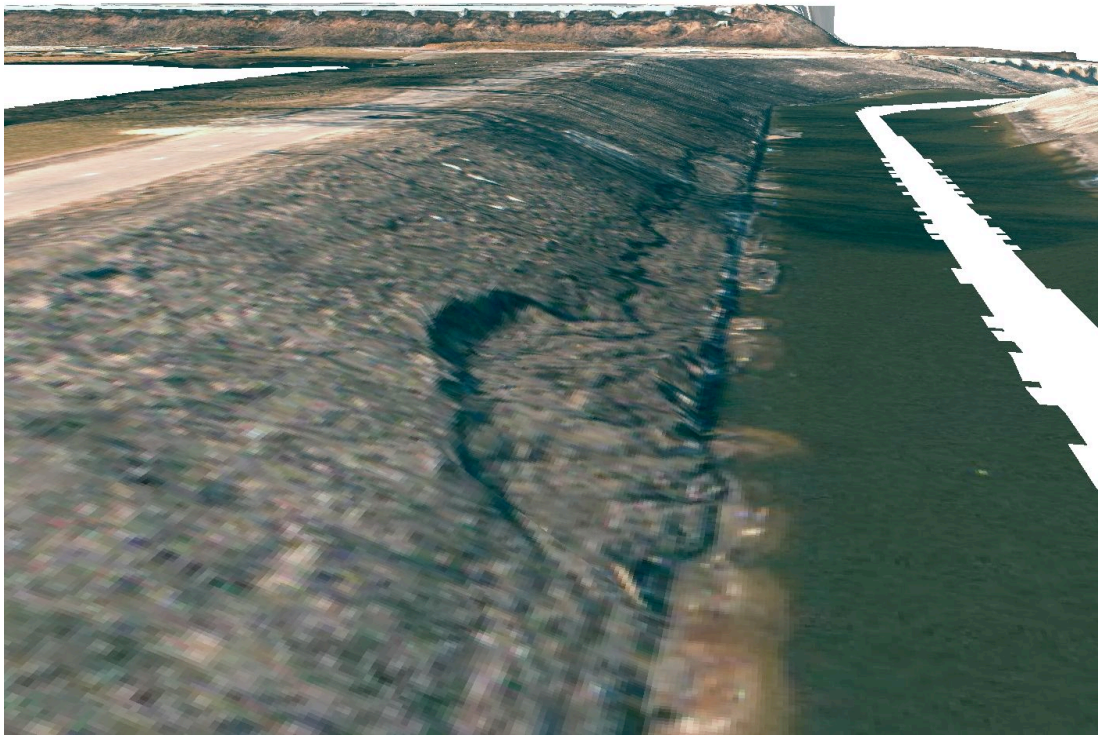


figuur 47 Op basis van bepaalde karakteristieken kunnen slimme filteralgoritmen worden gemaakt waarmee verschillende soorten topografie kunnen worden geclassificeerd. Deze klassen hebben hierboven een eigen kleur gekregen. (© Fugro-Inpark, FLI-MAP 400).

Een toepassing die met de toegenomen meetprecisie en punt dichtheden in het verschiet komt is de bepaling van zettingen en zettingsverschillen. In figuur 48 is een prachtig voorbeeld te zien van een deformatie die dankzij de hoge resolutie en precisie van laseraltimetrie aan het licht kwam. Van een waterkering die Waternet recentelijk aanlegde blijkt het talud te zijn uitgezakt. Ook is in de nog grotendeels droog staande watergang uitspoeling te zien. Voor de afbeelding is, nadat de deformatie eenmaal opgemerkt was, een visualisatie gemaakt waarbij een optisch beeld over het hoogtemodel heen is gedrapeerd.

Voor de bepaling van zetting, via het verschil tussen twee met laseraltimetrie bepaalde hoogtemodellen, is een zeer hoge precisie noodzakelijk, met name in ligging. Waterschap De Stichtse Rijnlanden heeft hiermee reeds ervaring opgedaan. Het voorbeeld in figuur 49 is op zich baanbrekend, maar betrof nog laserdata met een vrij lage punt dichtheid. Het gaat dan ook om flinke hoogteverschillen. Als hoge eisen aan niet alleen punt dichtheid, maar ook aan precisie in hoogte én in ligging worden gesteld, lijkt de bepaling van zetting en zettingsverschillen dé voor waterkeringbeheer veelbelovende toepassing van laseraltimetrie.

Indien dergelijke zeer hoge eisen aan laseraltimetriedata worden gesteld, is het verstandig zich de eigenschappen van het laseraltimetriesysteem te realiseren. Door de wijze waarop de data wordt ingewonnen, ontstaan er bijvoorbeeld stroken die niet alleen bestaan uit punten met een zekere individuele spreiding, die op ver uit elkaar liggende punten een systematische hoogteafwijking kunnen hebben, maar is het ook mogelijk dat de strook kanteling vertoont ('wokkels'). Zie over de achtergronden van deze foutsoorten het rapport van Rijkswaterstaat AGI, *Precisiebeschrijving AHN 2002* [65].

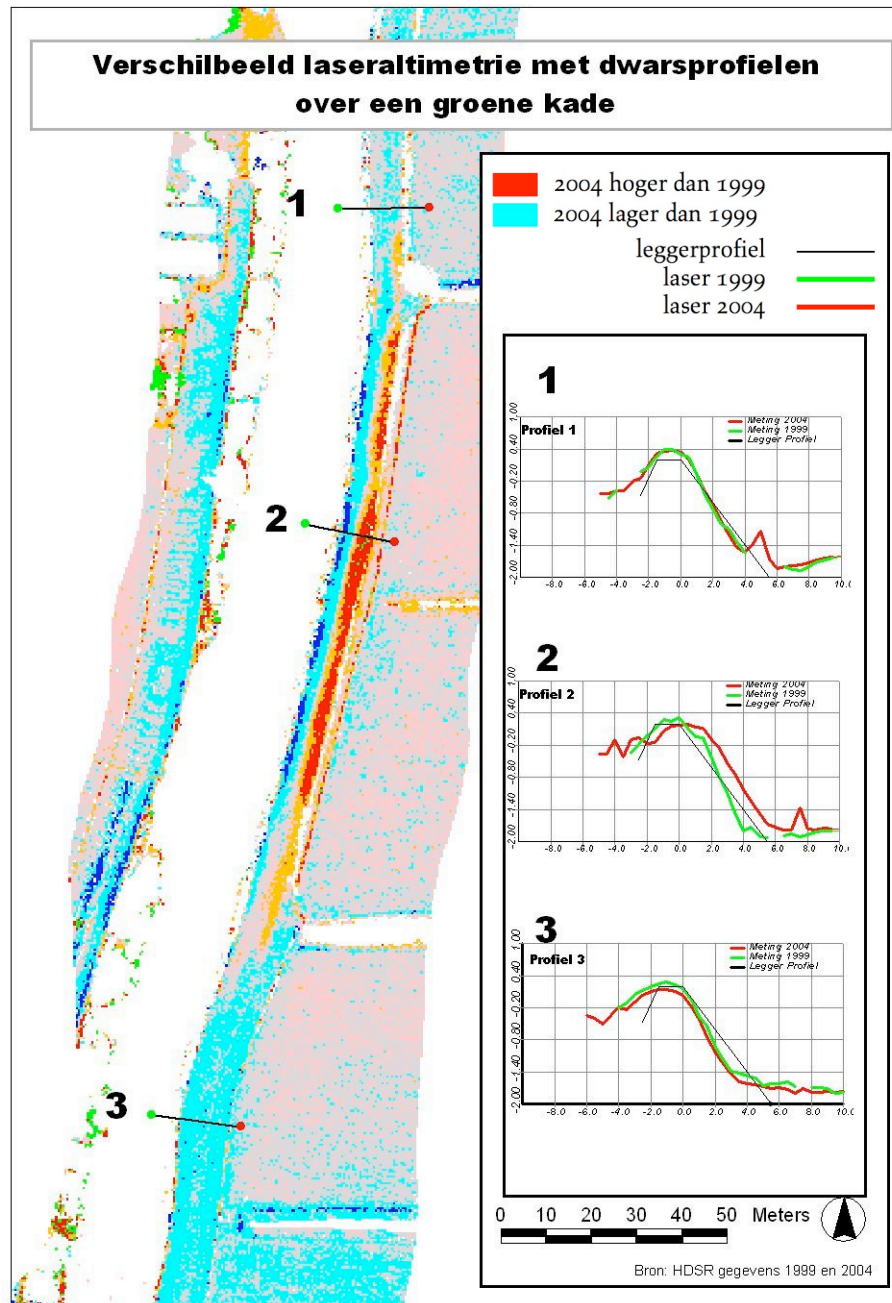


figuur 48 Een prachtig voorbeeld van een deformatie die dankzij de hoge resolutie en precisie van laseraltimetrie aan het licht kwam. Van een waterkering die Waternet recentelijk aanlegde blijkt het talud te zijn uitgezakt. Ook is in de nog grotendeels droog staande watergang uitspoeling te zien. Het wit rechts is water, dat niet terugreflecteerde. Over de laserdata met een rastergrootte van 25 cm is ten behoeve van de visualisatie een optisch beeld heen gedrapeerd. (© Waternet)

Conclusie laseraltimetrie voor inspectie waterkeringen

Als er een remotesensingtechniek een hoge vlucht heeft genomen voor de toepassing bij het waterkeringbeheer, is het laseraltimetrie. Gezien de grote behoefte aan dergelijke hoogtegegevens en de inspanningen van WGL en AHN, komt er voldoende data met hoge kwaliteit beschikbaar en is alle benodigde kennis voor beheerders makkelijk toegankelijk.

Inspectie van waterkeringen kan baat hebben bij vegetatieclassificering, wat mogelijk is met hoge puntdichtheden en meerdere vastgelegde reflecties per laserpuls. Een voorbeeld hiervan is het opmerken van hoger gras bij een teen, die het gevolg is van veranderingen in de groei van de vegetatie door kwel of doordat de maaimachine om de moeilijker begaanbare vochtige plek heenrijdt zonder dat hij weet dat deze het gevolg is van kwel.



figuur 49 Hoogheemraadschap De Stichtse Rijnlanden heeft als een van de weinige waterschappen bepaalde locaties reeds tweemaal met laseraltimetrie ingewonnen. Daardoor was het mogelijk verschilberekeningen uit te voeren. De rode lijn (laserdata van 2004) is in profiel 2 voor het binnentalud duidelijk hoger dan de groene lijn (laserdata van 1999). Dit duidt op een verhoging van het talud met omstreeks een halve meter over de periode 1999–2004. Dit bleek het gevolg van een in de tussentijd aangebrachte verflauwing van een te steil talud. (© HDSR)

Voor de bepaling van hoogteverschillen, bijvoorbeeld als gevolg van de seculiere zetting van een waterkering op veengrond of na aanleg of dijkverbetering, is laseraltimetrie zeer geschikt, gezien de hoge dichtheid van de vlakdekkende hoogtedata. Wel dient daarvoor de precisie zeer hoog te zijn en met name de systematische fout in ligging is daarvoor nog een beperking. Deze kan worden omzeild door de data 'goed te leggen', maar de toenemende precisie van laseraltimetrische data kan bij goede controle deze stap overbodig maken.

Zoals in § 3.3 is opgemerkt, kan de inhomogeniteit van een waterkering niet rechtstreeks met remotesensingtechnieken worden waargenomen, maar kan deze mogelijk worden waargenomen via verklikkers: bijvoorbeeld in de vorm van zettingsverschillen in de tijd of hoogteverschillen in het maaiveld. Laseraltimetrie leent zich voor dit type nauwkeurige hoogtemeting of hoogteverschilmeting. Voor de precisie gelden dezelfde nuances als zojuist voor zettingen gegeven.

5.3.8 Radar en radarinterferometrie

Ook met radio- of microgolven met een golflengte grofweg van een centimeter tot een meter is het mogelijk beelden te maken. Voor de duidelijkheid en ter voorkoming van spraakverwarring verderop worden de vier 'stadia' van radiogolfwaarnemingen hieronder opgesomd, in oplopende complexiteit:

- **Radar** staat voor radio detection and ranging. Een radar meet de afstand en snelheid van één punt (of beter gezegd: vlek). Voorbeelden: snelheidscamera's, regenradar.
- Een radar kan geen beeld maken, hij ziet maar één intensiteit. Door gebruik te maken van looptijdverschillen bij het naar opzij kijken en Dopplerverschillen die ontstaan doordat het platform beweegt, kan een beeld worden gegenereerd. Dit proces heet **SAR** (radarapertuursynthese). In *Spectral filtering and oversampling for radar interferometry* [55] is dit beeldvormend mechanisme toegelicht.
- Door twee of meer SAR-beelden 'van elkaar af te trekken' ontstaat een interferogram. Deze is geschikt om deformaties mee te bepalen. Dit heet interferometrische SAR oftewel **InSAR**, of gemakshalve **radarinterferometrie**.
- In bepaalde gevallen is het lastig deformaties te bepalen met InSAR. Men neemt dan zijn toevlucht tot een analyse van over een grote reeks van beelden zichtbare objecten die op een constante en sterke wijze het radarsignaal terugverstrooien. Deze punten worden *permanent* of *persistent scatterers* genoemd (auteur dezes hanteert hiervoor de Nederlandse term *langcoherente verstrooiers*). Het acroniem luidt **PS-InSAR**.

SAR

Een SAR-beeld wordt gemaakt door een microgolfpuls uit te zenden en de amplitude en eventueel de fase en de polarisatie van het terugverstrooide signaal te registreren. Microgolven hebben zeer weinig last van bewolking. Met SAR-beelden kan men in principe weersonafhankelijk waarnemen. Omdat de SAR zijn eigen lichtbron is (het is een *actief* systeem) kan ook 's nachts worden waargenomen. De voordelen zijn daarmee duidelijk. Omdat er bovendien metalen structuren met hun eigen signatuur in zijn te herkennen (radiostraling is gevoelig voor geleidbaarheid), kan SAR van oudsher op grote militaire belangstelling rekenen.

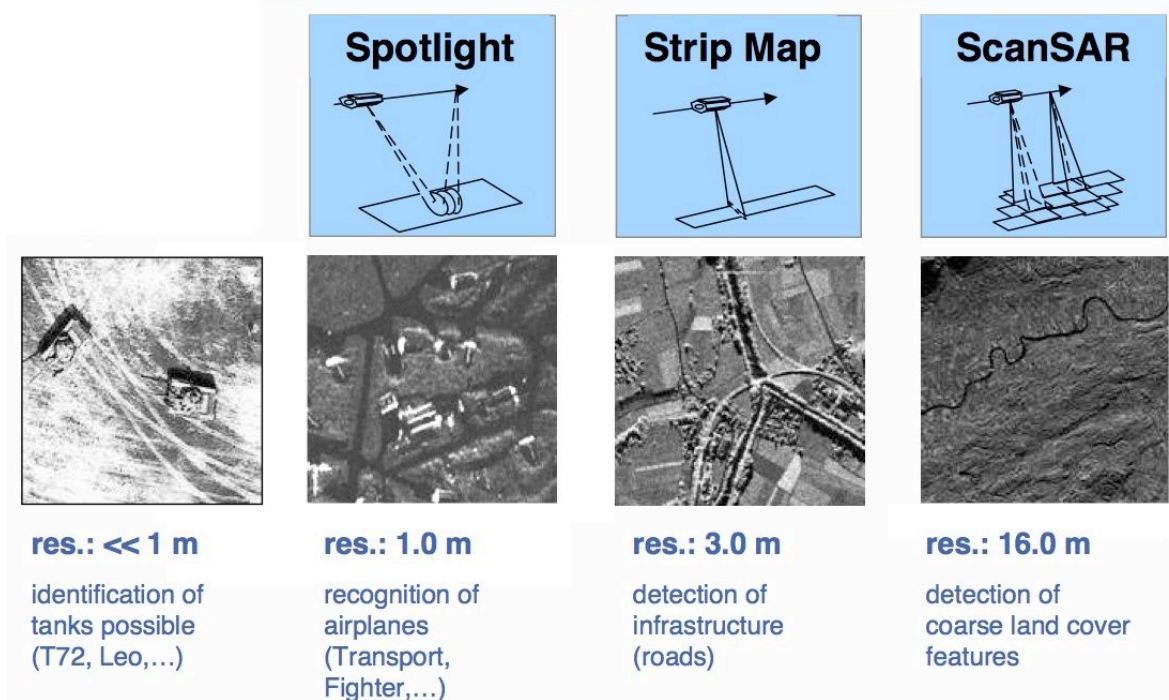
Nadelen van SAR zijn de beperkte resolutie en het intrinsiek ruisige beeld (spikkelruis of *speckle*). Daarnaast moet voor de vervaardiging van een scherp beeld het gevlogene pad zeer nauwkeurig bekend zijn. Het beeld in azimuth (één van de twee beelddimensies) ontstaat

juist door de voortbeweging van het platform tijdens het waarnemen (zie [55]). Theoretisch is de resolutie van een SAR-beeld onafhankelijk van de hoogte, heel bijzonder vergeleken met de hiervoor besproken systemen. Dit opent helaas geen grote perspectieven omdat het vermogen dat nodig is om voldoende signaal terug te krijgen met de vierde macht van de hoogte toeneemt. Vanuit vliegtuigen bevatten korte radarpulsen nog voldoende vermogen om signaal terug te krijgen, terwijl korte pulsen ook voor een hogere resolutie zorgen.

De resolutie van het bekendste SAR-systemen in de ruimte, de ERS-1 en -2 van ESA, opgevolgd door de ENVISAT, bedraagt 4×20 meter. Het door TNO Defensie en Veiligheid ontwikkelde systeem PHARUS haalt van onder een vliegtuig 1×4 meter. In figuur 50 is Ypenburg te zien. Een SAR ziet geen kleuren. De kleuren in deze figuur zijn gemaakt aan de hand van de polarisatie van het uitgezonden en ontvangen signaal. Met behulp van deze polarisatie, die gerelateerd is aan de wijze waarop het signaal door het terrein of object wordt weerkaatst, is het mogelijk te classificeren.



figuur 50 Een SAR-beeld van Ypenburg gemaakt met het PHARUS-instrument van onder een vliegtuig. Pixelgrootte 4×4 meter, 5 looks. De kleuren zijn toegekend aan de hand van de polarisaties: R = HH, G = HV, B = VV. (© TNO Defensie en Veiligheid)

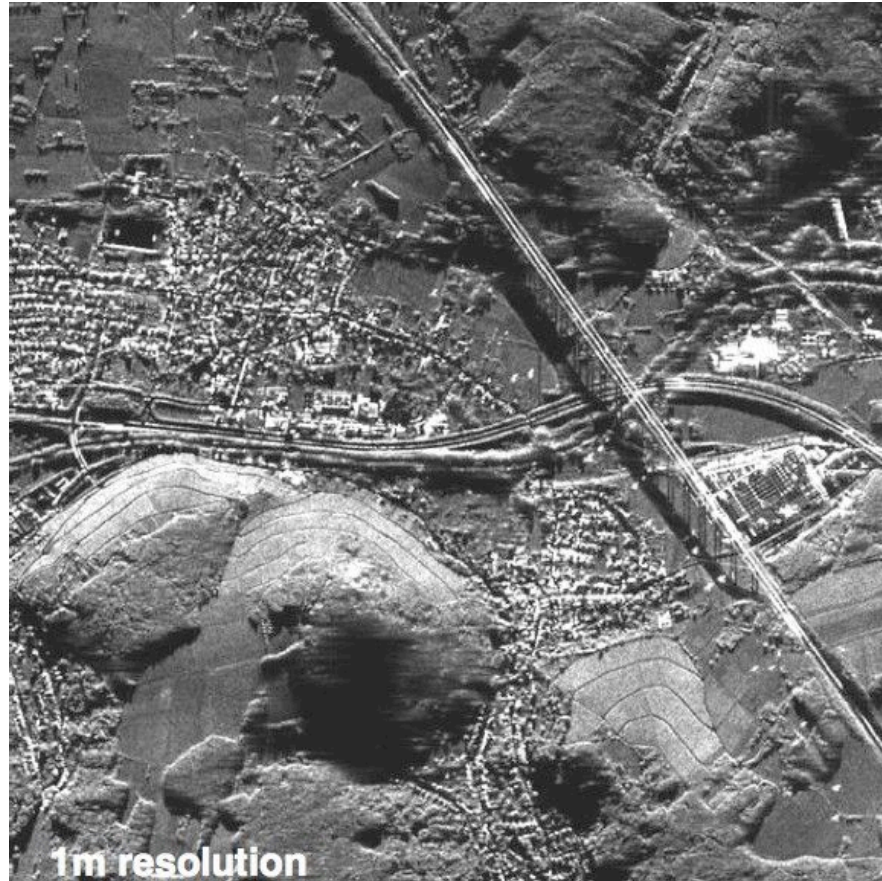


figuur 51 TerrasAR-X kent verschillende modi. Door een tijd naar hetzelfde gebiedje te kijken (spotlight) kan een resolutie van 1,0 meter worden bereikt. (© Infoterra, beeld uit [62])

Omdat ENVISAT, in tegenstelling tot zijn voorganger ERS, de polarimetrie kan registreren, nemen de gebruiksmogelijkheden toe. In principe zou door een handige combinatie van polarisatiekanalen water zeer donker moeten afsteken tegen land. In *Land/water detection with polarimetric SAR* [54] toonde Rijkswaterstaat AGI met TNO en ARGOS aan dat dit om verschillende redenen tegenvalt. Ook bij de selectie van persistent scatterers in PS-InsAR (zie verderop) kan polarimetrie van pas komen.

TNO Defensie en Veiligheid bouwt aan de opvolger van PHARUS, MinisAR (zie [28]). Dit systeem is relatief goedkoop door het gebruik van standaardelektronica en wordt op compactheid ontworpen. Daarmee is het toepasbaar onder flexibel inzetbare en goedkoper dan vliegtuigen te exploiteren motorzweefvliegtuigen (dit werd reeds genoemd in § 5.2.5) en uiteindelijk in onbemande vliegtuigen, hetgeen ook militaire perspectieven opent. MinisAR behaalt een resolutie van 30 cm vanaf 1 tot 2 kilometer hoogte.

In juni 2007 werd TerrasAR-X gelanceerd, een Duitse SAR-satelliet die in publiek-private samenwerking wordt geëxploiteerd. Deze satelliet kan in verschillende modi waarnemen (zie figuur 51), waaronder spotlight, waarmee een resolutie van 1,0 meter wordt behaald. In spotlightmodus kan echter niet meer dan een gebiedje van 5 x 10 km worden opgenomen. In principe kan TerrasAR-X in 95% van de gevallen eenzelfde punt op aarde elke 2,5 dag waarnemen, maar zoals in § 5.2.2 is uiteengezet, liggen de grondsporen enkele honderden kilometers uit elkaar zodat met andere gebruikers moet worden geconcurrereerd en zeker niet een groot gebied met die frequentie kan worden opgenomen. In figuur 52 is een beeld te zien met een resolutie van 1,0 meter, zoals TerrasAR-X dat zou kunnen opnemen. Zie *TerraSAR-X & TanDEM-X. Data & product services* [62].



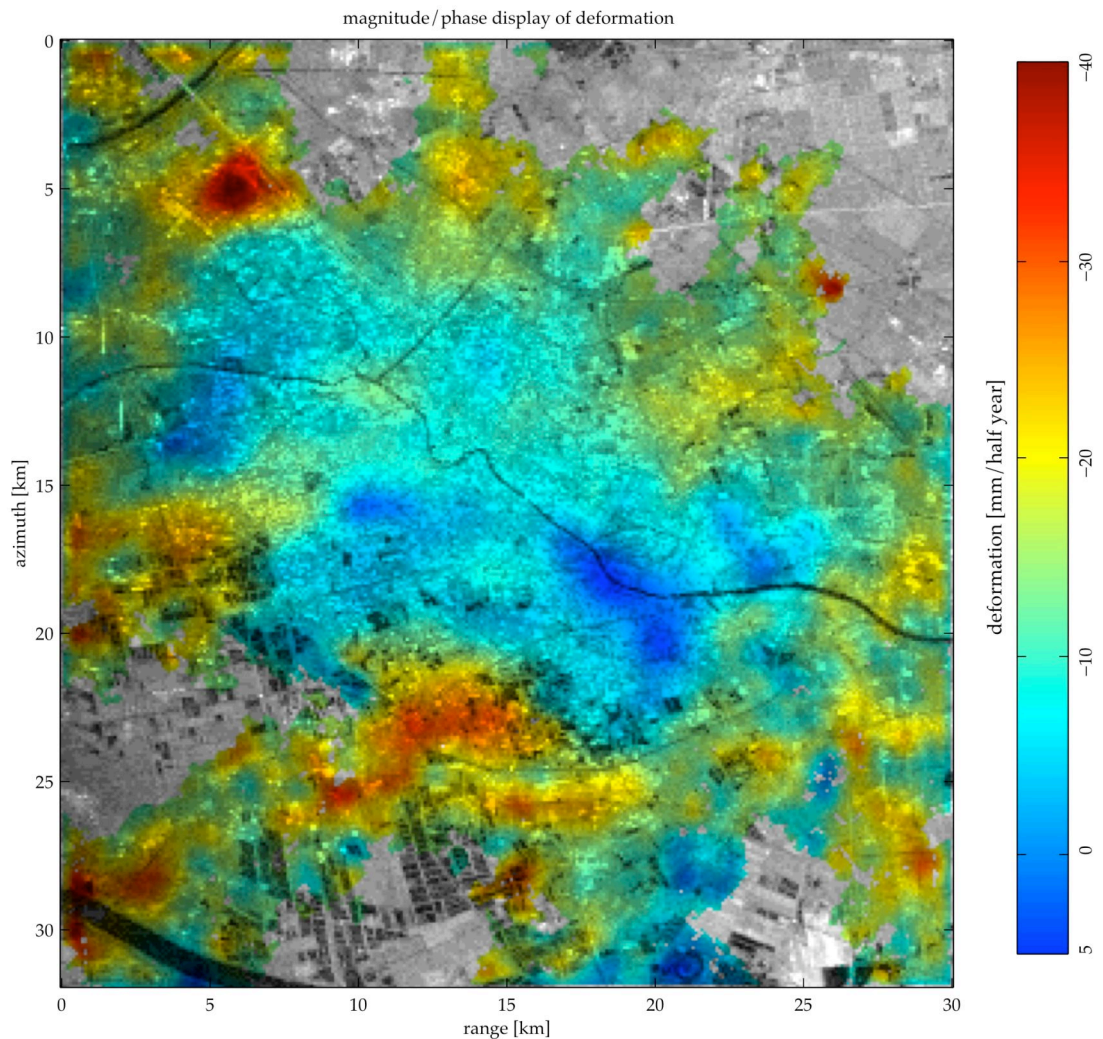
figuur 52 SAR-beeld met een resolutie van 1,0 meter, zoals dat door Terrasar-X kan worden opgenomen. Dit is een snelwegviaduct in Nordrhein-Westfalen. (© Infoterra, beeld uit [62])

TerrasAR-X is een commerciële satelliet, waardoor geldt wat daarover in § 5.2.2 werd gemeld: er is een veel betere afstemming op de wensen van de gebruiker dan bij ESA's ERS en ENVISAT, waardoor de gebruiker met een veel grotere kans krijgt wat hij zou willen hebben, maar de kosten zijn daardoor ook aanmerkelijk hoger.

Radarinferometrie of InSAR

De grote kracht van SAR-beelden is dat behalve de intensiteit ook de fase van het terugontvangen signaal kan worden gedetecteerd. De fase zegt iets over de wijze waarop het signaal verstrooid wordt, maar óók neemt de fase lineair toe met de afstand. Door twee beelden 'van elkaar af te trekken' en te corrigeren voor de invloeden van de waarnemingspositie en het terrein, ontstaat een weglengteverschilbeeld. Onder bepaalde omstandigheden is dit te gebruiken als een *deformatiebeeld*. Zie voor een uitgebreide uitleg *Spectral filtering and oversampling for radar interferometry* van auteur dezes [55]; Ramon Hanssen's boek *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis* [31] is een goed overzichtswerk.

Bekend zijn de plaatjes met gekleurde banden die vanaf 780 kilometer hoogte de verschuiving als gevolg van een aardbeving laten zien. Dat kan tot op de millimeter! Door verschillende beelden te combineren zijn fouten en storingen (onder andere als gevolg van de atmosfeer) te verminderen en is het mogelijk verzakkingen als gevolg van bijvoorbeeld grondwaterwinning in kaart te brengen (zie figuur 53).



figuur 53 In het noordwesten van de Chinese stad Tianjin worden grote hoeveelheden water opgepompt. Door analyse van verschillende SAR-satellietbeelden kan worden aangetoond dat de bodem rond het wingebied daalt met 80 mm per jaar. Het deformatiebeeld is kleur gecodeerd over het amplitudebeeld van de stad geprojecteerd. De blauwe vlekken worden gedeeltelijk veroorzaakt door het atmosferisch signaal en hebben niet met deformatie te maken. (© TU Delft – Rens Swart)

In Nederland heeft de faculteit Geodesie van de TU Delft vanaf de opkomst van deze techniek een belangrijke rol gespeeld bij de ontwikkeling ervan. De toepassing ervan voor het in kaart brengen van de bodemdaling als gevolg van de gaswinning in Noordoost-Nederland mislukte echter aanvankelijk. Dit komt doordat tussen de opnamen van de SAR-beelden de manier van verstrooien van het radarsignaal door het terrein niet mag wijzigen. In Nederland is dit door de groei van vegetatie, het ploegen van akkers en dergelijke, niet te bereiken. Slechts met korte tussenpozen blijft deze zogeheten *coherentie* gehandhaafd. Harde, constante verstrooiers zoals bebouwing behouden deze coherentie beter. Dit, plus het feit dat het deformatiesignaal groot is over korte tijd, zorgde ervoor dat er alleen in het stedelijk gebied in figuur 53 deformatie kon worden vastgesteld.

TNO heeft in samenwerking met Rijkswaterstaat in 2003 een proef gedaan waarbij werd aangesloten bij de poging van verschillende kennisinstellingen en Rijkswaterstaat een oud

stuk Lekdijk bij Bergambacht onder gecontroleerde omstandigheden te laten bezwijken. Met de PHARUS onder het laboratoriumvliegtuig van TNO en NLR werd op verschillende momenten vóór, tijdens en na het pompen van water tegen de dijk een beeld opgenomen (zie [24]). Ondanks dat de tijd tussen de opnamen niet erg groot was, lukte het in deze proef niet goed om een gebiedsdekkend deformatiebeeld te vervaardigen omdat het signaal reeds te veel van zijn coherentie verloren had. Voor een deel had dit te maken met het feit dat er in het laboratoriumvliegtuig onvoldoende data met de vereiste zeer hoge kwaliteit beschikbaar was met betrekking tot de positie en stand van het vliegtuig. Omdat een sar-beeld gebruik maakt van de beweging van het vliegtuig, moet voor een goed beeld (zeker als daarmee interferometrie wordt gedaan, een nauwkeurige 'verschilmeting') liefst het platform zeer stabiel zijn (hetgeen bij satellieten het geval is, zoals in § 5.2.2 werd gemeld), maar in ieder geval de beweging zeer nauwkeurig bekend. Omdat MinisAR een veel hogere resolutie heeft en moderner is dan het instrument waarmee deze proef gedaan is, lijkt MinisAR geschikt voor deformatiemetingen met hoge resolutie met relatief korte tussenpozen, waarbij het vliegpad optimaal op de waterkering kan worden afgestemd.

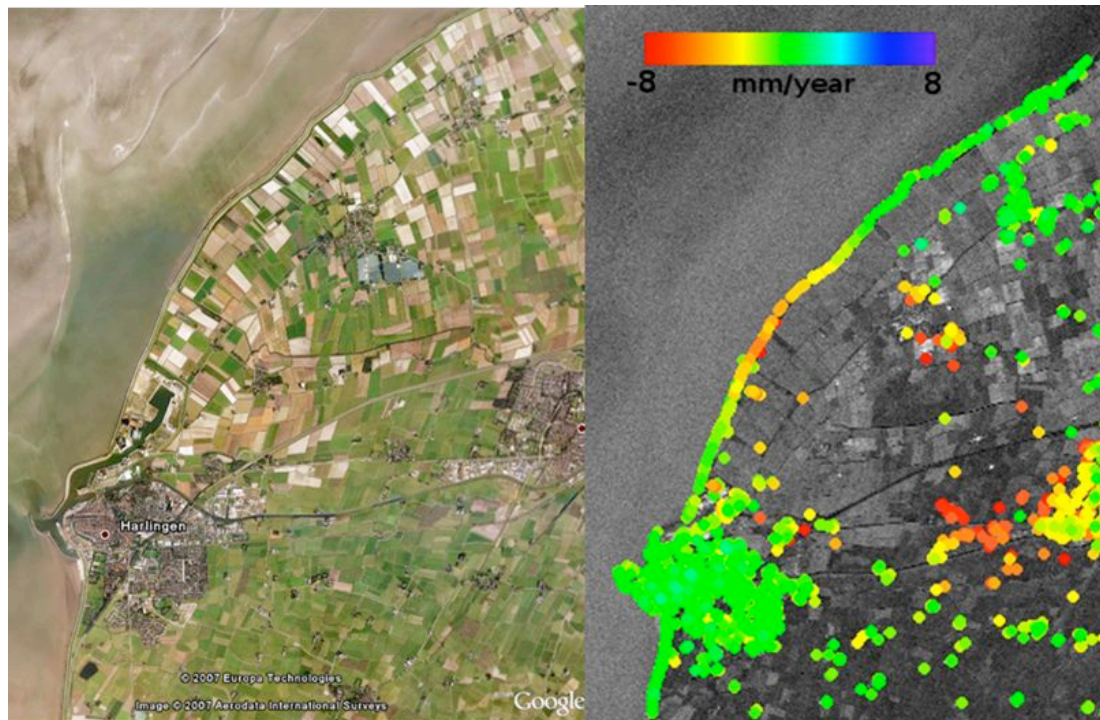
De mogelijkheid bestaat SAR-beelden van satellieten met langere golflengte te gebruiken: L-band (25 cm) in plaats van C-band (5,6 cm). Deze hebben minder last van decorrelatie. Naar verwachting is dit niet voldoende om in Nederland alsnog deformatiemetingen met 'klassieke interferometrie' mogelijk te maken. Bovendien geschiedt de vaststelling van de deformatie door de langere golflengte onnauwkeuriger.

Een andere toepassing van radarinterferometrie is de berekening van hoogtemodellen. Dit is een belangrijke toepassing van de moderne hogeresolutie-SAR-satellieten; sommige missies worden hiervoor zelfs speciaal ontworpen. Dit geldt bijvoorbeeld voor een tweelingpaar van de hiervóór genoemde TerrasAR-X, Tandem-X (zie [62]). Voor Nederland is dit niet interessant: de precisie en resolutie van de met InSAR te bepalen hoogtemodellen halen het op geen stukken na vergeleken met het AHN. In 2001 concludeerde de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat in *Laser versus radar. Een vergelijking tussen laseraltimetrie en radarinterferometrie voor het inwinnen van digitale hoogtemodellen* [34] dat het hoogtemodel vervaardigd met een speciaal voor het project gevlogen sar-systeem het aflegde tegen een model vervaardigd met laseraltimetrie. De standaardafwijking in hoogte bedroeg omstreeks 75 centimeter. Sinds 2001 heeft laseraltimetrie zich dermate ontwikkeld dat dit zonder enige twijfel de voorkeur geniet boven radarinterferometrie voor het vervaardigen van een hoogtemodel. Nederland verkeert bovendien in de unieke omstandigheid dat het een landsdekkend gedetailleerd en precies Actueel Hoogtebestand Nederland heeft.

PS-InSAR

Het zojuist genoemde probleem dat in Nederland deformatiebepaling met radarinterferometrie bijna onmogelijk is omdat het terrein zijn verstrooiende eigenschappen niet behoudt, heeft geleid tot de ontwikkeling van een nieuwe techniek. De techniek berust op hetzelfde principe als InSAR, maar spoort in een lange reeks van beelden (minstens dertig) punten op die in alle beelden herkenbaar zijn én hun verstrooiende eigenschappen behouden. Vandaar de naam *langcoherente verstrooiers*. In de literatuur wordt deze techniek *permanent* of *persistent scatterers* genoemd, kortweg PS-InSAR.

Alleen op basis van het signaal van deze persistent scatterers wordt vervolgens de deformatie berekend, een zeer grote uitdaging omdat ook fasemeerduidigheden, atmosferische storingen, terreinhoogtevariëaties en fouten in de bepaling van de



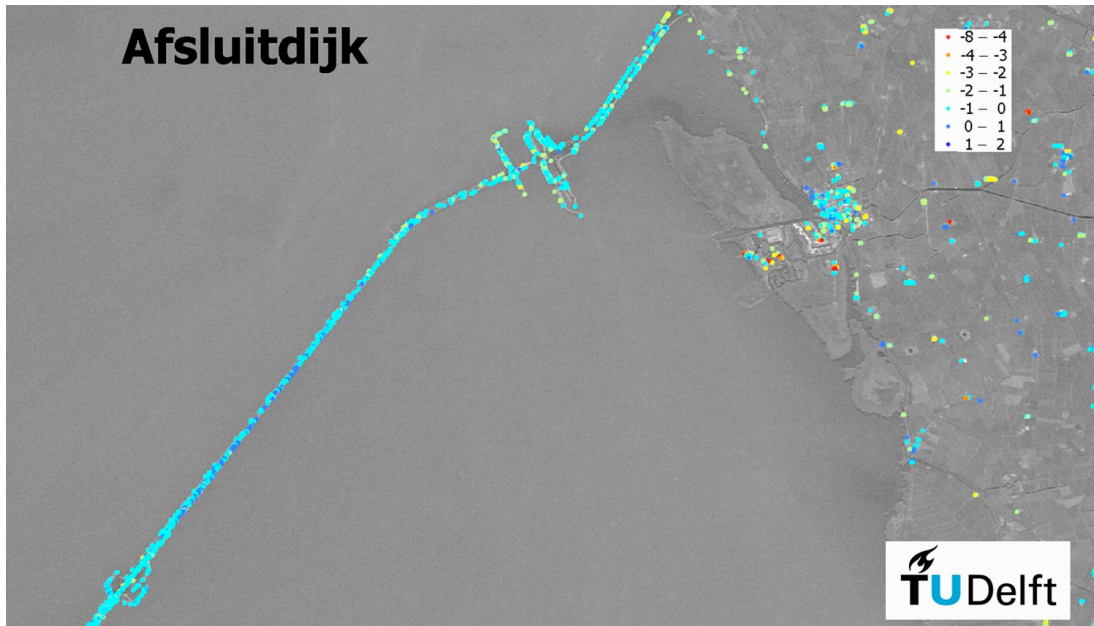
figuur 54 De door de TU Delft met PS-InsAR bepaalde deformaties in de buurt van Harlingen. Met deze techniek kunnen deformaties tot op een millimeter per jaar bepaald worden. (© TU Delft / Hansje Brinker)

satellietbaan bijdragen tot het signaal. Voor het oplossen van een dergelijk sterk onderbepaald systeem is een grote hoeveelheid waarnemingen nodig. De techniek is meestal slechts bruikbaar als er meer dan dertig satellietbeelden voorhanden zijn. Door slimme rekenalgorithmen worden uiteindelijk de punten geselecteerd waarvan het signaal waarschijnlijk alleen nog maar deformatie bevat en deze kunnen in kleur op een radarintensiteitsbeeld worden weergegeven.

Met deze techniek is het mogelijk deformaties met een precisie van beter dan millimeter per jaar vast te stellen (zie figuur 54). Bovendien gebeurt dit op basis van beelden die sinds 1992 zijn opgenomen. Daardoor bestaat de unieke mogelijkheid terug te kijken in de tijd, om achteraf bijvoorbeeld verzakkingen te achterhalen.

Een nadeel van deze techniek is dat er beslist *persistent scatterers* nodig zijn: in het algemeen zijn dit harde hoekige objecten, die de radarstraling onder een gunstige hoek en op een over jaren onveranderlijke manier terugverstrooien naar de satelliet. De techniek werkt dan ook niet op bijvoorbeeld grasdijken. Een hiermee verwant nadeel is dat niet tevoren te zeggen is op welke locaties de techniek deformaties zal kunnen vaststellen: misschien wel niet waar deze gewenst zijn. Een voordeel is echter dat de techniek deformaties opspoorde waar ze wellicht volstrekt niet verwacht werden. Het is daarmee een geschikt signaleringsinstrument, dat locaties kan opsporen waar met conventioneelere technieken nader onderzoek op zijn plaats is. Het is, gezien de beperkte resolutie van de gebruikte C-band-radarbeelden, niet mogelijk de locatie van het gevonden punt beter dan tot op 5 à 10 meter vast te stellen.

Een studie door de TU Delft heeft aangetoond dat verschillende waterkeringen in Nederland, waaronder de dijken van de IJsselmeerpolders en de Afsluitdijk, inderdaad in



figuur 55 De bepaling van de deformatie van punten op de Afsluitdijk met PS-InSAR. (© TU Delft / Hansje Brinker)

de gaten te houden zijn (zie figuur 55 en het rapport *POSEIDON: on the potential of satellite radar interferometry for monitoring dikes of the Netherlands*, [16]). Dit blijkt vooral te komen door stortsteen aan de waterlijn of kunstwerken. Niettemin is ook daarmee een goede indicatie te geven en de verwachting is dat de techniek zich verder ontwikkelt zodat nog meer punten gevonden kunnen worden.

Als 'spin-off' van de kennis van de TU Delft, die zich vooral richt op de ontwikkeling van innovatieve methoden, is het bedrijf Hansje Brinker opgericht, dat tot doel heeft deze kennis te operationaliseren. Hansje Brinker is een van de vijf winnaars van een aanbesteding voor innovatieve inspectietechnieken in het kader van het SBIR-programma Digidijk (zie noot 11 op pagina 46 en de projectbeschrijving [29] en informatieblad [30]). In het kader daarvan beoogt men een operationele dienst op te zetten waarbij waterkeringbeheerders in Nederland worden gewaarschuwd als er deformaties aan hun waterkeringen plaatsvinden. Eens per week komt er namelijk een satellietbeeld bij, waarmee ook veranderingen in de deformatiesnelheid zijn te detecteren.

Naast de TU Delft is ook Vexcel (tegenwoordig onderdeel van Microsoft) actief als commerciële aanbieder van de PS-methode. Deze methode is op hetzelfde principe gebaseerd, maar anders uitgewerkt, hetgeen tot interessant vergelijkingsmateriaal zou kunnen leiden. Vexcel noemt hun methode Coherent Target Monitoring (CTM). Er zijn wereldwijd nog enkele andere ontwikkelaars die het principe van PS-InSAR in commerciële software of producten aanbieden.

Met de hiérvóór genoemde TerrasAR-X en dergelijke satellieten zou deze techniek kunnen profiteren van een hogere resolutie en dus een betere localisatie in het terrein van de gevonden punten. Ook de verschillende mogelijke kijkhoeken dragen bij aan een betere deformatiebepaling, doordat de deformatievector beter ontleed kan worden in de coördinaatrichtingen. Daarnaast heeft TerrasAR-X een hoge herhalingsfrequentie, hetgeen gunstig is voor monitoring en waardoor relatief snel een groot archief (noodzakelijk voor PS-InSAR) wordt opgebouwd. De kortere golflengte maakt dat er andere parameters



figuur 56 Een aluminium hoekreflector kan dienen als kunstmatige langcoherente verstrooier of persistent scatterer, om zo het gebrek aan natuurlijke reflectiepunten in het terrein te compenseren. Deze moeten jaren verankerd blijven en zeer constant van vorm zijn – en koebestendig ... Dit is een van de reflectoren die bij de proef bij de Lekdijk bij Bergambacht is gebruikt. (© Swartvast – Rens Swart)

gelden, maar door de hogere herhalingsfrequentie wordt een verlies aan correlatie (ten opzicht van C-band) gecompenseerd. Ook de hogere signaalruisverhouding is gunstig voor PS-INSAR.

Het grote nadeel is dat de beelden aanmerkelijk kostbaarder zijn dan de beelden van ERS en ENVISAT van ESA en dat bovendien niet kan worden beschikt zo'n groot archief. Dankzij ERS bestaat dat al vanaf 1992 en met de lancering van Sentinel-1 (zie § 5.2.2 en figuur 13) zal de analyse van C-band-beelden tot in lengte van jaren gegarandeerd zijn.

De genoemde potentie van TerraSAR-X kan alleen worden benut als de beelden werkelijk operationeel en commercieel voor Nederland worden verworven. Als er geen overheid of instituut opstaat om dit potentiële monitoringsinstrument te voorzien van een ononderbroken stroom aan data, zal het blijven bij af en toe een experiment door een wetenschappelijk instituut, met af en toe een paar (dan kostbare) beelden.

Een manier om het gebrek aan natuurlijke langcoherente verstrooiers te compenseren is om deze zelf in het terrein aan te brengen. Dit is goed mogelijk door metalen hoekreflectoren in het terrein te plaatsen. Om voldoende te reflecteren voor gebruik door SAR-satellieten moeten ze minimaal een meter groot zijn: zie figuur 56. Daarnaast moeten ze jaren op exact dezelfde manier in het terrein verankerd blijven en moeten ze 'koebestendig' zijn. Vanwege de precisie waarmee deze techniek werkt moeten ook dergelijke hoekreflectoren (*corner reflectors*) een op de millimeter constante vorm hebben en met vee in de buurt dat zich graag wil schuren is dat niet eenvoudig.

Denkbaar is deze hoekreflectoren 'op te vouwen' als bij een fietsreflector. Met name als kleinere afmetingen voldoende zijn, zoals bij een gevlogen systeem als MinisAR, lijkt dit een mogelijkheid om InsAR en PS-InsAR ook te gebruiken voor hogeresolutiewaarnemingen van waterkeringen. Als deze 'reflectortegels' of zoals TNO ze noemt 'slimme stoeptegels' op grote schaal geproduceerd kunnen worden en in de bekleding van de waterkering kunnen worden aangebracht, ontstaat een verzameling 'koebestendige' meetpunten van grote waarde.

Conclusies radar en radarinterferometrie voor inspectie waterkeringen

SAR-beelden zijn voor waterkeringbeheer niet erg nuttig. Natuurlijk is een beeld met een resolutie van een meter dat dwars door bewolking kan worden genomen aardig, maar er zijn voldoende andere mogelijkheden om op andere momenten aan aanmerkelijk betere beelden te komen. Ook voor de mogelijkheid van polarimetrie lijken geen toepassingen te bestaan. Bij calamiteiten zou men aan radar denken vanwege de weersonafhankelijkheid, maar dit lijkt niet terecht omdat ook de inzetbaarheid en stabiliteit van vliegtuigen lijdt onder het noodweer waarmee calamiteiten vaak gepaard gaan.

Radarinterferometrie is een zeer krachtige techniek, waarvoor nader onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden binnen inspectie aan te bevelen is. De grootste potentie ligt bij PS-InsAR gebaseerd op satellietbeelden, maar de ontwikkeling van flexibele gevlogen hogeresolutiesystemen verdient eveneens aandacht.

De zeer beperkte hoeveelheid punten die op onder meer grasdijken wordt gevonden beperkt de toepasbaarheid ernstig. Voor de benutting van de potentie van de techniek is het van groot belang een groot en ononderbroken data-archief op te bouwen. Daarvoor is het noodzakelijk niet alleen C-band-data te verwerven, maar ook 'aan te haken' bij de komst van TerraSAR-X.

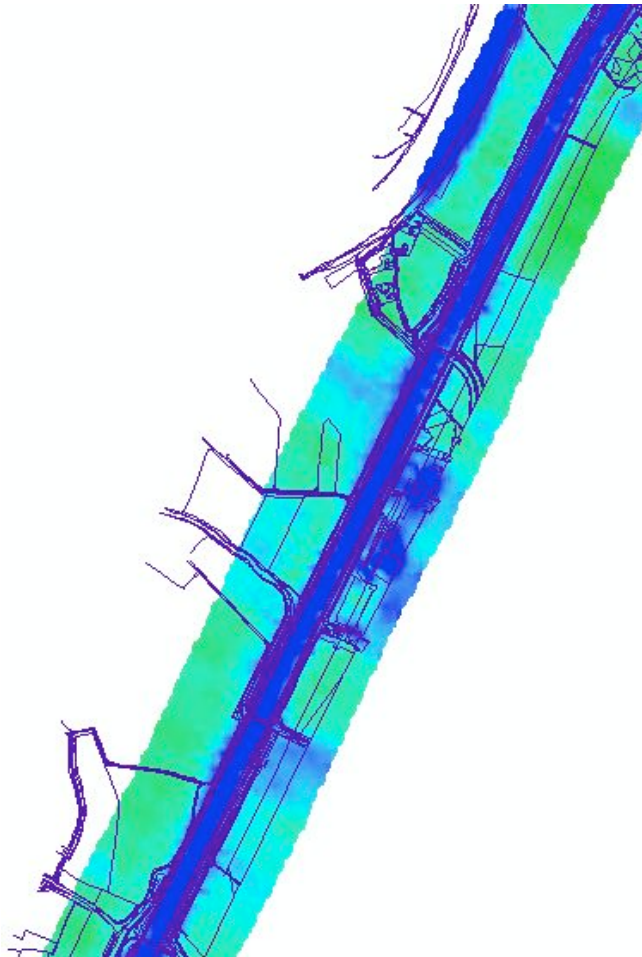
Het ontwikkelen van 'opgevouwen' hoekreflectoren die bij dijkversterkingsprojecten en anderszins in waterkeringen of kunstwerken kunnen worden aangebracht, is het verkennen waard.

5.3.9 Hyperspectrale beelden

Met bepaalde scanners is het mogelijk informatie in tientallen spectrale banden te verzamelen. Met deze hyperspectrale beelden kunnen analyses worden uitgevoerd waarbij zeer nauwkeurig kan worden geïdentificeerd. Vooral bij vegetatieclassificatie kan deze techniek worden gebruikt. Het bekijken van de informatie in het nabije infrarood, zoals in § 5.3.5, is hiervan een eenvoudig voorbeeld zonder de mogelijkheden van hyperspectrale analyse. Voor inspecties van waterkeringen lijkt dit niet werkelijk veelbelovend, tenzij men de vegetatie op de waterkering in kaart wil brengen.

5.3.10 Passieve microgolfradiometrie

De natuurlijke microgolfstraling van het aardoppervlak is tussen golflengten van globaal 1 en 30 centimeter vooral afhankelijk van het vochtigheidsgehalte van de grond. Voor kleinere golflengten wordt de invloed van weer en atmosfeer groot, voor grotere golflengten gaan ionosfeer, kosmische radiostraling en communicatie-apparatuur



figuur 57 Een bodemvochtbeeld van het Julianakanaal, vervaardigd met passieve microgolfradiometrie. Dit beeld is met korte golflengte opgenomen, waardoor de resolutie vrij hoog is, maar de penetratie niet veel dieper dan 5 cm is. De blauwe vlekken rechts naast het midden worden veroorzaakt door bebouwing met veel metaal; de andere vlekken wijzen mogelijk wél op vocht lekkend uit dit bovenop het maaiveld gebouwde kanaal. (© Miramap)

overheersen. Voor de ruimtevaart zijn gevoelige ontvangers gebouwd die de sterkte van deze passieve microgolven meten: passieve microgolfradiometrie (PMR). Het Nederlandse bedrijf Miramap heeft in samenwerking met een Russische onderzoeker en ESTEC deze ruimtevaarttechnologie geschikt gemaakt voor gebruik onder vliegtuigen. Het hangt van de golflengte af hoe diep in het aardoppervlak wordt gekeken. Bij de langste golflengte (L-band, 21 cm) kan een meter diep worden gekeken, maar de resolutie neemt dan af tot 10–25 meter.

Miramap heeft onder meer in samenwerking met het Innovatietestcentrum van Rijkswaterstaat DWW (zie [10]) een proef gedaan met waterschap Rivierenland en met Rijkswaterstaat rond het Julianakanaal. Men gebruikt een scanner met drie golflengten (X-, C- en L-band), elk met een eigen penetratie en ruimtelijke resolutie. In principe kan zo een goed overzicht van het bodemvocht worden gegeven. Zie figuur 57. De resultaten hiervan zijn nog niet definitief; calibratie en interpretatie kosten veel aandacht. Natte plekken in het landelijk gebied lijken goed te zien, maar in het stedelijk gebied overheersen andere bronnen van microgolven. Ook vocht in vegetatie speelt een rol.

De droogtescanner is een van de sensoren waarmee Miramap zijn multisensorproject voor monitoring van waterkeringen uitvoert. Dit multisensorproject is een van de vijf winnaars van een aanbesteding voor innovatieve inspectietechnieken, die in het kader van het SBIR-programma Digidijk (zie noot 11 op pagina 46) is georganiseerd.

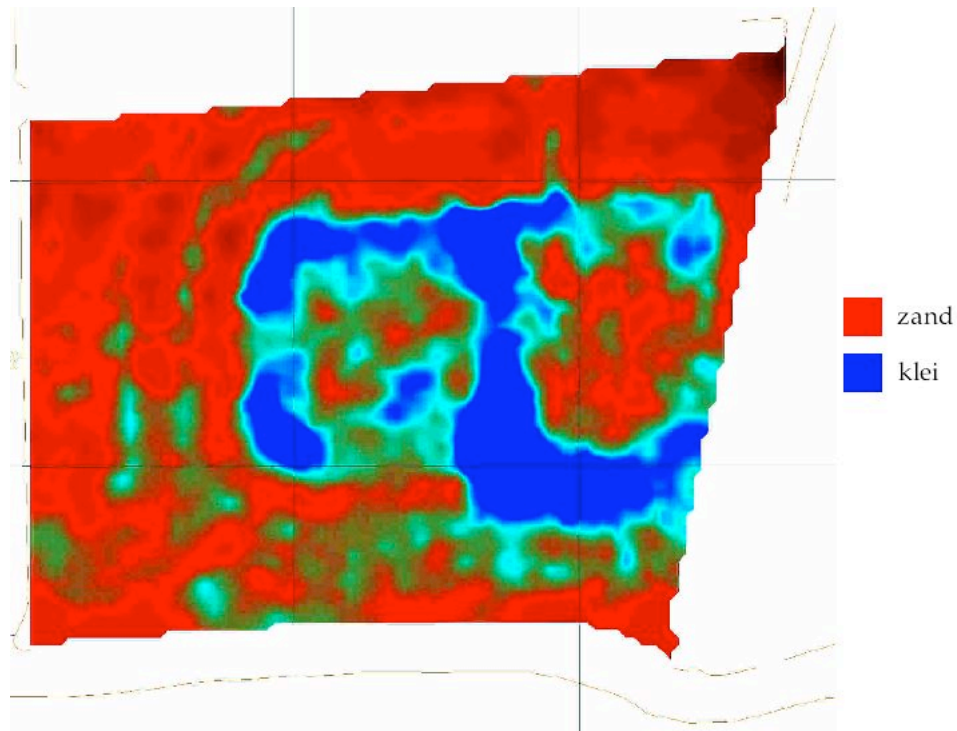
5.3.11 Radioactiviteit

De natuurlijke radioactiviteit van de bodem kan met speciale scanners worden gemeten. Het Groningse bedrijf Medusa Explorations (waarbij MEDUSA staat voor Multi-Element Detector system for Underwater Sediment Activity), dat voortkomt uit de Nuclear Geophysics Division van het Kernfysisch Versnellerinstituut, heeft een systeem ontwikkeld waarmee op een efficiënte manier de samenstelling van bodemmateriaal in kaart kan worden gebracht. Men meet ter plekke met onder meer een gammasonde met grote nauwkeurigheid de natuurlijke radioactiviteit van de bodem: ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U en soms ^{137}Cs . Van deze stoffen is het Cesium door de mens gemaakt; de overige drie komen van nature voor. MEDUSA is gevoelig voor de bovenste 30 tot 50 cm van de bodem.

Met dit innovatieve systeem is veel ervaring opgedaan om bijvoorbeeld het slibtransport bij baggeractiviteiten in riviermondingen en havens in kaart te brengen. Rijkswaterstaat heeft er zelfs een leidraad voor geschreven [47]. Omdat men inzicht verkrijgt in de verplaatsing van sediment onder invloed van stromingen, kan men adviseren om baggerslib uit havens op een locatie in zee te storten waar het blijft liggen en dus niet met de stromingen weer in de haven of riviermonding terugvloeit.

Door de gammasensor over het terrein te bewegen, kan onderscheid worden gemaakt tussen zand- en klei-achtige bodems, kan bepaald worden of de bodem vervuild is, bijvoorbeeld met zware metalen, en kan worden bepaald of de bodem 'verstoord' is, bijvoorbeeld door graaf- of bouwwerkzaamheden. Met name doordat sinds het ongeluk in Tsjernobil de bodem bedekt is met een flinterdun laagje radio-actief Cesium, zijn verstoringen op te merken.

In het kader van het verdrag van Malta brengt VB Ecoflight in samenwerking met onder meer de Rijksdienst voor Archeologie, Cultuurlandschap en Monumenten van onder een motorzweefvliegtuig gebieden met een mogelijk archeologische waarde in kaart, met een



figuur 58 Radioactiviteitsmetingen laten een verstoorde bodem zien. Dit zijn de op het maaiveld niet zichtbare restanten van de fundamenteën van kasteel Selwerd. (© Medusa Explorations Groningen)

multispectrale scanner maar eveneens met radioactiviteitsmetingen (zie [20]). Dit gebeurt in het kader van een project binnen Ruimte voor Geo-informatie (RGI). Een voorbeeld van een dergelijk beeld is te vinden in figuur 58.

De sensor wordt tot nu toe hoofdzakelijk in water of grondgebonden gebruikt. Een beperking voor gebruik vanuit vliegtuigen is dat de resolutie sterk afneemt en omstreeks gelijk is aan de vlieghoogte. Zie ook de *Airborne gammaspectrometers product information* [39] van Medusa Explorations.

Volgens Victor Hopman van Deltares heeft Medusa in het verleden een aantal proeven uitgevoerd waarbij de topaagsamenstelling (de textuur van de bovenste 50 cm) van een aantal dijken in de Flevopolder in kaart is gebracht. Doel van deze proef was om de kwaliteit van de toplaag gebiedsdekkend in kaart te brengen en om bemestingsadviezen aan de pachters te kunnen geven. In het kader van IJkdijk stelt Medusa Explorations samen met VB Ecoflight voor de sensor te beproeven vanuit een vliegtuig. Daarmee kan de topaagsamenstelling nauwkeurig en gebiedsdekkend in kaart gebracht worden. Door deze proeven twee maal per jaar uit te voeren (voorjaar/najaar) kan eventuele variatie door plantengroei en uitwassing worden bestudeerd. Het doel van de metingen is om gedetailleerd en gevalideerd kaartmateriaal te leveren over de kwaliteit van de dijkbekleding en over de relatie tot bemesting en daarmee een service te kunnen bieden aan dijkbeheerders en pachters. Voorts draagt onze informatie bij aan de modellen over overslag in relatie tot sterkte en dijkerosie. Na uitvoering van de metingen worden de ruwe data verwerkt tot ruimtelijke bodemsamenstellingsinformatie en tot ruimtelijke veranderingen in deze bodemsamenstellingsinformatie.

Voor inspectie van waterkeringen is hiermee nog nauwelijks ervaring opgedaan. Het verdient aanbeveling nader onderzoek te doen om over de toepasbaarheid een uitspraak te kunnen doen.

5.3.12 Elektrische geleidbaarheid en weerstand

Bij elektromagnetisch onderzoek wordt door middel van elektromagnetische inductie de elektrische geleidbaarheid van de ondergrond gemeten. Elektromagnetisch onderzoek geeft volgens Victor Hopman van Deltares een globaal inzicht in de laagopbouw op een snelle en relatief goedkope manier. Ook lokale contrasten in de elektrische geleidbaarheid, veroorzaakt door afval of oude funderingen, worden gedetecteerd. Bij GeoDelft wordt gebruik gemaakt van de EM-31 van de firma GEONICS.

Het basisprincipe achter de toepassing van de EM-31 is eenvoudig. Een zendspoel aan één kant van het instrument stuurt een wisselstroom met een vastgestelde frequentie de grond in. Deze wisselstroom wekt in de ondergrond een primair magnetisch veld op. Dit primair magnetisch veld induceert in de ondergrond kleine stromen die een secundair magnetisch veld opwekken. Het secundaire magnetische veld wordt tesamen met het primaire veld door de ontvangspoel geregistreerd. De EM-31 is zodanig ontworpen dat het elektrisch geleidend vermogen van de ondergrond direct kan worden afgelezen. Dit is een zogenaamde schijnbare geleidbaarheid: het geeft een gemiddelde waarde van het elektrisch geleidend vermogen van de verschillende lagen waaruit een grondpakket is opgebouwd. Door op dezelfde positie metingen uit te voeren met afwisselend een horizontale en verticale spoelconfiguratie wordt informatie over verschillende dieptebereiken verkregen.

De elektromagnetische metingen worden beïnvloed door de aanwezigheid van goede elektrische geleiders als stalen hekken, hoogspanningsmasten en elektriciteitskabels. Deze verstoringen kunnen tijdens de interpretatiefase gemakkelijk worden herkend en bij de verwerking worden ze uitgefilterd. Het voordeel van het gebruik van de elektromagnetische methode boven het traditionele grondonderzoek is de snelheid en de semi-continuïteit waarmee informatie over de grondopbouw wordt verkregen. GeoDelft gebruikt dit instrument bij verkennen van tracé's voor dijken, wegen en leidingen, voor het in kaart brengen van vuilpluimen en het opsporen van grote ondiep gelegen obstakels.

In principe is deze techniek ook vanuit een helikopter bruikbaar, maar de resolutie verslechtert snel en het is moeilijk het juiste signaal in het beeld te herkennen. In het *Overzicht van meettechnieken* [43] wordt meer over ervaringen elders geschreven. Voor inspectie van waterkeringen is hiermee nog nauwelijks ervaring opgedaan. Het verdient aanbeveling nader onderzoek te doen om over de toepasbaarheid een uitspraak te kunnen doen.

5.3.13 Multisensorwaarnemingen

Het waarnemen met meerdere sensoren tegelijk is uiteraard geen remotesensingtechniek op zich, maar verdient wel speciale aandacht, omdat daarmee de hiervóór separaat behandelde technieken een meerwaarde kunnen verkrijgen boven wat ze op zichzelf te bieden hebben. Een combinatie van technieken zorgt in het algemeen voor synergie: in combinatie zijn er meer uitspraken over hetgeen waargenomen wordt mogelijk dan met de technieken afzonderlijk.

Een bekend voorbeeld is laseraltimetrie. Waterkeringbeheerders hebben ervaren dat het zeer nuttig is om tegelijk met de laseropname ook optische of videobeelden op te nemen. Een waterkeringbeheerder bekijkt delen van zijn beheergebied soms met een zeer gedetailleerde blik en vraagt zich dan af wat een bepaald verschijnsel in het hoogtemodel voorstelt. Hij vergewist zich hiervan door er de simultaan met het laserbestand opgenomen foto- of video-opnamen bij te pakken. Soms betekent deze informatie dat het 'alarm' definitief als loos kan worden gekwalificeerd. Dit is óók belangrijke informatie. Soms echter komen daardoor verschijnselen aan het licht die wel degelijk tot alarm leiden, zoals in figuur 48. Het beschikken over gelijktijdig met laseraltimetrie vervaardigde optische beelden blijkt in praktijk dermate nuttig, dat dit als *eis* in de door de Werkgroep Grootschalige Laseraltimetrie opgestelde specificaties is opgenomen (zie hun rapport [53]).

Sommige sensoren geven informatie die niet altijd eenduidig te interpreteren is. Dit is hiervóór opgemerkt bij nabij- en thermisch infraroodbeelden. Het geldt evenzeer voor radioactiviteitsmetingen en hyperspectrale beelden. Sensoren hebben verschillende karakteristieken, bijvoorbeeld in gevoeligheid voor het elektromagnetisch spectrum, maar (onder meer daardoor) ook in resolutie. Bijna altijd gaat het minimaal om een hoge-resolutie optisch beeld dat de interpretatie van een andere sensor ondersteunt. Mutatiedetectie (zie § 5.3.14) wordt pas krachtig als het detectie-algoritme informatie uit verschillende bronnen met elkaar kan combineren. Rijkswaterstaat heeft laten zien dat vegetatieclassificatie profiteert van het betrekken van de maaiveldhoogte bij het classificatieproces.

Een vaak terugkerend aspect bij verschillende waarneemtechnieken is dat het gaat om de detectie van *anomalieën*: het gaat niet zozeer om de absolute waarneming, maar om afwijkingen ten opzichte van de directe omgeving. De detectie en de beoordeling van anomalieën wint aan kracht door de inzet van multisensorwaarnemingen.

Een groot voordeel van de multisensorbenadering, althans als het gaat om gevlogen systemen, is dat de kosten veel lager zijn dan indien apart met de afzonderlijke sensoren waarnemingen zouden worden gedaan. De vlieggkosten zijn immers in het algemeen een van de grootste kostenposten en deze kosten drukken dan slechts éénmaal. Voorwaarde is uiteraard wel dat de verschillende sensoren zich in het vliegtuig of ander platform met elkaar laten combineren. Volgens Miramap zorgt de toevoeging van één sensor voor een kostenstijging van naar schatting slechts 20%.

VB Ecoflight, bijvoorbeeld, volgt deze aanpak in het kader van IJkdijk. Daarnaast brengt VB Ecoflight gebieden met een mogelijk archeologische waarde simultaan in kaart met een multispectrale scanner en met radioactiviteitsmetingen, zoals in § 5.3.11 werd gemeld.

Het bedrijf Miramap is met het multisensorproject RAMSIL (Rapid Airborne Multi-Sensor Inspection of Levees) een van de vijf winnaars van een aanbesteding voor innovatieve inspectietechnieken, die in het kader van het SBIR-programma Digidijk (zie noot 11 op pagina 46) is georganiseerd. Zie de projectbeschrijving [40]. Miramap beoogt zijn multisensorproject voor monitoring van waterkeringen uit te voeren met een droogtescanner, sensoren voor thermisch en nabij infrarood, een optische camera en een laseraltimeter.

5.3.14 Mutatiedetectie

Ook mutatiedetectie is geen techniek, maar een combinatie van technieken die gebruikmaakt van (een combinatie van) remotesensingbeelden. In Nederland hebben onder meer NEO en TerraImaging hiermee ervaring.

Het gaat al lang niet meer over het bepalen van het verschil tussen twee hogeresolutiesatellietbeelden of luchtfoto's. Met behulp van slimme programmatuur kan een ruimtelijke analyse op een geheel andere manier plaatsvinden. In het *Statusrapport digitale inwinning t.b.v. het product GIV B&O HWS* [12] van Rijkswaterstaat wordt onder meer het pakket ECognition beschreven. Dit gebruikt een objectgeoriënteerde beeldanalyse. ECognition benadert een (satelliet)beeld meer op een manier zoals mensen dit doen. Het menselijke beeldinzicht is eerder gebaseerd op het onderzoeken van de relaties tussen objecten dan op geïsoleerde punten van beeldinformatie. Mensen gebruiken verscheidene eigenschappen bij het interpreteren van beelden: kleur, vorm, grootte, textuur, patroon en context. De meeste pakketten classificeren een beeld op basis van pixelwaarden. Deze moderne programmatuur segmenteert het beeld eerst in groepen pixels met overeenkomstige spectrale eigenschappen. Pas in een volgende stap worden deze segmenten in klassen ingedeeld. Daarbij kan niet alleen een hogeresolutiebeeld worden gebruikt, maar ook bijvoorbeeld vectordata als het DTB of de GBKN en bepaalde klassen kan men laten afhangen van de hoogte door het AHN erbij te betrekken. Naast de grootte van de segmenten en het gewicht van de afzonderlijke lagen is het ook mogelijk om de classificatie te laten beïnvloeden door de vorm van de te verwachten waar te nemen objecten.

Met deze innovatieve technieken is classificatie en mutatiedetectie aanmerkelijk succesrijker geworden. Voor waterkeringbeheerders kan dit vooral interessant zijn met het oog op het handhaven van de keur. Mogelijk is de techniek ook geschikt voor classificatie van vegetatie op en rond de waterkeringen met het oog op natuurontwikkeling. Met dit laatste heeft Rijkswaterstaat AGI ruime ervaring.

5.4 Kansrijke toepassing van remote sensing in het inspectieproces

In de vorige paragrafen is per platform en per remotesensingtechniek aan de hand van een beschrijving een inschatting gegeven voor de toepasbaarheid bij inspectie van waterkeringen. In deze paragraaf wordt gepoogd deze conclusies overzichtelijk in een tabel te presenteren. Dit zou mogelijk zijn per inspectieparameter, zoals in de bijlage van het *Overzicht van meettechnieken* [43] en in *Inspectietechnieken voor droge veenkaden* [32] is gebeurd. Ook kan de compactere presentatie per indicator worden gevolgd, zoals deze zijn opgesomd in de tabel in bijlage B. Deze aanpak wordt hier echter omwille van de overzichtelijkheid en leesbaarheid niet gevolgd.

Er wordt aangesloten bij de representatie van faalmechanismen zoals deze zijn opgesomd in tabel 2 in § 3.3. Omdat daarin de faalmechanismen reeds in verband zijn gebracht met de geotechnische en geometrische *basiselementen* van dijken als hoogte, helling, type bekleding, opbouw en grondsterkte, wordt de toepasbaarheid en potentie van remotesensingtechnieken gerelateerd aan deze basiselementen, omdat deze de meest compacte sleutel lijken tot de waarneembaarheid met remotesensingtechnieken.

Het eerste deel van de onderstaande tabel herhaalt het in tabel 2 genoemde verband tussen faalmechanismen en geotechnische en geometrische basiselementen. Per basiselement wordt vervolgens voor elke remotesensingtechniek de mate van huidige toepassing en de

potentie weergegeven. Op die manier worden remotesensingtechnieken tevens gekoppeld aan faalmechanismen.

Per remotesensingtechniek wordt met symbolen de mate waarin deze nu reeds wordt toegepast en de potentie weergegeven:

- huidige toepassing
- potentie

waarbij de potentie in de volgende gradaties wordt geclassificeerd:

- gering
- matig
- goed
- zeer goed

In die gevallen dat er één bolletje vermeld is, betekent dat soms dat nader onderzoek wordt aanbevolen om een uitspraak over de toepasbaarheid te kunnen doen. Als er naast een grijs bolletje een zwart bolletje is vermeld, betekent dat dat het huidige gebruik de potentie van de techniek waarschijnlijk niet ten volle benut. Verder spreekt de klassering voor zich.

De presentatie in de tabel is beslist een versimpeling van de werkelijkheid. Het nabij-infrarood kan bijvoorbeeld naar verwachting goede informatie verschaffen over bekleeding, maar alleen als dit vegetatie is. Genuanceerde informatie is te vinden aan het einde van de behandeling van de afzonderlijke remotesensingtechnieken in § 5.3.

De conclusie die de tabel toelaat is dat een substantieel aantal faalmechanismen gerelateerd is aan geometrische basiselementen en dat het juist deze basiselementen zijn die met fotogrammetrie en laseraltimetrie zeer goed in kaart te brengen zijn. Daarbij kan de potentie van deze technieken nog verder worden benut dan nu in praktijk reeds gebeurt, leidend tot betere informatie over deze faalmechanismen.

De geotechnische basiselementen laten zich zoals in § 3.3 opgemerkt moeilijk waarnemen. De tabel laat zien dat de minder bekende technieken als thermisch infrarood, passieve microgolfradiometrie, radioactiviteitsmetingen en geleidbaarheidsmetingen hiervoor waarschijnlijk enige potentie bezitten. Juist omdat deze basiselementen zo moeilijk zijn waar te nemen, verdient het aanbeveling de geschiktheid van genoemde technieken nader te onderzoeken.

Niettemin hebben ook laseraltimetrie en PS-INSAR enige potentie tot het doen van geometrische waarnemingen die als verklikker fungeren van faalmechanismen die gerelateerd zijn aan de opbouw en ondergrond van de waterkering. Het verdient aanbeveling dit gebruik van deze technieken nader te onderzoeken: hiermee zou zeer waardevolle informatie beschikbaar komen.

De tabel laat tevens zien dat verschillende technieken weliswaar met succes toegepast worden, maar dat deze nog niet in hun volle potentie ontplooid worden. Het hoeft geen betoog dat deze ontplooiing gestimuleerd dient te worden.

| basiselementen → | | hoogte | helling | type bekleding | kwaliteit bekleding | opbouw dijk-kern | ondergrond | inhomogeniteit | doorlatendheid | grondsterkte |
|------------------|---------------------------------|--------|---------|----------------|---------------------|------------------|------------|----------------|----------------|--------------|
| nr | faalmechanisme | | | | | | | | | |
| 1 | overloop | ● | | | | | | | | |
| 2 | overslag | ● | ● | ● | | | | | | |
| 3 | macro-instabiliteit binnentalud | ● | ● | | | ● | ● | | ● | ● |
| 4 | macro-instabiliteit buitentalud | ● | ● | | | ● | ● | | ● | ● |
| 5 | horizontaal afschuiven | ● | ● | | | | ● | | | ● |
| 6 | erosie binnen/kruin | | ● | ● | ● | | | | | |
| 7 | erosie bekleding buitentalud | | | ● | ● | | | | | |
| 8 | micro-instabiliteit | | | ● | ● | ● | | | | |
| 9 | piping | | | | | | ● | ● | ● | |
| 10 | heave | | | | | | ● | ● | ● | |
| 11 | opbarsten | | | | | | ● | ● | ● | |
| 12 | zettingsvloeiing | | | | | | ● | ● | ● | |
| 13 | beschadiging | | | ● | ● | ● | | | | |
| | remotesensing-techniek | | | | | | | | | |
| | luchtfoto's | | | ●●● | ●●● | | | | | |
| | fotogrammetrie | ●●●● | ●●●● | ●● | ● | | | | | |
| | hogeresolutie-satellietbeelden | | | ● | ● | | | | | |
| | nabij-infrarood | | | ●● | ●● | | | | | |
| | thermisch infrarood | | | ● | ●● | | ●● | ●● | ●● | |
| | laseraltimetrie | ●●●● | ●●●● | ●● | ●● | | ●● | ●● | | |
| | SAR | | | ● | ● | | | | | |
| | PS-INSAR | ●●● | ●●● | ● | ● | | ● | ● | | |
| | hyperspectrale beelden | | | ●● | ●● | | | | | |
| | passieve microgolf-radiometrie | | | ● | ● | ●● | | ● | ● | |
| | radioactiviteit | | | ● | ● | ● | ●● | | | |
| | elektrische geleidbaarheid | | | ● | ● | ●● | ● | ●● | | |
| | mutatiedetectie | | | | ●● | | | | | |

tabel 4 De huidige toepassing en de potentie van remotesensingtechnieken, afgezet tegen de faalmechanismen en hun karakterisering in geometrische en geotechnische basiselementen, behandeld in § 3.3.

Voor de potentie van platforms leent het bovenstaande zich niet. De verzameling platforms en remotesensingtechnieken vormen een tweedimensionale ruimte. Als daarbij nog relaties met geometrische en geotechnische basiselementen en faalmechanismen moeten worden aangegeven, wordt het geheel minimaal driedimensionaal en te complex. Gekozen is hieronder voor een potentie-oordeel afgezet tegen de werkprocessen van de waterkeringbeheerder zoals die zijn behandeld in § 4.3.2. Deze lopen gedeeltelijk parallel aan een bereik in tijd: dagelijks, seizoens, vijfjaarlijks, calamiteit. Een van de conclusies is dat de potentie van de verschillende platforms vooral afhangt van de tijdsduur waarbinnen en waarover de inzet gevraagd wordt.

De betekenis van de bolletjes is dezelfde als bij de vorige tabel (zie daarvoor).

| platform → | | satellieten | vliegtuigen | helikopters | motor-zweefvliegtuigen | laag-vliegende UAVs | langdurig hoog-vliegende UAVs |
|------------|---|-------------|-------------|-------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|
| nr | werkproces | | | | | | |
| 1 | dagelijkse inspectie | | | | | ● | ●●● |
| 2 | voor- en najaarsinspectie | ● | ●●● | ●●●● | ●●● | ● | ●●● |
| 3 | inspectie tijdens bijzondere omstandigheden | | | ● | ● | ●● | ●●● |
| 4 | inspectie tijdens calamiteiten | | ● | ● | ● | ●●● | ●●● |
| 5 | vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid | ● | ●●● | ●●●● | ●● | | ●● |
| 6 | basisinformatievoorziening | ●● | ●●●● | ●●● | ●● | | ● |
| 7 | beheer en onderhoud | | ●● | ●● | ●● | | ● |
| 8 | plannen, ontwerpen en realiseren | | ● | ● | ● | ● | |
| 9 | vergunningverlening en handhaving | ●● | ●● | ●● | ●● | ● | ●● |
| 10 | natuurontwikkeling | | ●● | ●● | ●●● | | ●● |

tabel 5 De potentie van remotesensingplatforms afgezet tegen de werkprocessen binnen het waterkeringbeheer zoals behandeld in § 4.3.2.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Inleiding

Op verschillende plekken in dit rapport zijn conclusies geformuleerd. Soms zijn deze samengebracht in aparte paragrafen. In dit hoofdstuk worden ze kort opgesomd, onderverdeeld in onderwerpen die globaal verwijzen naar de betreffende paragrafen. Ook worden aanbevelingen geformuleerd.

6.2 Conclusies

6.2.1 Invalshoeken en visie van het projectteam

1. De toepassing van remote sensing bij inspectie is weinig anders dan gereedschap om dat wat we al eeuwen doen te stroomlijnen.
2. Enerzijds hebben remotesensinggegevens een uniek karakter (vooral door hun uniformiteit en grootschaligheid), anderzijds zijn het gegevens als alle andere, die een inkoopproces vereisen en moeten worden ontsloten voor de organisatie.
3. Bij inspectie gaat het in veel gevallen feitelijk om mutatiedetectie, of het nu de hoogte, vorm, vocht of vegetatie betreft. Bij de ontwikkeling en de toepassing van remotesensingtechnieken is het goed dit in het achterhoofd te houden.
4. Het gebruik van remote sensing stelt zijn eisen aan de organisatie. Andersom stellen de processen van de organisatie eisen aan de toepassing van remote sensing. Met beide moet rekening gehouden worden, wil de toepassing succesvol zijn.
5. De toepassing van remote sensing moet niet opgeknipt worden langs eilandjes van afdelingen en deelprocessen. Juist remote sensing leent zich voor één organisatiebrede basis-geo-informatievoorziening.
6. De toepassing van remote sensing kan vanuit heel verschillende invalshoeken worden gezien: de techniek, de informatiebehoefte, faalmechanismen, het inspectieproces, de werkprocessen en de informatiekringloop. Er is niet één manier om de toepassing van remote sensing bij inspectie van waterkeringen tot een succes te maken. De grootste kans op het dichten van de kloof tussen vraag en aanbod van remotesensingtechnieken heeft men als men zich rekenschap geeft van alle afzonderlijke invalshoeken.
7. Het is verstandig dat al tijdens de ontwikkeling van een product de beoogd gebruiker wordt betrokken, bijvoorbeeld in een zogenaamd 'bouwteam'. Hoe zich dit verhoudt tot aanbestedingsregels staat te bezien.

6.2.2 Faalmechanismen en indicatoren in relatie tot remote sensing

8. Voor de beoordeling van de inzetbaarheid van remotesensingtechnieken als hulpmiddel bij inspectie van waterkeringen is een goed begrip van de onderliggende faalmechanismen belangrijk.

9. Het in verband brengen van faalmechanismen met de geotechnische en geometrische *basiselementen* van dijken als hoogte, helling, type bekleding, opbouw en grondsterkte is een compacte sleutel tot de waarneembaarheid met remotesensingtechnieken.
10. Remote sensing kan bijdragen tot detectie van faalmechanismen door ofwel de oorzaken waar te nemen (vooraf) ofwel de gevolgen (tijdens of achteraf). Piping is bijvoorbeeld vooral waarneembaar via zijn gevolgen; het mechanisme is dan reeds bezig schade aan te richten.
11. Belangrijke basiselementen van de waterkering kunnen moeilijk worden waargenomen: de opbouw, ondergrond, inhomogeniteit en doorlatendheid. Falen op deze gebieden kan mogelijk worden waargenomen via de gevolgen, zoals piping, en mogelijk door verklikkers, zoals zettingsverschillen door een inhomogene ondergrond.
12. Kennis van historische ingrepen in de opbouw van de dijk en in wijzigingen als bijvoorbeeld het verwijderen van een oude sluis draagt bij aan een verbetering van de diagnose en prognose van de toestand van de waterkering. Het is een belangrijke aanvulling op de zo moeilijk waar te nemen opbouw, ondergrond en inhomogeniteit.
13. Onder de in eerdere onderzoeken in kaart gebrachte inspectieparameters zitten vrijwel geen parameters die betrekking hebben op de grondopbouw. De nadruk op het waarnemen van inspectieparameters doet onrecht aan het feit dat veel belangrijke parameters voor faalmechanismen niet of moeilijk waarneembaar zijn.

6.2.3 Het inspectieproces in relatie tot remotesensingtechnieken

14. De toepassing van remote sensing is slechts kansrijk als deze aansluit bij de processen van het waterkeringbeheer.
15. Voor de aansluiting bij de waterkeringbeheerpraktijk is het verstandig de verbinding te leggen tussen de inspectiedeelprocessen en de werkprocessen.
16. Het begrip 'inspectie' wordt soms in enge zin gebruikt, hetgeen tot babylonische spraakverwarring kan leiden. De vijfjaarlijkse toetsing op veiligheid is vanuit de systematiek van de inspectiedeelprocessen met name diagnosticering en prognosticering en derhalve onderdeel van inspectie, terwijl veel waterkeringbeheerders dit niet als zodanig zien.
17. De inrichting van de vijfjaarlijkse toetsing is bij uitstek geschikt om voor waterkeringbeheerders als voorbeeld te dienen om hun inspectieproces volgens de inspectiedeelprocessen in te richten. Daarmee wordt sterk bijgedragen aan de intentie om het inspectieproces eenduidig, kwantificeerbaar en reproduceerbaar te maken.
18. Het is denkbaar dat de methodiek van de vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen in de toekomst onderdeel zal uitmaken van het reguliere inspectieproces van de waterkeringbeheerder, zowel voor de primaire als de regionale waterkeringen. Daardoor zou de wettelijk voorgeschreven vijfjaarlijkse toetsing feitelijk vrijwel een formaliteit worden.
19. De standaardbeschrijving van het inspectieproces in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* is vooral gericht op visuele inspecties. Niettemin blijken de criteria zoals ze daar ontwikkeld zijn, een prima basis te vormen voor het stellen van criteria aan laseraltimetrie. De aanpassingen die noodzakelijk zijn, blijken vanzelf.

20. Visuele inspectie is een activiteit die door de waterkeringbeheerder zelf gedaan wordt. Bij de inzet van specialistische waarnemetechnieken als remote sensing is dat niet aan de orde. Dit heeft grote consequenties voor omstandigheden en criteria voor de uitvoering van het proces, dat vooral door uitbesteding wordt uitgevoerd.

6.2.4 De casus laseraltimetrie

21. De inzet van een waarnemingstechniek als laseraltimetrie zou in het inspectieplan moeten worden opgenomen als een van de middelen waarmee gegevens verzameld worden.
22. Het is van groot belang dat vóór het specificatie- en aanbestedingstraject alle potentiële gebruikers binnen de organisatie betrokken worden. Het moet duidelijk worden wie (potentieel) belang heeft bij de data en met welk doel zij de data zouden willen verkrijgen.
23. De ervaringen met laseraltimetrie wijzen uit dat het van groot belang is dat zowel het te leveren product als de omstandigheden en randvoorwaarden rond de opname en het productieproces bij de aanbesteding uitputtend worden gespecificeerd. Het blijkt dat zowel het specificatieproces bij de opdrachtgever als het productieproces bij de aannemer nog niet dermate volwassen zijn dat met een reeks functionele eisen kan worden volstaan.
24. Een intensieve controle van het geleverde product blijkt in het geval van laseraltimetrie beslist noodzakelijk. Hiervoor zijn hooggekwalificeerde specialisten noodzakelijk.
25. Bij laseraltimetrie gaat het om zeer grote hoeveelheden data, die door een groot gedeelte van de organisatie gebruikt zullen worden. De automatiseringsomgeving dient hiervoor toegerust te zijn. Het gaat daarbij onder meer om schijfruimte, de capaciteit van het netwerk en van de werkstations en om actuele en geschikte programmatuur.
26. Voor de verschillende activiteiten rond specificatie, inkoop, ontsluiting en bewerking van laseraltimetrie zijn verschillende soorten specialisten nodig, met een opleidingsniveau dat in het algemeen hoger is dan bij visuele inspectie.
27. Het hoge en specialistische kennisniveau dat rond laseraltimetrie nodig is, maakt inhuur van externe specialisten verstandig.
28. Bij laseraltimetrie en remotesensingstechnieken in het algemeen is de waarneming duidelijk van de diagnose gescheiden, meer dan bij visuele inspectie. De mate waarin de diagnosestap kan worden uitgewerkt is voor laseraltimetriedata in het algemeen beknopter dan bij de waarnemingsstap. De prognosticering en operationalisatie lenen zich niet voor uitwerking.
29. Als de laserdata goed gestandaardiseerd, toegankelijk en consistent is opslagen en er een arsenaal aan geschikte, actuele en toegankelijke programmatuur en andere hulpmiddelen beschikbaar is, is de data eenvoudig bruikbaar bij de diagnostiek.
30. Men dient zich bij het afleiden van informatie uit bijvoorbeeld laseraltimetrische data voortdurend bewust te zijn van de onderliggende faalmechanismen. Door de gerichtheid op normen en bijvoorbeeld de vertaling daarvan naar dwarsprofielen, bestaat de kans dat situaties die op een andere manier duiden op een dreigend falen van de waterkering niet worden opgemerkt. Zowel in *Procesbeschrijvingen inspecties*

waterkeringen als in de data-analysepraktijk zouden faalmechanismen een belangrijkere rol moeten spelen.

31. Het Voorschrift Toetsen op Veiligheid en de praktijk van de waterkeringbeheerder gaat nog sterk uit van een beschouwing van profielen. Weliswaar kunnen deze op een representatief punt uit de laserdata genomen worden, maar feitelijk wordt daarbij de enorme dichtheid van de waargenomen hoogte-informatie sterk onderbenut.
32. Voor het stellen van precisie-eisen aan laserhoogtemetingen en het beslissen over acceptatie van het geleverde product is het verstandig het stochastisch karakter van metingen in ogenschouw te nemen.
33. Met laseraltimetrie kan een 'vlakdekkend' hoogtemodel van het dijklichaam worden vervaardigd. De grote kracht daarvan is de oppervlakte-informatiedichtheid. Deze informatie kan worden gebruikt voor het bepalen van hoogteverschillen en in het bijzonder zettingen, met inachtneming van de beperkingen in hoogte- en planimetrische precisie.
34. De bewerking van laserdata, het analyseresultaat en de opvolging (wat gaat er met het resultaat gebeuren) dienen te worden vastgelegd, zowel om later uitspraken over de kwaliteit van het eindresultaat te kunnen doen, als om de prognosticering en operationalisatie op te kunnen baseren. Daarnaast is deze informatie ook van belang voor diagnostiek in de toekomst.
35. Ondanks de inhoudelijk soms specifieke details, is de uitwerking van de casus laseraltimetrie in dit rapport zeer geschikt als kapstok voor de toepassing van andere remotesensingtechnieken bij inspectie van waterkeringen.

6.2.5 Algemene conclusies rond het inspectieproces en de toepassing van remote sensing

36. In het *Voorschrift Toetsen op Veiligheid* (vtv) speelt feitelijk het stochastisch karakter van waarnemingen en modellen geen rol. De in de vtv gehanteerde methodiek is volstrekt niet-probabilistisch. Dat doet aan het karakter van meten en toetsen afbreuk.
37. Het talud wordt in de vtv minder op voorgrond gesteld dan zijn belang feitelijk zou rechtvaardigen.
38. Er bestaat een discrepantie tussen de steeds toenemende gedetailleerdheid van de informatie aan het oppervlak van de waterkering en die van de opbouw van het dijklichaam, terwijl beide parameters invoer zijn voor de stabiliteitsberekening van de kering.
39. De inzet van remotesensingtechnieken waarbij in korte tijd over een grote strekking informatie kan worden verzameld kan inspectie van regionale keringen een grote stap vooruit helpen.
40. Een gedetailleerd overzicht van de hoogte van de waterkering – en met name de deformatie – kan bijdragen tot kennis over de opbouw ervan, doordat ze als verklikker fungeren voor inhomogeniteiten in het dijklichaam en de ondergrond.
41. Remotesensingdata en daaruit afgeleide informatie dient te worden beschouwd als basisinformatie met een hoge potentie, die centraal en gestructureerd voor de hele organisatie moet worden opgeslagen en ontsloten.

42. Remotesensingdata verschilt van visueel waargenomen inspectiedata in die zin dat het gaat om zeer grote hoeveelheden gegevens, die zowel voor de automatiseringsinfrastructuur als voor de benodigde menskracht grote gevolgen heeft. Remote sensing stelt zijn eisen aan de organisatie. Anderzijds stelt de organisatie ook eisen aan remote sensing, omdat de data en informatie moet aansluiten op de processen van de waterkeringbeheerder.
43. Het ontbreken van een gezamenlijk kennisinstituut op het gebied van remote sensing wordt door de waterschappen als omissie ervaren.
44. Initiatieven als IJkdijk en DigiDijk, waarbij de overheid innovatieve initiatieven voor waterkeringbeheer stimuleert, zijn zeer nuttig en dienen te worden gestimuleerd.

6.2.6 Platforms voor inspectie waterkeringen

45. Satellieten hebben voor inspectie van waterkeringen een beperkte potentie, doordat ze een beperkte resolutie bieden, aan hun baan gebonden zijn en niet-commerciële beelden moeilijk leverbaar zijn. De potentie voor operationeel gebruik is veel groter bij commerciële satellieten, maar daarvan zijn er weinig en de beelden zijn erg kostbaar.
46. Satellietbeelden kunnen vanwege het overzicht dat ze bieden een rol spelen bij het optimaliseren van processen: op grote schaal kunnen verschijnselen worden gesignaleerd die met lokale inspectietechnieken nadere bestudering verdienen. Vanwege de beperkte resolutie heeft dit principe voor inspectie slechts een beperkte waarde, met uitzondering van radarinterferometrie.
47. Er is geen ander platform dat om verschillende redenen zo noopt tot nationale en internationale samenwerking als aardobservatiesatellieten. Te allen tijde moet het bouwen van taakgerichte operationele satellieten en het ontwikkelen van operationele diensten daarvoor worden bevorderd binnen grote internationale samenwerkingsverbanden.
48. Het vliegtuig is hét platform voor remote sensing. Enkele karakteristieke eigenschappen zorgen voor nadelen, die ruimte laten voor de opkomst van de overige in dit rapport genoemde platforms.
49. Waterkeringen zijn relatief smalle stroken waarvoor informatie met hoge dichtheid gewenst is. Ondanks de nadelen van de hogere kosten en verminderde stabiliteit, zijn helikopters bij uitstek geschikt voor inspectie van waterkeringen vanwege hun lage mogelijke vliegsnelheid en minimale vlieghoogte.
50. Vanwege de lage kosten, lage milieu- en geluidsbelasting en flexibele inzetbaarheid verdient het aanbeveling de inzet van motorzweefvliegtuigen bij inspectie van waterkeringen nader te onderzoeken, ook al lijkt de omvang en het gewicht van de gebruikelijke waarneemapparatuur een beperking.
51. Laagvliegende onbemande luchtvaartuigen zijn minder geschikt voor dagelijkse en periodieke inspectie vanwege de lengte van de waterkeringen, maar kunnen interessant zijn bij calamiteiten, doordat ze zowel snel inzetbaar zijn als een klein gebied met hoge resolutie kunnen waarnemen.
52. Onbemande helikopters kunnen kunstwerken vanaf ontoegankelijke posities in kaart brengen.

53. Het Vlaamse langdurig hoogvliegende onbemande motorzweefvliegtuig PEGASUS combineert de voordelen van satellieten en vliegtuigen, zonder de meeste van hun nadelen. Ondanks dat de resolutie maar net voldoende is en de instrumenten extreem licht en klein dienen te zijn, is het voor inspectie van waterkeringen, zowel dagelijks, maandelijks als bij calamiteiten een zeer veelbelovend platform, mede door de gerichtheid op de eindgebruiker en de praktische realisatie.
54. De inzetbaarheid van de verschillende platforms is gecorreleerd met het tijdsaspect van het type inspectie.

6.2.7 Remotesensingtechnieken voor inspectie waterkeringen

55. Gezien de zeer hoge kwaliteit, en bij de moderne digitale luchtcamera's ook de korte productiecycclus, zijn luchtfoto's voor vele processen binnen het waterkeringbeheer zeer waardevol.
56. Voor luchtfoto's die daadwerkelijk voor inspectie gebruikt moeten worden, is een hoge resolutie en een hoge actualiteit noodzakelijk en dat maakt ze kostbaar omdat ze dan waarschijnlijk speciaal voor de inspectie moeten worden ingevlogen.
57. Ondanks de soms beperkte resolutie, zijn landsdekkende luchtfoto's die vanaf de plank gekocht kunnen worden zeer aantrekkelijk.
58. Luchtfoto's winnen het op verschillende punten vooralsnog makkelijk van hogeresolutiesatellietbeelden.
59. Fotogrammetrie is voor wat betreft remotesensingtechnieken altijd nog de meest nauwkeurige wijze van karteren, zeker voor harde topografie. Als bijproduct heeft het, in tegenstelling tot laseraltimetrie, kwalitatief en geometrisch zeer goede lucht- of orthofoto's.
60. Het nut van hogeresolutiesatellietbeelden voor inspectie van waterkeringen is beperkt. Het is moeilijk het gewenste product van het gewenste gebied op het gewenste tijdstip te verkrijgen, voor inspectie is de resolutie te laag en de kosten zijn hoog. Luchtfoto's zijn te verkiezen, zeker als volstaan kan worden met foto's van de plank van de leverancier.
61. Het nabij-infrarood kan, indien met hoge resolutie opgenomen, informatie geven over de toestand van de grasmat en andere vegetatie die van belang is voor de sterkte van de bekleding. Nu bij de moderne digitale luchtcamera's ook het nabij-infrarood wordt opgenomen, nemen de mogelijkheden de vegetatiekwaliteit te inspecteren toe.
62. Thermisch infrarood zou zich in principe moeten lenen voor vocht- en kweldetectie, maar de spaarzame ervaringen wijzen op een aantal beperkende thermische voorwaarden die het gebruik voor kweldetectie beperken. Een definitievere uitspraak is gewenst.
63. Laseraltimetrie heeft een hoge vlucht genomen. Niettemin wordt nog zeker niet de volledige potentie voor waterkeringbeheer benut. Met name de mogelijkheden tot een werkelijk vlakdekkende analyse en bepaling van zettingen, hoogteverschillen en zettingsverschillen worden nog onvoldoende benut.
64. Met moderne laserscanners die per puls meerdere reflecties vastleggen kan vegetatie mogelijk beter worden geclassificeerd, ook om veranderingen daarin te detecteren die duiden op een faalmechanisme.

65. De bepaling van hoogteverschillen of zettingen profiteert van laseraltimetrische data, maar de precisie dient daarvoor zeer hoog te zijn en met name de systematische fout in ligging is daarvoor nog een beperking.
66. Of de precisiebeperkingen nu worden opgeheven of niet, nauwkeurige hoogteverschilmetingen kunnen een belangrijke bron van informatie zijn, zowel over vormveranderingen in de kering als bij wijze van verklikker over de ondergrond.
67. SAR-beelden zijn voor waterkeringbeheer niet erg nuttig, zelfs niet hun polarimetrische mogelijkheden en hun mogelijkheid door bewolking heen te kijken.
68. Radarinterferometrie met langcoherente verstrooiers (PS-INSAR) is een zeer krachtige techniek voor deformatiesignalering, ondanks de zeer beperkte hoeveelheid punten die op onder meer grasdijken wordt gevonden. Deze techniek kan helpen te inspecteren waar dat nodig is; de kracht is dat tevoren niet bekend hoeft te zijn waar dit is.
69. Een substantieel aantal faalmechanismen is gerelateerd aan geometrische basiselementen en juist deze zijn met fotogrammetrie en laseraltimetrie zeer goed in kaart te brengen. Daarbij kan de potentie van deze technieken nog verder worden benut dan nu in praktijk reeds gebeurt, leidend tot betere informatie over deze faalmechanismen.
70. Verschillende technieken worden weliswaar met succes toegepast, maar worden nog niet in hun volle potentie ontplooid.

6.3 Aanbevelingen

1. Het verdient aanbeveling te voorzien in een gezamenlijk kennisinstituut op het gebied van *remote sensing* voor waterkeringbeheer, dat kan voorzien in de kennis die operationele waterkeringbeheerders zelf niet in huis hebben, dat de spankracht heeft om innovaties te helpen ontwikkelen en beproeven en de kloof tussen vraag en aanbod van remotesensingtechnieken voor waterkeringbeheer kan helpen dichten.
2. Initiatieven als IJkdijk en DigiDijk, waarbij de overheid innovatieve initiatieven voor waterkeringbeheer stimuleert, zijn onmisbaar om de kloof tussen ontwikkeling en operationele inzet te helpen dichten en dienen te worden gestimuleerd.
3. Het verdient aanbeveling bij de ontwikkeling van een toetsmethodiek als de vijfjaarlijkse toetsing rekening te houden met het stochastische karakter van modelleren, meten en toetsen. Daarnaast verdient het aanbeveling de methodiek minder op representatieve profielen en meer op vlakdekkende informatie af te stemmen, daar deze in steeds hogere dichtheden voorhanden is.
4. Bij de ontwikkeling van in het algemeen kostbare remotesensingdiensten voor waterkeringbeheer is het aan te bevelen samen te werken, indien mogelijk op nationaal niveau. Het betreft zowel waterkeringbeheerders als ontwikkelaars en dienstverleners. Als het gaat om aardobservatiesatellieten, dient deze samenwerking zelfs internationaal te zijn.
5. Vanwege de lage kosten, lage milieu- en geluidsbelasting en flexibele inzetbaarheid verdient het aanbeveling de inzet van motorzweefvliegtuigen bij inspectie van waterkeringen nader te onderzoeken.
6. Vanwege de mogelijkheid zeer flexibel, lokaal en snel beschikbaar te zijn, verdient het aanbeveling de inzet van laagvliegende onbemande luchtvaartuigen bij met name

- calamiteiten en zeer plaatselijke inspectie (onder meer van kunstwerken) nader te onderzoeken.
7. Het Vlaamse langdurig hoogvliegende onbemande motorzweefvliegtuig PEGASUS biedt voor vele typen inspecties een dermate veelbelovend platform, dat de Nederlandse overheid wordt aanbevolen intensief met VITO samen te werken bij de ontwikkeling, zeker ook gezien de voortgang en inspanningen door VITO en de daadwerkelijke gerichtheid op het bedienen van de eindgebruiker.
 8. Gezien de zeer hoge kwaliteit verdient het aanbeveling binnen het waterkeringbeheer een bredere toepassing van luchtfoto's te zoeken, zeker bij de moderne digitale luchtcamera's.
 9. Gezien de zeer grote nauwkeurigheid van het resulterende hoogtemodel en de productie van orthofoto's van zeer hoge kwaliteit, verdient het aanbeveling het gebruik van fotogrammetrie nader te onderzoeken, met name ten opzichte van laseraltimetrie.
 10. Het verdient aanbeveling waarnemingen met laseraltimetrie en luchtfotografie frequenter te doen dan eens per vijf jaar, omdat dit een grote meerwaarde vertegenwoordigd voor met name periodieke inspectie en bepaling van zettingen. Doordat het karakter daarmee meer regulier wordt, zullen de aanvankelijk hogere kosten dalen.
 11. Het verdient aanbeveling het gebruik van het nabij-infrarood voor de beoordeling van bekleiding in de vorm van vegetatie nader te onderzoeken, zeker nu de moderne digitale luchtcamera's ook het nabij-infrarood opnemen. Daarnaast zou moeten worden onderzocht of kwelplekken via kleurvariaties in de teensloot of via een veranderde vegetatie detecteerbaar zijn.
 12. Een nadere studie kan uitwijzen of moderne laserscanners, die per puls meerdere reflecties vastleggen, vegetatie beter kunnen classificeren en welke informatie dat over faalmechanisme kan opleveren.
 13. Het verdient aanbeveling de inzet van laseraltimetrie en radarinterferometrie voor de bepaling van hoogteverschillen of zettingen te bestuderen, zowel omdat deze een belangrijke bron van informatie over de stabiliteit van de kering zijn, als omdat ze als verklikker van de toestand van de ondergrond kunnen fungeren.
 14. Nader onderzoek naar de toepassingsmogelijkheden van radarinterferometrie binnen inspectie is gewenst. Daarbij is de beperking van het aantal gevonden punten op onder meer grasdijken een punt van aandacht.
 15. Het ontwikkelen van 'opgevouwen' hoekreflectoren die bij dijkversterkingsprojecten en anderszins in waterkeringen of kunstwerken kunnen worden aangebracht, dient nader te worden onderzocht.
 16. De potentie van PS-InsAR kan alleen ten volle worden benut als dit potentiële monitoringsinstrument wordt voorzien van een ononderbroken stroom aan data. De overheid dient deze potentie te bevestigen door zijn verantwoording te nemen voor een structurele opbouw van dit data-archief, zowel voor C-band-data als voor Terrasar-X. De beelden worden daardoor bovendien betaalbaarder.
 17. De geotechnische basiselementen laten zich moeilijk waarnemen. Minder bekende technieken als thermisch infrarood, passieve microgolfradiometrie, radioactiviteitsmetingen en geleidbaarheidsmetingen bezitten hiervoor waarschijnlijk enige potentie. Juist omdat deze basiselementen zo moeilijk zijn waar te nemen,

verdient het aanbeveling de geschiktheid van genoemde technieken nader te onderzoeken.

18. Het verdient aanbeveling te onderzoeken of moderne methoden van mutatie-detectie waterkeringinspectie kunnen vereenvoudigen.
19. Verschillende technieken worden weliswaar met succes toegepast, maar worden nog niet in hun volle potentie ontplooid. Deze ontplooiing dient gestimuleerd te worden.

Referenties

In deze bijlage worden de referenties opgesomd die gebruikt zijn bij het schrijven van dit rapport of die kunnen dienen ter nadere informatie. De eventueel niet tot de algemeen toegankelijke literatuur behorende referenties kunnen via de auteur van dit rapport worden verkregen.

- [1] *Actieplan Ruimtevaart*, Ministeries van Economische Zaken, Verkeer en Waterstaat en Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen, november 2004
- [2] M. Akkermans en L. Amoureux, *DTM-ontwerp met FLI-MAP 400. Eindrapport pilotproject Rijksweg 2*, Rijkswaterstaat AGI, april 2007
- [3] E. Attema, G. Levrini en M. Davidson, *Sentinel-1 ESA's new European radar observatory*, in: *The future of remote sensing*, Antwerpen 17–18 oktober 2006, ESA, oktober 2006
- [4] S. van Baars, *Causes and failure mechanisms of historical dyke failures in the Netherlands*, ongepubliceerd, maart 2007
- [5] S.W. Bakkenist, J.H. Hoogland en P.J.L. Blommaart, *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Onderzoek naar de verbetering van visuele inspectie en de toepasbaarheid van technieken in aanvulling daarop*, Rijkswaterstaat DWW, juli 2004
- [6] S.W. Bakkenist et al., *Operationeel gebruik van aardobservatie in waterbeheer. Uitwerking business case 'waterbeheer' bij het actieplan ruimtevaart*, Geomatica Businesspark, juli 2005
- [7] W.G.M. Bastiaanse, E.J.M. Noordman en G. Hiemstra, *Remote sensing ondersteund waterbeheer. Toepassingsmogelijkheden van vlakdekkende verdampingsinformatie*, STOWA, oktober 2003
- [8] P. van den Berg, P.J.L. Blommaart, J.J. Flikweert et al., *De veiligheid van de primaire waterkeringen in Nederland. Voorschrift Toetsen op Veiligheid voor de tweede toetsronde 2001–2006 (VTV)*, Rijkswaterstaat DWW, januari 2004
- [9] A.E. Bollweg, R. Brügelmann, H. van Dijk en E.M.J. Vaessen, *Laseraltimetriedata met hoge punt dichtheid voor rivierbeheer. Een pilot in opdracht van Directie Oost-Nederland*, Rijkswaterstaat AGI, februari 2004
- [10] P. van den Brand et al., *Partner in innovatie: Innovatietestcentrum Rijkswaterstaat*, Rijkswaterstaat Innovatie Test Centrum, augustus 2007
- [11] P.W. Bresters en D. Jansen, *Hoge resolutie satellietbeelden. Wat kunnen ze betekenen voor V&W?*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, december 2001
- [12] R. Brügelmann, *Statusrapport digitale inwinning t.b.v. het product GIV B&O HWS*, Rijkswaterstaat AGI, december 2004
- [13] J. Caldwell, *Merging technologies. LiDAR complements multispectral imagery*, in: *Earth Imaging Journal*, januari 2005

- [14] B. Delauré en T. Van Achteren, *Pegasus payload: MEDUSA*, in: The future of remote sensing, Antwerpen 17–18 oktober 2006, VITO, oktober 2006
- [15] DelFly, <http://www.delfly.nl/>, TU Delft, oktober 2007
- [16] F. Dentz, L. van Halderen, B. Possel, S. Samiei Esfahany, C. Slobbe en T. Wortel, *POSEIDON: on the potential of satellite radar interferometry for monitoring dikes of the Netherlands*, TU Delft, november 2006
- [17] F. De Wispelaere, *Mercator 1: the first Pegasus technology demonstrator for remote sensing applications*, in: The future of remote sensing, Antwerpen 17–18 oktober 2006, Verhaert Space, oktober 2006
- [18] W. Epema, *Advies aan RWS voor innovatie dijkinspecties*, Rijkswaterstaat Water Innovatiebron (WINN), augustus 2005
- [19] *ESA ASAR product handbook*, ESA, december 2002
- [20] R.I. Ghauharali, *Innovaties in archeologisch onderzoek. Hoe moderne technieken oude bodemschatten opsporen en het toekomstige gezicht van Nederland bepalen*, in: GIN-symposium 2006, VB Ecoflight, december 2006
- [21] *GMES from concept to reality*, Europese Commissie, november 2005
- [22] B. Gorte en N. Pfeiffer, *Height texture of low vegetation in airborne laser scanner data and its potential for DTM correction*, TU Delft, in opdracht van Rijkswaterstaat AGI, januari 2005
- [23] Chr. Grimm en J. Kremer (IGI, Kreuztal), *DigiCAM and LiteMapper. Versatile Tools for Industrial Projects*, in: Photogrammetrische Woche 2005, Universität Stuttgart, april 2005
- [24] J.S. Groot, D. van Halsema en R.A. van Maarseveen, *Dike deformation measurement. Report on project phase 2*, TNO Physics and Electronics Laboratory, september 2002
- [25] *The Group on Earth Observations* (overzichtsbrochure), Group on Earth Observations, oktober 2004
- [26] *Global Earth Observation System of Systems GEOSS. 10-year implementation plan reference document*, Group on Earth Observations, februari 2005
- [27] R. Haarbrink, *Helikopter UAV voor DTB updates* (innovatieve voorstellen in de Geo-ICT), Miramap, in opdracht van Rijkswaterstaat AGI, februari 2007
- [28] D. van Halsema, *Mini-SAR*, TNO Defensie en Veiligheid, april 2005
- [29] Hansje Brinker i.o., TU Delft, *Haalbaarheid systematische monitoring waterkeringen met satelliet radar technologie (SBIR-regeling)*, Rijkswaterstaat WaterINNovatiebron (WINN), april 2007
- [30] *Hansje Brinker Facts: monitoring waterkeringen vanuit de ruimte?*, Hansje Brinker, augustus 2007
- [31] R.F. Hanssen, *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*, Kluwer Academic Publishers, mei 2001
- [32] H. van Hemert et al., *Inspectietechnieken voor droge veenkaden*, STOWA, december 2004
- [33] *IKONOS Imagery Products Guide*, GeoEye, januari 2006

- [34] R. de Lange en R. Brügelmann, *Laser versus radar. Een vergelijking tussen laseraltimetrie en radar-interferometrie voor het inwinnen van digitale hoogtemodellen*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, september 2001
- [35] F. Leberl en M. Gruber (Vexcel Imaging GmbH), *Ultracam-D: understanding some noteworthy capabilities*, in: Photogrammetrische Woche 2005, Universität Stuttgart, april 2005
- [36] F. Leberl, *Frame camera (UCD) versus 'Push-brooming'*, Vexcel Imaging GmbH, december 2005
- [37] *Leidraad toetsen op veiligheid regionale waterkeringen, Katern boezemkaden* (groene versie), 2006
- [38] N. Lewyckyj, *Pegasus: applications and business plan*, in: The future of remote sensing, Antwerpen 17–18 oktober 2006, VITO, oktober 2006
- [39] H. Limburg en M. Goossens, *Airborne gammaspectrometers product information*, Medusa explorations, augustus 2007
- [40] Miramap, *Haalbaarheid "Rapid Airborne Multi-Sensor Inspection of Levees" (RAMSIL) (SBIR-regeling)*, Rijkswaterstaat WaterINNOvatiebron (WINN), april 2007
- [41] B. Molenkamp, M. de Gruijter en F.J.J. Thijs, *Projectplan inspectieplan waterkeringen*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW/Waternet, juni 2007
- [42] G.M. Moser, F.J.J. Thijs en W.S. Zomer, *Onderzoek verbetering inspectie waterkeringen. Stroomlijning van inrichting en uitvoering van inspecties*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, oktober 2005
- [43] G.M. Moser en W.S. Zomer, *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, juli 2006
- [44] H. Noorbergen, Th. Claassen, J. Schouwenaars, K. van Raamsdonk, P. Spierenburg en R. Verhage, *Remote sensing in het waterbeheer*, STOWA, april 2002
- [45] H. Oosterwijk, A. Baak, R.C. van Oort en D. Willems, *Productcatalogus basisinformatie Rijkswateren*, Rijkswaterstaat RIKZ, april 2006
- [46] Rijkswaterstaat, *Productspecificatie DTB Droog*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, maart 2000
- [47] J.R. Roberti, *Meten met MEDUSA. Een leidraad voor gebruik bij Rijkswaterstaat*, Rijkswaterstaat RIKZ, september 2001
- [48] K. Roebert, *Project 'De digitale dijk' van Waternet*, in: Geo-Info 2006-4, april 2006
- [49] *Statusrapportage ruimtevaart 2005* (Tweede-Kamerstuk), Ministeries van Economische Zaken, Verkeer en Waterstaat en Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen, juni 2006
- [50] L.M.Th. Swart, *Projectplan Verkenning toepassing remotesensingtechnieken voor inspectie waterkeringen*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, maart 2007
- [51] L.M.Th. Swart, *Verslag workshop 'Toepassing remote sensing voor inspecties' op de Kennisdag inspectie waterkeringen, 9 maart 2007 in het Spant te Bussum*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, maart 2007

- [52] L.M.Th. Swart en W.S. Zomer, *Informatiebehoefteinventarisatie waterkeringbeheer/dijkdeformatie*, Rijkswaterstaat Meetkundige Dienst, januari 2003
- [53] L.M.Th. Swart, S.J. Flos en W.S. Zomer, *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer. Ontwikkelingen, gewenste specificaties, procesbeschrijving en evaluatie AHN-2-proef*, STOWA, december 2007
- [54] L.M.Th. Swart, C.F. de Valk en A.J.E. Smith, *Land/water detection with polarimetric SAR*, Rijkswaterstaat AGI, september 2006
- [55] L.M.Th. Swart, *Spectral filtering and oversampling for radar interferometry*, TU Delft, november 2000
- [56] H.A. Schelfhout, *Ontwikkeling gids inspectie waterkeringen. Grip Op Kwaliteit visuele inspectie*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, maart 2007
- [57] R. Takken, *Landsdekkend 10 centimeter bestand. Luchtfoto-producent als 'Luchtfoto-Warehouse'*, in: GIS Magazine, juli 2007
- [58] TAW, *Technisch rapport steenzettingen, deel achtergronden*, december 2003
- [59] F.J.J. Thijs et al., *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen*, STOWA/Rijkswaterstaat DWW, maart 2007
- [60] T. Van Achteren, B. Delauré en J. Everaerts, *Instrument design for the Pegasus HALE UAV payload*, in: The future of remote sensing, Antwerpen 17–18 oktober 2006, VITO, oktober 2006
- [61] R. van der Velden, *Onderzoek en advies t.b.v. innovatie in de geografische vastlegging van waterkeringen. Eindrapport fase 1*, AeroVision in opdracht van Dienst Waterbeheer en Riolerings (Waternet), juli 2005
- [62] M. Weber, *TerraSAR-X & TanDEM-X. Data & product services*, in: The future of remote sensing, Antwerpen 17–18 oktober 2006, Infoterra, oktober 2006
- [63] WINN, *Bedrijven ontwikkelen nieuwe methoden voor dijkinspecties (SBIR-regeling)*. Persbericht, Rijkswaterstaat WaterINNOvatiebron (WINN), april 2007
- [64] IJkdijk, *Wat is IJkdijk?*, www.ijkdijk.nl, februari 2007
- [65] G.B.M. Brand, M.J.E. Crombaghs, S.J. Oude Elberink, R. Brügelmann en E.J. de Min, *Precisiebeschrijving AHN 2002*, Rijkswaterstaat AGI, juli 2003

A Casus: criteria voor laseraltimetrie volgens de inspectiedeelprocessen

A.1 Inleiding

In deze bijlage wordt het concept om het inspectieproces op te delen in de vier deelprocessen waarnemen, diagnosticeren, prognosticeren en operationaliseren in praktijk getoetst door de remotesensingtechniek waarmee waterkeringbeheerders de meeste ervaring hebben als casus te gebruiken: *laseraltimetrie*. Daarbij wordt de tabelstructuur van de uitwerking van de inspectiedeelprocessen gebruikt zoals beschreven in § 4.4. De teksten in de eerste drie kolommen zijn overgenomen uit *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59]. Daaraan zijn in de vierde kolom op basis van de ervaringen met laseraltimetrie criteria toegevoegd, refererend aan de ‘checklist voorwaarden’ in de derde kolom.

De conclusies die uit deze casus kunnen worden getrokken, worden toegelicht in § 4.5. Het gaat daarbij niet alleen om de invulling en vertaling van de voorwaarden naar het geval laseraltimetrie (§ 4.5.3 voor waarnemen tot en met § 4.5.6 voor operationaliseren en § 4.5.7 voor wat betreft de generieke voorwaarden), maar ook om de vraag in hoeverre de methodiek die in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* vooral voor visuele inspecties ontwikkeld is, tevens bruikbaar is voor een waarnemingstechniek als laseraltimetrie (§ 4.5.2).

Omdat voor de prognostiek in § 4.5.5 en operationalisatie in § 4.5.6 geen specifieke aspecten met betrekking tot laseraltimetrie zijn onderscheiden en evenmin voor de generieke voorwaarden in § 4.5.7, worden de dienovereenkomstige tabellen uit *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* hier niet opgenomen en ingevuld.

A.2 Waarnemen

In deze paragraaf worden aan de tabel, die in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] is ontwikkeld voor het inspectiedeelproces waarnemen, in de vierde kolom criteria toegevoegd op basis van de ervaringen met laseraltimetrie, refererend aan de ‘checklist voorwaarden’ in de derde kolom. De tabel en de conclusies worden toegelicht in § 4.5.3.

| Proces-stap | Beschrijving | Checklist voorwaarden | Casus laseraltimetrie |
|-------------|--|--|--|
| Invoer | Inspectieplanning uit het inspectieplan. | Aanwezigheid vastgesteld inspectieplan | Inzet van laseraltimetrie dient in het inspectieplan te worden opgenomen, inclusief het op te nemen areaal en de daartoe benodigde middelen. |
| | | | Alle potentiële gebruikers en belanghebbenden binnen de organisatie zijn vóór aanbesteding betrokken bij het bepalen |

| | | | |
|-----------|---|--|--|
| | | | van beoogde toepassingen en op basis daarvan bepalen van de specificaties. |
| Bewerking | <p>Conform de actieplanning uit het inspectieplan zichtbare aspecten van de waterkering objectief en concreet waarnemen, aspectgegevens verzamelen en vastleggen.</p> <p>Daarnaast is er bij de waarneming oog voor bijzondere details die mogelijk relevant kunnen zijn voor de status van de waterkering. Het waarnemen, verzamelen en het vastleggen van de aspectgegevens verloopt zoveel mogelijk volgens een vast stramien (alle aspecten worden afgevinkt). Vooraf is helder aangegeven wat tot normale en afwijkende situaties kan worden gerekend.</p> | Vastgestelde werkwijze voor het waarnemen. | <p>Het waarnemen geschiedt in dit geval via een inkoopproces, dat moet worden vastgesteld met</p> <ul style="list-style-type: none"> • vastgestelde specificaties (zie volgende onderdeel); • standaardbestek; • standaard gunningscriteria; • vastgestelde aanbestedingsprocedure; • vastgestelde controleprocedure: wat en hoe controleert de aannemer en hoe rapporteert hij dit; welke controle voert de opdrachtgever uit. <p>Daarnaast zijn er vele eisen die niet over de waarnemingen zelf gaan, maar over de omstandigheden en overige randvoorwaarden:</p> <ul style="list-style-type: none"> • minimale vlieghoogte; • verantwoordelijkheid regelen ontheffingen luchtverkeersleiding; • onder welke omstandigheden mag de aannemer waarnemen; • wijze van kwaliteitscontrole bij de aannemer en wijze van rapporten daarover; • overleg tijdens voorbereiding van de vlucht; • vastgestelde momenten en omvang van deelliveringen; • rapportage over het productieproces na de vlucht; • leveren van metadata; • acceptatiecriteria opdrachtgever; • uitgewerkte boeteclausules; • regeling juridisch eigendom van de data of licenties. |
| | | Beschrijving van te verkrijgen waarnemingen. | <p>Uitputtende specificatie van de laserdata:</p> <ul style="list-style-type: none"> • type product: ongefilterd laserpuntenbestand, op maaiveld gefilterd puntenbestand, ongefilterd bestand geïnterpoleerd naar raster, gefilterd rasterbestand, dichtgeïnterpoleerd maaiveldbestand, bijproducten als nadirfoto's, orthofotomozaïek, videobeelden, kartering, ...; • rastergrootte; • wijze van interpolatie; • punt dichtheid: gemiddeld, minimaal, ...; • hoogteprecisie per lasermeetpunt; • hoogteprecisie per rastercel: toevallige of relatieve fout, systematische fout; • planimetrische precisie: toevallige of |

| | | | |
|-------------|---|--|--|
| | | | <p>relatieve fout, systematische fout;</p> <ul style="list-style-type: none"> • pixelgrootte orthofotomozaïek; • radiometrische en kleureisen aan orthofotomozaïek; • minimale strookbreedte; • dataformaten van de verschillende producten; • datadrager; • opnametijdstip: bladloos, laag gras, laag water, ... |
| | | Eenduidige, gestructureerde en geautomatiseerde procedure van vastleggen en opslaan. | Laserdata is al kwantitatief en hierboven voldoende gespecificeerd. Van belang is op welke server de data wordt geplaatst en hoe deze ontsloten wordt. |
| | | Schadecatalogus. | Niet van toepassing. |
| Uitvoer | Informatie over de feitelijke (onderhouds- en beheer) toestand (afwijkingen en normaal) van de waterkering is gestructureerd en uniform vastgelegd in een informatiesysteem en voor zover relevant (= structureel/langdurig afwijkende situatie) opgenomen in het beheerregister. | Vastgelegde waarneming uitgewerkt. | Niet van toepassing. |
| | | Vastgestelde verwerkingsprocedure. | Laserdata kan fungeren als basis voor het vullen van de legger. Uit de laserdata kunnen profielen gegenereerd worden die worden opgenomen in het beheerregister. |
| | | Vastgestelde overdrachtsprocedure voor data. | Niet van toepassing. |
| | | Vastgestelde procedure voor opvolging. | Niet van toepassing. |
| Voorwaarden | Het uitvoerende personeel is goed opgeleid (kennis van waterbouw, waterkeringen en faalmechanismen), heeft kennis van het gebied en de ondergrond, ze beschikt over alle (hulp)middelen om tot een objectieve waarneming en vastlegging te komen en ze heeft kennis van het vervolg van haar taken. Ervaringen worden uitgewisseld en vastgelegd (betreft zowel inhoud als proces). Er is bekendheid met de mogelijkheden om externe specialisten in te zetten. Er is ruimte om twijfel en/of opmerkingen vast te | Opleiding personeel is minimaal MBO-civiele techniek, aangevuld met een specifieke opleiding voor inspecties en faalmechanismen waterkeringen. | De opleidingseisen hiernaast zijn specifiek gericht op inspecteurs. Voor laserdata kunnen de volgende eisen worden gesteld: <ul style="list-style-type: none"> • kennis van faalmechanismen van waterkeringen en met name de relatie met het profiel ervan; • kennis van de inwintechiek (eventueel extern); • kennis van eisen aan aanbestedings- en gunningsprocedure; • kennis van automatisering (GIS en CAD) voor de bewerking en beschikbaarstelling van de data aan de organisatie. |
| | | Personeel beschikt over voldoende hulpmiddelen voor het doen van een waarneming en het vastleggen ervan. | Dit betreft met name automatiseringsapparatuur en programmatuur: <ul style="list-style-type: none"> • schijfruimte; • netwerkcapaciteit; • rekencapaciteit individuele werkstations, afgestemd op wat de gebruiker met de data doet; |

| | | | |
|--|---------|--|---|
| | leggen. | | <ul style="list-style-type: none"> • toegankelijkheid gedifferentieerd en geregeld voor de gehele organisatie; • toegangsrechten gedifferentieerd en geregeld voor de gehele organisatie; • beheer data, programmatuur en overige automatiseringsmiddelen goed geregeld; • aggregatieniveau gedifferentieerd voor de verschillende typen en niveaus gebruikers; • consistentie database als meer mensen eraan werken of wijzigingen mogen aanbrengen; • geschikte en geactualiseerde programmatuur voor verwerking en raadpleging; • geschikt en geactualiseerd gereedschap voor specifieke bewerkingen als bijvoorbeeld het extraheren van profielen en het vergelijken daarvan met het leggerprofiel; • dataformaat afgestemd op te gebruiken programmatuur; <p>Het personeel moeten ook voldoende middelen ter beschikking staan om de controle goed te kunnen uitvoeren, zowel op de data zelf als met betrekking tot terrestrische metingen.</p> |
| | | Personeel is op de hoogte van de stappen in het inspectieproces door opleiding, informatiebijeenkomsten of agendering in regulier overleg. | |
| | | Ervaringen worden frequent en gestructureerd uitgewisseld. | |
| | | Er is bekendheid met de mogelijkheden om externe specialisten in te zetten. | <p>Externe specialisten zijn bijna onontbeerlijk vanwege hun kennis van</p> <ul style="list-style-type: none"> • de inwintechniek én de toepassingen; • de (soms Europese) aanbestedingsprocedure en de gunning; • de procedures ter controle van het geleverde product. |
| | | Ruimte voor opmerkingen/twijfel. | |

A.3 Diagnosticeren

In deze paragraaf worden aan de tabel, die in *Procesbeschrijvingen inspecties waterkeringen* [59] is ontwikkeld voor het inspectiedeelproces diagnosticeren, in de vierde kolom criteria toegevoegd op basis van de ervaringen met laseraltimetrie, refererend aan de 'checklist voorwaarden' in de derde kolom. De tabel en de conclusies worden toegelicht in § 4.5.4.

| Proces-stap | Beschrijving | Checklist voorwaarden | Casus laseraltimetrie |
|-------------|---|---|---|
| Invoer | Informatie over de feitelijke beheer- en onderhoudstoestand (afwijkingen en normaal) van de waterkering wordt gestructureerd aangeleverd en is afkomstig uit een daartoe geëigend informatiesysteem. | Gestructureerde aanlevering van gegevens. | Laserdata zijn in de vorige stap 'waarnemen' al goed gespecificeerd waargenomen en vervolgens gestandaardiseerd en consistent opgeslagen en toegankelijk. Niet alleen laserdata wordt gebruikt bij het diagnosticeren. |
| | | Basisgegevens als legger en beheerregister zijn actueel, bevatten historische gegevens (onderhoud, inspecties en meldingen) en zijn toegankelijk. | Uitvoering van de toetsing vindt vooral plaats door vergelijking van profielen. Profielen moeten beschikbaar zijn: <ul style="list-style-type: none"> • in digitaal formaat dat vergelijking met laseraltimetriedata mogelijk maakt (vaak CAD versus GIS); • op representatieve locaties qua vorm, bekleding of opbouw. Voor een (vanwege de hoge eisen nog weinig voorkomende) <i>vlakdekkende</i> vergelijking van de hoogte moet geschikte en toegankelijke historische data aanwezig zijn. Laserhoogtedata en eventueel afgeleide producten als reflectie-intensiteitsbeelden en karteringen worden ook gebruikt om legger en beheerregister te <i>vullen</i> . |
| | | Basisgegevens over ondergrond en opbouw kering. | Hierin verschilt de casus laseraltimetrie niet van visuele inspectie. Er bestaat een discrepantie tussen de gedetailleerdheid van de kennis over het oppervlak (laseraltimetrie: geometrie) en van de ondergrond en opbouw. |
| Bewerking | Objectief analyseren van de informatie, met als doel een waardeoordeel te krijgen over de toestand van de waterkering. Kwantitatief: De verkregen informatie wordt, eventueel na een bewerkingsslag, vergeleken met vastgestelde technische normen. Deze technische normen zijn een vertaling van de veiligheidseisen en overige | Vastgestelde procedure en methodiek voor bewerking van de waarnemingen naar specifieke informatie. | De verwerking bestaat vaak uit het genereren van profielen uit de gerasterde laserhoogtedata (soms uit de gefilterde laserhoogtepunten). Hiervoor moeten goede programmatuur en instructies aanwezig zijn. De profielen moeten op de juiste locaties gegenereerd worden, in de vorige stap aangeleverd. Het fundament onder de procedure en methodiek om informatie uit laseraltimetriscie data af te leiden is een goed begrip van over welke faalmechanismen laserdata informatie kan geven en hoe deze informatie uit laserdata |

| | | | |
|---------|---|--|---|
| | <p>functionele eisen, potentiële gevolgschade en het onderdeel van de waterkering. Kwalitatief: indien technische normen niet aanwezig zijn, dan zal op basis van expertise een kwalitatief oordeel geveld moeten worden. Als er getwijfeld wordt of er is onzekerheid over de correctheid van de diagnose van de kering, is verdere raadpleging en nader onderzoek verplicht. Een en ander kan leiden tot inzet van speciale technieken waarmee aanvullende informatie over de staat van de waterkering kan worden ingewonnen, waardoor een betrouwbaardere diagnose kan worden gesteld.</p> | | kan worden afgeleid. |
| | | Vastgestelde procedure en methodiek voor het bepalen van de staat van de kering. | <p>Het bepalen van de staat van de kering is feitelijk het kwantitatief of kwalitatief stellen van de diagnose. Voor de vijfjaarlijkse toetsing van de primaire waterkeringen is hiervoor de procedure en methodiek precies voorgeschreven, voor overige keringen is dat niet het geval.</p> <p>Wat betreft hoogte kunnen uit de laserdata profielen over de kruin of op representatieve locaties dwars op de waterkering worden gegenereerd. Men moet zich daarbij de beperkingen van laserdata realiseren. Ook begrip van het stochastisch karakter is verstandig.</p> <p>Bij het gebruik van profielen blijft een deel van de vlakdekkende potentie van laserdata onbenut. De diagnostiek voor vlakdekkende hoogteverschilanalyses staat nog in de kinderschoenen.</p> |
| | | Vastgestelde eenduidige normering/ waardering. | De normering is opgenomen in de vtv. Voor wat betreft overig gebruik van laseraltimetrische data is er geen normering. |
| | | Vastlegging bewerking. | Voor het kunnen doen van uitspraken over de kwaliteit van het resultaat dient de bewerking te worden vastgelegd. |
| | | Er is bekendheid met de mogelijkheden om interne en externe specialisten in te zetten. | <p>Externe specialisten zijn nuttig of onontbeerlijk vanwege</p> <ul style="list-style-type: none"> • het uitvoeren van stabiliteitsberekeningen; • hun kennis van de merites van de inwintechniek; • de voetangels en klemmen bij hoogteverschilanalyses. |
| | | Kennis van de mogelijkheden tot inzet van speciale inspectietechnieken. | Ten opzicht van visuele inspectie, waarop deze procesbeschrijving in eerste instantie gericht is, is laseraltimetrie zo'n techniek. Daarnaast kan voor wat betreft geometrie (deformatie) radarinterferometrie een rol spelen. Voor overige remotesensingtechnieken zie hoofdstuk 5. |
| Uitvoer | <p>Toestand van de waterkering, in vooraf bepaalde classificatie.²¹ Overzicht van uit te voeren klein onderhoud. Resultaten worden vastgelegd in het geschikte informatiesysteem. Algemene terugkoppeling</p> | Vastgestelde classificatie en definitie en procedure van opvolging. | |
| | | Gestructureerde vastlegging in informatiesysteem. | <p>Vastgelegd moeten worden</p> <ul style="list-style-type: none"> • de wijze van bewerking van de data; • de gegenereerde profielen en andere data; |

²¹ Voorbeeld van een dergelijke classificatie is, in toenemende ernst: Monitoren, Verbeteren, Reconstrueren.

| | | | |
|-------------|--|---|---|
| | naar waarnemer. | | <ul style="list-style-type: none"> • de toetsingsuitkomsten volgens de vrv vanwege • kwaliteitscontrole van resultaten en tussenproducten; • prognosticering en operalisatie; • diagnostiek in de toekomst in de vorm van mutatiesignalering en -analyse. |
| Voorwaarden | <p>Personeel beschikt over accurate areaalinformatie (gegevens over gebruik, ondergrond en opbouw van de waterkering), een volledige legger en beheerregister (o.a. overzicht van uitgevoerde en uit te voeren onderhoudsmaatregelen) en heeft goede kennis van de processen die relevant zijn voor de beoordeling van de waterkeringen. Er is bekendheid met de mogelijkheden om externe specialisten in te zetten.</p> | Personeel kan beschikken/beschikt over accurate (volledig, relevant en historisch) areaalinformatie. | |
| | | Idem voor basisgegevens: legger en beheerregister zijn actueel, bevatten historische gegevens en zijn toegankelijk. | |
| | | Personeel beschikt minimaal over een opleiding HBO-Civiele Techniek, aangevuld met specifieke opleiding waterbouw, faalmechanismen en beheer & onderhoud. | <p>Voor diagnostiek op basis van laserdata kunnen de volgende eisen worden gesteld:</p> <ul style="list-style-type: none"> • kennis van faalmechanismen van waterkeringen en met name de relatie met het profiel ervan, zowel qua geometrie als qua opbouw; • kennis van de inwintechniek (eventueel extern) en de wijze waarop uit de data verantwoord informatie kan worden gegenereerd; • kennis van de toetsingsmethodiek en de achtergronden daarvan. |
| | | Ervaringen worden uitgewisseld met andere waterkering-beheerders. | |

B Indicatoren en inspectieparameters

B.1 Beperkte opsomming indicatoren en inspectieparameters en relatie met faalmechanismen

Zoals in § 3.4 werd opgemerkt, is een faalmechanisme op zich geen waarneming. Het mechanisme treedt aan het licht door middel van indicatoren. Het rapport *Inspectie van waterkeringen. Een overzicht van meettechnieken* [43] somt voor verschillende typen waterkeringen de indicatoren op. Ze zijn afkomstig uit het *Plan van aanpak onderzoek verbetering inspectie waterkeringen* [5]. Een andere, nog praktischere vorm van grootheden die kunnen worden waargenomen om informatie over de toestand van een waterkering te krijgen, zijn *inspectieparameters*. Inspectieparameters zijn de aspecten waarnaar een inspecteur bij zijn visuele inspectie kijkt. Het rapport *Informatiebehoefteninventarisatie dijksdeformatie/waterkeringbeheer* [52] heeft deze geïnventariseerd door vraaggesprekken met 18 waterkeringbeheerders en literatuurstudie. Dit rapport is onder meer waardevol omdat de onderscheiden 46 inspectieparameters zoveel mogelijk zijn gekwantificeerd en een oordeel over de prioriteit hebben meekregen aan de hand van de mate van kwantificering en de mate waarin de parameter door de ondervraagden genoemd werd.

In tabel 6 worden de 30 belangrijkste indicatoren en inspectieparameters opgesomd (vooral gebaseerd op het *Overzicht van meettechnieken* [43]) en gerelateerd aan de 13 faalmechanismen. De relatie met de 9 onderscheiden basiselementen oftewel parameters van waterkeringen, zoals bijvoorbeeld hoogte, type bekleding, opbouw en ondergrond, wordt vermeld in tabel 2 in § 3.3. Een opsomming als deze kan bijdragen tot de beoordeling van de geschiktheid van remotesensingtechnieken als aanvullende waarnemingstechniek voor de inspectie van waterkeringen. Voor de volledige opsomming wordt verwezen naar de net genoemde literatuur.

| inspectieparameter of indicator | faalmechanisme |
|---------------------------------|---|
| hoogte van de kruin | overloop overslag zetting/vloeiing |
| profiel, o.a. helling talud | overloop overslag macro-instabiliteit binnentalud macro-instabiliteit buitentalud horizontaal afschuiven zetting/vloeiing |
| verzakking van de kruin | overloop overslag |
| dwarsscheuren in de kruin | overloop overslag |
| langsscheuren in de kruin | macro-instabiliteit binnentalud macro-instabiliteit buitentalud |

| | |
|--|---|
| erosie van binnentalud | overloop overslag |
| scholvorming binnentalud | overloop overslag macro-instabiliteit binnentalud |
| vorming glijcirkel | macro-instabiliteit binnentalud macro-instabiliteit buitentalud micro-instabiliteit |
| vervorming/opbolling bij teen binnentalud | overslag macro-instabiliteit binnentalud horizontaal afschuiven |
| dichtdrukken teensloot binnentalud | horizontaal afschuiven macro-instabiliteit binnentalud macro-instabiliteit buitentalud |
| vervorming beschoeiing | macro-instabiliteit binnentalud horizontaal afschuiven |
| kanteling van de kruin | macro-instabiliteit buitentalud |
| stenen, stukken asfalt of klei op de kruin | erosie bekleding buitentalud |
| gangen en gaten | micro-instabiliteit beschadiging |
| uittreden van water op binnentalud | micro-instabiliteit piping heave |
| verkleuring slootwater | micro-instabiliteit piping heave |
| verandering van vegetatie | micro-instabiliteit piping heave |
| natte plekken bij teen binnentalud of op enige afstand | piping heave |
| drijfzand | zettingsvloeiing piping heave |
| zandheuveltjes met krater | piping heave |
| recente verstoringen in omgeving | horizontaal afschuiven macro-instabiliteit binnentalud macro-instabiliteit buitentalud beschadiging |
| ontbrekende stenen | erosie bekleding buitentalud beschadiging |
| omhoog komen of verzakken van (groepen) stenen | erosie bekleding buitentalud |
| geulen of gaten onder bekleding | erosie bekleding buitentalud |
| scheuren in asfalt of beton | erosie bekleding buitentalud |
| dunne plekken in asfalt, beton of klei | erosie bekleding buitentalud |

| | |
|--------------------------------------|--|
| | erosie bekleding binnentalud |
| stripping van asfalt | erosie bekleding buitentalud |
| openingen bij overgangen bekledingen | erosie bekleding buitentalud |
| gaten in het gras | erosie bekleding binnentalud erosie bekleding buitentalud beschadiging |
| kwaliteit gras | erosie bekleding binnentalud erosie bekleding buitentalud beschadiging |

tabel 6 Inspectieparameters en indicatoren met hun gerelateerde faalmechanismen.

B.2 Kwantificering van enige geometrische indicatoren

Om het aanbod van remotesensingtechnieken werkelijk op de vraag af te stemmen, moeten de indicatoren en inspectieparameters worden gekwantificeerd. Zowel voor de haalbaarheid als uiteindelijk voor het opstellen van een bestek is dat noodzakelijk. In het rapport *Informatiebehoefteninventarisatie dijkdeformatie/waterkeringbeheer* [52] is een deel van de 46 onderscheiden inspectieparameters zo goed mogelijk gekwantificeerd, gebaseerd op de informatie uit de vraaggesprekken met 18 waterkeringbeheerders.

Criteria als de gewenste precisie van hoogtemetingen of de ruimtelijke spreiding kunnen worden afgeleid van faalmechanismen en indicatoren. Lang niet alle van belang zijnde criteria kunnen daaruit worden afgeleid: de inspectieprocessen en de werkprocessen van de waterkeringbeheerder leveren andere criteria, doorgaans de tijdgerelateerde aspecten en voorwaarden voor inpassing in de organisatie. Deze criteria worden behandeld in hoofdstuk 4.

Bij wijze van voorbeeld zijn in tabel 7 de eisen die kunnen worden gesteld aan de eerste drie indicatoren uit tabel 6 gekwantificeerd. Deze indicatoren hoogte, profiel en verzakking zijn van het waarnemingstype *geometrie*, terwijl het waarnemingstype van de overige indicatoren vaak *thematisch* van aard is. De kwantificering is gebaseerd op de veel uitgebreidere specificaties die voor het met laseraltimetrie in te winnen hoogtemodel zijn opgenomen in het rapport *Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer* [53]. Dit is het rapport van een STOWA-werkgroep die zich tot doel heeft gesteld het grootschalig gebruik van laseraltimetrie voor het beheer van waterkeringen te operationaliseren door aanbestedingscriteria en specificaties op te stellen.

| inspectieparameter of indicator | criteria | | |
|---------------------------------|-----------------------|---|--|
| | puntafstand | precisie | frequentie |
| hoogte van de kruin | 50 cm langs kering | $\sigma = 5$ cm $\Delta z \leq 5$ cm $\Delta x, y \leq 25$ cm | vijfjaarlijks; liever frequenter; nieuwe keringen: 3–12 maanden |
| profiel, o.a. helling talud | 20 cm dwars op kering | $\sigma = 5$ cm $\Delta z \leq 5$ cm $\Delta x, y \leq 15$ cm | idem |
| verzakking van de kruin | 10 m langs kering | $\sigma = 5$ cm per 5 jaar $\Delta z \leq 3$ cm | idem |

tabel 7 Kwantificering van de geometrische inspectieparameters of indicatoren, bij wijze van voorbeeld.

ISBN 978-90-79331-02-4



9 789079 331024