

De geodetische lijn

Aan het begin van de achttiende eeuw ontspan zich een belangrijke geodetische discussie tussen de aanhangers van Newton en die van Cassini over de vraag hoe onze Aarde afgeplat is: aan de polen of aan de evenaar.

Door tussenkomst van de Franse academie van wetenschappen kwam aan dit dispuut in 1735 een einde. Er werden nieuwe en meer precieze breedtegraadmetingen uitgevoerd, op twee sterk in geografische breedte verschillende locaties. Dit besliste de strijd uiteindelijk in het voordeel van Newton. Met de acceptatie van zijn theorie begon ook voor de geodesie een nieuw tijdvak van toenemende integratie van geometrie en gravimetrie, van positie en potentiaal, van situatie en hoogte, maar vooral ook van statische en dynamische theorieën. Met name deze geodetische lijn van ontwikkeling zien we vandaag de dag opnieuw in een geweldige stroomversnelling geraken, zowel door de recente theorievorming op het gebied van de geïntegreerde geodesie, als door de omvangrijke mogelijkheden die de nieuwe methode van de satellietenpuntsbepaling in de nabije toekomst zal gaan bieden.

Prof.dr.ir. P. J. G. Teunissen

De auteur is hoogleraar in de Mathematische Geodesie aan de Faculteit der Geodesie van de Technische Universiteit Delft.

De ruimtelijke figuur van de Aarde wordt traditioneel vastgelegd door een voldoende aantal representatieve punten, waarvan de onderlinge ligging door middel van terrestrische hoek- en afstandmetingen in een driedimensionaal stelsel bepaald wordt. De terrestrische puntsbepaling heeft de geodeten echter altijd voor praktische problemen geplaatst. De oorzaken hiervan zijn de vereiste van onderlinge zichtbaarheid en het verschijnsel van refractie. De vereiste van onderlinge zichtbaarheid tussen de punten maakte het voor het overbruggen van grote afstanden noodzakelijk om tussenpunten in te voeren. Overigens paste Snellius dit principe als eerste toe in zijn triangulatieconcept. Maar aangezien de tussenpunten alleen op land te plaatsen zijn, is het met terrestrische methoden bijvoorbeeld nooit gelukt om de continenten met elkaar te verbinden.

Het verschijnsel van refractie is er de oorzaak van, dat de uit terrestrische trigonometrische metingen verkregen hoogtecomponent altijd zwak bepaald is. Dit is dan ook de voornaamste reden waarom het huidige Europese driehoeksnetwerk in essentie nog steeds een tweedimensionaal netwerk is. Een netwerk dus, dat wel de situatie beschrijft, maar niet de hoogte.

Met de komst van de eerste *satellietenpuntsbepalingssystemen* in de jaren zestig werden de tekortkomingen van de terrestrische meetmethoden voor een belangrijk deel ondervangen. De satellieten dienden als hulppunten om intercontinentale afstanden te overbruggen en om daarmee het eerste wereldwijde driedimensionale netwerk te realiseren. De eerste satellietenpuntsbepalingssystemen waren echter niet voldoende mobiel en niet voldoende precies om een rol van betekenis in de dagelijkse praktijk van de landmeetkunde te kunnen spelen.

Het NAVSTAR Global Positioning System - dat naar verwachting in 1993 volledig operationeel zal zijn - kent ge-

noemde nadelen niet. Dit systeem zal dan ook bij uitstek geschikt zijn voor de driedimensionale bepaling van de meetkundige figuur van de Aarde in een wereldwijd referentiestelsel.

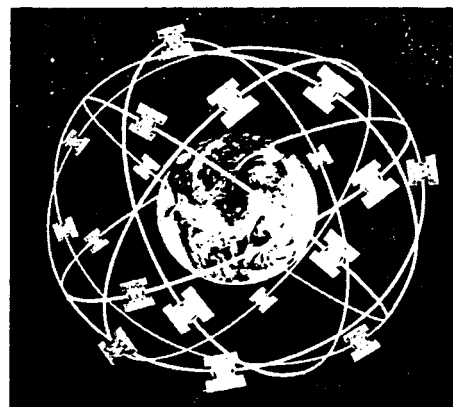
Global Positioning System

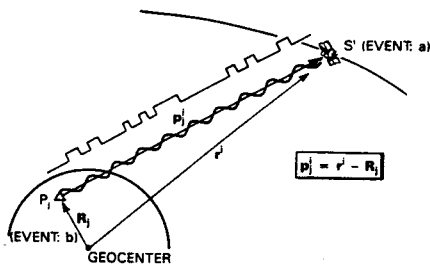
Het Global Positioning System, veelal afgekort tot GPS, zal bestaan uit een bijna perfect symmetrische constellatie van in totaal 24 satellieten. Deze zijn verdeeld over zes baanvlakken en staan op een hoogte van ongeveer 20 000 km. De hoge banen hebben het voordeel dat de satellieten relatief weinig hinder ondervinden van de wrijving van de atmosfeer en van de grilligheden in het aardse zwaartekrachtsveld. De satellietposities zijn hierdoor in de tijd goed te voorspellen, zodat ze voor veel praktische toepassingen als bekend verondersteld mogen worden. De hoge banen zorgen er tevens voor dat de satellieten steeds over een groot oppervlak van de Aarde simultaan zichtbaar zijn. Hierdoor kan de duur van de statische waarnemingssessies drastisch beperkt worden.

De door de GPS-satellieten permanent uitgezonden radiosignalen worden in de puntsbepaling hoofdzakelijk voor het verrichten van twee typen waarnemingen benut, te weten zogenaamde pseudo-afstandmetingen en fase-metingen. De pseudo-afstandmetingen worden voornamelijk voor de dynamische puntsbepaling gebruikt. De veel preciezere fase-metingen daarentegen zijn bijzonder geschikt voor de statische puntsbepaling.

Fasemeting bij GPS bestaat uit het meten van het faseverschil tussen het door de satelliet uitgezonden en het in de ont-

De GPS-constellatie met in totaal 24 satellieten, verdeeld over 6 baanvlakken.





$$\text{PSEUDORANGE}$$

$$|r - R_i| = \rho_i - c [\Delta t(a) - \Delta T_i(b)]$$

$$\text{PHASE}$$

$$\phi_i = P_i [T_i(b) - t(a)] = \frac{F_i}{c} |r - R_i| + P_i [\Delta t(a) - \Delta T_i(b)]$$

Pseudo-afstand- en fasemeting.

vanger gegenereerde signaal. De fasemeting kan, op een aantal onbekende parameters na, als een afstandmeting naar de GPS-satelliet geïnterpreteerd worden.

De onbekende parameters hebben een tweeledige oorzaak. Ten eerste is de klok in de ontvanger niet voldoende te synchroniseren met de klokken in de GPS-satellieten. Ten tweede is er vanwege het meten van fractionele fasen sprake van meerduidigheden. De fractionele fase geeft immers geen uitsluitel over het aantal gehele golflengten dat in de afstand van satelliet naar ontvanger past. Het is alsof men met een meetlat een afstand in millimeter meet zonder het gehele aantal centimeter te kennen.

Het probleem van de meerduidigheden en onbekende kloktermen kan echter opgelost worden door, gedurende een bepaalde periode, een aantal satellieten op verschillende plaatsen simultaan aan te meten.

Deze relatieve puntsbepalingsmethode maakt het mogelijk om zo'n geweldig hoge precisie te bereiken. Het beslissende voordeel van de relatieve aanpak is namelijk dat de invloeden van storingsbronnen, zoals de onzekerheden in de satellietbanen en het effect van de ionosfeer en de troposfeer op het satelliet signaal, over niet al te grote afstanden tussen de ontvangers, voor een belangrijk deel geëlimineerd kunnen worden. Nu al is duidelijk dat in de toekomst met de in ontwikkeling zijnde verwerkingsmodellen en betere baanbepalingsmethoden een relatieve precisie van tegen de 10^{-8} haalbaar moet zijn.

Men moet zich daarbij voorstellen, dat dat zou betekenen dat we met meting naar satellieten die op een hoogte staan

die gelijk is aan de halve omtrek van de Aarde, op een afstand van 1000 km de spreekwoordelijke naald in de hooiberg terug moeten kunnen vinden.

Hoewel het zover nog niet is en op verschillende deelgebieden van GPS nog het nodige onderzoek verricht zal moeten worden, is wel al duidelijk dat we voor het eerst in de geschiedenis van de puntsbepaling gaan beschikken over een systeem, waarmee we met niet al te kostbare ontvangers, met weinig logistiek en een korte meettijd, dag en nacht en onder alle weersomstandigheden, terrestrische punten in positie kunnen bepalen met een relatieve precisie van 10^{-6} of beter. GPS zal dan ook tot geweldig ingrijpende veranderingen leiden op zowel het gebied van de statische puntsbepaling, als ook op het gebied van de dynamische puntsbepaling.

Statische puntsbepaling

De statische puntsbepaling nader beschouwend, kan men zich afvragen wat de consequenties van GPS voor de huidige landmeetkundige praktijk zullen zijn. Het antwoord op deze vraag kan pas goed gegeven worden als men de geodetische gedachtenlijn die het inrichten van landmeetkundig werk kenmerkt, als uitgangspunt neemt.

De drie sleutelbegrippen worden hierbij gevormd door: (1) het werken van het grote naar het kleine, (2) het pseudo kleinste-kwadratisch inpassen van nieuwe metingen en (3) de kwaliteitsbeoordeling op basis van relatieve precisie en relatieve betrouwbaarheid.

Het principe van het werken van het grote naar het kleine komt neer op het volgende. In de vereffening en de berekening van coördinaten wordt een volgorde gekozen, waarbij eerst een relatief wijdmazig puntenveld berekend wordt. Dit puntenveld levert dan als het ware de nieuwe bekende punten op voor verdere verdichting. Aan dit principe liggen hoofdzakelijk twee overwegingen ten grondslag. Ten eerste is er het feit dat interpolatie boven extrapolatie te verkiezen is, ten tweede het feit dat om praktische redenen altijd een voldoende 'levensduur' van de coördinaten van gegeven punten nagestreefd wordt. De consequentie van het ongewijzigd willen laten van de coördinaten van gegeven punten is echter, dat de metingen van iedere verdichtingsstap niet op een strenge kleinste-kwadratenwijze kunnen worden aangesloten. Men wordt dus gedwongen voor een zogenaamde pseudo kleinste-kwadraten aansluiting te kiezen. Hiervan is echter weer het gevolg dat, wil het principe van het werken van het grote naar het kleine werkbaar

blijven, de kwaliteit van de gegeven punten ten minste gelijkwaardig, maar liefst een orde beter moet zijn dan de in te passen nieuwe metingen. Wanneer dit niet het geval zou zijn, dan verkrijgen de nieuw ingepaste metingen immers een precisie en betrouwbaarheid die slechter is dan ze oorspronkelijk hadden.

Bovendien - en dat is praktisch gezien veel moeilijker te verteren - zijn dan de kansen groot dat met de nieuwe verdichtingsmetingen regelmatig tegenspraken ontdekt zullen worden in het als duurzaam beoogde gegeven puntenveld. Bij het beschikbaar komen van preciezere puntsbepalingssystemen kan men dus problemen verwachten bij de aansluiting aan bestaande puntenvelden.

Problemen bij de aansluiting van Transit aan ED50

Een belangrijk voorbeeld hiervan betreft de problemen die men eind jaren zeventig, begin jaren tachtig op de Noordzee ondervonden heeft bij de puntsbepaling met het Transit-Doppler-systeem, de voorganger van GPS. Men was namelijk gedwongen de puntsbepalingsresultaten van de Transit-metingen op zee aan te sluiten aan het toenmalige Europese triangulatiernetwerk ED50. De belangrijkste reden hiervoor was dat dit stelsel de juridische grondslag vormde - en trouwens nog altijd vormt - voor de verdeling van het continentale plat en de verdeling in concessiegrenzen. Tevens dient het als basis voor alle grensoverschrijdende geodetische projecten. De consequentie van het gebruik van het superieure Transit-systeem was nu, dat de inhomogeniteit in het ED50-systeem al snel voelbaar werd. Deze inhomogeniteit werd nog eens versterkt door de gebrekkige onderlinge vastlegging van de Noordzeemringende landen. De breedte van de Noordzee en de afwezigheid van eilanden daarin, hebben namelijk in het verleden het realiseren van een terrestrisch netwerk voor de Noordzee tegengehouden.

De inhomogeniteiten kwamen onder andere tot uiting in de gevonden discontinuïteiten tussen land en zee, de inconsistentie in de puntsbepaling van Noordzee-installaties en het gebrek aan eenduidigheid bij de reconstructie van concessiegrenzen. Deze problemen hadden opgelost kunnen worden, indien men ED50 door het Transit-stelsel had kunnen vervangen. De reeds eerder genoemde juridische grondslag verhinderde dit echter.

Overigens is het interessant op te merken dat de gevonden discontinuïteiten

op de Noordzee, voor een deel gereduceerd en gladgestreken hadden kunnen worden als men in staat geweest was een strenge pseudo kleinste-kwadratenaansluiting uit te voeren. Een dergelijke aansluiting bestaat uit twee stappen. Eén die te maken heeft met de definitie van het coördinatenstelsel en één die te maken heeft met de eigenlijke vereffening. Allereerst zorgt men ervoor dat de Transit-coördinaten, zowel die van de aansluitpunten op land als die van de nieuwe punten op zee, via een kleinste-kwadratdatumtransformatie, naar het ED50-systeem getransformeerd kunnen worden. Dit was ook de gangbare procedure voor de Noordzee.

In de tweede stap echter, behoren de nieuwe Transit-punten op zee, nu beschreven in ED50, nog een tweede correctie te ondergaan en wel een correctie op basis van de aanwezige correlatie met de punten op land. Juist deze tweede stap ontbrak er bij de puntsbepaling op de Noordzee aan. Met een geschikt gekozen vervangingsmatrix voor de Transit-punten, een die in de mathematische geodesie ook gebruikt wordt bij het aansluiten van kringnetten, hadden de gevonden discontinuïteiten echter voor een belangrijk deel gereduceerd kunnen worden. Bovendien biedt de recentelijk ontwikkelde methode voor het schatten van complete kunstmatrices nu ook goede mogelijkheden willekeurige covariantiestructuren te schatten. Dit zou in de toekomst voor de pseudo kleinste-kwadratenaansluiting van GPS-metingen op de Noordzee van belang kunnen zijn.

Nieuwe landelijke coördinatenstelsels

Het voorbeeld van de Noordzee illustreert de problemen die men kan verwachten bij de introductie van precieze puntsbepalingssystemen. In het voorgaande is er al op gewezen dat een deel van de problemen gereduceerd had kunnen worden. Dit neemt echter niet weg dat men bij aansluiting aan een minder precies puntenveld blijft zitten met de bezwaarlijke situatie van het regelmatig vinden van tegenspraken.

De introductie van het precieze GPS-systeem vormt dan ook de aanleiding de realisatie van nieuwe landelijke coördinatenstelsels te overwegen. Het vervangen of hervereffenen van landelijke coördinatenstelsels dient echter met de nodige zorgvuldigheid uitgevoerd te worden. Het oude coördinatenstelsel zal - voor de nodige band met het verleden - altijd voor een bepaalde overgangperiode gehandhaafd moeten blijven. Bovendien zal, daar de introductie

van nieuwe methoden in de praktijk in het begin toch altijd een wat wilde boel is, nog dringender dan voorheen op bewaking van het bestaande coördinatenstelsel toegezien moeten worden. Wel is het natuurlijk zaak nu al voorbereidingen te treffen voor de introductie en realisatie van een nieuw landelijk coördinatenstelsel.

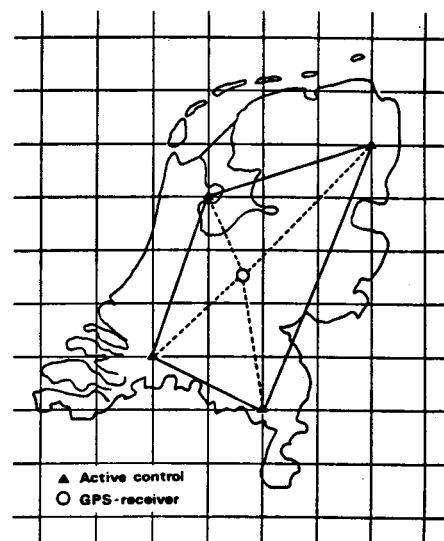
EUREF

In Europa is inmiddels een voorzichtig begin gemaakt met de realisatie van een nieuw driedimensionaal uniform referentiestelsel. Dit stelsel wordt aangeduid met de naam EUREF (European REference Frame). Het bestaat uit een netwerk van 90 punten met onderlinge afstanden tot enkele honderden kilometers en is in mei 1989 gedurende een GPS-campagne van drie weken bepaald. Vier van de EUREF-punten liggen in Nederland. Een deel van de gegevensverwerking en kwaliteitsanalyse van het EUREF-netwerk wordt momenteel door de sectie mathematische geodesie en puntsbepaling van de TU Delft uitgevoerd.

Ook voor Nederland wordt momenteel bij de TU Delft onderzocht op welke wijze een nieuw driedimensionaal Rijksnetwerk gerealiseerd moet worden. Dit gebeurt in samenwerking met de praktijkdiensten, de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster en de Meetkundige Dienst van Rijkswaterstaat. Wil GPS op grote schaal mogelijk worden, dan zal het nieuwe netwerk de gebruiker in staat moeten stellen eenvoudig aansluiting te vinden met bestaande referentiestelsels. Daarom is een band met het huidige RD-net (Rijksdriehoeksnets) nodig en zal dit GPS-netwerk tevens aangesloten moeten kunnen worden aan het definitieve EUREF-netwerk. Voorlopig zal het netwerk bovendien moeten kunnen dienen voor het onderhoud van het huidige RD-puntenveld, dat immers de eerstkomende jaren nog veelvuldig door gebruikers benut zal worden. Daar GPS de mogelijkheid biedt om snel, eenvoudig en precies grote afstanden te overbruggen, zal te zijner tijd met een GPS-netwerk volstaan kunnen worden, dat wijdmaziger is dan het huidige RD-net.

GPS-digitizer

Momenteel wordt tevens onderzocht of in de toekomst met een aantal zogenaamde actieve GPS-grondslagpunten volstaan kan worden. Actieve grondslagpunten zijn punten waarop permanent een geavanceerde GPS-ontvanger opgesteld staat, die continu fasemetin-



GPS-digitizer.

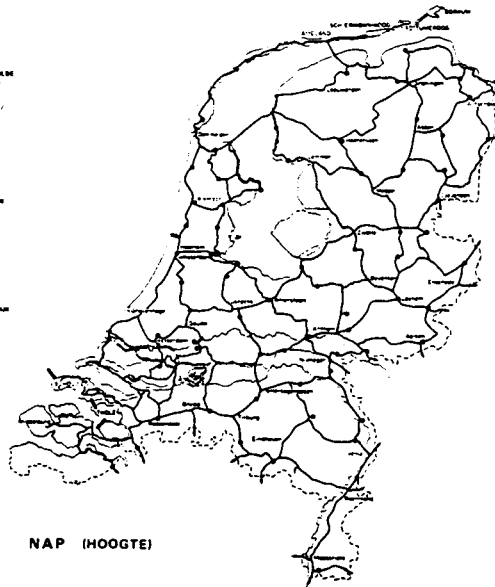
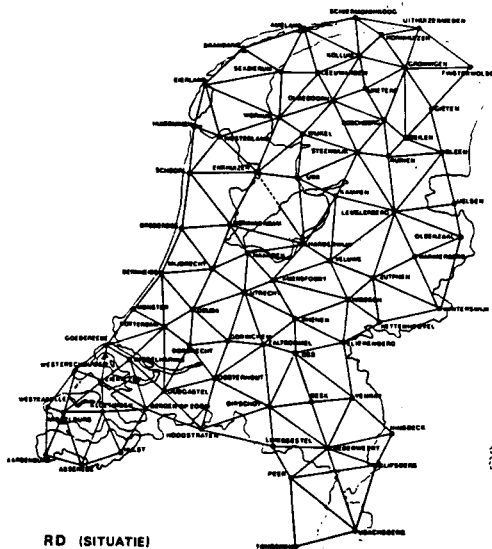
gen naar de overkomende satellieten uitvoert. Door GPS-gebruikers over deze gegevens te laten beschikken, kunnen eenvoudig relatieve posities ten opzichte van de actieve grondslagpunten bepaald worden. In dit scenario zouden de mobiele GPS-ontvangers dan de rol van landelijke 'digitizers' toebedeeld krijgen.

Wellicht klinkt dit wat futuristisch. Het is echter wat de precisie betreft zelfs niet uitgesloten dat met slechts één actief grondslagpunt volstaan kan worden. Toch zullen betrouwbaarheidsoverwegingen het noodzakelijk maken, dat niet één, maar een netwerk van actieve grondslagpunten gerealiseerd wordt. Immers, de gebruikers moet altijd de mogelijkheid van controle op het eigen werk geboden kunnen worden.

Gevolgen van GPS voor hoogtebepaling

In het voorgaande zijn hoofdzakelijk de gevolgen van de introductie van het GPS-systeem voor de bepaling van situatie aan de orde gekomen. GPS is echter een driedimensionaal puntsbepalingssysteem. Het ligt dus voor de hand de derde component, de hoogte, in een integraal 3D-GPS-netwerk te betrekken. Hiermee zouden de huidige 2D- en 1D-netwerken, waarbij situatie en hoogte strikt gescheiden zijn, geïntegreerd kunnen worden.

Op dit punt aangeland, is het goed zich af te vragen wat onder het concept hoogte verstaan wordt. Want 2D plus 1D hoeft beslist nog geen 3D te zijn. Als gesproken wordt over hoogte, dient men goed onderscheid te maken tussen het geometrische en het gravimetrische



Het RD- (links) en het NAP-net.

concept. Het onderscheid is weliswaar voor veel praktische toepassingen subtiel, maar niettemin toch zeer essentieel. De beide hoogteconcepten - het geometrische en het gravimetrische hoogteconcept - onderscheiden zich onder andere in de definitie van hun referentievlakken, ofwel niveauvlakken. Voor het geometrische hoogteconcept is het type niveauvlak niet essentieel. Het zou bijvoorbeeld een plat vlak of een bol kunnen zijn. Vanwege de afgeplatte vorm van de Aarde is het echter gebruikelijk om voor een omwentelingsellipsoïde te kiezen, die in het middelpunt van de Aarde gecentreerd is. Men spreekt dan van ellipsoidische hoogte. Het geometrische hoogteconcept hoort dus bij een zuiver meetkundige beschrijving van de Aarde, zonder dat er enige band bestaat met het aardse zwaartekrachtsveld. GPS kan ons deze hoogte leveren. Het is echter niet de hoogte die door de meeste ééndimensionale netwerken beschreven wordt. Deze netwerken beschrijven namelijk gravimetrische hoogten.

Het geometrische en gravimetrische hoogteconcept

Wat is nu precies het verschil tussen geometrische en gravimetrische hoogten? Dat kan het beste aan de hand van een voorbeeld geïllustreerd worden.

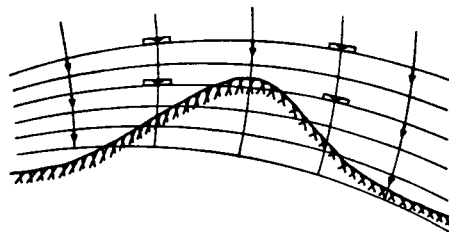
Men stelle zich voor dat men in het mooie Limburgse landschap een wandeling aan het maken is. Met beide ogen ziet men diepte en kan men boven van onder onderscheiden. Kortom, men is in staat om geometrische hoogteverschillen waar te nemen. Veronderstel, dat men vervolgens de ogen sluit en door een gids bij de hand genomen

wordt. Hoogteverschillen ziet man dan niet meer, maar voelen doet men ze wel.

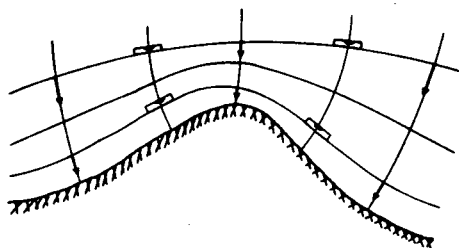
Het beklimmen van een berg kost namelijk energie; hoe hoger de berg, des te meer energie het kost om de top te bereiken. Dit energieverlies is een maat voor het afgelegde gravimetrische hoogteverschil. Het is het gevolg van het feit dat bij beklimming van de berg een weg afgelegd wordt, die niet haaks staat op de lokale zwaartekrachtvectoren.

Ter verduidelijking nog het volgende. Als de massa van de berg zo groot zou zijn dat alle lokale zwaartekrachtvectoren haaks op de bergrand zouden staan, dan vormt de bergrand een vlak van gelijke potentiële energie (equipotentiaalvlak). Ten opzichte van deze niveauvlakken worden gravimetrische hoogten beschreven.

Equipotentiaalvlakken.



TOPOGRAPHY \neq EQUIPOTENTIAL SURFACE



TOPOGRAPHY = EQUIPOTENTIAL SURFACE

In deze situatie zou men, nog altijd met de ogen dicht, het idee krijgen over vlak terrein te wandelen, want ondanks het geometrische hoogteverschil is er dan namelijk geen gravimetrisch hoogteverschil.

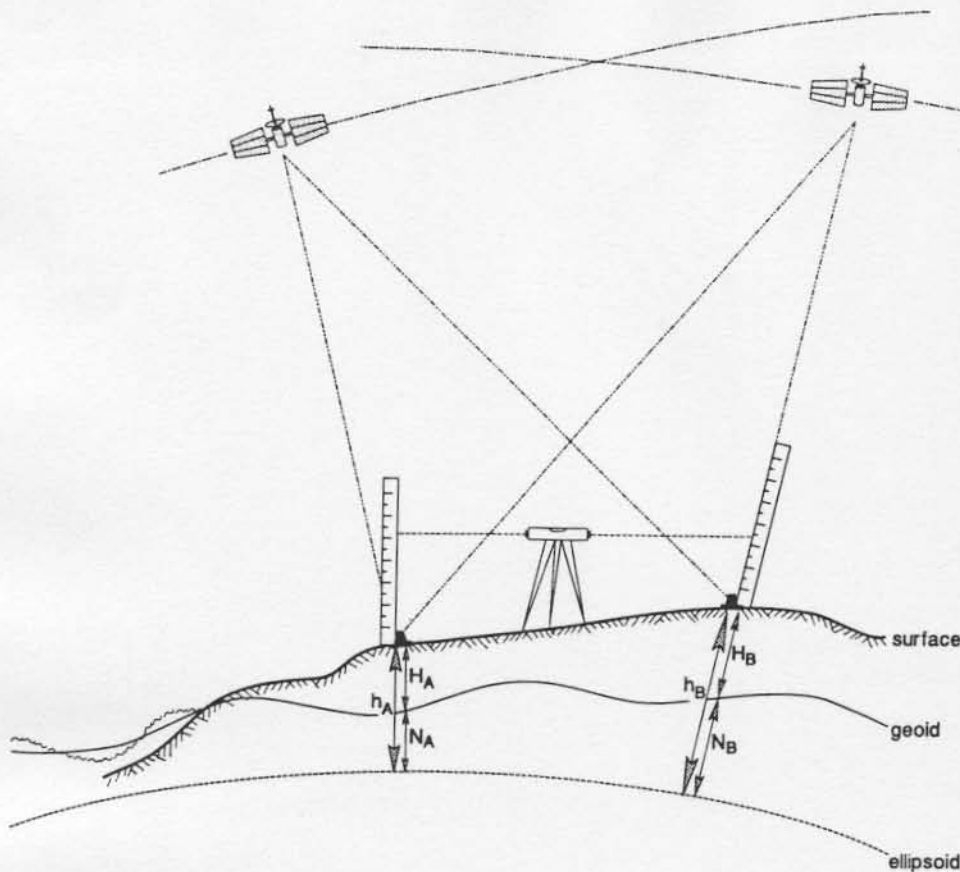
Waarom is het onderscheid tussen beide hoogteconcepten nu zo essentieel? Omdat vrij verplaatsbare massa's altijd posities van minimale potentiële energie innemen. Kennis over gravimetrische hoogten en dus over de toestand van potentiële energie van de topografie is daarom van groot praktisch belang. Men denke bijvoorbeeld maar aan de waterstaatshuishouding. De huidige ééndimensionale netwerken beschrijven nu juist deze toestand van potentiële energie van de topografie. De topografische potentiaalverschillen worden hierbij bepaald uit een combinatie van lokale zwaartekrachtmetingen en een netwerk van waterpasmetingen volgens de regel 'arbeid is kracht maal afgelegde weg'.

Waterpassen met GPS

Welke rol is nu bij de bepaling van deze potentiaalverschillen voor GPS weggelegd? Op het eerste gezicht lijkt deze er niet te zijn. Uitkomst wordt echter geboden als men gaat denken aan de integratie van geometrische en gravimetrische concepten. De bekende oppervlakte-integraal van Stokes biedt daartoe interessante mogelijkheden. Deze integraal legt namelijk een functioneel verband tussen enerzijds de geometrie van het aardoppervlak en anderzijds de gravimetrische grootheden hierop, te weten potentiaal en zwaartekracht. Met dit functioneel verband moet het dus in principe mogelijk zijn om topografische potentiaalverschillen te bepalen uit een integratie van GPS- en zwaartekrachtmetingen. Hoewel nog verschillende theoretische problemen te overwinnen zijn, in het bijzonder waar het gaat om kwaliteitsbeheersing, hebben eerste onderzoeken van deze integratiemethode toch al zeer bemoedigende resultaten opgeleverd. Het is dan ook niet uitgesloten dat de geschetste integratiemethode de kostbare en tijdvergende lagere orde waterpassen voor een belangrijk deel zou kunnen gaan vervangen. 'Waterpassen met GPS' lijkt dus voor een aantal toepassingen in de toekomst tot de mogelijkheden te gaan behoren.

Integratie

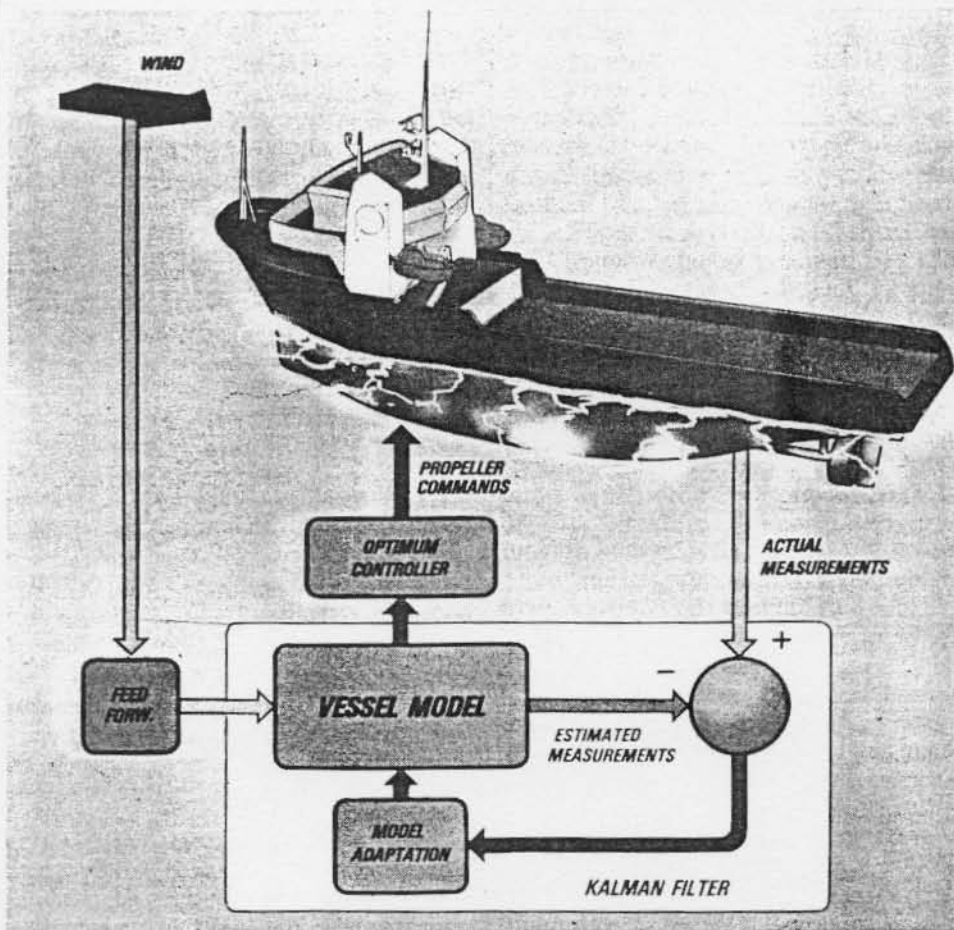
Het zojuist geschetste integratieconcept van GPS- en zwaartekrachtmetingen is een goed voorbeeld van een praktische toepassing van de integratiemethoden



Hoogtemeting met GPS.

die de laatste jaren in de geodesie in ontwikkeling zijn. Het betekenisvolle van deze theoretische ontwikkeling is dat het op termijn de mogelijkheid biedt te komen tot een consistent raamwerk ten behoeve van de gezamenlijke bepaling van positie en potentiaal. Zo maakt integratie het in beginsel mogelijk om gravimetrische hypothesen streng te toetsen. Het zou dan bijvoorbeeld uitsluitel kunnen geven over de tot nu toe onverklaarde discrepanties tussen de met oceanografische en geodetische methoden bepaalde equipotentiaalvlakken. Bovendien is het van groot belang voor de wereldwijde separatie van zeespiegelrijzing en verticale korstbewegingen. Het interessante van de integratie van geometrische- en gravimetrische functionalen is ook, dat men geconfronteerd wordt met sterk uiteenlopende, maar elkaar aanvullende, functiemodellen. Voor de netwerken zijn deze bijvoorbeeld discreet van aard, gebaseerd op meerpuntsfunctionalen en overtalig. Voor de potentiaalbepaling zijn deze daarentegen continu van aard, gebaseerd op enkelpuntsfunctionalen en vanwege de eindige waarnemingsgreep ondertalig. Bovendien houdt het principe van het werken van het grote naar het kleine voor de gravimetrie in dat de ruimtemethoden dienen te worden aangesloten op de terrestrische methoden,

Positionering op zee.



terwijl dit voor de geometrie, zoals in het voorgaande aangetoond is, nu juist andersom geldt. Het zijn onder andere deze eigenschappen van de functionalen die de ontwikkeling van nieuwe verwerkingsmethoden ten behoeve van integratie noodzakelijk maken.

Door het consequent trekken van de parallel met de traditionele vereffenings- en toetsingstheorie is de laatste jaren op dit gebied al een aantal belangrijke resultaten geboekt. Te noemen zijn de gevonden oplossing voor het overbepaalde geodetische randwaardeprobleem, de hybride-normmethode voor de integratie van discrete en gediscrèteerde functionalen, en ten slotte de spectrale beschrijving van continue netwerken. Niettemin zullen nog verschillende vragen beantwoord moeten worden, voordat met recht gesproken kan worden over een consistent raamwerk van integratiemethoden voor geometrische en gravimetrische concepten; een raamwerk waarbinnen dan de afzonderlijke verwerkingsmethoden automatisch hun plaats zullen vinden.

Dynamische puntsbepaling

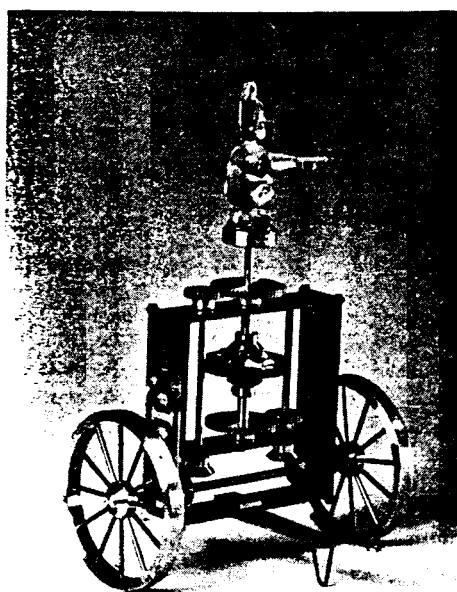
Tot nu toe is een aantal nieuwe ontwikkelingen aan de orde gekomen op het gebied van de statische puntsbepaling en op het gebied van de integratie van

geometrische en gravimetriscie concepten. De ontwikkelingen in de satellietenpuntsbepaling en de theorievorming op het gebied van de geïntegreerde geodesie hebben echter ook belangrijke consequenties voor de dynamische puntsbepaling.

Tot voor kort lag het werkteerrein van de goede die betrokken was bij de dynamische puntsbepaling, voornamelijk op zee. Zijn werkzaamheden werden daarbij uitgevoerd ten behoeve van de hydrografie, de offshore-exploratie en meer in het algemeen het zee-onderzoek. Het betreft hier toepassingen die nauwkeurige en voortdurend beschikbare puntsbepaling vereisen, zoals de positiebepaling van vaartuigen voor opname- en kaarteringsdoeleinden, het dynamisch positioneren van platformen en schepen, en de positie- en netwerkbe-paling van schip en streamer voor drie-dimensionale seismische surveys.

Omdat het conceptueel gezien een kleine stap is van de dynamische puntsbepaling naar de algemene navigatie, is het opmerkelijk dat de algemene navigatie in de geodesie altijd een wat aparte rol gespeeld heeft. Hiervoor zijn drie redenen te geven. Allereerst stelde de navigatie in vergelijking met de traditionele puntsbepaling over het algemeen geen hoge precisie-eisen. Ten tweede was er altijd sprake van een geometrisch eenvoudige en vaak niet eens overtallige enkelpuntsbepaling. En op de derde plaats werden er in de algemene navigatie puntsbepalingssystemen toegepast, die vaak te specifiek waren om voor de geodeet gemeengoed te worden.

Chinese strijdswagen met differentiële odometer.



De laatste jaren ziet men echter dat de in de algemene navigatie toegepaste methoden en technieken een steeds duidelijker verwantschap gaan vertonen met die van de traditionele puntsbepaling. Enerzijds komt dit natuurlijk door de ontwikkeling van het GPS-systeem. Anderzijds, komt ook in de navigatie de nadruk steeds meer te liggen op het ontwerpen van verwerkingsmethoden voor de koppeling van verschillende sensoren tot één geïntegreerd navigatiesysteem.

Deze ontwikkeling is mogelijk geworden door de rijping van digitale technieken en microprocessoren, waardoor een verschuiving van hardware naar software ontstaan is.

Integratie van navigatiesensoren heeft het grote voordeel dat het een strenge verwerking van de afzonderlijke gegevensstromen mogelijk maakt. Zó kunnen de elkaar aanvullende en controlerende eigenschappen van de sensoren optimaal benut worden.

Voertuignavigatie

Dit kan geïllustreerd worden aan de hand van een eenvoudig voorbeeld uit de voertuignavigatie.

De eenvoudigste manier om een gegist bestek voor een landvoertuig te maken is het voertuig uit te rusten met sensoren die continu het aantal omwentelingen van de niet-aangedreven wielen meten. Uit middeling hiervan voor linker en rechter wiel volgt dan de afgelegde weg, terwijl het verschil in omwentelingen de doorlopen richtingsverandering van het voertuig bepaalt.

Dit principe van de differentiële odometer is al ruwweg 2000 jaar oud en is veelvuldig toegepast. De Chinezen gebruikten het al op hun strijdagens vóór de uitvinding van het magnetisch kompas. De wagens werden uitgerust met een wijzende figuur die op basis van dit principe, onafhankelijk van de gevolgde weg, continu de richting naar het vertrekpunt aangaf.

Een meer eigentijds voorbeeld van de toepassing van de differentiële odometer is te vinden in de ruimtevaart. Het tijdens de Apollo-missies gebruikte maanwagentje was er namelijk eveneens mee uitgerust. Zo kon de radiale afstand tot de maanlander bijgehouden worden, opdat de bemanning zich niet te ver van de maanlander zou begeven; dit in verband met hun zuurstofvoorraad.

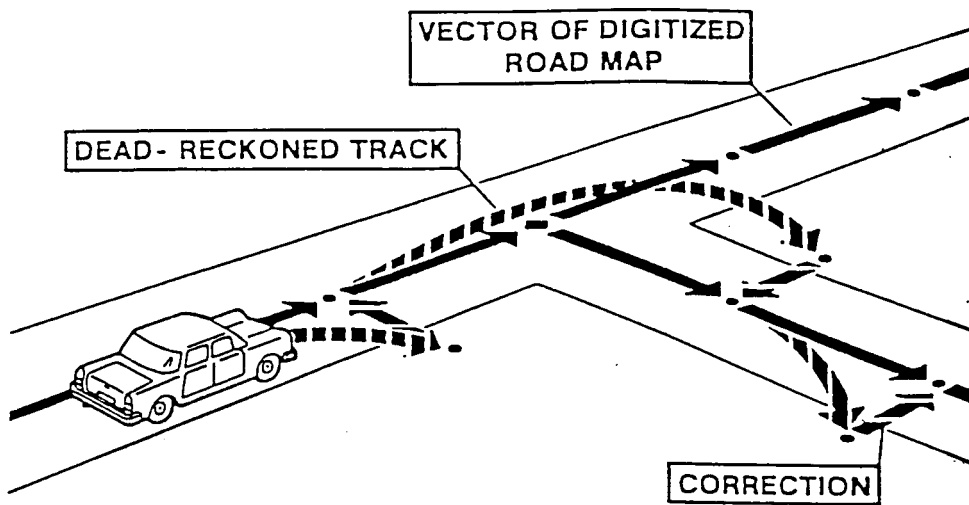
Differentiële odometers leggen alleen richtingsveranderingen vast en geven dus geen informatie ten aanzien van het azimut. Men kan dan ook pas spreken van een land-navigatiesysteem, wanneer de differentiële odometer gecombineerd wordt met een gyrokompas of

een magnetisch kompas. Voor de richtingsveranderingen geeft dit voor het eerst overtalligheid en dus de mogelijkheid om controles en kansmodeladaptatie uit te voeren. Op basis van een real-time kansmodelschatting kan dan de relatieve weging van beide sensoren continu in de vereffening aangepast worden. Een belangrijk deel van de veelal laagfrequente modelfouten van de differentiële odometer en de overwegend hoogfrequente modelfouten van het kompas kan zo geëlimineerd worden. Niettemin zal, volkomen analoog aan het precisiegedrag van een open landmeetkundige veelhoek, de uit het gegist bestek bepaalde voertuigpositie een steeds toenemende kans op miswijzingen vertonen. Additionele positie-informatie is daarom nodig om het navigatiesysteem op geregelde tijdstippen te kunnen 'up-daten'. Men kan dit vergelijken met het aansluiten van een open veelhoek aan een stel in coördinaten gegeven punten.

Een methode van 'up-daten', die momenteel door verschillende ontwikkelaars van autonavigatiesystemen onderzocht en toegepast wordt, is gebaseerd op het gebruik van een digitale kaart die in een compact disc opgeslagen wordt. Deze methode van 'up-dating' gaat volgens de drie stappen van detectie, identificatie en adaptatie.

Allereerst, detecteert het verwerkingsalgoritme op basis van het gegist bestek, welke aaneengesloten segmenten op de digitale kaart gevolgd kunnen zijn. Dit levert een verzameling van alternatieve hypothesen op in de vorm van mogelijke trajecten. Vervolgens wordt hieruit de meest waarschijnlijke hypothese geïdentificeerd. En, zodra een van te voren gekozen waarschijnlijkheidsdrempel overschreden wordt, wordt ten slotte besloten het gegist bestek te 'up-daten'. Het oude functie- en kansmodel wordt dan automatisch aan de nieuw ontstane situatie aangepast, waarmee de kans op miswijzingen overeenkomstig wordt gereduceerd. De digitale kaart fungeert dus als het ware als een hoger orde netwerk voor de pseudo kleinste-kwadraaten aansluiting, van de uit het gegist bestek bepaalde veelhoekposities.

Dit voorbeeld van geïntegreerde verwerking heeft weliswaar betrekking op de voertuignavigatie, maar zowel voor de zee- als de luchtnavigatie zijn vergelijkbare voorbeelden te geven. Evenals in de dynamische puntsbepaling wordt hierbij gebruik gemaakt van systemen zoals GPS en Loran-C, en zelfgevoelige traagheidsystemen bestaande uit versnellingsmeters en gyroscopen.



Routecorrectie op basis van een digitale kaart.

Gezien de hier geïllustreerde ontwikkelingen kan verwacht worden dat de geodeet in de toekomst, naast de dynamische puntsbepaling, steeds meer betrokken zal raken bij het ontwerpen van geïntegreerde verwerkingssystemen voor de algemene land-, zee- en luchtnavigatie. Niettemin vereisen de geschetste ontwikkelingen op een aantal punten bijstelling en uitbreiding van de in de mathematische geodesie traditionele methoden van dynamische gegevensverwerking en kwaliteitsbeheersing. Dit geldt zowel voor de vereffening, voor de toetsing, als voor de verkenning. Bovendien vereisen de veelal snel veranderende meetomstandigheden dat bijzondere aandacht geschonken wordt aan de inschakeling van het model.

Uitbreiding van de bestaande theorie

Om een indruk te geven van de benodigde bijstelling en uitbreiding, volgt hier een aantal voorbeelden op het gebied van respectievelijk de vereffening, de toetsing en de verkenning. De standaard recursieve methoden voor de real-time vereffening van dynamische systemen volstaan, wanneer er vanuit gegaan mag worden dat de ingeschakelde functie- en kansmodellen voldoende bekend zijn. Dit is echter voor sommige dynamische toepassingen niet meer het geval. Vooral het ingeschakelde kansmodel van bijvoorbeeld traagheidsystemen mag slechts gedeeltelijk bekend verondersteld worden. Door integratie met GPS wordt dynamische kalibratie van het kansmodel van traagheidsystemen echter mogelijk. Maar dit betekent wel dat er methoden ontwikkeld dienen te worden, die recursieve vereffening en recursieve kansmodel-schatting simultaan mogelijk maken.

Ten aanzien van de toetsing kan gesteld worden dat de recentelijk ontwikkelde methode voor de recursieve detectie, identificatie en adaptatie van modelfouten, goede perspectieven biedt voor de real-time kwaliteitsbewaking van dynamische systemen. Dit geldt bijvoorbeeld voor de zogenaamde cycle-slip-detectie bij de integratie van GPS en traagheidsnavigatie. Er zal echter nog onderzocht moeten worden hoe de methode geïntegreerd kan worden met kansmodel-schattingmethoden. Bovendien moet onderzocht worden in hoeverre de methode te gebruiken is bij die toepassingen in het verkeer, waar de radionavigatiesystemen hinder ondervinden van propagatieverstoringen. Afscherming en reflecties van signalen in een stedelijke omgeving zorgen er namelijk voor dat de GPS-ontvanger geregeld het signaal verliest of op het indirecte signaal inspeelt. Door nu GPS onderdeel uit te laten maken van een geïntegreerd systeem, kan het detectie-, identificatie- en adaptatie-algoritme in principe zorg dragen voor het onderdrukken van de reflecties en het overbruggen van perioden van signaalafscherming. De implementatie van het algoritme vereist echter het ontwerpen van speciale signaal-processoren voor GPS-ontvangers. Dit onderzoek maakt deel uit van het project 'geïntegreerde navigatiesystemen ten behoeve van verkeer en vervoer', een samenwerkingsproject tussen de sectie mathematische geodesie en puntsbepaling en de vakgroep telecommunicatie en verkeersbegeleidingssystemen aan de TU Delft. Naast de real-time toetsing op modelfouten zal ook de verkenning steeds vaker real-time uitgevoerd dienen te worden. Immers, het is bijvoorbeeld in de civiele luchtvaart - uit veiligheidsoverwegingen - van belang om op ieder wille-

keurig moment te weten wat de kans is op het vinden van modelfouten in het navigatiesysteem. Dit maakt dan ook het ontwerpen van snelle recursieve algoritmen ter beoordeling van de inwendige- en uitwendige betrouwbaarheid noodzakelijk. Hierbij is het overigens interessant op te merken, dat op grond van met name betrouwbaarheidsoverwegingen momenteel door verschillende instituten onderzoek verricht wordt naar de bijdrage die een zogenaamd 'Wide Area Differential GPS Network' van permanent opgestelde GPS-ontvangers hierbij kan bieden.

De slotsom is dus, dat zowel voor de statische als voor de dynamische puntsbepaling het toekomstbeeld bepaald lijkt te gaan worden door het concept van de 'GPS-digitizer'.

Conclusie

Aan de hand van een aantal concrete voorbeelden is in het voorgaande in het kort een overzicht gegeven van de huidige ontwikkelingen in de mathematische geodesie en puntsbepaling. Daaruit is een aantal conclusies te trekken.

- Het zeer precieze GPS-systeem zal tot ingrijpende veranderingen leiden op het gebied van de geodetische puntsbepaling. Nu al worden resultaten behaald welke ten minste gelijkwaardig zijn aan die van de gebruikelijke netwerken; netwerken die tot stand gekomen zijn uit tijdrovende verkenningen en metingen. Bovendien zal door GPS de scheiding tussen situatie en hoogte komen te vervallen en wordt de realisatie van een nationaal wijdmazig driedimensionaal referentiestelsel mogelijk.

- De huidige ontwikkelingen in de dynamische puntsbepaling en navigatie worden beheerst door de inschakeling van GPS en de integratie ervan met aanvullende sensoren. Hierdoor vertonen de in de algemene navigatie toegepaste methoden en technieken een steeds duidelijker verwantschap met die van de puntsbepaling. Dit rechtvaardigt dan ook de verwachting dat de geodeet in de toekomst steeds meer betrokken zal kunnen raken bij het ontwerpen van geïntegreerde verwerkingssystemen voor de algemene navigatie.

- Als gevolg van instrumentele ontwikkelingen en nieuwe theoretische inzichten behoeft de destijds in de mathematische geodesie gekozen uitgangssituatie op een aantal punten bijstelling en uitbreiding. Dit betreft onder andere de inschakeling van het kansmodel, de dynamische toetsmethodieken en de voor de nieuwe puntsbepalingssystemen te volgen opzet van metingen en optimalisering hiervan naar precisie en betrouwbaarheid.