

De geodetische lijn *)

door prof. dr. ir. P. J. G. Teunissen, hoogleraar mathematische geodesie en puntsbepaling aan de Faculteit der Geodesie van de Technische Universiteit Delft.

SUMMARY

The geodetic line

On occasion of his maiden lecture accepting the post as professor in Mathematical Geodesy and Point determination at the Delft University of Technology the author reviews the development of geodetic science since the introduction of Newton's gravity theory, covering the integration of geometry and gravimetrics, location and potentials, planimetry and elevation and static and dynamic theories. Finally the consequences of these developments in adjustment, testing and planning of ground control networks are discussed.



Inleiding

„In 1699, 13 jaar nadat Newton zijn befaamde *Gravitatie Wet* publiceerde in zijn *'Principia'*, vertrekt een jongeman met de naam Lemuel voor een zeereis naar de Grote Oceaan. Na een aanvankelijk voorspoedige reis komt zijn schip *'De Antilope'* op ongeveer 30 graden zuiderbreedte in geweldig noodweer terecht. De aanhoudende storm doet het schip uiteindelijk te pletter slaan tegen de rotsen. Lemuel spoelt als enige opvarende laveloos, maar levend, aan op een klein eiland ten noordwesten van het Anthony van Diemensland, het huidige Tasmanië. Lemuel wordt direct door de eilandbewoners gevangen genomen, maar weet toch na verloop van tijd hun vertrouwen te winnen. Zozeer zelfs, dat hij van de binnen- en buitenlandse moeilijkheden van het kleine rijk op de hoogte wordt gebracht. Het geval wil namelijk, dat de eilandbewoners al geruime tijd een gewelddadige en verbitterde strijd voeren met de bewoners van een naburig eiland en wel over de serieuze kwestie hoe men de eieren stuk dient te maken; aan de stompe of aan de spitse punt”.

Met deze woorden leidde Jonathan Swift zijn beroemde en controversiële boek „Gullivers Travels” in. In dit in 1726 gepubliceerde boek neemt hij stelling tegen de toenmalige Britse samenleving. Hij drijft daarbij op onderhoudende, maar tevens onbarmhartige wijze de spot met

de kerk, de overheid, maar vooral ook met de wetenschappers.

Ik ben zo vrij geweest in het geschil tussen de Lilliputters en de Blefusciënen de analogie te zien met een in die tijd zeer belangrijk geodetisch dispuut. Een dispuut tussen de aanhangers van Newton en die van Cassini over de vraag hoe onze aarde is afgeplat; aan de polen of aan de evenaar (fig. 1).

Door tussenkomst van de Franse academie van wetenschappen kwam er in 1735 een einde aan dit dispuut. Er werden nieuwe en preciezere breedtegrademetingen uitgevoerd, op twee sterk in geografische breedte verschillende locaties. Dit besliste de strijd uiteindelijk, zoals u weet, in het voordeel van Newton.

Met de acceptatie van Newtons theorie begint ook voor de geodesie een nieuw tijdvak. Een tijdvak van toenemende integratie van geometrie en gravimetrie, van positie en potentiaal, van situatie en hoogte, maar vooral ook van statische en dynamische theorieën. Welnu, het is deze geodetische lijn van ontwikkeling, die we vandaag de dag opnieuw in een geweldige stroomversnelling zien geraken. Enerzijds komt dit door de recente theorievorming op het gebied van de geïntegreerde geodesie. Anderzijds komt dit door de zeer omvangrijke mogelijkheden, die de nieuwe methode van de satellietenpuntsbepaling in de nabije toekomst zal gaan bieden.

In het navolgende zal ik trachten deze ontwikkelingen in de mathematische geodesie en puntsbepaling te schetsen. Ik zal hierbij beginnen met de satellietenpuntsbepaling.

Satellietenpuntsbepaling

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 wordt bepaald.

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 tussenpunten in te voeren. Overigens was het Snellius, die dit principe als eerste toepaste in zijn triangulatieconcept. Aangezien de tussenpunten alleen op land zijn te plaatsen, is het met terrestrische methoden bijvoorbeeld nooit gelukt de continenten met elkaar te verbinden.

Het verschijnsel van refractie zorgt ervoor, dat de uit

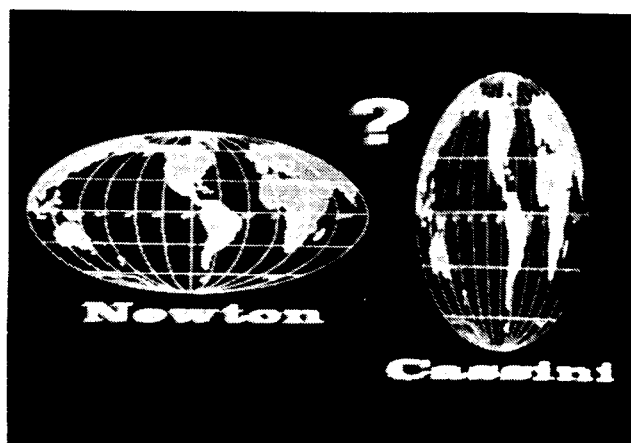


Fig. 1. Newton of Cassini?

*) Bewerking van de inaugurele rede van prof. dr. ir. P. J. G. Teunissen.

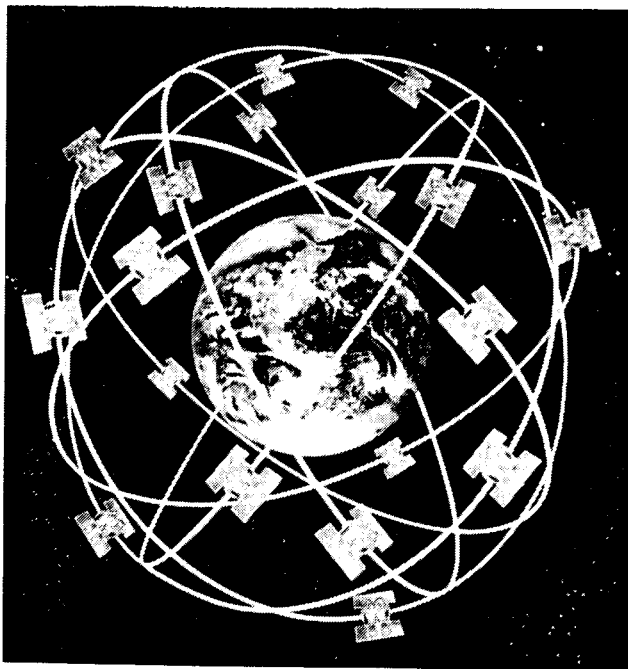


Fig. 2. GPS-constellatie.

terrestrische trigonometrische metingen verkregen hoog-tecomponent 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 '60 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 te kunnen spelen in de dagelijkse praktijk van de landmeetkunde.

Welnu, het NAVSTAR Global Positioning System, dat naar verwachting in 1993 volledig operationeel zal zijn, kent de genoemde 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 (GPS)

Het Global Positioning System, wat veelal wordt afgekort tot GPS, zal bestaan uit een bijna perfect symmetrische constellatie van in totaal 24 satellieten (fig. 2). 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 mogen worden verondersteld. 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 waarnemingsessies drastisch worden beperkt.

De door de GPS-satellieten permanent uitgezonden

radiosignalen worden in de puntsbepaling hoofdzakelijk aangewend voor het verrichten van twee typen waarnemingen. Dit zijn de zogenaamde pseudo-afstandmetingen en de fasemetingen (fig. 3). De pseudo-afstandmetingen worden voornamelijk gebruikt voor de dynamische puntsbepaling. De veel preciezere fasemetingen daarentegen zijn bijzonder geschikt voor de statische puntsbepaling.

Fasemeting bij GPS bestaat uit het meten van het faseverschil tussen het door de satelliet uitgezonden signaal en het in de ontvanger gegenereerde signaal. De fasemeting kan, op een aantal onbekende parameters na, als een afstandmeting naar de GPS-satelliet worden geïnterpreteerd.

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 uitsluitsel over het aantal gehele golflengten dat in de afstand van satelliet naar ontvanger past.

Het is alsof u een afstand meet met een meetlat in millimeters, zonder het gehele aantal centimeters te kennen. Het probleem van de meerduidigheden en onbekende kloktermen kan echter worden opgelost door, gedurende een bepaalde periode, een aantal satellieten op verschillende plaatsen simultaan aan te meten.

Deze relatieve puntsbepalingmethode maakt het mogelijk 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 ionosfeer en troposfeer op het satelliet signaal, over niet al te grote afstanden tussen de ontvangers, voor een belangrijk deel kunnen worden geëlimineerd. Nu al is duidelijk, dat in de toekomst met de in ontwikkeling zijnde verwerkingsmodellen en betere baanbepalingmethoden een relatieve precisie van tegen de 10^{-8} haalbaar moet zijn. Dat zou betekenen dat we met meting naar satellieten die op een hoogte staan gelijk aan de halve omtrek van de aarde, op een afstand van 1000 km, de spreekwoordelijke naald in de hooiberg moeten kunnen terugvinden.

Hoewel het zover nog niet is en op verschillende deel-

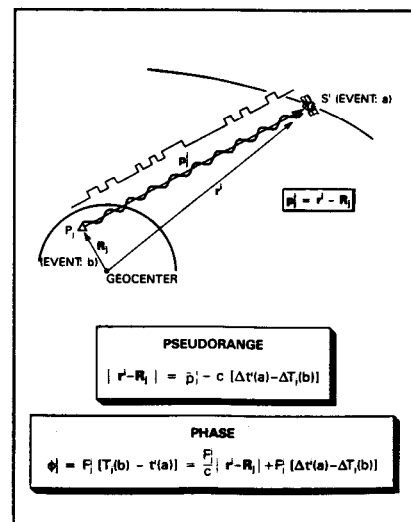


Fig. 3. Pseudo afstand- en fasemeting.

gebieden van GPS nog het nodige onderzoek zal moeten worden verricht, 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 op het gebied van de dynamische puntsbepaling.

Statische puntsbepaling

Laten we nu eerst de statische puntsbepaling beschouwen en ons afvragen wat de consequenties van GPS zullen zijn voor de huidige landmeetkundige praktijk. Het antwoord op deze vraag kan pas goed worden gegeven, als we de geodetische gedachtenlijn die het inrichten van landmeetkundig werk kenmerkt, als uitgangspunt nemen. De drie sleutelbegrippen worden hierbij gevormd door:

- het werken van het grote naar het kleine;
- het pseudo kleinste-kwadratisch inpassen van nieuwe metingen;
- 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 wordt berekend. Dit puntenveld levert dan als het ware de nieuwe bekende punten voor verdere verdichting. Dit principe wordt hoofdzakelijk ingegeven door twee redenen. Ten eerste door het feit, dat interpolatie boven extrapolatie is te verkiezen, en ten tweede doordat om praktische redenen altijd een voldoende „levensduur” van de coördinaten van gegeven punten wordt nagestreefd.

De consequentie van het ongewijzigd willen laten van de coördinaten van gegeven punten is echter, dat de metingen van iedere verdichtingsstap niet kunnen worden aangesloten op een strenge kleinste-kwadratenwijze. Men wordt dus gedwongen te kiezen voor een zogenaamde pseudo kleinste-kwadraten aansluiting. Gevolg hiervan is echter weer dat, wil het principe van het werken van het

grote naar het kleine werkbaar blijven, de kwaliteit van de gegeven punten minstens gelijkwaardig, maar liefst een orde beter moet zijn dan de in te passen nieuwe metingen. Wanneer dit niet het geval zou zijn, 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 zullen worden ontdekt in het als duurzaam beoogde, gegeven puntenveld. Bij het beschikbaar komen van preciezere puntsbepalingssystemen kunnen we 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 '70, begin jaren '80 op de Noordzee heeft ondervonden 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, dat de inhomogeniteit in het ED50-systeem al snel voelbaar werd. Deze inhomogeniteit werd nog eens versterkt door de gebrekkige, onderlinge vastlegging van de landen rondom de Noordzee. 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 Noordze-installaties en het gebrek aan eenduidigheid bij de reconstructie van concessiegrenzen. Deze problemen hadden kunnen worden opgelost, indien men ED50 had kunnen vervangen door het Transit-stelsel. 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 hadden kunnen worden gereduceerd en gladgestreken, als men in staat was geweest een strenge pseudo kleinste-kwadraten aansluiting uit te voeren. Zo'n 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-kwadraten datumtransformatie kunnen worden getransformeerd naar het ED50-systeem. 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 bij de puntsbepaling op de Noordzee.

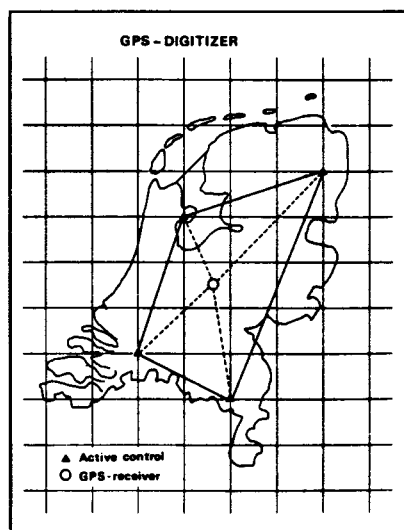


Fig. 4 GPS-digitizer.

Met een geschikt gekozen vervangingsmatrix voor de Transit-punten, één die we in de mathematische geodesie ook gebruiken bij het aansluiten van kringnetten, hadden de gevonden discontinuïteiten echter voor een belangrijk deel kunnen worden gereduceerd. Bovendien biedt de recentelijk ontwikkelde methode voor het schatten van complete kunstmatrices nu ook goede mogelijkheden om willekeurige covariantiestructuren te schatten. Dit zou in de toekomst van belang kunnen zijn voor de pseudo kleinste-kwadraten aansluiting van GPS-metingen op de Noordzee. De nieuwe methode laat trouwens fraai zien, dat Baarda's lambda-max exact de w-toets is voor het testen van precisie.

Nieuwe, landelijke coördinatenstelsels

Het voorbeeld van de Noordzee illustreert de problemen die men kan verwachten bij de introductie van preciezere puntsbepalingssystemen. We hebben tevens gezien, dat een deel van de problemen had kunnen worden gereduceerd. 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 te worden uitgevoerd. Het oude coördinatenstelsel zal altijd voor een bepaalde overgangperiode gehandhaafd moeten blijven voor de nodige band met het verleden. 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 moeten worden toegezien op bewaking van het bestaande coördinatenstelsel. 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, hetgeen staat voor European Reference Frame. Het bestaat uit een netwerk van 90 punten, met onderlinge afstanden tot enkele honderden kilometers en is in mei 1989 bepaald gedurende een GPS-campagne van drie weken. Vier van de EUREF-punten liggen in Nederland. Een deel van de gegevensverwerking en kwaliteitsanalyse van het EUREF-netwerk wordt momenteel uitgevoerd door de sectie Mathematische Geodesie en Puntsbepaling.

Ook voor Nederland onderzoeken we momenteel op welke wijze een nieuw, driedimensionaal rijksnetwerk moet worden gerealiseerd. Dit gebeurt in samenwerking met de praktijkdiensten, de Rijksdriehoeksmeting van het Kadaster en de Meetkundige Dienst van de 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 referentie-

stelsels. Daarom is een band met het huidige RD-net nodig en zal dit GPS-netwerk tevens moeten kunnen worden aangesloten 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 zal worden benut. Daar GPS de mogelijkheid biedt om snel, eenvoudig en precies grote afstanden te overbruggen, zal te zijner tijd kunnen worden volstaan met een GPS-netwerk, dat wijdmaziger is dan het huidige RD-net.

GPS-digitizer

Momenteel wordt tevens onderzocht of in de toekomst kan worden volstaan met enkele zogenaamde actieve GPS-grondslagpunten.

Actieve grondslagpunten zijn punten waarop permanent een geavanceerde GPS-ontvanger staat opgesteld, die continu fasemetingen uitvoert naar de overkomende satellieten. Door GPS-gebruikers te laten beschikken over deze gegevens, kunnen eenvoudig relatieve posities ten opzichte van de actieve grondslagpunten worden bepaald. In dit scenario zouden de mobiele GPS-ontvangers dan de rol van landelijke „digitizers" krijgen toebedeeld (fig. 4).

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

Gevolgen van GPS voor hoogtebepaling

Tot nu toe heb ik me beperkt tot de gevolgen van de introductie van het GPS-systeem voor de bepaling van situatie. GPS is echter een driedimensionaal puntsbepalingssysteem. Het ligt dus voor de hand de derde component, de hoogte, in een integraal, driedimensionaal GPS-netwerk te betrekken. Hiermee zouden de huidige tweedimensionale en ééndimensionale netwerken, waarbij situatie en hoogte strikt gescheiden zijn, kunnen worden geïntegreerd (fig. 5). Nu moeten we echter even een pas op de plaats maken en ons afvragen wat we verstaan

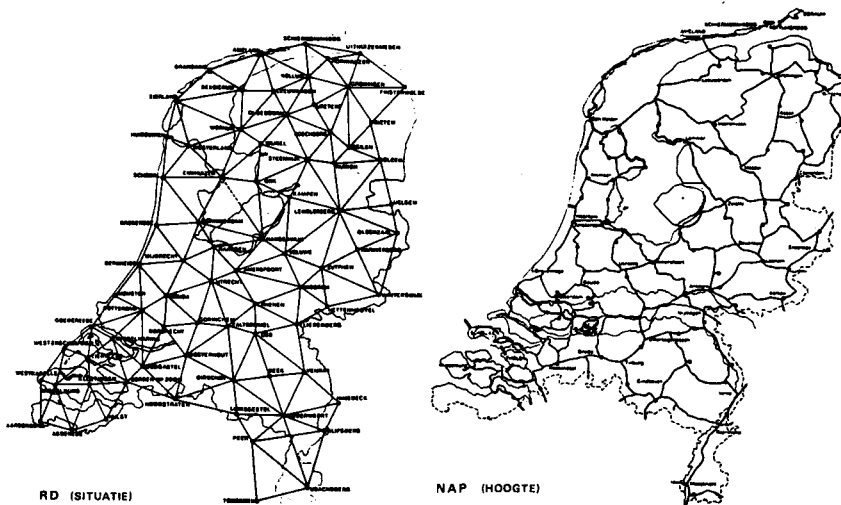


Fig. 5. RD- en NAP-net.

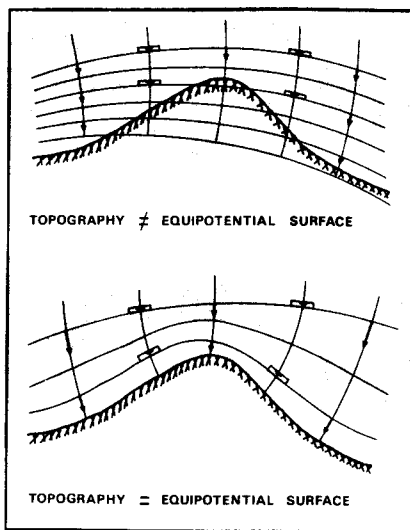


Fig. 6. Equipotentiaalvlakken.

onder het concept hoogte. Want tweedimensionaal plus ééndimensionaal hoeft beslist nog geen driedimensionaal te zijn.

Als we spreken over hoogte, dienen we goed onderscheid te maken tussen het geometrische en het gravimetrische concept. Het onderscheid is weliswaar voor veel praktische toepassingen subtiel, maar niettemin toch zeer essentieel.

De beide hoogteconcepten onderscheiden zich onder andere in de definitie van hun referentievlakken, ofwel niveaувlakken. Voor het geometrische hoogteconcept is het type niveaувlak niet essentieel. Het zou bijvoorbeeld een plat vlak of een bol kunnen zijn. Vanwege de afgeplatte vorm van de aarde is het echter gebruikelijk te kiezen voor een omwentelingsellipsoïde die in het middelpunt van de aarde is gecentreerd. We spreken dan van ellipsoïdische 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 wordt beschreven. Deze netwerken beschrijven namelijk gravimetrische hoogten.

Geometrisch en gravimetrisch hoogteconcept

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

Stelt u zich eens voor dat u in het mooie, Limburgse landschap een wandeling aan het maken bent. Met uw beide ogen ziet u diepte en kunt u boven van onder onderscheiden. Kortom, u bent in staat om geometrische hoogteverschillen waar te nemen. Veronderstel dat u vervolgens uw ogen sluit en door een gids bij de hand wordt genomen. Hoogteverschillen ziet u nu niet meer, maar voelen doet u ze wel. Het beklimmen van een berg kost u namelijk energie: hoe hoger de berg, des te meer energie kost het u om de top te bereiken. Dit energieverlies is een maat voor het door u afgelegde gravimetrische hoogteverschil. Het is het gevolg van het feit dat u bij beklimming van de berg een weg aflegt, die niet haaks staat op de lokale zwaartekrachtsvectoren (fig. 6).

Laat ik dit nog eens wat nader toelichten. Als de massa van de berg zo groot zou zijn, dat alle lokale zwaartekrachtsvectoren haaks op de bergrand zouden staan, dan vormt de bergrand een vlak van gelijke potentiële energie, ofwel een equipotentiaalvlak. Ten opzichte van deze niveaувlakken worden gravimetrische hoogten beschreven. In deze situatie zou u, nog altijd met uw 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 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. Denkt u bijvoorbeeld maar aan de waterhuishouding. De huidige ééndimensionale netwerken beschrijven juist deze toestand van potentiële energie van de topografie. De topografische potentiaalverschillen worden hierbij bepaald uit een combinatie van lokale zwaartekrachtsmetingen en een netwerk van waterpasmetingen volgens de regel „arbeid is kracht maal afgelegde weg”.

Waterpassen met GPS

Welke rol is bij de bepaling van deze potentiaalverschillen weggelegd voor GPS? Op het eerste gezicht lijkt deze er niet te zijn. Uitkomst wordt echter geboden, als we gaan 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 functionele verband moet het dus in principe mogelijk zijn topografische potentiaalverschillen te bepalen uit een integratie van GPS- en zwaartekrachtsmetingen.

Hoewel nog verschillende theoretische problemen te overwinnen zijn, in het bijzonder als het gaat om kwaliteitsbeheersing, hebben eerste onderzoeken van deze integratiemethode toch al zeer bemoedigende resultaten

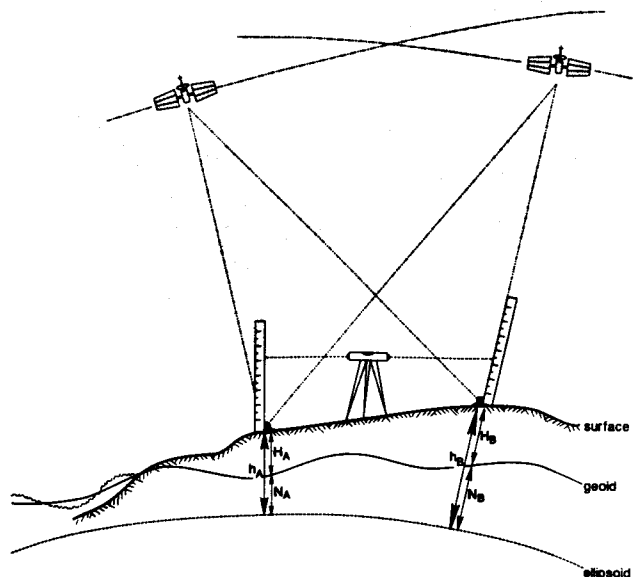


Fig. 7. Hoogtemeting met GPS.

opgeleverd. Het is dan ook niet uitgesloten, dat de geschetste integratiemethode de kostbare en tijdvergende lagere orde waterpassingen 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 (fig. 7).

Integratie

Het zojuist geschetste integratieconcept van GPS- en zwaartekrachtmetingen is een goed voorbeeld van een praktische toepassing van de integratiemethoden 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 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 scheiding van zeespiegelrijzing en verticale korstbewegingen.

Het interessante van de integratie van geometrische en gravimetrische functionalen is ook, dat men wordt geconfronteerd met sterk uiteenlopende, maar elkaar aanvullende, functiemodellen. Voor de netwerken zijn deze bijvoorbeeld discreet van aard, gebaseerd op meerpuntsfunctionalen en overtallig. Voor de potentiaalbepaling zijn deze daarentegen continu van aard, gebaseerd op enkel-puntsfunctionalen en vanwege de eindige waarnemings-greep ondertallig. 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, terwijl dit voor de geometrie, zoals we eerder hebben gezien, 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. Ik noem de gevonden oplossing voor het overbepaalde, geodetische randwaardeprobleem, de hybride-normmethode voor de integratie van discrete en gediscetiseerde functionalen, en tenslotte de spectrale beschrijving van continue netwerken. Niettemin zullen nog verschillende vragen moeten worden beantwoord, voordat we met recht kunnen spreken 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 heb ik een aantal nieuwe ontwikkelingen geschetst op het gebied van de statische puntsbepaling en op het gebied van de integratie van geometrische en gravimetrische concepten. De ontwikkelingen in de satelliepuntsbepaling en de theorievorming op het gebied van de geïntegreerde geodesie hebben echter ook belangrijke consequenties voor de dynamische puntsbepaling.

Tot voor kort heeft het werkterrein van de geodeet, die betrokken was bij de dynamische puntsbepaling, voornamelijk gelegen op zee. Zijn werkzaamheden worden 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 karteringsdoeleinden, het dynamisch positioneren van platforms en schepen (fig. 8), en de positie- en netwerkbepaling van schip en „streamer” voor driedimensionale, 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 altijd een wat aparte rol heeft gespeeld in de geodesie. Hiervoor zijn drie redenen aan 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.

De laatste jaren zien we 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 een geïntegreerd navigatiesysteem. Deze ontwikkeling is mogelijk geworden door de rijping van digitale technieken en microprocessoren, waardoor een verschuiving van apparatuur naar programmatuur is ontstaan.

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

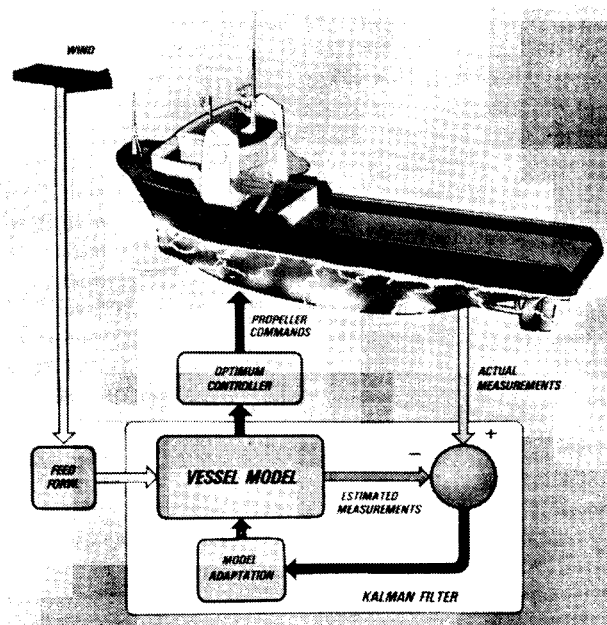


Fig. 8. Positionering op zee.

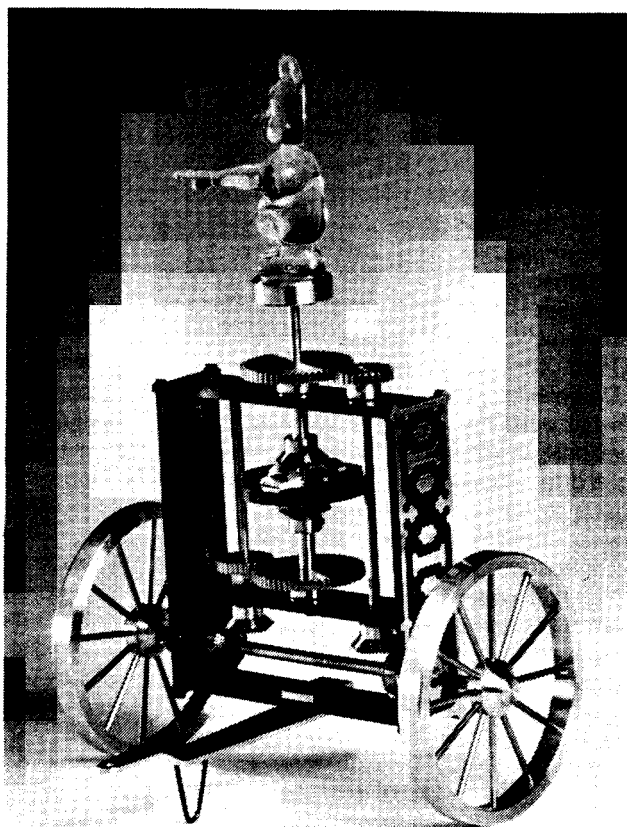


Fig. 9. Chinese strijdwagen, uitgerust met de differentiële odometer.

Voertuignavigatie

Laat ik dit eens illustreren 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 zo'n 2000 jaar oud en is veelvuldig toegepast. De Chinezen gebruikten het al op hun strijdwagens, ver voor de uitvinding van het magnetisch kompas (fig. 9). 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. Overigens is de replica, zoals weergegeven in fig. 9, op kundige wijze vervaardigd bij de instrumentmakerij van de faculteit.

Een meer eigentijds voorbeeld van de toepassing van de differentiële odometer vinden we in de ruimtevaart. Het tijdens de Apollo-missies gebruikte maanwagentje was er namelijk eveneens mee uitgerust. Zo kon de radiale afstand tot de maanlander worden bijgehouden, 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. We kunnen dan ook pas spreken van een land-navigatiesysteem, wanneer de differentiële odometer wordt gecombineerd met een gyrokompass of een magnetisch kompas. Voor de richtingsveranderingen geeft dit voor het eerst overtuiging en dus de mogelijk-

heid om controles en kansmodeladaptatie uit te voeren. Op basis van real-time kansmodelschatting kan dan de relatieve weging van beide sensoren continu in de vereffening worden aangepast. Een belangrijk deel van de veelal laagfrequente modelfouten van de differentiële odometer en de overwegend hoogfrequente modelfouten van het kompas kan zo worden geëlimineerd.

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”. Dit is te 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 wordt onderzocht en toegepast, is gebaseerd op het gebruik van een digitale kaart, die in een compact disc wordt opgeslagen. 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 kunnen zijn gevolgd. Dit levert een verzameling van alternatieve hypothesen op, in de vorm van mogelijke trajecten. Vervolgens wordt hieruit de meest waarschijnlijke hypothese geïdentificeerd. Zodra een van tevoren gekozen waarschijnlijkheidsdrempel wordt overschreden, wordt tenslotte 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-kwadratenaansluiting van de uit het gegist-bestek bepaalde veelhoekposities (fig. 10).

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

Gezien de hier geïllustreerde ontwikkelingen verwacht ik dan ook, 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 traditionele methoden van dynamische gegevensverwerking en kwa-

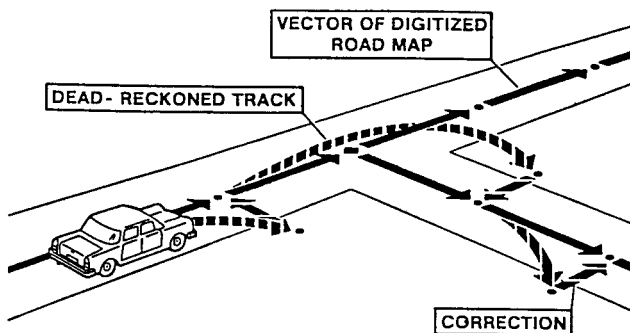


Fig. 10. Routecorrectie op basis van een digitale kaart.

litsbeheersing in de mathematische geodesie. Dit geldt zowel voor de vereffening, voor de toetsing als voor de verkenning. Bovendien vereisen de veelal snel veranderende meetomstandigheden, dat bijzondere aandacht wordt geschonken aan de inschakeling van het model.

Uitbreiding van de bestaande theorie

Om een indruk te geven van de benodigde bijstelling en uitbreiding, zal ik een aantal voorbeelden geven 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 ervan mag worden uitgegaan 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 traagheidssystemen mag slechts gedeeltelijk bekend worden verondersteld. Door integratie met GPS wordt dynamische kalibratie van het kansmodel van traagheidssystemen echter mogelijk. Dit betekent wel, dat er methoden dienen te worden ontwikkeld, die recursieve vereffening en recursieve kansmodelschatting simultaan mogelijk maken.

Ten aanzien van de toetsing kan worden gesteld, 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.

Onderzocht zal nog moeten worden hoe de methode kan worden geïntegreerd met kansmodelschattingmethoden. Bovendien moet worden onderzocht 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 GPS onderdeel te laten uitmaken 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 signaalprocessors voor GPS-ontvangers.

Dit onderzoek maakt deel uit van het project „geïntegreerde navigatiesystemen ten behoeve van verkeer en vervoer”. Dit is een samenwerkingsproject tussen de sectie Mathematische Geodesie en Puntbepaling van de Faculteit der Geodesie en de vakgroep Telecommunicatie en Verkeersbegeleidingssystemen van de Faculteit der Elektrotechniek.

Naast de real-time toetsing op modelfouten zal ook de verkenning steeds vaker real-time dienen te worden uitgevoerd. Immers, het is bijvoorbeeld in de civiele luchtvaart, uit veiligheidsoverwegingen, van belang om op ieder willekeurig 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 interessant op te merken, dat op grond van met name betrouwbaarheidsoverwegingen momenteel door verschillende instituten onderzoek wordt verricht naar de bijdrage, die een zogenaamd „Wide Area Differential GPS Network” van permanent opgestelde GPS-ontvangers hierbij kan bieden.

We komen dus tot de slotsom, dat zowel voor de statische als voor de dynamische puntbepaling het toekomstbeeld lijkt te gaan worden bepaald door het concept van de „GPS-digitizer”.

Conclusie

Aan de hand van enkele concrete voorbeelden heb ik in het kort een overzicht willen geven van de huidige ontwikkelingen in de mathematische geodesie en puntbepaling.

We hebben gezien, dat het zeer precieze GPS-systeem tot ingrijpende veranderingen zal leiden op het gebied van de geodetische puntbepaling. Nu al worden resultaten behaald, welke minstens gelijkwaardig zijn aan die van de gebruikelijke netwerken; netwerken, die tot stand zijn gekomen 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.

Tevens is gebleken, dat de huidige ontwikkelingen in de dynamische puntbepaling en navigatie worden beheerst door de inschakeling van GPS en integratie ervan met aanvullende sensoren. Hierdoor vertonen de in de algemene navigatie toegepaste methoden en technieken een steeds duidelijker verwantschap met die van de puntbepaling. 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.

Tenslotte kan worden vastgesteld dat, als gevolg van instrumentele ontwikkelingen en nieuwe theoretische inzichten, de indertijd in de mathematische geodesie gekozen uitgangssituatie op een aantal punten bijstelling en uitbreiding behoeft. Dit betreft onder andere de inschakeling van het kansmodel, de dynamische toetsmethodieken en de voor de nieuwe puntbepalingssystemen te volgen opzet van metingen en optimalisering hiervan naar precisie en betrouwbaarheid.

GEO

Bij de rijksdiensten zit de schrik er in vanwege de Grote Efficiency Operatie, afgekort GEO. Het gerucht gaat, dat de diensten rond aardwetenschappen een extra gevaar lopen.

Beleidsmakers worden door het voorvoegsel GEO op

een idee gebracht. Zou het nu echt zo verstandig zijn geweest van die landmeters om zich GEOdeten te gaan noemen? Zal men later zeggen: de GEO deed het?

Piksel