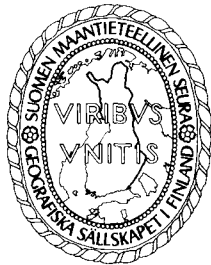


# Tähtisuunnistuksesta satelliittiaikaan: maantieteellisten paikannusmenetelmien kehittyminen

VESA JUNTUNEN

Maantieteen laitos, Oulun yliopisto



*Juntunen, Vesa (1996). Tähtisuunnistuksesta satelliittiaikaan: maantieteellisten paikannusmenetelmien kehittyminen (Development of geographical positioning methods from the time of star orientation to present-day satellite positioning). Terra 109: 1, 15–24.*

As the concept of spherical Earth became commonly accepted, the question of how to determine the positioning on the symmetrical spherical surface emerged. The problem was solved theoretically with the creation of the grid of coordinates, where location could be determined by graduations of latitudes and longitudes. In practice, however, there were no accurate means to calculate exact positioning. This, especially, affected seafaring, as no fixed landmarks were accessible. Until the 18th century, positioning on the open sea was determined by astronomical methods. The determination of latitude was based on the elevation of heights of the sun or the selected star and of longitude by measuring the difference between local time and some agreed basic time. In the 1900s, the different kinds of radionavigational methods have played a significant role. From the 1980s, satellite positioning has become the principle method of positioning. The satellite positioning system GPS (Global Positioning System) is accurate to one millimetre, and in navigation, real-time accuracy of one metre is possible. The Department of Geography of the University of Oulu has tested the accuracy of GPS equipment and its suitability for geographical field studies.

*Vesa Juntunen, Department of Geography, University of Oulu, P. O. Box 333, FIN-90571 Oulu, Finland.*

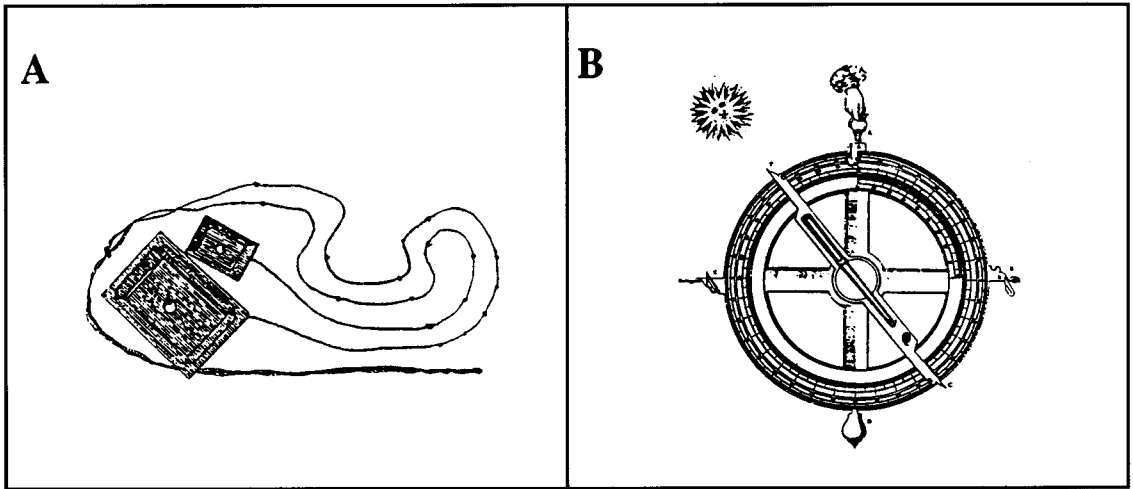
Ihminen on läpi historiansa etsinyt yksinkertaista keinoa määrittää missä hän on ja mihin suuntaan hän on menossa. Tähän maantieteelliseen perusongelmaan on aikojen kuluessa keksitty toinen toistaan tarkempia paikantamismenetelmiä, mutta kukin niistä on kohdannut säännöllisesti myös rajoitteensa. Kiinteällä maaperällä oma sijainti on kyetty määrittämään maiseman muotojen, ihmisen rakentamien kiintopisteiden sekä niistä laadittujen karttojen avulla. Merellä sijainnin ja liikesuunnan selvittäminen on ollut vaikeampaa ilman kiinteitä maamerkkejä.

Jotta sijainti pallopinnalla voitaisiin ilmaista lukuarvoilla eli koordinaateilla, tulee ensin määrittää koordinaatiston sijoittuminen pallon suhteen ja koordinaattien laskentamenetelmä. Nykyisin käytössä on kolme erilaista tapaa ilmaista sijainti Maan pinnalla. Se voidaan ilmaista joko geodeettisin eli maantieteellisin koordinaatein ( $\varphi, \lambda$ ), tasokoordinaatein ( $x, y, z$ ) tai suorakulmaisoin avaruuskoordinaatein ( $X, Y, Z$ ). Kansallisissa kartastoissa käytetään pääsääntöisesti tasokoordinaatteja.

Alueensa sijainnista ja muodosta johtuen eri valtiot ovat päätyneet karttaprojektion ja vertausellipsoidin valinnassa erilaisiin ratkaisuihin. Näin kansalliset kartastot on laadittu toisistaan poikkeavissa koordinaattijärjestelmissä. Sekalainen käytäntö aiheuttaa väärinkäsityksiä sekä suoransaisia paikannusvirheitä. Tämä artikkeli tarkastelee paikannusmenetelmien ja koordinaattijärjestelmien historiallista kehitystä sekä nykymuotoisen, satelliitteihin perustuvan paikannusjärjestelmän sovelsuhmahdollisuuksia ja ongelmia.

## Astronomiset paikannusmenetelmät

Varhaisina aikoina pyrittäessä määränpään, joka oli näköetäisyyden ulkopuolella rannikosta, purjehdittiin ennalta tunnetussa kulkusuunnassa lähtöpisteestä. Matkan pituus ilmaistiin purjehduspäivinä. Suunnan pitämiseen käytettiin neljää ilmansuuntaa, jotka määritettiin tarkkailemalla auringon nousua ja laskua sekä varjon suuntaa keskipäivällä. Yöllä ne voitiin määrittää tähtien



Kuva 1. Kamal (A) ja astrolabi (B). Kamalilla tähden korkeuskulma määritetään pitämällä nyörin toinen pää suussa ja asettamalla puulevy horisontin ja tähden väliin. Kulmakorkeus saadaan laskemalla käytetyt solmuvälit. Astrolabilla kulmakorkeuden mittausta perustuu auringon tai tähden heittämään varjoon, jolloin korkeuden astelukema voidaan lukea kehältä (Ericsson *et al.* 1988: 73, 76).

*Fig. 1. Kamal (A) and astrolabe (B). By kamal, the angle of elevation is measured by holding the cord between the teeth at the other end and placing the board between the horizon and the star. The angle of elevation is achieved by counting intervals between knots. By astrolabe, measurements of the height of the sun or the star are based on the shadow cast by astrolabe's pointer. The reading for the angle is obtained from the ring (Ericsson *et al.* 1988: 73, 76).*

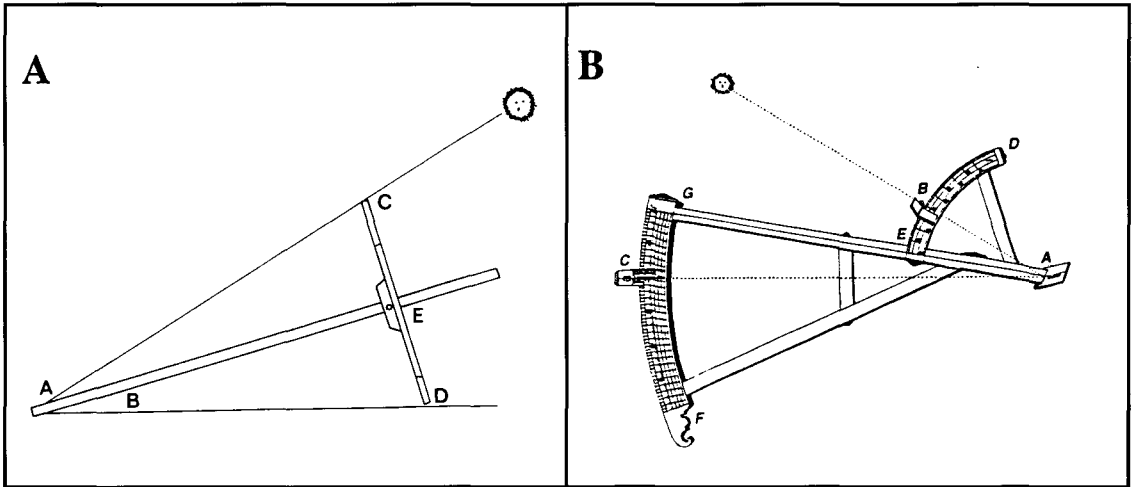
näennäisiä liikkeitä tarkkailemalla. Vanhimmat tiedot taivaankappaleiden hyväksikäytöstä löytyvät noin vuodelta 1200 eKr., jolloin Välimerellä ja Punaisella merellä purjehtineet foinikialaiset käyttivät suunnan pitämisen tukena Pohjantähteä (Ericsson *et al.* 1988: 73). Kokeneet merenkulkijat kykenivät myös navigoimaan lähellä horisonttia olevien pilvien, merivirtojen suunnan, veden värin sekä lintujen tai perhosten esiintymisen mukaan (James & Martin 1981: 18–19; Ryman 1996: 40–41).

Maan pallonmuotoisuuden hyväksymisen myötä 400-luvulla eKr. nousi esille sijainnin määrittämisen ongelma symmetrisellä, pyöreällä pinnalla. Ongelman ratkaisi noin vuonna 140 eKr. kreikkalainen matemaatikko ja astronomi Hipparkhos, jonka mukaan maanpiiri voitiin käsittää koordinaattien määrittämänä tasona, jossa jokaisen maantieteellisen paikan sijainti voitiin ilmaista kahdella asteluvulla, leveysasteella ja pituusasteella. Maan ympärys jaettiin assyrialaisien aritmetiikkaan perustuen 360 asteeseen (James & Martin 1981: 33–34). Sijainti pallon pinnalla tässä astronomiseksi koordinaatistiksi kutsutussa järjestelmässä ilmaistiin latitudin ( $\varphi$ ) eli leveysasteen ja longitudin ( $\lambda$ ) eli pituusasteen avulla. Asteisiin sidotun koordinaatiston etuna oli, että sijainti kyettiin teoriassa määrittämään tarkasti, vaikka maapallon kokoa ei tunnuttukaan. Astronominen koor-

dinaatisto perustui Maan pallonmuotoisuuteen ja siitä johdettavaan oletukseen, että Maan pintaa kohtisuoraan osoittava luotilanka kulkee Maan keskipisteen kautta. Leveysaste määriteltiin täten tämän kohtisuoran ja ekvaattoritason välisenä kulmana. Pituusaste määriteltiin paikallisen meridiaanin ja sovitun nollameridiaanin välisenä kulmana (James & Martin 1981: 34; Ashkenazi 1988: 270–271).

Leveysasteen määrittäminen perustui tunnetun kiintotähden ja horisontin väliseen kulmaan. Intian valtamerellä arabit määrittivät Canopus-tähden ja meren horisontin välistä kulmaa. Kulmakorkeutta mitattiin ns. kamalin (kuva 1 A) avulla. Se on solmuja täynnä oleva nyöri, jonka toiseen päähän on kiinnitetty puulevy. Levy toimii tasasivuisen mittauskolmion kantana ja naru sen korkeutena mitattaessa tähden korkeutta horisontista. Välimeren piirissä leveysaste määritettiin Pohjantähden mukaan, jonka korkeutta horisontista mitattiin Hipparkhoksen kehittämän laitteen, astrolabin (kuva 1 B), avulla. Auringon korkeuden mittausta perustui astrolabin osoittimen heittämään varjoon. Yöllä osoitin suunnattiin tähteä kohti, ja kulmakorkeuden astelukema saatiin kehältä. Laitteella saavutettiin hyvissä havainto-oloissa noin yhden asteen eli noin sadan kilometrin tarkkuus (Ericsson *et al.* 1988: 73–74).

Koska Maa pyörähtää akselinsa ympäri 24 tun-



Kuva 2. Ristisauva eli Jaakobin sauva (A) sekä takasauva eli Davisin kvadrantti (B). Ristisauvalla kulmakorkeus mitataan asettamalla mittakeppi horisontin ja kiintotähden väliin ja lukemalla korkeus sauvan mitta-asteikolta. Takasauvalla korkeus havainnoidaan asettamalla tähtäimen ja horisontin välinen linja sekä auringon langettama varjo yhteneviksi (Singer *et al.* 1957: 546, 552).

*Fig. 2. The cross-staff, or the 'Jacob's staff,' (A) and the back-staff, or Davis' quadrant, (B). Using the cross-staff, the elevation of height is measured by setting a rod mounted vertically on the staff between the horizon and the sun or star. The elevation can then be read from the scale on the staff. Using the back-staff, the height is determined from the shadow of the sun when it falls on the forward-sighting slit, while the lower arc was sighted precisely to the horizon (Singer *et al.* 1957: 546, 552).*

nissa, jokainen tunti vastaa 15 pituusastetta. Pituuspiirin määrittäminen perustuu siis sovitun perusajan ja paikallisen ajan eron määrittämiseen. Kahden paikan välisen aikaeron selvittäminen oli kuitenkin varhaisilla mittausmenetelmillä hyvin karkeaa. Vaikka teoriassa sijainti kyettiin ratkaisemaan jo varhain, osoittautui tämä käytännössä kuitenkin liian tekniseksi. Pituusasteen määrittästä sekoitti myös se, että nollameridiaanin valinnassa käytettiin useita erilaisia lähtökohtia (James & Martin 1981: 33–39; Eco 1994: 180–185).

Pituusasteen määrittäksen vaikeus teki paikannäilyksestä avomerellä löytöretkien aikoihin saakka varsin arvionvaraista. Niinpä sijainti avomerellä määritettiin yleensä ns. merkintälaskulla eli kuljetun matkan ja suunnan perusteella. Suunta saatiin 1200-luvulta lähtien kompassilla ja kuljettu matka mittaamalla nopeus. Nopeus saatiin pudottamalla veteen loki eli puupala, johon oli kiinnitetty solmuin varustettu köysi. Nopeus laskettiin aikayksikköä kohti veteen laskettujen solmujen määrästä. Laivan nopeus ilmaistiin täten »solmuina». Sijainnin määrittäminen oli hankalaa, sillä aluksen vauhti vaihteli ja ajanmäärittäminen tiimalasilla oli epätarkkaa. Lisäksi suuntaan vaikuttivat merivirrat, eranto (magneettisen ja maantieteellisen pohjoisen välinen ero), eksymä (mm. laivan metalliosien aiheuttamat kompassin virhenäyttämät) sekä sorto (tuulen ja aallokon aiheuttama poikkeama kulku-

suunnassa) (James & Martin 1981: 78; Ericsson *et al.* 1988: 80; Heikkinen & Lammi 1989: 107–121).

### Löytöretkien aikakausi

Ristisauvan eli Jaakobin sauvan (kuva 2 A) kehitti astronomisten kulmamittausten apuvälineeksi juutalainen matemaatikko Levi ben Gerson jo vuonna 1342, mutta merenkulkuun laite vakiintui vasta 1500-luvulla (Singer *et al.* 1957: 528). Ristisauvassa noin metrin mittaiseen sauvaan on kiinnitetty mittakeppi siten, että sitä kyetään liikuttamaan edestakaisin. Havainnoija katsoo sauvan päästä (A) ja keppiä liikuttamalla asettaa sen alaspäin (D) ja yläpäin (C) tarkalleen kiintotähden ja horisontin väliin. Kulmakorkeus luetaan sauvaan olevalta asteikolta (E). Ongelmana on, että havainnoijan täytyy katsoa samanaikaisesti kahta kohdetta, horisonttia ja kiintotähteä. Päivällä kiintotähtenä toimii aurinko, jolloin myös häikäisy rajoittaa tarkkuutta (Singer *et al.* 1957: 546; James & Martin 1981: 77–78).

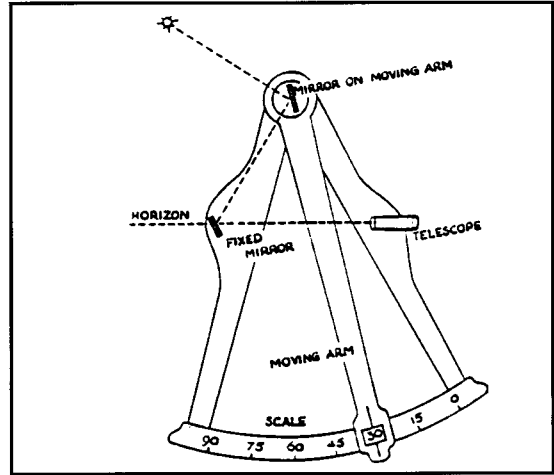
Vuonna 1594 englantilainen tutkimusmatkailija John Davis kehitti laitetta siten, että kulmakorkeus laskettiin auringon varjosta, jolloin häikäisy ei enää rajoittanut tarkkuutta. Laitteesta käytettiin nimitystä takasauva eli Davisin kvadrantti (kuva 2 B). Siinä havainnoija katsoo horisonttiin tähti-

men (C) ja diopterissa (A) olevan raon lävitse siten, että aurinko on hänen selkensä takana. Asettamalla auringon varjon tähtäin (B) siten, että myös varjo osoittaa diopterissa olevaan rako, ilmaisee pienempi mitta-asteikko (D–E) auringon korkeuskulman karkeasti. Tähtäimen (C) hienosäädön avulla saadaan suuremmalta mitta-asteikolta (F–G) myös asteiden osat määritettyä (Singer *et al.* 1957: 552). 1600-luvulla varjo korvattiin peilillä, jolloin laitteesta alettiin käyttää nimeä kvadrantti (James & Martin 1981: 78).

Pituusasteen määrittämisessä kaikkialla maailmassa käytettäväksi soveltuvan menetelmän otaksui keksineensä Kristoffer Kolumbus Amerikkaan purjehtiessaan, jolloin hän havaitsi kompassin maantieteellisen ja magneettisen pohjoisen välisen erannon riippuvan maantieteellisistä pituus- ja leveysasteista. Tällöin tunnettaessa leveys voitiin pituus määritellä erannon suuruuden perusteella. Erannossa on kuitenkin paikallisia poikkeamia ja ne vaihtelevat ajan mittaan. Sen tähden menetelmästä tuli käyttökelpoinen vasta Edmund Halley'n julkaistua vuonna 1701 kartan, johon oli merkitty kompassineulan erannot koko maapallolla (Singer *et al.* 1957: 548–555).

1600-luvun lopulla Maan muotoa kuvaavan tutkimuksen edistyttyä havaittiin, että Maa on navoiltaan litistynyt ja siten ns. pyörähdysellipsoidin muotoinen. Astronomisten koordinaattien korvikkeeksi tarvittiin koordinaateille uusi määritelmä, jossa maanpinnan pisteet projisoidaan maapalloa mahdollisimman hyvin vastaavan vertauskappaleen pinnalle. Myös uudessa määritelmässä sijainti ilmaistiin leveys- ja pituuspiirein, mutta erotuksena epätarkoista astronomisista koordinaateista nyt käytettiin geodeettisia koordinaatteja (Ashkenazi 1988: 271). Tässä koordinaatistossa leveysaste määritellään havaintopisteen kautta kulkevan ellipsoidin normaalin ja maapallon ekvaattoritason välisenä kulmana. Koska Maa on ellipsoidin muotoinen, ei normaali kulje yleensä sen keskipisteen kautta. Geodeettisella pituudella tarkoitetaan sovitun nollameridiaanin ja havaintopisteen kautta kulkevan meridiaanin välistä kulmaa maapallon keskipisteestä määritettynä (Tikka 1977: 10–11). Riippuen leveysasteesta sekä maankuoren massaepätasaisuuksista astronomisten ja geodeettisten koordinaattien yhtenevyys vaihtelee. Käytännön merkitystä tällä ei tuon ajan merenkululle kuitenkaan ollut. Suurimmillaan erot ovat pohjoisilla leveysasteilla ja sielläkin pienemmät kuin mihin tarkkuuksiin tuohon aikaan päästiin (Ashkenazi 1988: 271–273).

1700-luvulla navigointia kehitti merkittävästi laitteiden ja menetelmien parantuminen. Kulmamittauksessa huomattava edistysaskel otettiin vuonna 1731, kun englantilainen John Hadley kek-



Kuva 3. Oktantin periaate. Oktantti sisältää sekä kiinteän että keskiakseliin sidotun ja siten liikuteltavan peilin. Havainnoitavat kohteet asetetaan peiliheijastuksen avulla rinnakkain, jolloin kohteiden välinen kulmakorkeus on kaksi kertaa niin suuri kuin peilien välinen kulma. Myöhemmin varustusta on parannettu mm. suodatimella ja himmentimellä (Singer *et al.* 1957: 555).

*Fig. 3. Octant's principle. In octant, a mirror is fixed opposite to the telescope and another mirror is placed on the arm which moves across the limb at the pivotal point. The objects are then made parallel by means of mirror reflection. The angle between the two objects is then twice that of the angle between the two mirrors. Later, the quality has been improved by adding a filter and a diaphragm (Singer *et al.* 1957: 555).*

si menetelmän mitata taivaankappaleiden korkeuskulmia saattamalla vertailukohtat, kuten horisontin ja tähden, peiliheijastuksen avulla rinnakkain. Kehitettyä laitetta kutsuttiin Hadley'n oktantiksi (kuva 3). Mittauksissa päästiin nyt 1–2 asteminuutin toleranssiin, mikä vastaa noin 2–4 kilometrin tarkkuutta. Laitteen tarkkuutta mm. himmennyslasien avulla paransi entisestään vuonna 1757 englantilaisen John Birdin keksimä sekstantti (James & Martin 1981: 77; Ericsson *et al.* 1988: 83–85). Sekä oktantista, sekstantista että myöhemmin käytetystä kvintantista käytetään yhteistä nimeä peiliheijastuskojeet. Toisistaan ne eroavat asteikaren pituudessa. Tavallisessa kielenkäytössä sanotaan kaikkia heijastuskojeita yleensä sekstanteiksi (Merenkulun oppikirja II 1969: 37–38). Sekstantti vakiinnutti asemansa merenkulussa ja oli tämän vuosisadan alkuun saakka yleisimmin käytetty kulmamittauslaite (James & Martin 1981: 77).

Vaikka pituusasteen määrittämisessä tunnettiin itä-länsiulottuvuuden ja ajan suhteet jo antiikin ajoilta, ei riittävän tarkkaa mittaumenetelmää oltu

1700-luvulle tultaessa kehitetty. Pitkillä toiselle puolelle maapalloa suuntautuneilla matkoilla määrittämisessä saattoi tapahtua jopa kymmenien asteiden virheitä. Ongelmana oli, että siinä käytettävät kellot olivat liian epätarkkoja tai ne eivät soveltuneet keinoihin laivoihin. Vuonna 1714 Ison-Britannian parlamentti lupasi 20 000 punnan palkkion riittävän tarkan ja merikelpoisen kellon kehittäjälle. Kuitenkin vasta vuonna 1761 englantilainen John Harrison rakensi vaatimukset täyttävän kronometrin, joka 156 päivää kestäneen, toiselle puolelle maapalloa suuntautuneen matkan aikana jättäi ainoastaan 15 sekuntia. Pituusasteen määrittäminen näin saatu yhtä tarkaksi leveysasteen määrittämisen kanssa ja sijainti avomerellä voitiin optimiolosuhteissa ilmoittaa noin kahden kilometrin tarkkuudella (James & Martin 1981: 78–79; Eco 1994: 280–285).

### Koordinaattijärjestelmien kehittyminen

Maapallon muotoa kuvaavien tutkimusten edistyessä havaittiin, että myös geodeettisten koordinaattien määrittely sisältää kaksi virheellistä oleutusta. Ensinnäkään Maa ei ole täydellinen pyörähdyssellipsoidi, vaan sen pinta on epäsäännöllinen. Sen muodon luonnollinen lähtökohta olisikin valtameren pintaan liittyvä painovoiman tasapainopinta eli geoidi, joka ei voi kuitenkaan yhtyä tarkasti mihinkään matemaattiseen pintaan. Pyörähdyssellipsoidi on kuitenkin lähin säännöllinen muoto kuvaamaan Maata (Tikka 1977: 11). Toiseksi, menetelmät, joilla planeetan koko ja muoto määriteltiin, perustuivat oletukseen, että sen massa on tasaisesti jakautunut. Maan kuoren tiheuserot aiheuttavat kuitenkin ns. painovoima-anomalian eli painovoiman suunnan poikkeamia (Varonen 1991: 28).

Eräs geodeettisten koordinaattien haitta on niiden kaksiuulotteisuus. Merinavigoinnissa tämä ei muodosta ongelmaa, mutta kolmiulotteisuutta vaativissa sovelluksissa geodeettiset koordinaatit ovat epäkäytännöllisiä. Näin on siksi, että geodeettisessa koordinaatistossa kolmas ulottuvuus ei ole samaa muodossa ja siten laskennallisesti yhteensopiva kahden muun kanssa. Myöskään tunnettujen koordinaattien etäisyys- ja kulmalaskut eivät geodeettisessa koordinaatistossa luonnistu kymmenkantaisen tasotrigonometrian helpoudella. Geodeettinen koordinaatisto onkin korvattu suorakulmaisella tasokoordinaatistolla, jossa koordinaatit ilmaistaan  $x$ - ja  $y$ -koordinaatteina, metreinä päiväntasaajasta sekä Greenwichin nollameridiaanista, ja korkeus ortometrisenä korkeutena eli suhteesta keskimerenpintaan (= geoidiin). Geodeettiset eli maantieteelliset koordinaatit ovat jääneet kuitenkin yleisesti käyttöön mm. merinavi-

goinnissa (Ashkenazi 1988: 274; Henttu & Leh-toranta 1993: 25).

Kun maailman valtiot 1800- ja 1900-lukujen vaihteessa loivat alueilleen koordinaattijärjestelmiä, määrittivät kukin koordinaatistonsa peruspisteen. Koska tämä perustui havaintoihin suppealla alueella, ei maapallon epäsäännöllisen painovoimakentän vaikutusta voitu sen aikaisilla mitausmenetelmillä riittävästi ottaa huomioon. Siksi kunkin valtion oma peruspistemäärittäminen tarkoista havainnoista huolimatta hieman sivuun maapallon todellisesta keskipisteestä. Myös vertausellipsoidin valinnassa eri valtiot päätyivät erilaisiin ratkaisuihin. Näin kansalliset koordinaattijärjestelmät erosivat toisistaan huomattavastikin eivätkä siten olleet vertailukelpoisia (Varonen 1991: 28–29; Kakkuri 1996: 10).

Kansainväliseksi tavoitteeksi sovittiin, että saatua havaintoaineistoa vaihtamalla luotaisiin yhtenäisen koordinaattijärjestelmän perusteet. Kokonaan tähän ei ole päästy, vaikka paikallisesti mitausten yhdistämisessä on onnistuttu: esimerkiksi ovat Keski- ja Pohjois-Euroopan peittävä European Datum 1950 (ED-50), ja myöhemmin tarkennettu ED-79, Ison-Britannian ja Irlannin yhdistävä OS(SN)-80 sekä pohjoisamerikkalaiset NAD-27 ja NADII (Ashkenazi 1988: 276; Varonen 1991: 29–30). EUREF-89 on yleiseurooppalainen koordinaattijärjestelmä, jonka vertausellipsoidi on määriteltä siten, että se kuvaa mahdollisimman hyvin maapallon muotoa Euroopan mannerlaatan alueella (Ollikainen 1993: 9–11). ED-50 peittää myös Suomen ja toimii maamme karttakoordinaattien perustana. Suomessa ei ole silti julkaistu ainoatakaan karttaa tässä järjestelmässä, vaan käytössä oleva kansallinen tasokoordinaattijärjestelmä on Kartastokoordinaattijärjestelmä (KKJ). Se ei ole yhtenevä muiden koordinaattijärjestelmien kanssa (Suomen Kartasto 1984: 11; Kakkuri 1996: 12).

### Elektroniset paikanmäärittäjäjärjestelmät

Parhaimmillakin mittalaitteilla tähtisuunnistus kertoo vain likimääräisen sijainnin noin kilometrin tai kahden tarkkuudella. 1910-luvulta lähtien tähtitieteeseen nojautuvien navigointimenetelmien rinnalle nousi radiosignaalien kulkuun perustuvia paikannusjärjestelmiä. Yksinkertaisimmassa radionavigointimenetelmässä, suuntimisessa, alukseen sijoitettu vastaanotin määrittelee kahden lähtimen suunnan. Kartalle piirrettyinä nämä suuntimat muodostavat kaksi linjaa, joiden leikkauspiste ilmoittaa laivan sijainnin (*Merenkulun oppikirja I* 1969: 122–126).

Toisen maailmansodan jälkeen ovat erilaiset radiopaikannusjärjestelmät muodostuneet yhä merkittävämmäksi navigointimenetelmäksi. Näissä ns. hyperbelijärjestelmissä alus määrittää vähintään kolmelta rannikolta sijoitetulta asemalta samanaikaisesti lähetettyjen signaalien aikaerot (Varonen 1991: 14). Tällaisia järjestelmiä ovat vuodesta 1946 lähtien Länsi-Euroopassa käytetty Decca sekä Yhdysvaltain ylläpitämä Loran C. Edellisen kantomatka merelle on enintään 450 kilometriä, mutta jo 150 kilometrin etäisyyden ylityttyä tietyt virhetekijät rajoittavat käyttöä (Heikkinen & Lammi 1989: 239–248; Löfgren 1994: 68–72). Amerikkalaisjärjestelmässä radiosignaali kantaa lähes 2 000 kilometriä suuren lähetystehonsa ansiosta (Varonen 1991: 24).

Radiopaikannusjärjestelmien tarkkuudelle on vaikea antaa yksiselitteistä arvoa, sillä siihen vaikuttavat monet eri tekijät. Tarkkuutta heikentävät rannikon läheisyys, radioaaltojen heijastuminen ilmakehän ylemmistä osista, säävaihtelut sekä aluksen omat sähkölaitteet. Näiden tekijöiden summana virhe saattaa vaihdella 20 metristä aina useaan kilometriin (Herttua *et al.* 1990: 85; Löfgren 1994: 68–72).

Vuonna 1961 otettiin käyttöön koko maapallon peittävä paikannusjärjestelmä Omega. Siinä eri puolille maailmaa sijoitetut kahdeksan suuritehoista ja matalataajuista lähetintä kantavat kymmenkertaisesti Deccaan verrattuna ja tuottavat ainakin neljä kuuluvaa signaalia kaikilla merialueilla. Omegan paikannustarkkuus on normaalioloissa vain noin pari kilometriä, eli se soveltuu lähinnä valtamerien ylityksiin (Heikkinen & Lammi 1989: 259–263; Herttua *et al.* 1990: 85).

## Satelliittipaikannus

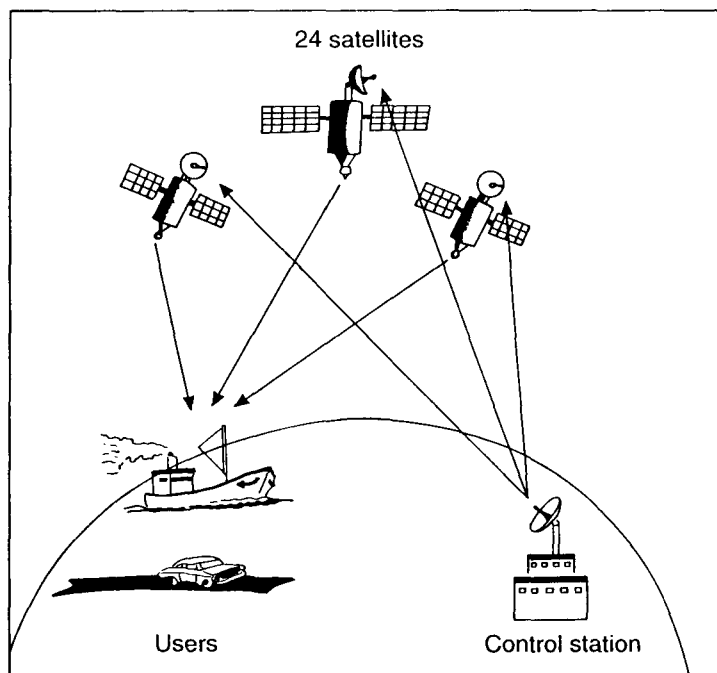
Satelliitteihin perustuvan paikannusjärjestelmän kehittäminen alkoi Yhdysvalloissa vuonna 1958. Järjestelmästä käytettiin nimitystä Transit tai NNSS (U.S. Navy Navigation Satellite System). Tavoitteena oli kehittää sotilaallisia järjestelmiä varten tarkka paikannäilymenetelmä. Transit valmistui vuonna 1964 ja Yhdysvaltain hallitus antoi sen vapaaseen siviilikäyttöön vuonna 1967. Järjestelmä käsittää seitsemän satelliittia. Paikannus perustuu yhden satelliitin ohikulun havaitsemiseen (Karioja 1986: 1–5; Varonen 1991: 25).

Suunnitelma uuden maailmanlaajuisen paikannusjärjestelmän, Navstar GPS:n (Global Positioning System), kehittämiseksi esitettiin vuonna 1973. Sille asetetun tavoitteen mukaan kaikkien liikkuvien laitteiden itsenäisen paikannuksen tulee olla mahdollista jatkuvasti, kaikkina vuorokaudenaikoina ja säästä riippumatta. Sen toiminta-alue

on koko maailma, ja sitä voidaan käyttää niin maalla, merellä, ilmassa kuin lähiavaruudessakin (Varonen 1991: 26). Ensimmäinen koosatelliitti laukaistiin radalleen vuonna 1978, josta lähtien on menetelmää voitu käyttää rajoitetusti sijaintitiedon tuottamiseen. Koesatelliittien korvaaminen varsinaisilla toimintasatelliiteilla aloitettiin vuonna 1989 ja täydessä valmiudessaan järjestelmä on ollut huhtikuusta 1995 lähtien, jolloin viimeinen nykyisin käytössä olevista 24 satelliitista laukaistiin radalleen (kuva 4) (Henttu & Lehtoranta 1993: 15–46; Vuokko 1996: 39).

GPS-järjestelmä käsittää 21 satelliittia, joita tukee kolme valmiudessa olevaa varasatelliittia. Satelliitit kiertävät maapalloa noin 20 190 kilometrin korkeudessa kuudella eri ratatasolla. Ne lähettävät navigointisignaalia, joita Maan pinnalla olevat vastaanottimet havainnoivat. Paikannämääritys perustuu satelliittietäisyyksiin. Tuntemalla etäisyys kolmeen sijainniltaan tunnettuun satelliittiin voidaan sijainti Maan pinnalla ratkaista matemaattisesti. Satelliitin ja vastaanottimen välinen etäisyys saadaan kertomalla satelliitin lähettämän radiosignaalin kulku-aika tunnetulla signaalin etenemisnopeudella, joka on noin 300 000 kilometriä sekunnissa. Paikannukseen tarvitaan siis periaatteessa vain kolmen satelliitin etäisyydet. Teknisistä syistä tarvitaan yleensä neljäskin mittaus (Henttu & Lehtoranta 1993: 22–30; Niinioja 1995: 42).

Myöskään GPS-paikannus ei ole virheetön. Suurimman käytännön virheen aiheuttaa Yhdysvaltain puolustusministeriön sotilasstrategisista syistä soveltama tarkkuuden tahallinen heikkennys, jota kutsutaan rajoitetuksi saatavuudeksi (Selective Availability, SA). Merkittävimmän luonnollisen virhetekijän muodostaa 80–400 kilometrin korkeudella maapalloa ympäröivä ionosfääri, jossa sähköisesti varatut hiukkaset vaikuttavat radiosignaalin kulunopeuteen. Myös troposfääri ja siinä esiintyvät sääilmiöt saattavat hidastaa signaalien kulkua. Mittaustarkkuuksiin vaikuttaa osaltaan myös satelliittien keskinäinen asema eli satelliittigeometria. Paras tulos saavutetaan silloin, kun satelliitit sijaitsevat tasaisesti yli koko horisontin, eli kun niiden väliset kulmat ovat mahdollisimman kohtisuoria (Jonsson 1991: 2–10; Henttu & Lehtoranta 1993: 48–57). GPS-paikannuksen mahdollisena virhelähteenä on myös ns. monitie-etenemisvirhe. Se syntyy, kun satelliittien lähettämät signaalit kimpoavat ympäriinsä ennen kuin ne saavuttavat vastaanottimen antennin. Vaikka kaikki mahdolliset virhetekijät aiheuttavat jokaiselle GPS-mittaukselle hieman epävarmuutta, ne eivät yhteenlaskettuinaakaan lisää merkittävästi kokonaisvirhettä. Käytännössä GPS määrittää sijainnin sadan metrin tarkkuudella horisontaali-



Kuva 4. GPS-järjestelmän periaate (Kansanaho et al. 1995: 9).

Fig. 4. Principle of GPS system (Kansanaho et al. 1995: 9).

ja 150 metrin tarkkuudella vertikaalisuunnassa (Henttu & Lehtoranta 1993: 48–57; Niinioja 1995: 46).

Kun GPS-signaalien havaitsemisessa käytetään vain yhtä vastaanotinta, puhutaan *absoluuttisesta* paikanmäärittämisestä. Tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä kahta tai useampaa vastaanotinta, jotka ovat lukittuina samanaikaisesti samoihin vähintään neljään satelliittiin. Tämän ns. *differentiaalisen* paikanmäärittämisjärjestelmän periaatteena on, että lisäämällä yksi vastaanotin kiinteälle maalle koordinaateiltaan tunnettuun paikkaan, mittaa se GPS-signaalin virhenäyttämät ja muodostaa niistä korjaustiedon. Tunnetussa pisteessä oleva GPS-vastaanotin toimii staattisena viitepisteinä, referensiasemana, joka erillisen radiolähettimen avulla lähettää tätä jatkuvasti päivitettävää virhekorjausviestienä samalla alueella oleville vastaanottimille. Ne voivat käyttää sitä korjaamaan oman sijaintinsa vastaavalla tarkkuudella (Jonsson 1991: 5–7; Varonen 1991: 27; Henttu & Lehtoranta 1993: 70–73).

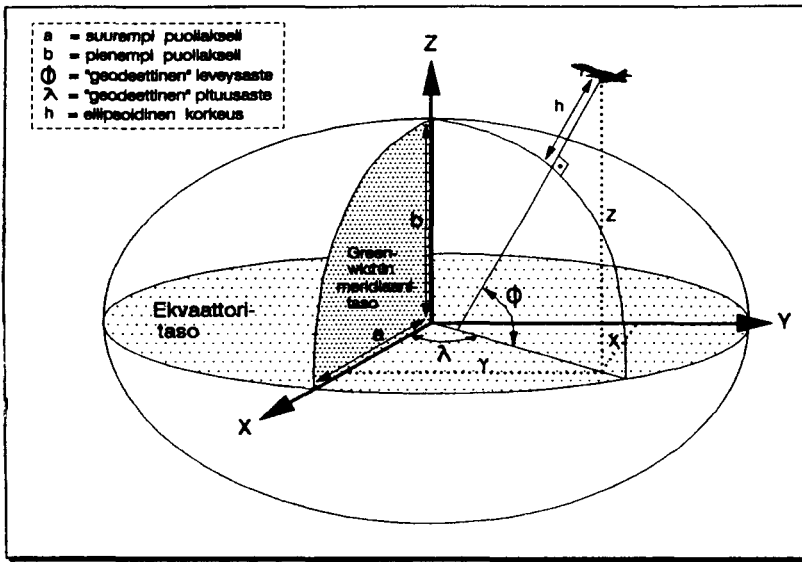
Merenkulkulaitos perusti vuonna 1991 Porkkalan Suomen (ja maailman) ensimmäisen »julkinen» differentiaalisen GPS-aseman eli DGPS-aseman. Myöhemmin on maamme etelärannikkoa täydennetty kolmella uudella DGPS-asemalla. Selkä- ja Perämerellä korjausviestit saadaan Ruotsista. Merenkulkulaitoksen rakennuttamilla DGPS-

asemilla on yleisesti saavutettu alle viiden metrin tarkkuus ja uusimmat mittaukset antavat jo alle metrin (0,8 m) korjaustarkkuuden. Vuonna 1995 Yleisradio käynnisti differentiaalisen korjaussanomien välittämisen ULA-lähetystensä yhteydessä. Palvelu kattaa koko maan ja ulottuu myös merialueille. Se on maksullista korjaustarkkuuden ollessa maksimissaan kaksi metriä (Santala 1996: 4).

Käytettäessä erikoisvastaanotinta, joka kykenee mittaamaan satelliitin lähettämän radiosignaalin kantoaallon vaihetta, on mahdollista päästä alle kymmenen senttimetrin navigointitarkkuuteen (Jonsson 1991: 4–6). Tällaisilla paikallaan olevilla vastaanottimilla saavutetaan pidemmällä havaintoajalla jopa millimetrin tarkkuus. Vaihehavaintoja hyödyntäviä menetelmiä käytetään lähinnä geodeettisissa mittauksissa (Koivula 1994: 27–31).

### WGS-84-koordinaattijärjestelmä

Satelliittien ratoja seuraamalla on saatu maapallon painovoimakentän suuret epätasaisuudet kartoitettua. Näin on luotu uusi koordinaattijärjestelmä, jossa satelliittien ratatiedot noudattavat fyysisen lakeja. Samaan aikaan käyttöön otetuilla satelliittipaikannuslaitteistoilla on voitu yksiselitteisesti osoittaa pisteitä maan pinnalla ja uudiskartoitukset on perustettu tähän maailmanlaajuiseen koordinaatistoon. Järjestelmän nimeksi on annet-



Kuva 5. Maantieteelliset (geodeettiset) koordinaatit ( $\varphi, \lambda, h$ ) ja suorakulmaiset avaruuskoordinaatit ( $X, Y, Z$ ) (Henttu & Lehtoranta 1993: 14).

Fig. 5. Geographical (geodetic) coordinates ( $\varphi, \lambda, h$ ) and geocentric cartesian coordinates (Henttu & Lehtoranta 1993: 14).

tu World Geodetic System 1984 (WGS-84) ja sen perustana on ns. kolmiulotteinen geosentrisen koordinaatisto (Ashkenazi 1988: 275–277; Kakkuri 1996: 10–13).

Tässä koordinaatistossa sijainti ilmaistaan suorakulmaisina avaruuskoordinaatein  $X, Y$  ja  $Z$ . Siinä  $Z$ -akseli on yhdensuuntainen maapallon pyörähdyksensä kanssa,  $X$ -akseli yhtyy ekvaattoritason ja Greenwichin meridiaanitason leikkaussuoraan ja  $Y$ -akseli on kohtisuorassa  $X$ - ja  $Z$ -akseleita vastaan ja positiivinen itään päin (kuva 5). Kaikilla kolmella on yhteinen origo, Maan massakeskipiste (Ashkenazi 1988: 275–277; Kakkuri 1996: 11). Vaikka kolmiulotteisen koordinaatiston kiistattomista eduista hyötyvät mm. lentoliikenne sekä satelliitti- ja avaruusnavigointi, useimmille käyttäjille järjestelmä on varsin epäkäytännöllinen. Esimerkiksi korkeuden suhteen merenpinta ja WGS-ellipsoidipinta eivät yhdy muualla kuin pohjoisnavalla erojen ollessa suurimmillaan 70 metriä (Ashkenazi 1988: 275–277; Ollikainen 1993: 9).

GPS määrittää sijaintinsa WGS-84-koordinaatistossa, kun taas Suomessa kansallinen tasokoordinaattijärjestelmä on KKKJ. Järjestelmät poikkeavat toisistaan mm. vertausellipsoidin ja koordinaatiston peruspisteen suhteen. KKKJ on määritelty eurooppalaisen ED-50-koordinaattijärjestelmän avulla ja se poikkeaa systemaattisesti noin 200 metriä sekä ED-50- että WGS-84-järjestelmästä. Haluttaessa hyödyntää GPS-paikannuksen tuoma tarkkuus on karttapohjien joko oltava WGS-84-koordinaatistossa tai nämä koordinaatit on muunnettava KKKJ:hin. Numeerisia WGS-84-karttapoh-

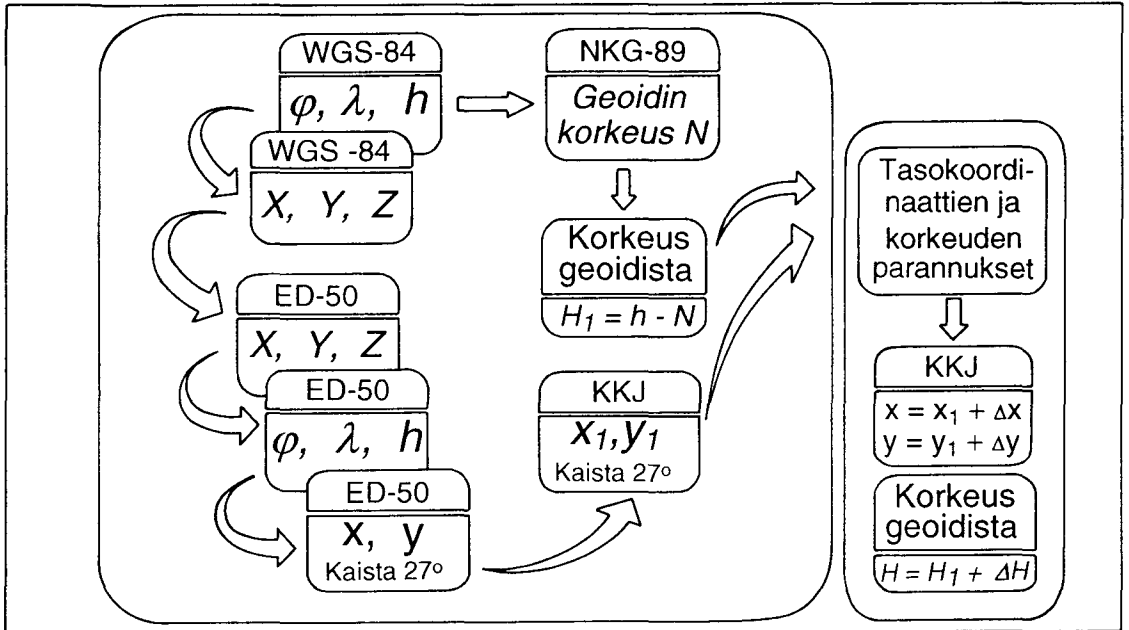
ja on laadittu jo mm. useimmista Suomen rannikkoalueiden merikartoista sekä myös kaupunkien katukartoista (Ollikainen 1993: 4).

Koordinaattimuunnokseen WGS-84-järjestelmästä KKKJ:hin on kaksi tapaa: sijainnin korjaus määrättyyn pituus- ja leveysasteeseen tai matemaattinen muunnos. Edellisessä menetelmässä on huomattava, että korjauksen virhe kasvaa siirryttäessä pisteestä etäämmälle. Matemaattinen muunnos edellyttää useiden kaavojen sekä erilaisten muunnosparametrien käyttöä. Tässä WGS-84-järjestelmän suorakulmaiset koordinaatit muunnetaan ensin ED-50-järjestelmään ja edelleen sen maantieteellisiksi koordinaateiksi, minkä jälkeen nämä muunnetaan Gaussin-Krugerin projektion mukaisiksi tasokoordinaateiksi. Lopuksi ne muunnetaan KKKJ:hin (kuva 6) (Ollikainen 1993: 9–17).

## Lopuksi

GPS-järjestelmä kehitettiin alun perin sotilaskäyttöön, mutta jo varsin varhain 1980-luvun alussa sen käyttömahdollisuudet oivallettiin siviilipuolella, erityisesti geodeettisissa sovelluksissa. Nyt, järjestelmän ollessa täydessä laajuudessaan, muodostavat erilaiset navigoinnin sovellukset, kuten hälytysajoneuvojen ja rekkaliikenteen ohjausjärjestelmät, suurimman käyttöalueen. Vaikka absoluuttisen navigoinnin tarkkuus, noin sata metriä, riittää huviveneilyyn ja ajoneuvonavigoinnin sekä paikkatietojärjestelmien tarpeisiin, on differentiaalinen menetelmä entisestään laajentanut ja monipuolistanut GPS-sovelluksia. Nykyisin GPS:ää





Kuva 6. WGS-84-järjestelmän ja KKJ:n välinen koordinaattimuunnos (Ollikainen 1993: 16).

Fig. 6. Coordinate transformation from the WGS-84 system to KKJ system (Ollikainen 1993: 16).

hyödynnetään jo varsin arkisesti, kuten kaivonkansien etsinnässä talvisen lumipeitteen alta, autovarkauksien estojärjestelmissä, kalastus- ja marjastuspaikkojen sijainnin määrittämisessä sekä erävaeltajien suunnistusvälineenä.

Menetelmän sovellusmahdollisuudet avaavat uusia näkymiä myös maantieteessä. GPS soveltuu erityisesti tutkimusten apuvälineeksi, sillä kenttätutkimuksissa havaintoaineistoa voidaan täydentää näytepisteiden tarkoilla sijaintitiedoilla aiempaa vaivattomammin ja tarkemmin. GPS:ää hyödynnetään jo mm. porojen laidunten inventoinneissa (Kumpula *et al.* 1996), puuston saastevaurioiden seurannassa, metsäinventoinneissa ja jään liikkeen tutkimuksessa. Biologiassa sitä käytetään eläinten pesien ja omaleimaisten kasvillisuusalueiden paikanmäärittämisessä. GPS soveltuu myös erilaisten geoprofiilien sijainnin määrittäksiin.

Omien kokemusten mukaan GPS sopii kenttätutkimusten apuvälineeksi hyvin. Selvitin differentiaalista GPS-paikannuslaitteistoa sekä kaikuluotainta käyttäen kulutus-kerrostumiserajan eli jyrkänpartaan sijaintia Oulujärven eri rantaosuuksilla. Saadun sijaintitiedon tarkkuudeksi voitiin aiempien koemittausten pohjalta arvioida kymmenen metriä. Tarkemmalla korjaussanomalla voidaan luotettavasti saavuttaa kahden metrin tarkkuus. Menetelmän kiistattomiksi eduiksi muodostuivat sijaintitiedon tarkkuuden ohella sen nopeus ja vai-

vattomuus sekä tiedonsaannin luotettavuus radioyhteyttä rajoittavien esteiden puuttuessa.

GPS:n merkittävin käytännön ongelma on, että se ei määritä sijaintiaan suoraan kansallisten karttasten käyttämässä koordinaattijärjestelmässä. Koordinaattien korjaaminen WGS-84-koordinaattijärjestelmästä KKJ:hin on monimutkainen prosessi useine kaavoineen ja erilaisine muunnospaareineen. Lisäksi kaavojen vakiot muuttuvat siirryttäessä alueelta toiselle. Kansallisten koordinaattijärjestelmien korvaaminen WGS-84:llä olisi perusteltua, mutta tämä aiheuttaisi suuria muutoksia koko kartta-alalla. Runkoverkko olisi mitattava uudelleen, karttatietokannat muuttuisivat ja paikkatietoa sisältävien rekisterien koordinaatit olisi muunnettava uuteen järjestelmään. Koska kuitenkin jo nyt kansainvälisessä meri- ja ilmaliiikenteessä on siirrytty turvallisuussyistä käyttämään GPS-pohjaista navigointijärjestelmää, on mahdollista, että tulevaisuudessa siirrytään yhteiseen koordinaattijärjestelmään.

## KIRJALLISUUS

- Ashkenazi, Vidal (1986). Coordinate systems: how to get your position very precise and completely wrong. *The Journal of Navigation* 39: 2, 269–278.
- Eco, Umberto (1994). *Edellisen päivän saari*. 488 s. WSOY, Juva.

- Ericsson, Christoffer H., Leena Miekkavaara, John Nurminen & Nils-Erik Raurala (1988). *Meritie*. 160 s. John Nurminen, Helsinki.
- Heikkinen, Helge & Pauli J. Lammi (1989). *Merenkulkijan opas*. 544 s. WSOY, Porvoo.
- Henttu, Pekka & Väinö K. Lehtoranta (1993). *GPS – maailmanlaajuinen satelliittinavigointijärjestelmä* (Alkuperäisteos Jeff Hurn: *GPS – A guide to the next utility* (1989). Trimble Navigation, Sunnyvale). 96 s. Naviprop, Helsinki.
- Herttua, Ilkka, Henrik Weckström & Raimo Ylönen (1990). GPS-navigointijärjestelmä. *Tekniikan maailma* 1990: 9, 82–85.
- James, Preston E. & Geoffrey J. Martin (1981). *All possible worlds – a history of geographical ideas*. 2. p. 508 s. John Wiley & Sons, New York.
- Jonsson, Bo (1991). Korttintroduktion till GPS. *Tekniska Skrifter – Professional Papers. LMV-rapport* 1991: 4. 17 s.
- Kakkuri, Juhani (1996). Miksi Suomi ei siirry WGS-84:ään? *Positio* 1996: 1, 10–13.
- Kansanaho, A., T. Ilander & H. Toivonen (1995). GPS positioning and desktop mapping – Applications to environmental monitoring. *Säteilyturvakeskus, YTO, tutkimusraportti* 88. 27 s.
- Karioja, Pentti (1986). Satelliittien käyttö mittauksiin. Lisensiaatintutkielma. Sähkötekniikan laitos, Oulun yliopisto.
- Koivula, Hannu (1994). GPS:n käyttömoodit. *Teknillinen korkeakoulu, Maanmittaustekniikan laitos, Geodesian ja kartografian laboratorion julkaisu* 24/1994. 51 s.
- Kumpula, Jouko, Alfred Colpaert, Timo Kumpula & Mauri Nieminen (1996). Poronhoitoalueen pohjoisosan porolaidunten inventointi. *Riista- ja kalatalouden tutkimuslaitos, Porotutkimusasema & Oulun yliopiston maantieteen laitos, tutkimusraportti*. 27 s.
- Löfgren, Kaj (1994). Veneilijän merenkulkuoppi II: Rannikonavigointi. *Suomen navigaatioliiton julkaisusarja* 8 a. 4. p. 171 s.
- Merenkulun oppikirja I–II* (1969). 275 s. Ammattikasvatushallitus, Helsinki.
- Niinioja, Seppo (1995). Toteuta satelliittinavigointijärjestelmä. *Processori* 1995: 4, 41–47.
- Ollikainen, Matti (1993). GPS-koordinaattien muuntaminen Kartastokoordinaateiksi. *Geodeettinen laitos, tiedote* 8. 31 s.
- Ryman, Anders (1996). Etelänmeren ulapat ylitettiin jo 3500 vuotta sitten. *Tiede* 2000 7, 34–42.
- Santala, Jaakko (1996). Satelliittipaikannuksen nykytila. *Maanmittaus* 1996: 1–2, 3–5.
- Singer, Charles, E. J. Holmyard, A. R. Hall & Trevor I. Williams (1957). *A history of technology III: from the Renaissance to the industrial revolution c1500–c1700*. 622 s. Clarendon, Oxford.
- Suomen Kartasto*, vihko 112 Suomen kartoitus. 40 s. Helsinki 1984.
- Tikka, Martti (1977). *Käytännön geodesia: mittausmenetelmät* 291. 3. p. 298 s. Otapaino, Espoo.
- Tuominen, Juha (1993). GPS mittaa maalla ja merellä. *Positio* 1993: 1, 4–7.
- Varonen, Jukka (1991). Elektroninen navigointi. *Suomen navigaatioliiton julkaisusarja* 6 a. 38 s.
- Vuokko, Jouko (1996). Kokemuksia Garmin 45 -navigaattorista geologisissa kentätöissä. *Geologi* 48, 39–42.