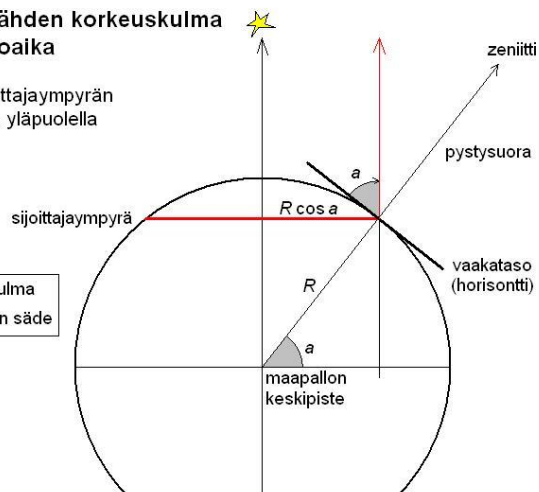


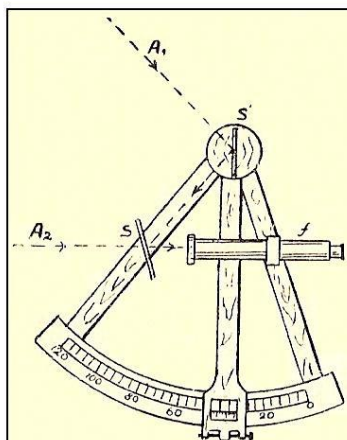
a) Mitataan tähden korkeuskulma ja havaintoaika

Tähti on sijoittajaympyrän keskipisteen yläpuolella

a = korkeuskulma
 R = maapallon säde

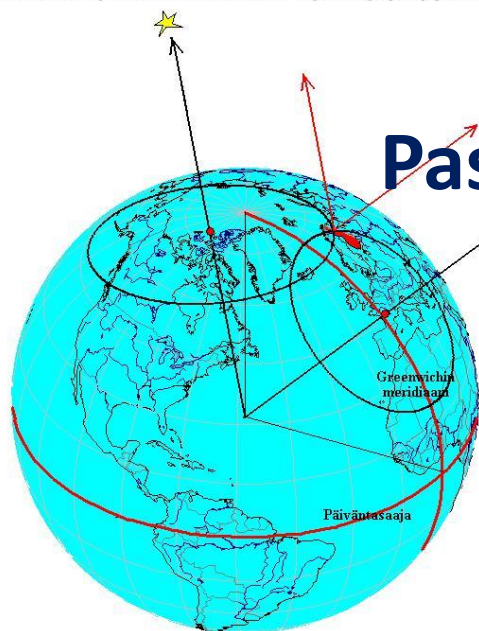


c) Sekstantti

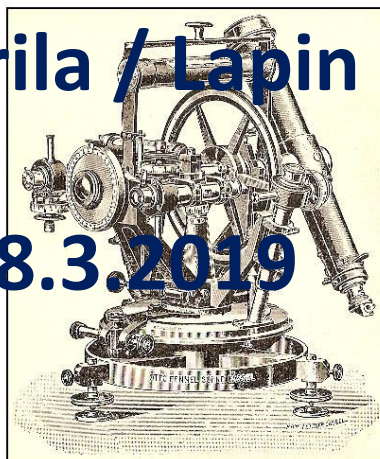


SATELLIITIPAIKANNUS (GNSS)

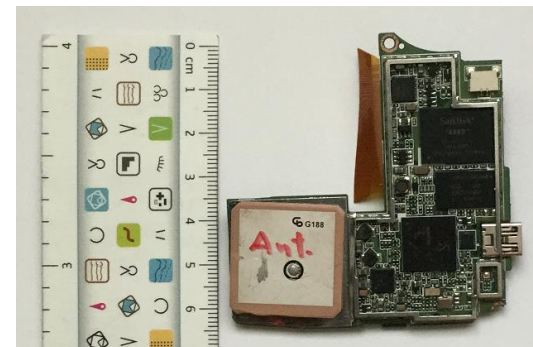
b) Havaintopaikka on kahden sijoittajaympyrän leikkauspisteessä



d) Universaali (teodoliitti)



18.3.2019



Historiaa, nykypäivää ja näköaloja

- Kun Neuvostoliitto laukaisi ensimmäisen satelliitin 1957, satelliitin lähettämää signaalia tutkittiin heti myös paikannus-tarkoituksessa
- 1960-luvun alkupuolella USA kehitti paikannukseen Transit Doppler -järjestelmän
- USA aloitti GPS-järjestelmän kehitystyön 1970-luvulla ja sen toiminnallinen laajuus saavutettiin 1994
- Nyt eletään GNSS-aikaa, kun käytössä on useita paikannus-satelliittijärjestelmiä ja niiden käyttöä tukevia järjestelmiä
- Paikannus on arkipäiväistynyt ammattikäytöstä tavallisten ihmisten elämän oheistekniikaksi
- **Ammattikäytössä on tarpeellista tuntea ja huomioida satelliittipaikannuksen mittaustapojen ja sovellusten monipuolinen käyttö → käytetään tehtävän mukaista mittaustapaa**
- Tulevaisuudessa paikannuksen luotettavuus ja tarkkuus paranevat edelleen

Paikannuksen infrastruktuuri

**GNSS = Global Navigation
Satellite System**

GPS

Galileo

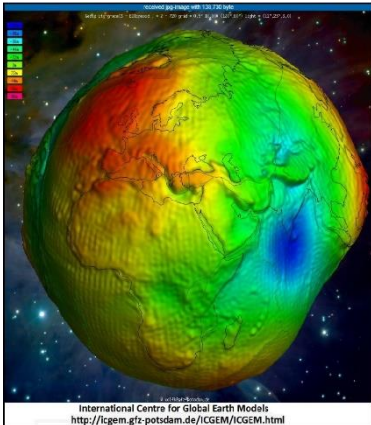
BeiDou

Glonass

Muut

Laitevalmistajat

Geoidimallit



**Internet-
palvelut**

Aikajärjestelmät

**Tieto-
liikenne-
satelliitit**

**Paikannus-
satelliitit**

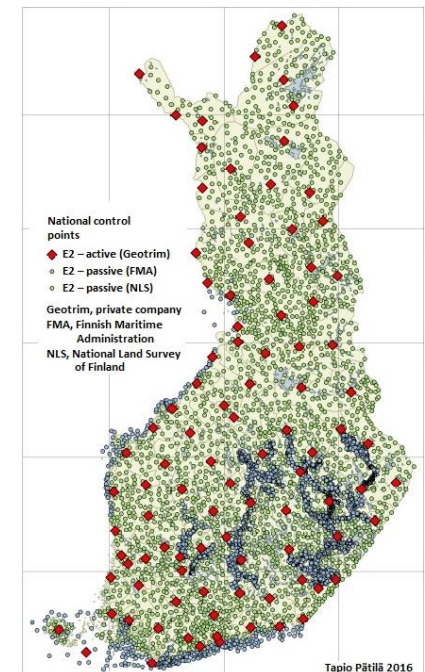
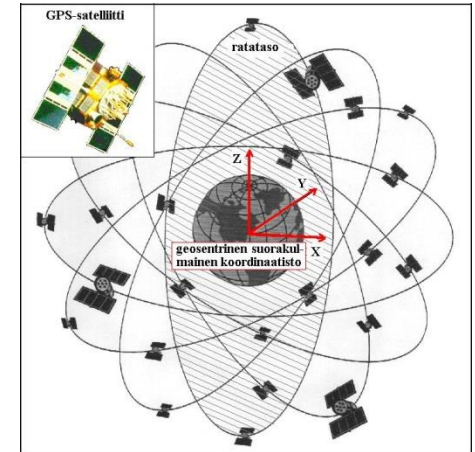
**Satelliittien
seuranta-
järjestelmät**

**Globaalit
koordinaatti-
järjestelmät**

**Globaalit
korkeusjärjestelmät**

Tukiasemaverkot

Korjauspalvelut



Globaalit koordinaattijärjestelmät

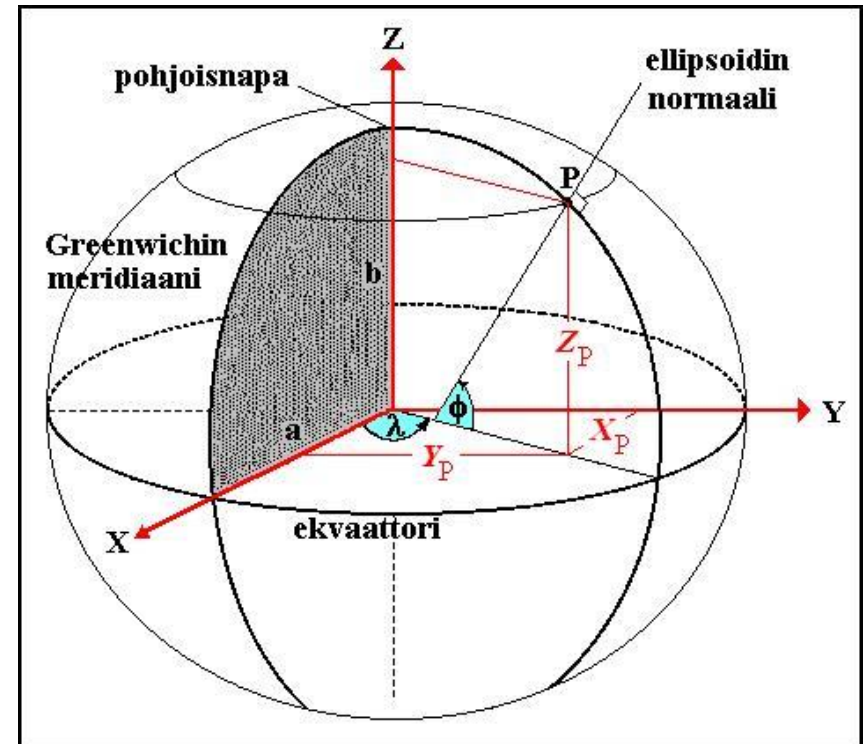
Satelliittimittaukset tehdään aluksi globaaleissa koordinaattijärjestelmissä:

ITRS, GRS80, WGS84 ja muut

- Kulmamittoja käyttävä maantieteellinen koordinaatisto (2D)
 - Leveyskulma (ϕ) ja pituuskulma (λ)
- Maakeskinen eli geosentrinen suorakulmainen koordinaatisto (3D; X, Y, Z)

Yleensä näistä koordinaateista siirrytään karttaprojektion kautta suorakulmaisiin **karttakoordinaatteihin**

ϕ 'fii', λ 'lambda'



WGS84

ETRS89-järjestelmä

Maanmittauksessa mittaukset sidotaan yleensä kiintopisteiden ja tukiasemien avulla oman maan koordinaattijärjestelmään. Suomen koordinaattijärjestelmä on globaaleihin koordinaattijärjestelmiin perustuva **ETRS89 ja sen suomalainen realisaatio EUREF-FIN**.

Yleensä maanmittauksen mittauksissa käytetään karttaprojektiossa (UTM tai Gauss-Krüger) määriteltyjä suorakulmaisia **karttakoordinaatteja**.

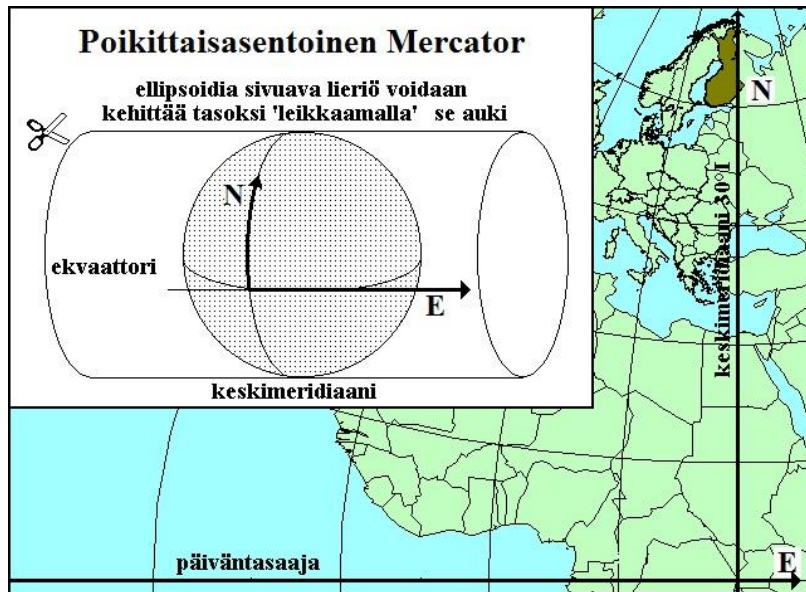
- **UTM-projektiossa:**

- 6° kaistat, mutta Suomessa käytetään tätä laajempaa kaistalla 35, jolla Suomi pääosin sijaitsee
- ETRS-TM35FIN -koordinaatit
- Kaistan reunoilla melko suuri mittakaavavirhe
- Käytetään valtakunnallisissa paikkatietoaineistoissa

- **Gauss-Krügerin projektiossa:**

- 1° kaistajako, jolloin Suomen alueella tarvitaan 13 kaistaa
- GK_n-koordinaatit, missä n on keskimeridiaani
- Ei juurikaan mittakaavavirhettä
- Käytetään tarkoissa maastomittauksissa ja kiinteistötoimituksissa

Suorakulmaiset karttakoordinaatit



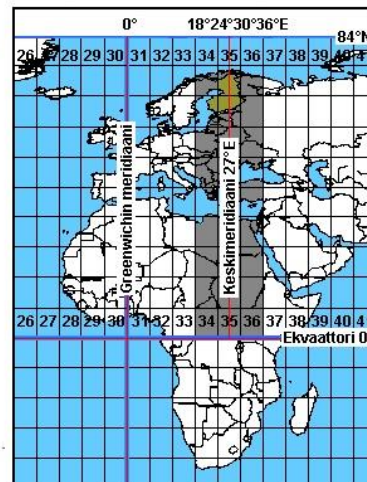
ETRS-TM35FIN -koordinaatit

pohjoiskoordinaatti

N = 692388 m ja E = 538788 m

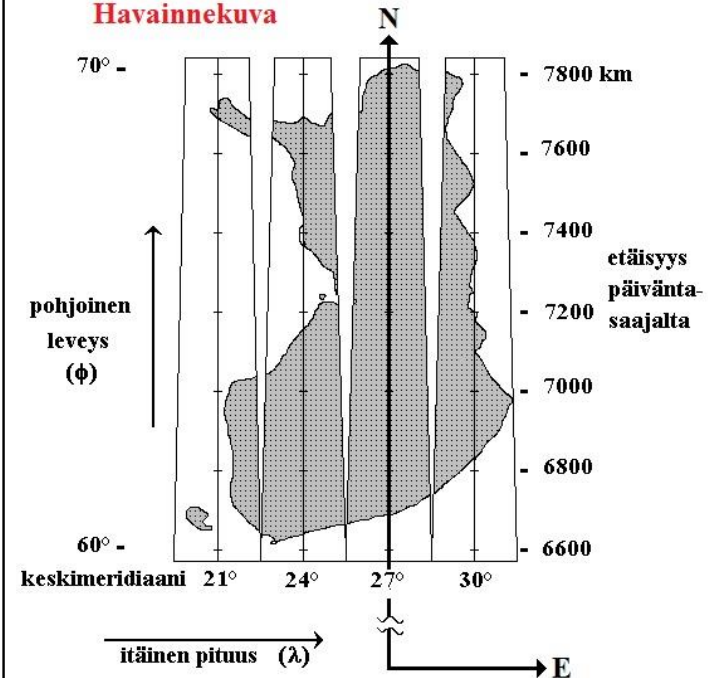
itäkoordinaatti

Ei kaistatunnusta



ETRS-GKn -koordinaatit

Havainnekuva



pohjoiskoordinaatti

itäkoordinaatti

N = 691936 m ja E = 27 524978 m

kaistan tunnuksena keskimeridiaani

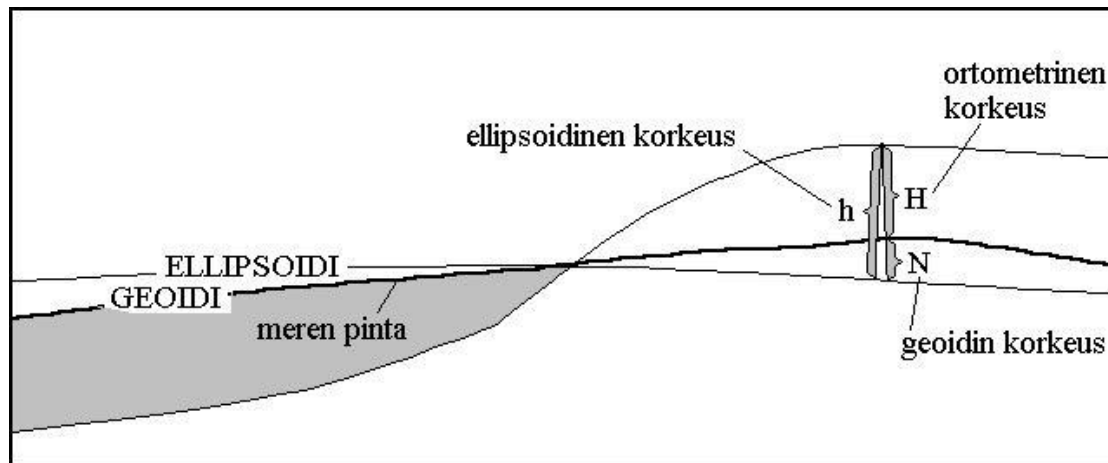
**Keskimeridiaanilla
E = 500000 m**

ETRS-GKn-kaistoja on 13

Kahdenlaisia korkeuksia

Satelliittipaikannin mittaa **ellipsoidisia korkeuksia**, jotka pitää muuntaa **geoidimallin** avulla yleisesti käytetyiksi **ortometrisiksi korkeuksiksi**

- Ortometrinen korkeus (H) mitataan merenpinnan jatkeelta eli geoidista (**vaaittu korkeus**)
- Ellipsoidinen korkeus (h) mitataan vertausellipsoidin pinnasta (**satelliittipaikannuksen korkeus**)
- Geoidin korkeus (N) saadaan geoidimallilta: N2000-korkeusjärjestelmässä käytetään geoidimallia **FIN2005N00**



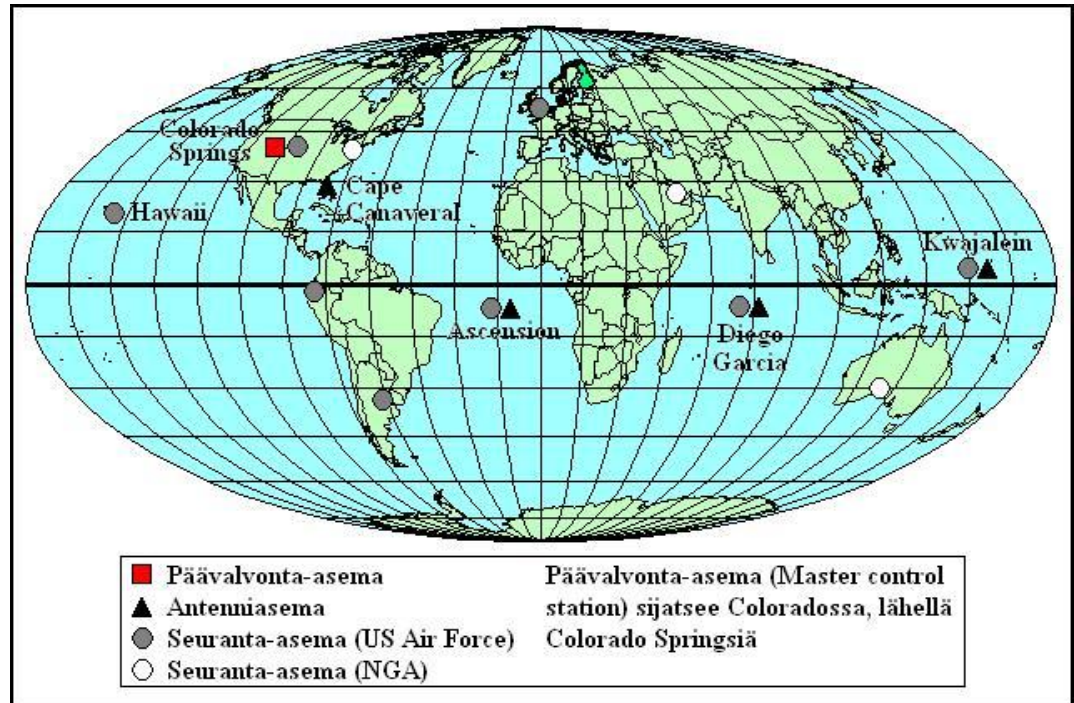
GPS on satelliittipaikannuksen selkäranka

GPS = Global Positioning System

- USA:n ylläpitämä
- Käyttövalmis 1994
- Toiminnallinen laajuus 21 + 3 satelliittia
- Satelliittilohko
- Valvontalohko
- Käyttäjälohko
- Koordinaattijärjestelmä WGS84

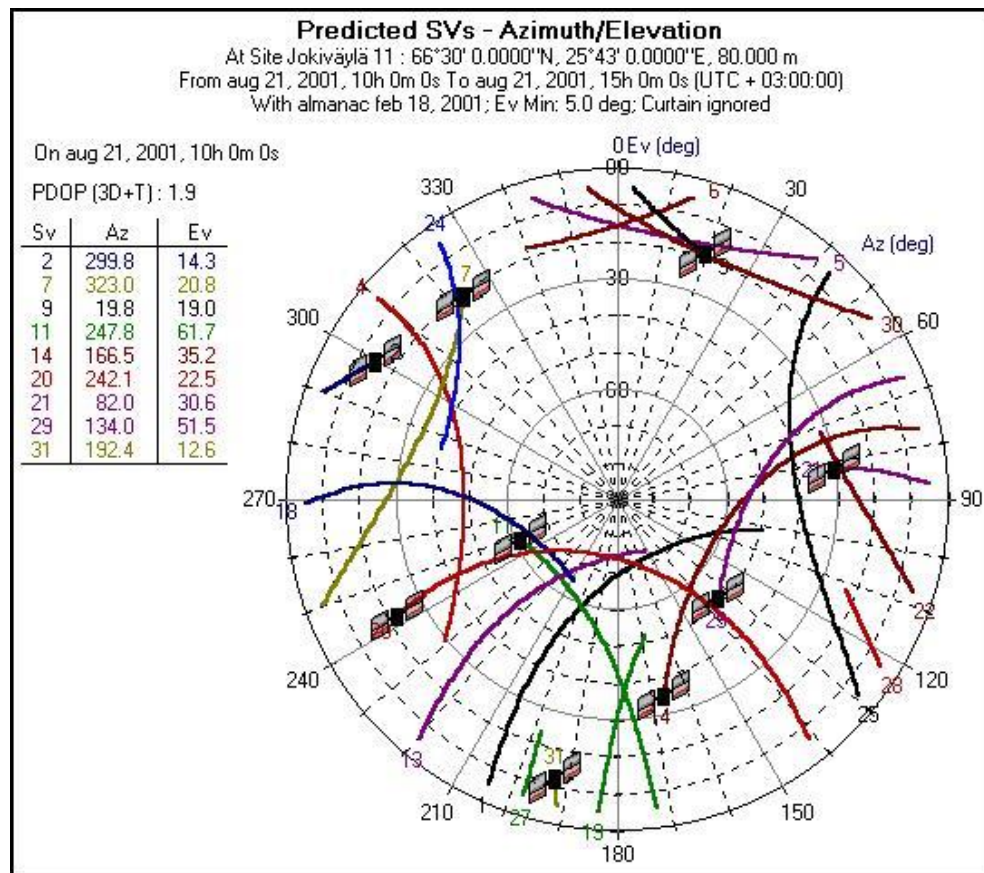
GPS-järjestelmää kehitetään. Sen tulevaisuus on varmistettu 2030-luvulle saakka

Maanpäälliset valvonta- ja seuranta-asemat ovat oleellinen osa paikannussatelliittijärjestelmää



Satelliittien ratojen esittäminen

- **Polaarinen napapiirros**
- Havaintsija ja zeniitti ovat keskellä piirrosta
- Uloin kehä on horisontti
- Az = atsimuutti
- Ev = korkeuskulma
- Pohjois-Suomessa on aukko satelliittisaatavuudessa pohjoisessa
- Lähellä horisonttia olevia satelliitteja ($Ev < 10^\circ - 15^\circ$) ei käytetä mittauksissa



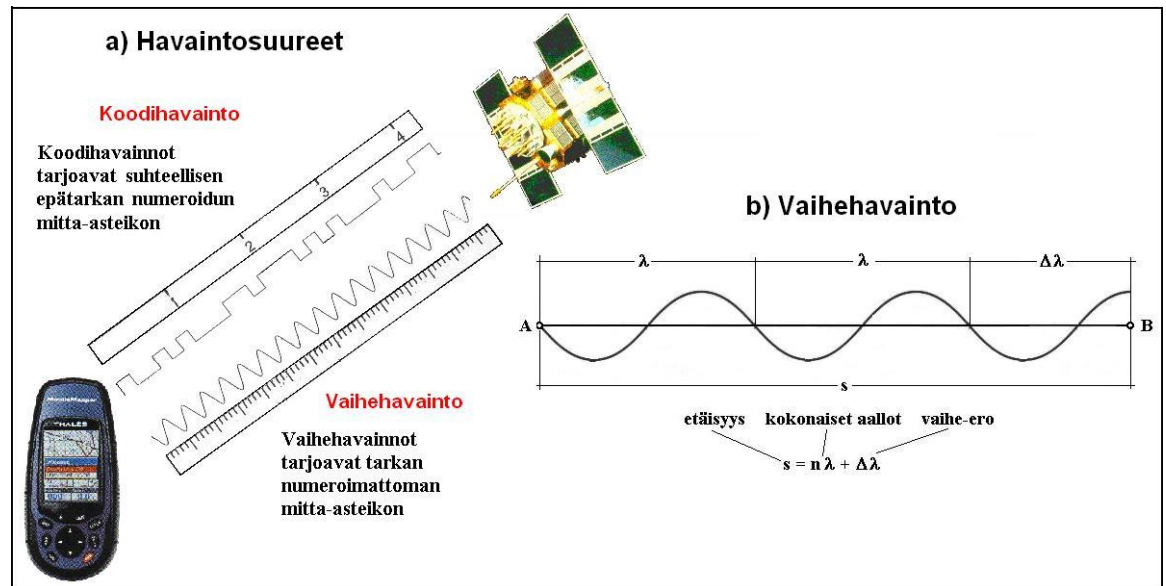
Puhutaan **satelliittisaatavuudesta**, kun tarkoitetaan mittaukseen kelvollisten satelliittien lukumäärää

Paikannussignaalit ja havaintosuureet

- Kantoaallot (L1, L2 ja L5)
- Paikannuskoodit (C/A ja P)
- Navigointiviesti
- Koodi → koodi-havainto
- Kantoaalto → vaihehavainto
- Kantoaalto → Doppler-havainto

Doppler-havainto kuvaa satelliitin lähenemis- tai loittonemisnopeutta vastaanottimen suhteen

Vaikka signaalia ja havaintosuureita kuvaavat nimitykset liittyvätkin GPS-järjestelmään, kuvaavat ne muidenkin paikannussatelliittien toimintaa



Paikannussignaalin avulla mitataan etäisyyksiä satelliitteihin ja toisiin vastaanottimiin

Paikka lasketaan satelliittien tai toisten vastaanottimien suhteen

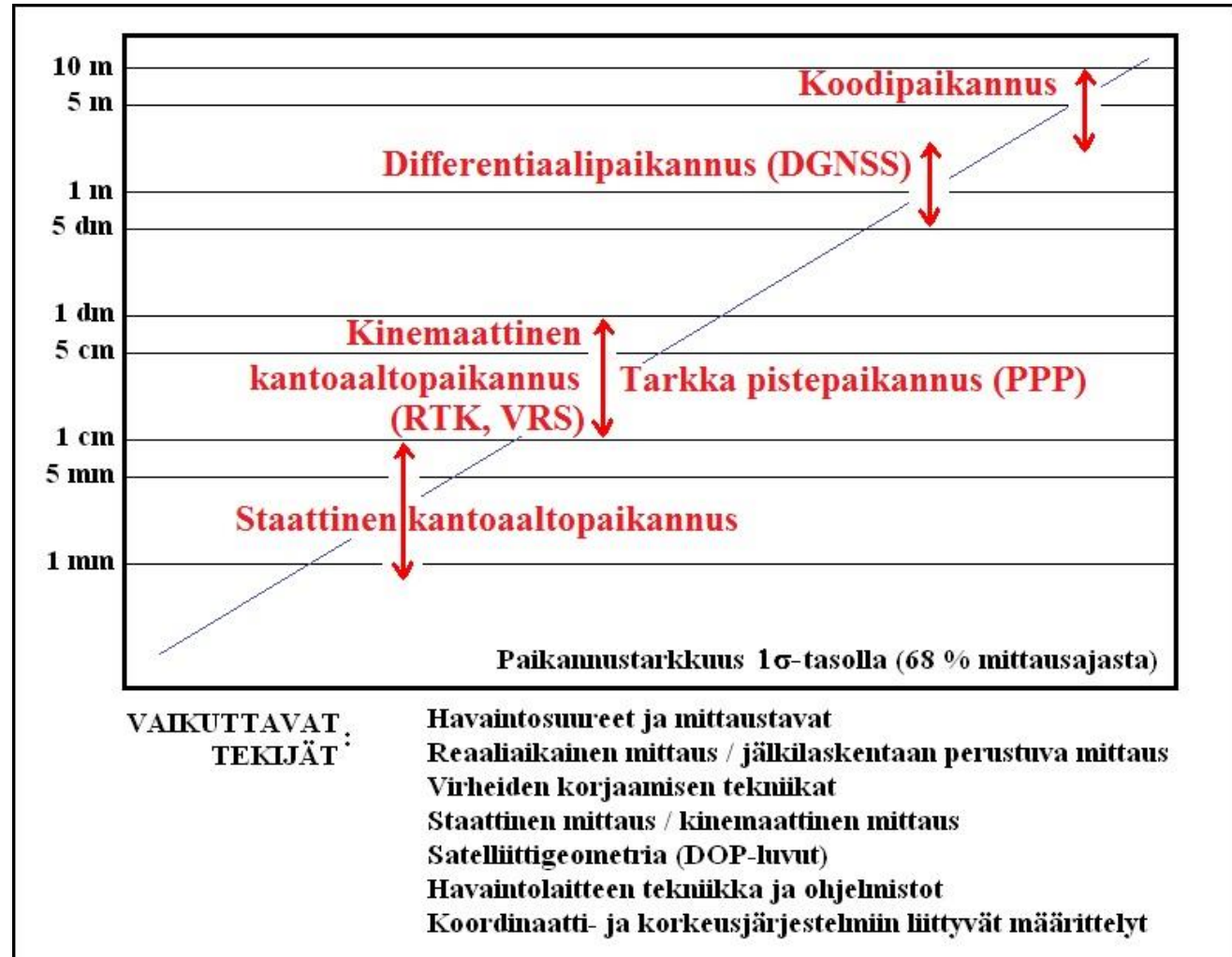
Satelliittipaikannuksen mittaustavat

Absoluuttinen paikannus

- Koodipaikannus
- Tarkka piste-paikannus (PPP)

Suhteellinen paikannus

- Differentiaali-paikannus (DGNSS)
- Kantoaaltopaikannus (kinemaattinen tai staattinen)



Kuinka tarkkaa mittausta tarvitaan?

Tarkkuustaso	Paikannuksen/mittauksen tarkoitus
100 m	
	Halutaan tietää yleisesti missä ollaan
10 m	
	Halutaan pysyä reitillä (tie, katu, vesiväylä) ja löytää haluttu kohde
1 m	
	Halutaan kerätä paikkatietoja kartoitusta ja tutkimusta varten
0.1 m	
	Halutaan kartoittaa maastoa tarkasti ja ohjata rakentamista
0.01 m	
	Halutaan tehdä tarkkoja geodeettisia ja geofysikaalisia mittauksia ja ohjata vaativien kohteiden rakentamista
0.001 m	
	Halutaan tehdä tieteellisiä tutkimuksia ja mitata erityiskohteita
0.0001 m	

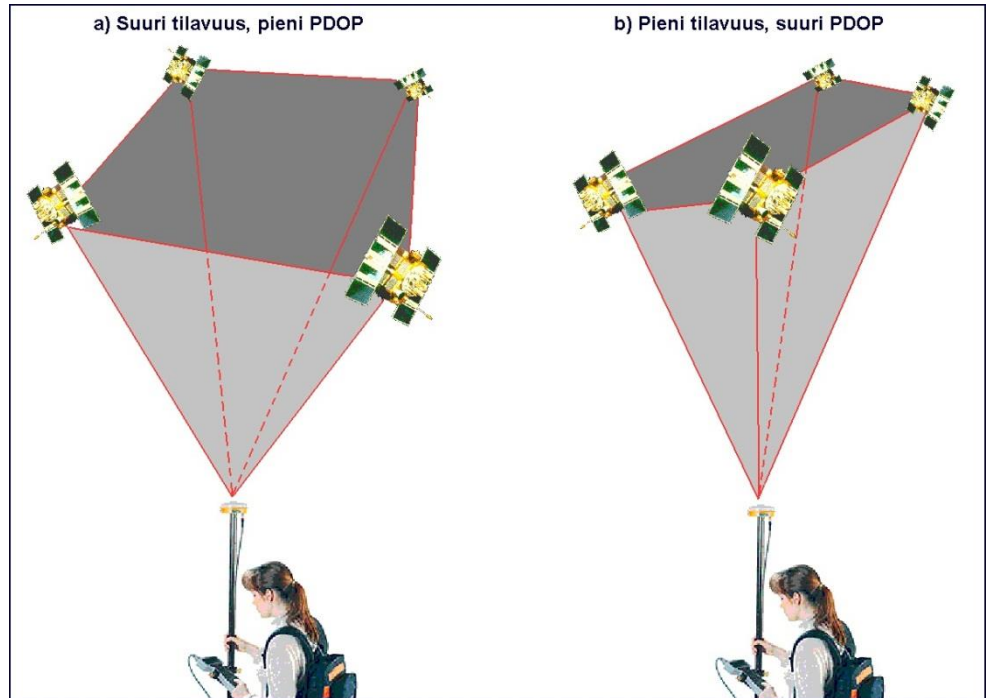
DOP-luvut

DOP = Dilution Of Precision, tarkkuuden epävarmuus

**DOP-luvut kuvaavat satelliitti-
geometrian vaikutusta
paikannuksen tarkkuuteen**

Satelliittigeometria tarkoittaa
satelliittien lukumäärä ja
sijaintia paikantimeen nähden

**HDOP, VDOP, PDOP, TDOP ja
GDOP**



Pieni DOP-luku on hyvän satelliittigeometrian merkki. Havaittavien satelliittien tulee olla selvästi horisontin yläpuolella. Satelliitit eivät saa olla samalla suoralla tai pienialaisessa ryhmässä. Ainakin yhden satelliitin pitää olla lähellä zeniittiä

Etäisyydenmittauksen tarkkuus

Etäisyydenmittauksen virhebudjetti

Virhelähde	Absoluuttinen paikannus (GNSS)			DGNSS
	Systemaattinen virhe / m	Satunnainen virhe / m	Yhteensä / m	Virhe / m
Ratatiedot	2.1	0.0	2.1	0.1
Satelliitin kello	2.0	0.7	2.1	0.1
Ionosfääri	4.0	0.5	4.0	0.2
Troposfääri	0.5	0.5	0.7	0.2
Monitie-heijastus	1.0	1.0	1.4	1.4
Vastaanotin	0.5	0.2	0.5	0.5
Yhteensä	5.1	1.4	5.3	1.5

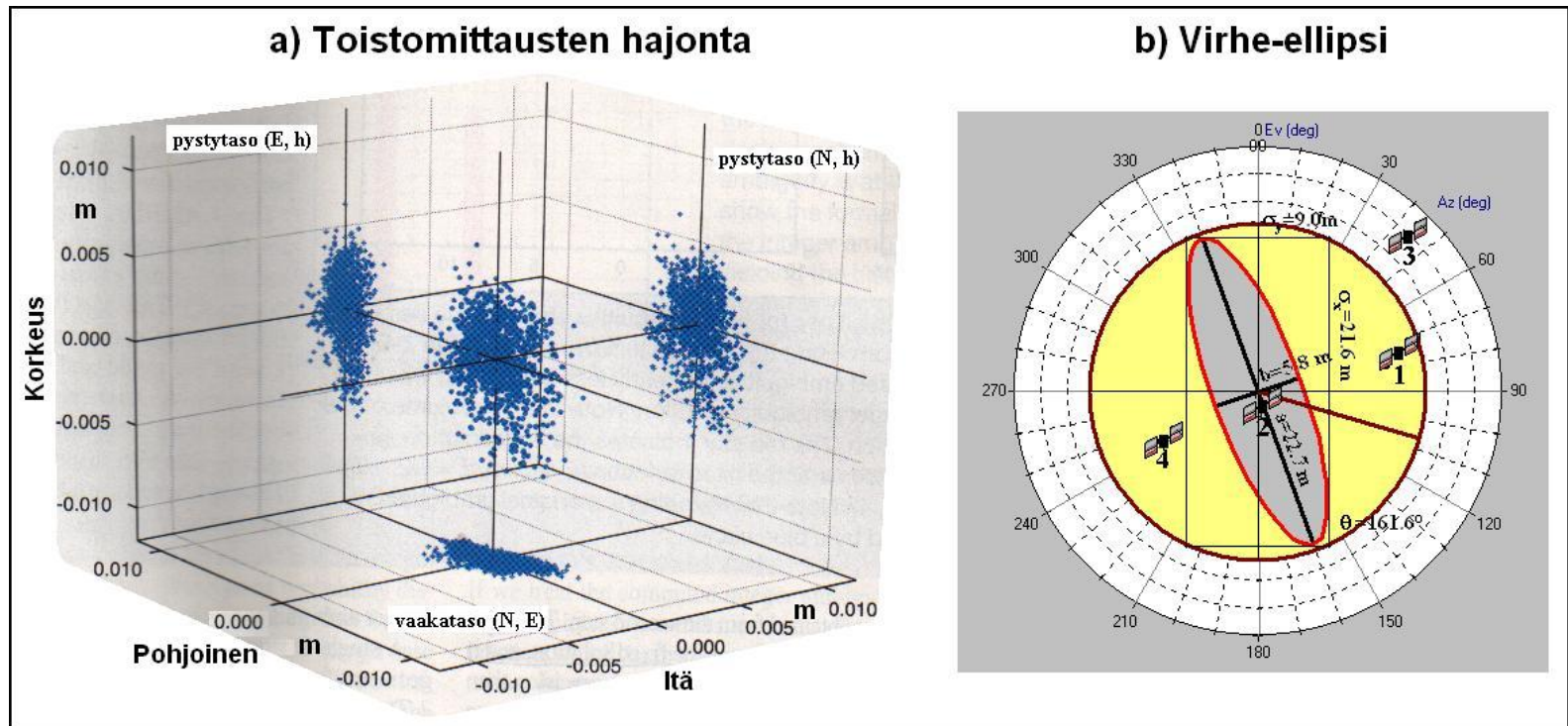
**Osavirheet yhdistetään neliöllisesti,
myös systemaattiset virheet**

1 σ -taso (68 %)

Paikannustarkkuus

paikannustarkkuus = DOP-luku x etäisyydenmittauksen tarkkuus

Paikannustarkkuutta voidaan tutkia kokeelliset, teoreettisesti ja eri näkökulmia yhdistelemällä



Kokeellinen näkökulma

Teoreettinen näkökulma

Mittaustapojen vertailua

Mittaustapa	Havainto-suureet	Paikan laskenta	Virheiden hallinta	Tarkkuus
Koodi-paikannus	C/A	Satelliittien suhteen	Kalman-suodatus ja toisto	5 – 10 m
Differentiaali-paikannus	C/A	Satelliittien suhteen	Tukiasemakorjaus, mallintaminen ja toisto	0.5 – 5 m
Kantaaalto-paikannus	L1, L2, L5	Vertailuvastaaottimien suhteen	Erotushavainnot, mallintaminen ja toisto	< 0.05 m

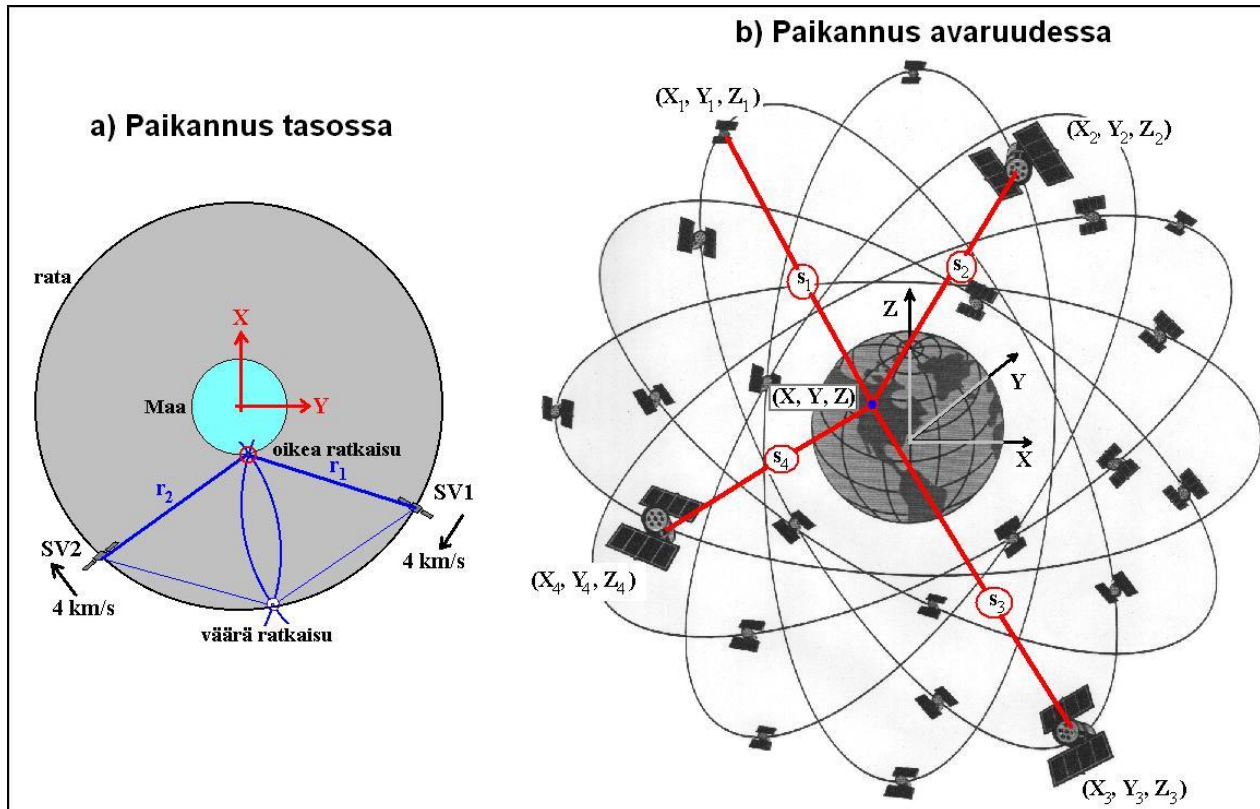
Tarkkuusarvio on esitetty 1σ -tasolla (68 % mittausajasta). Arvio on vain suuntaa-antava

Mittaustapojen käyttö

- **Koodipaikannusta** käyttävät eri alojen harrastajat ja ammattilaiset liikkueessaan jalan, autolla tai veneellä (→ **navigointi**)
- **Differentiaalipaikannusta** käytetään paikkatietoja kerättäessä, merenmittauksessa, metsätaloudessa ja ammattimaisessa auto- ja laivaliikenteessä (→ **kartoitus, navigointi**)
- **Kantaaaltopaikannusta** käytetään geofysiikassa, geodesiassa, kartoitusmittauksissa, rakentamisen mittauksissa ja koneohjauksessa (→ **geodesia, maanmittaus**)

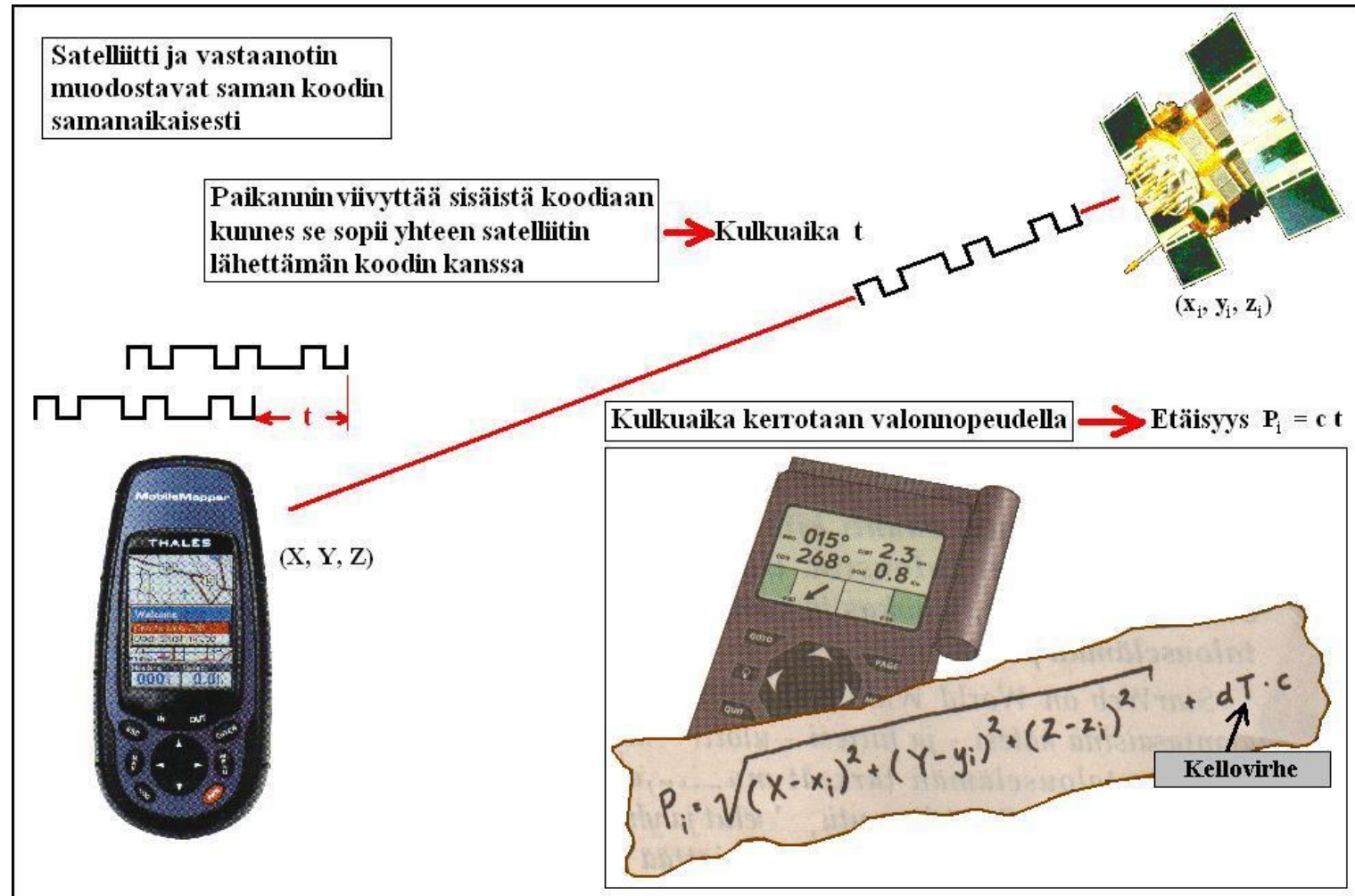
Koodipaikannuksen periaate

Mitataan yhdellä vastaanottimella ilman korjauspalveluita



Geometrian vuoksi kolme mittaus riittäisi periaatteessa. Paikantimen kellon käyntivirheen määrittämiseksi tarvitaan kuitenkin vähintään neljä mittaus.

Paikannuskoodi ja signaalin viivytys



Tarkka pistepaikannus (PPP)

- **PPP = Precise Point Positioning**
- Absoluuttista paikannusta eli mittausta yhdellä vastaanottimella ilman korjauspalveluita
- Paikan laskennassa käytetään tarkkoja satelliittien ratatietoja ja kellokorjauksia, Maan asentoparametreja sekä kahdella tai useammalla taajuudella tehtyjä koodi- ja vaihehavaintoja
- Havaintoajat ovat pitkiä, vähintään kymmeniä minuutteja, jopa tunteja, ja paikka lasketaan jälkikäteen
- Mittauksissa on mahdollista päästä jopa senttimetriluokan tarkkuuksiin
- Tavoitteena on tarkka, senttimetriluokan paikannus reaaliajassa
- **Ongelmana on muun muassa maankuoren liikkeiden hallinta ja muunnokset paikallisiin koordinaattijärjestelmiin**

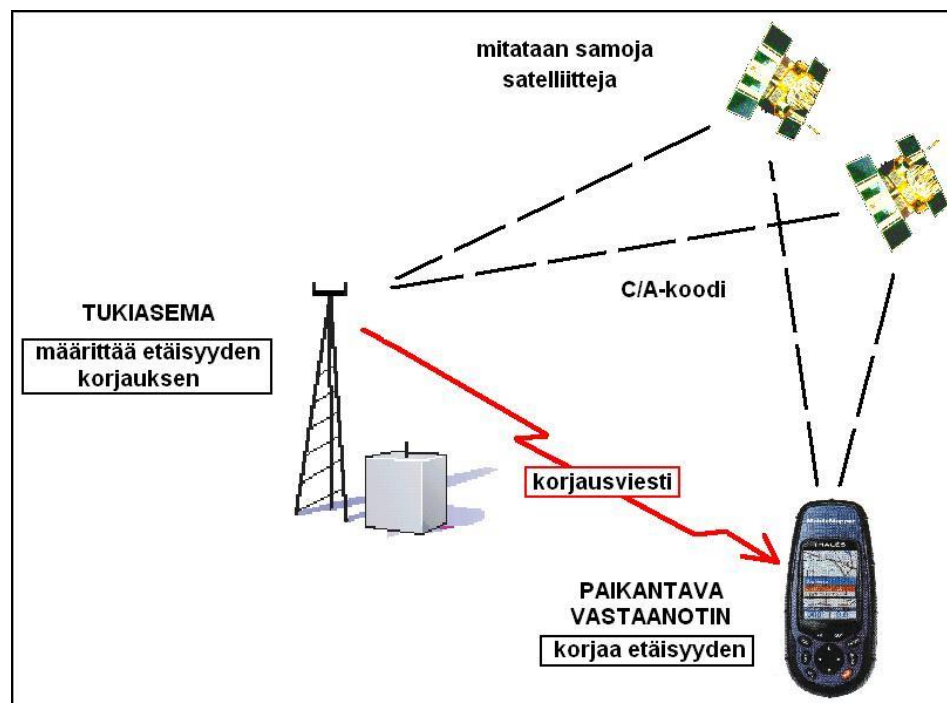
Differentiaalipaikannus (DGNSS)

Koodipaikannusta tarkennetaan tukiasemakorjauksen perusteella

Perusmenetelmässä korjaus on satelliitti-kohtainen etäisyyskorjaus

Epätarkemmassa menetelyssä korjaus tehdään suoraan koordinaatteihin

Mittauksessa on mukana paikantava vastaanotin ja tukiasema tai tukiasemaverkko

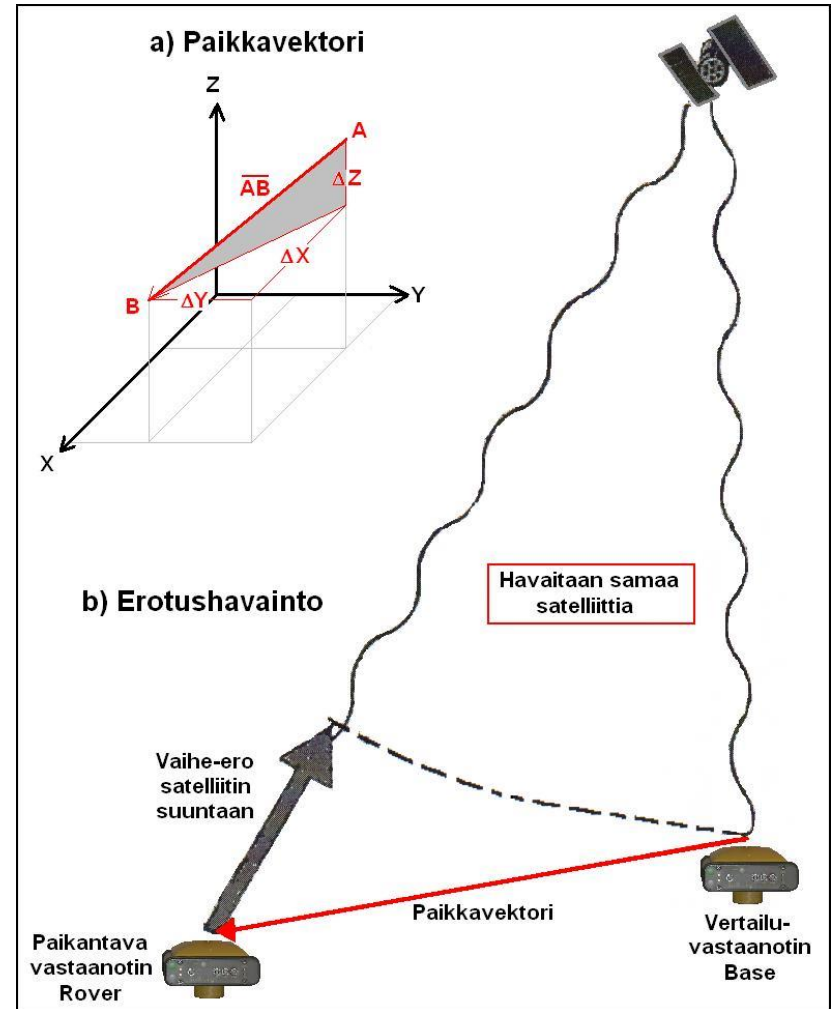


Tarjolla on useita ilmaisia tai maksullisia korjauspalveluita:

Suomessa esimerkiksi FinnRef DGNSS ja eurooppalainen EGNOS

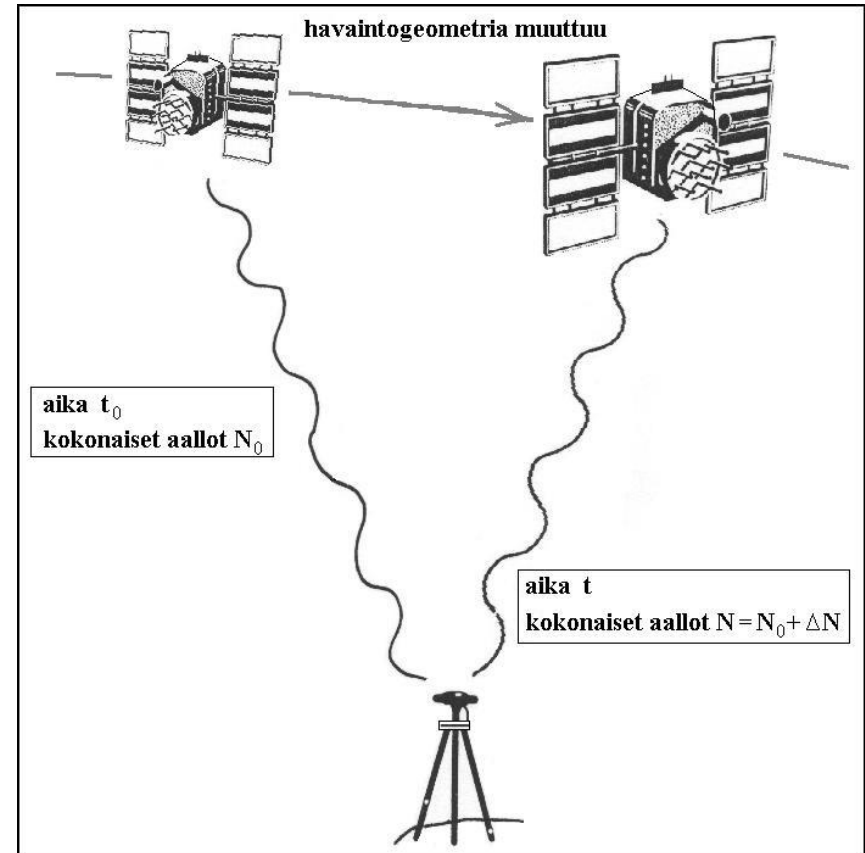
Kantoaaltopaikannus

- Etäisyydet mitataan kantoaallon avulla → pitää määrittää kokonaiset aallonpituudet
- Mittauksessa on mukana vähintään kaksi vastaanotinta: vertailuvastaanotin (base) ja paikantava vastaanotin (rover)
- Vastaanottimien havainnot yhdistetään:
 - erotushavainnot
 - paikkavektori
- Paikka lasketaan vertailuvastaanottimen suhteen



Alkutuntemattomien ratkaisu

- Alkutuntematon tarkoittaa kokonaisten aallonpituuksien määrää mittauksen aloitushetkellä
- Mittaus **alustetaan** ratkaisemalla alkutuntemattomat kaikkiin satelliitteihin
- Kun alustus onnistuu, saadaan **fixed-ratkaisu**
- **Fixed-ratkaisu on tarkan, senttimetrin tason, mittauksen edellytys**
- Jos yhteys satelliittiin katoaa, syntyy **vaihekatko**
- Vaihekatkon jälkeen joudutaan alkutuntemattomat ratkaisemaan uudestaan

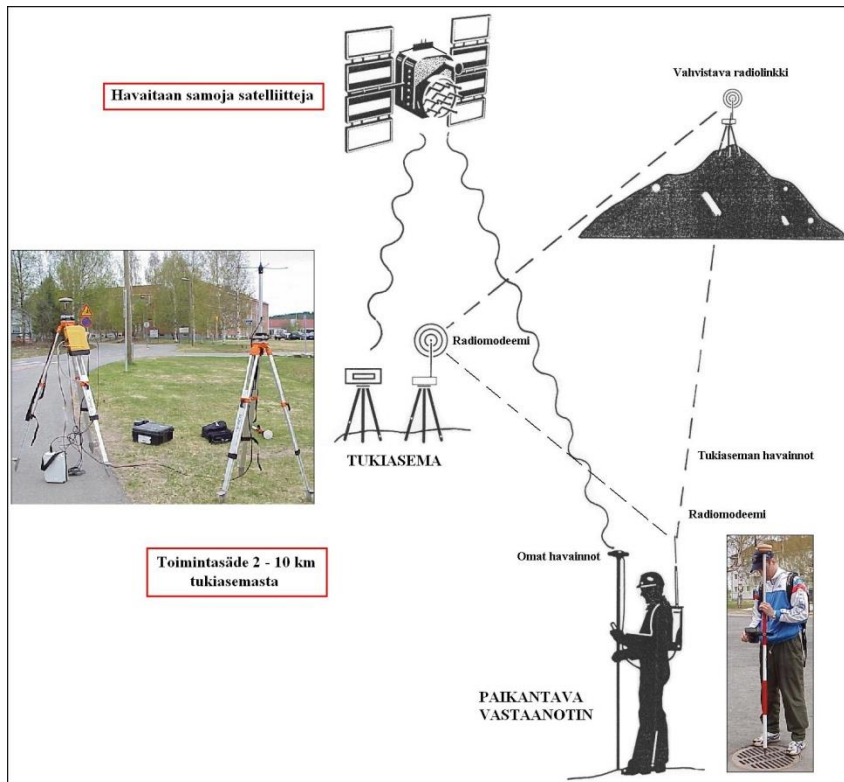


Reaaliaikaisissa mittauksissa alkutuntemattomat halutaan usein nopeasti ja liikkeessä, on-the-fly. Nopea ratkaisu on vaativa tehtävä ja siinä hyödynnetään kaikki saatavilla oleva mittaustieto

Reaaliaikainen kantoaaltopaikannus

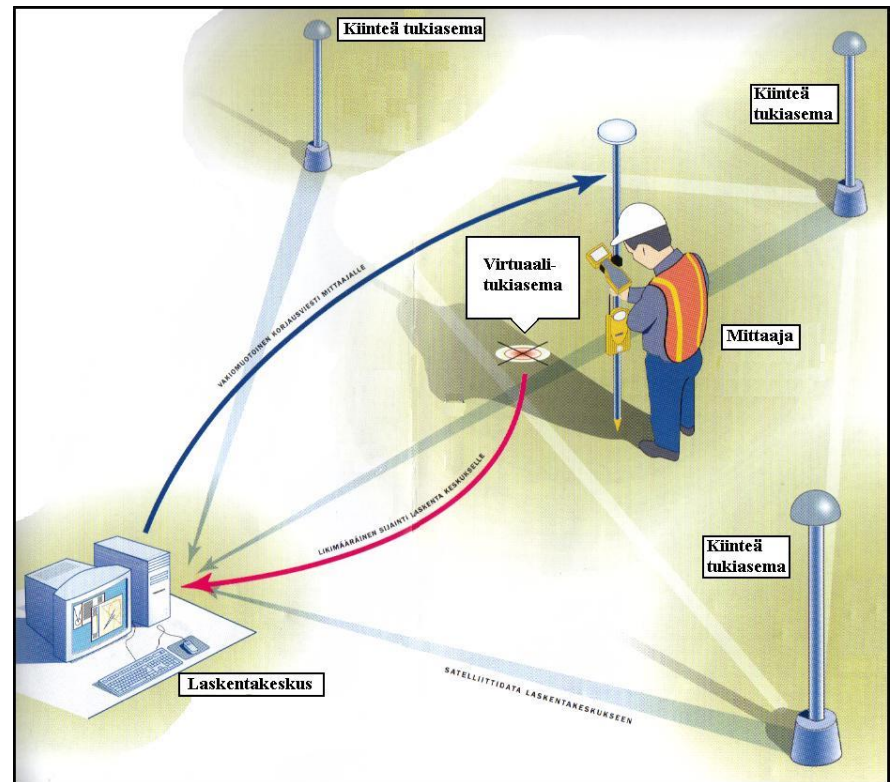
Kartoitusmittausten ja rakentamisen mittausten perustekniikka

RTK-mittaus (yksi tukiasema)



Käytetään tulevaisuudessakin,
esimerkiksi koneohjauksessa

VRS-mittaus (tukiasemaverkko)



Virheiden hallintaa ja luotettavuutta

Miten satelliittipaikannus kehittyy?

- Uusia paikannussatelliittijärjestelmiä otetaan käyttöön ja vanhojen järjestelmien satelliitteja modernisoidaan
- **Yhdellä vastaanottimella tehtävä tarkka pistepaikannus (PPP), avustettu tarkkuuden parantaminen ja GNSS-signaalien laatu-kontrolli kehittyvät**
- Nykyiset epätarkemmat satelliittipaikannuksen mittaustavat tarkentuvat, mutta **yleisesti paras tarkkuus on jo saavutettu**, ehkä **korkeudenmittausta lukuun ottamatta**
- Mittausten luotettavuus (karkeiden virheiden hallinta) paranee
- Paikantimet halpenevat, myös tarkan paikannuksen laitteet
- Muihin laitteisiin integroidut paikantimet tulevat entistä yleisimmiksi
- Paikantimet oppivat käyttämään kaikenlaisia sähkömagneettisia signaaleja paikannussignaalien avusteina
- Ammattikäytössä on tulevaisuudessakin erilaisia mittaustekniikoita, muitakin kuin satelliitteihin perustuvia: tehtävän mukaisesti käytetään parasta mahdollista tekniikkaa

Lähteet

- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. ja Wasle, E. 2008. GNSS – Global Navigation Satellite Systems. Springer-Verlag, Wien.
- Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikan perusteet. Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro 3. RAMK, Rovaniemi.
- Poutanen, M. 2016. Satelliittipaikannus. Ursan julkaisuja 152. Ursa ry, Helsinki.