

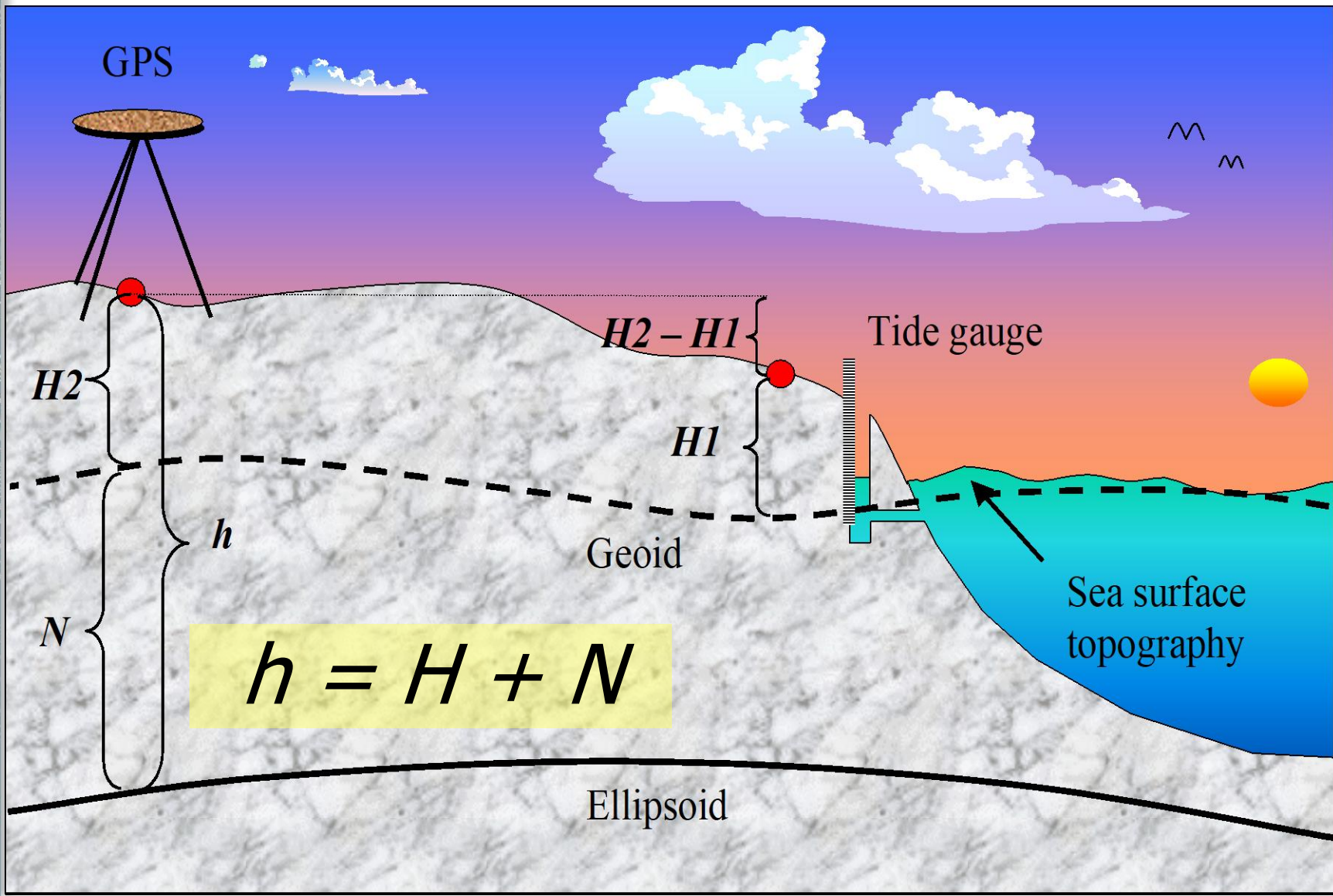
# **Tulevaisuuden korkeusjärjestelmät**

Markku Poutanen  
Geodeettinen laitos

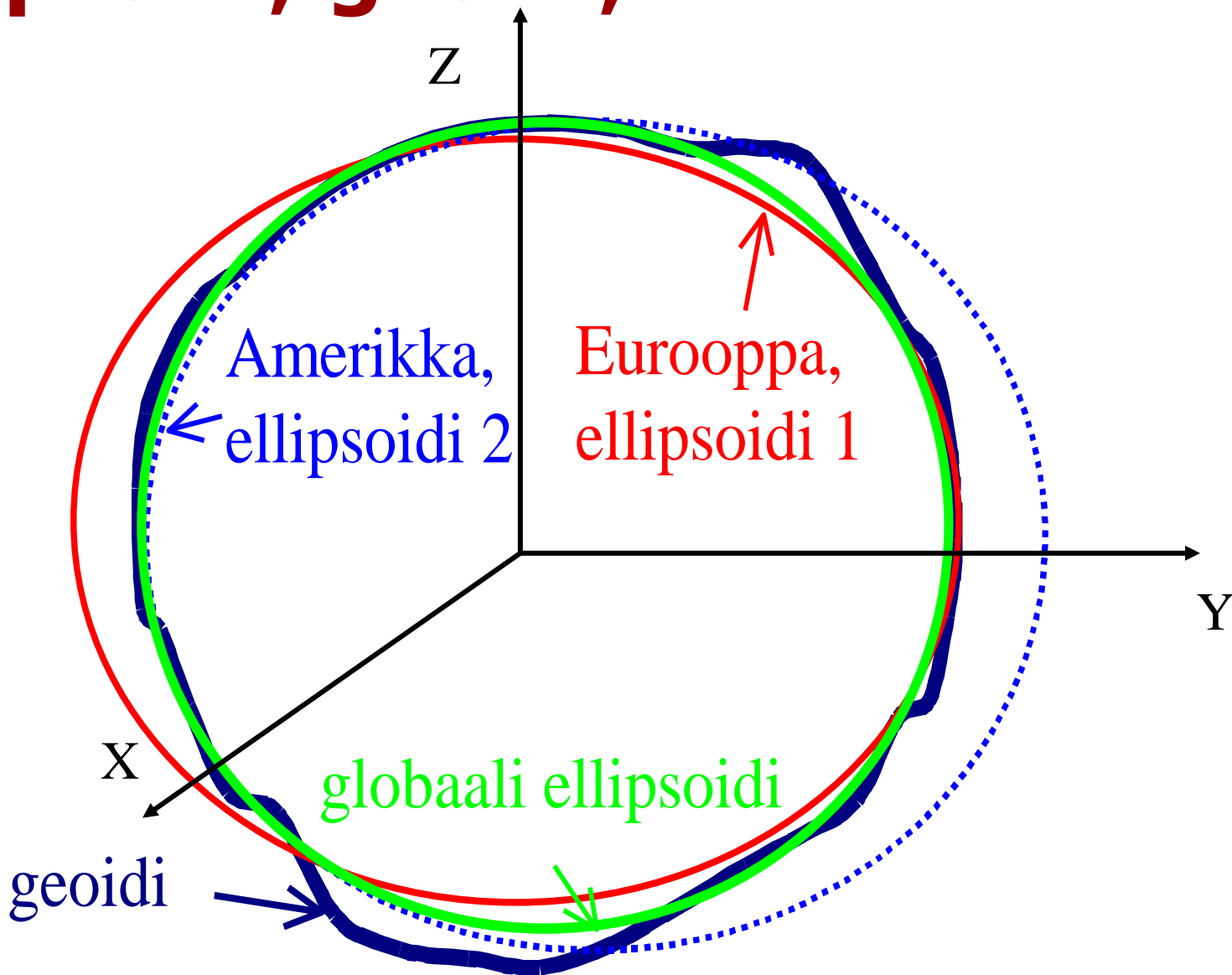
# Korkeus

- Vaaituksella saatu geopotentialiero on fysikaalinen suure jolla ei ole geometrinen merkitystä
- Satelliittitekniikalla (GNSS) saatu korkeus  $h$  on geometrinen suure jolla ei ole fysikaalista merkitystä
- Painovoima sitoo asiat yhteen:
  - kun geopotentialiero jaetaan painovoimalla, saadaan metrisiä korkeuseroja ( $\Delta H$ )
  - geopotentialin tasa-arvopinta, geoidi, liittyy eri tyyppiset korkeudet toisiinsa
  - vesi ei koskaan virtaa ylämäkeen, so. potentiaalia vastaan!

# GPS, geoidi ja vaaitus

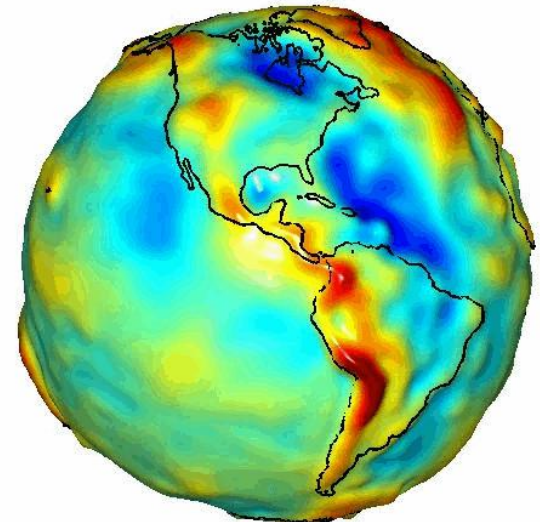


# Ellipsoidi, geoidi, 3-D



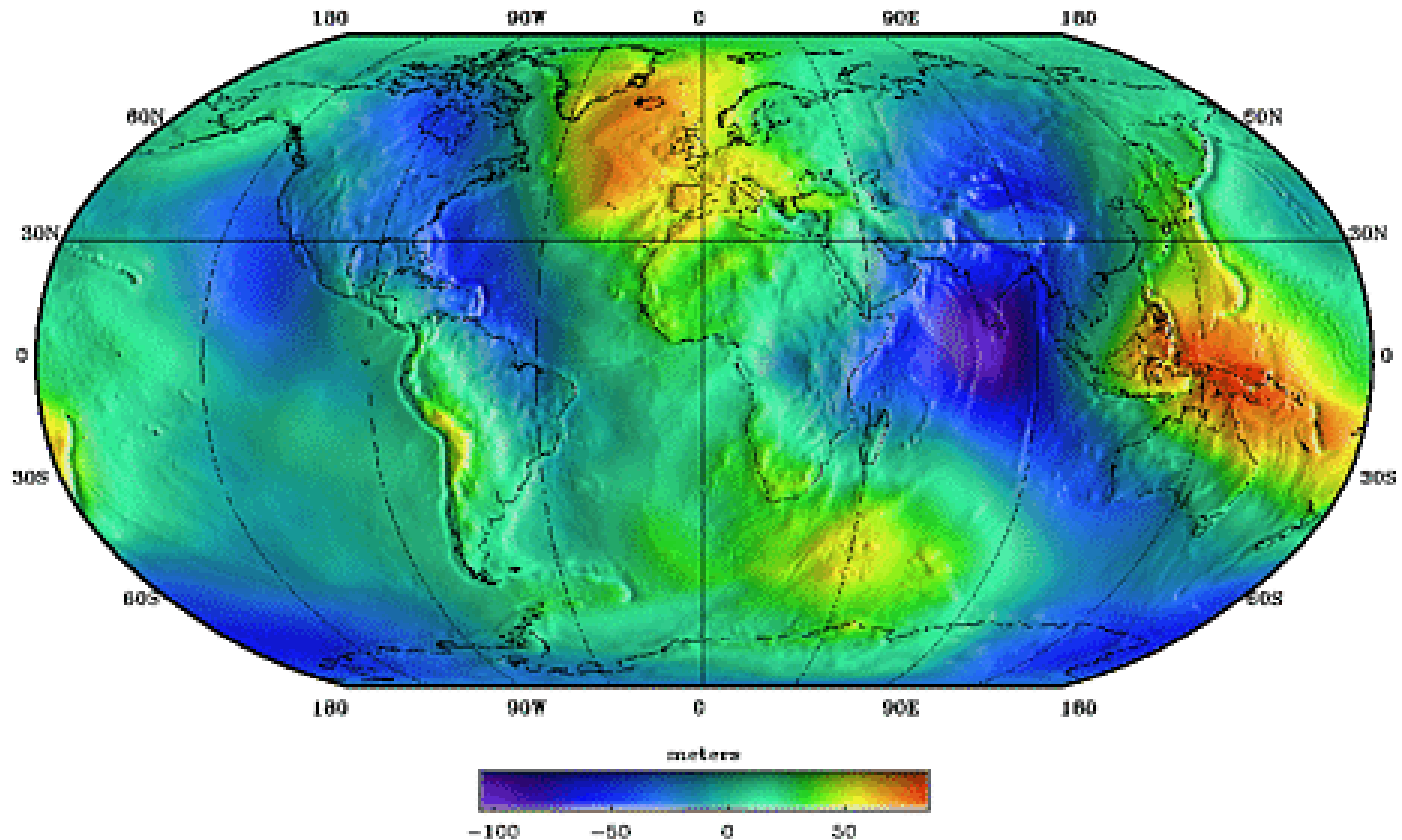
# Geoidi

- Potentiaalinen tasa-arvopinta;  $V$  on vakio ; voidaan valita mielivaltaisesti; valtamerien keskimääräinen pinta
- vesi asettuu potentiaalisen tasa-arvopinnan mukaisesti
- Suhteita Maassa:
  - napasäde n. 20 km lyhyempi kuin ekvaattorisäde
  - geoidi ( $M$ ) poikkeaa ellipsoidista max. n.  $\pm 100$  m
  - keskim. merenpinta poikkeaa geoidista  $\pm 1$  m
- geoidi voidaan määrittää painovoimahavainnoista

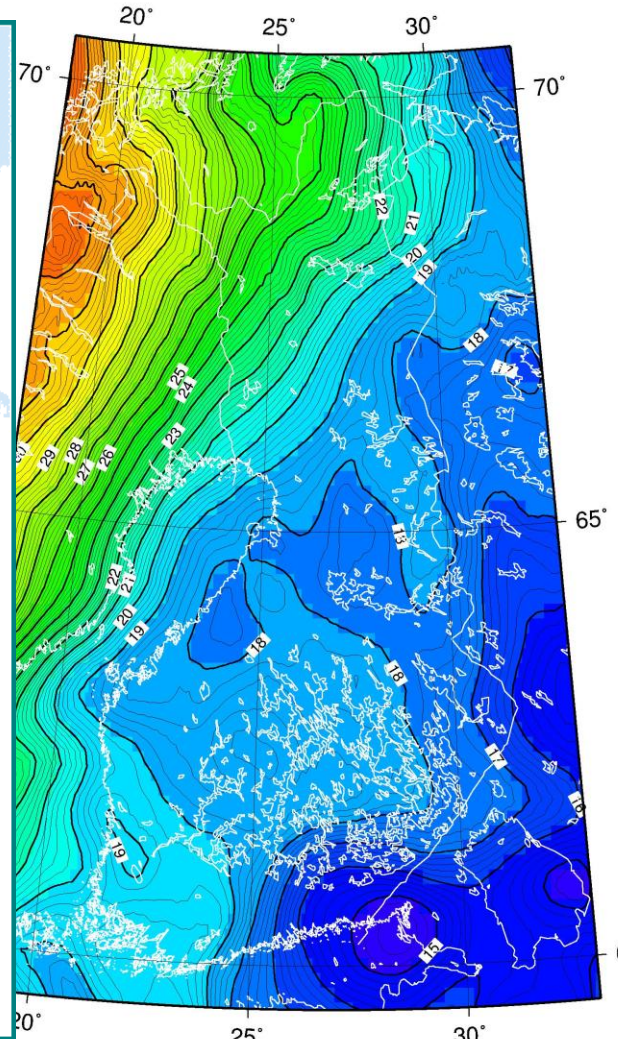
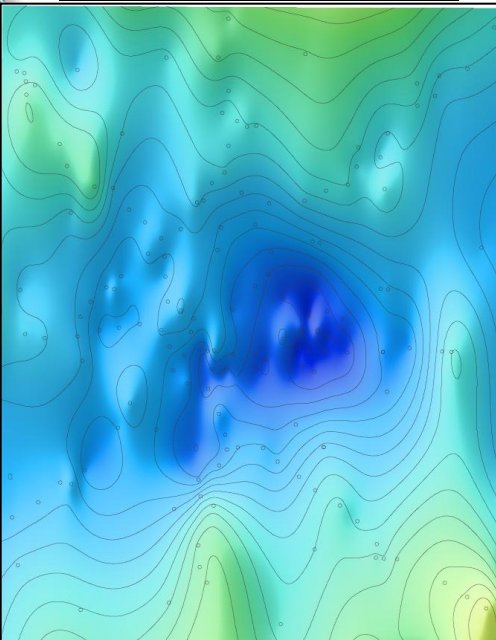
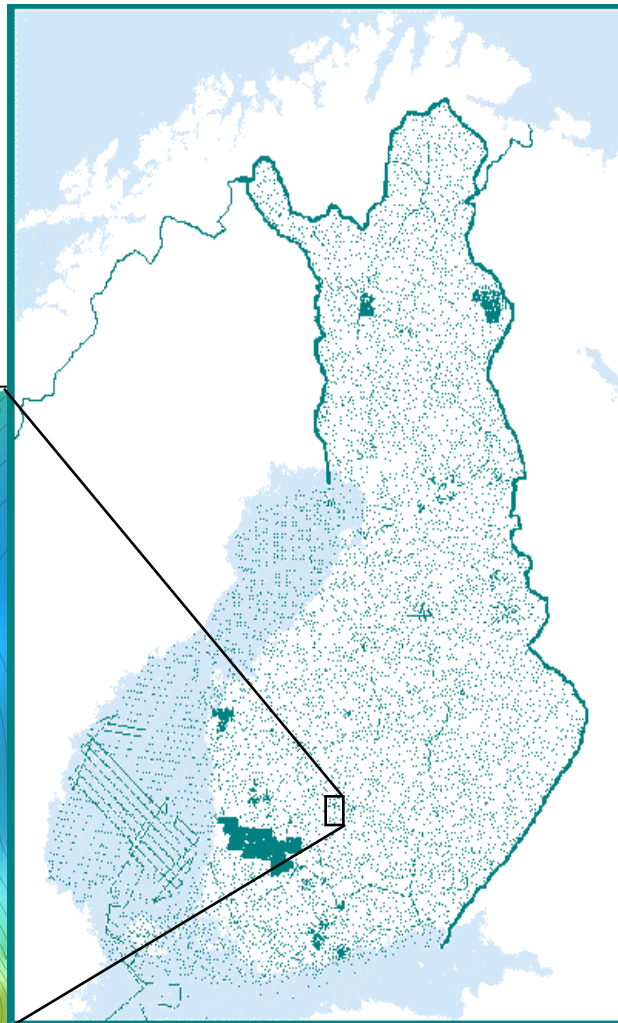
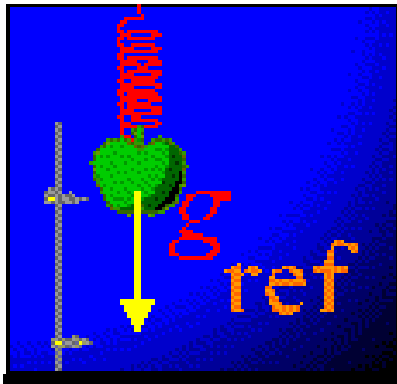


# Geoidi

Geoidin suuren mittakaavan vaihtelut kertovat Maan vaipan tiheyskontrasteista, paikalliset vaihtelut kuoren tiheysvaihteluista (malmit, kivilajien vaihtelut yms.)



# Painovoima ja geoidin paikalliset vaihtelut



# Korkeuden määritelmiä 1

- **Ortometrinen korkeus:** Pisteiden ja geoidin välinen etäisyys. Se saadaan jakamalla pisteen geopotentiaaliluku  $C$  sen ja geoidin välisellä keskimääräisellä painovoimalla  $\bar{g}$  (integroimalla geoidin ja havaintopaikan välistä luotiviivaa pitkin käyttäen maankuoren todellisia tiheyksiä). Ortometrinen korkeus vastaa parhaiten intuitiota ”korkeus merenpinnasta”.
- Useimmiten laskemiseen käytetään likimääräistä *Helmertin* kaavaa:

$$\bar{g} = g_p + 0.0424 \times 10^{-5} s^{-2} H_m$$

missä  $g_p$  on havaintopaikan painovoima,  $H_m$  sen likimääräinen ortometrinen korkeus. Tiheydeksi on tällöin oletettu  $2670 \text{ kg/m}^3$ .

# Korkeuden määritelmiä 2

- **Normaalikorkeus:** Saadaan jakamalla geopotentialiluku  $C$  keskimääräisellä normaalipainovoimalla  $\bar{\gamma}$

$$H_n = C / \bar{\gamma}$$

$\bar{\gamma}$  lasketaan normaalipainovoimakentän luotiviivaa pitkin vertausellipsoidin ja sen pisteen välillä, jossa normaalipainovoimakentän potentiaaliero ellipsoidiin on sama kuin havaintopaikan todellisen potentiaaliero geoidiin.

$$\bar{\gamma} = \gamma_o - \frac{1}{2} k H_m \quad k = 0.3086 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$$

$$\gamma_o = 978032.67715 \cdot (1 + 0.0052790414 \sin^2 \varphi + 0.0000232718 \sin^4 \varphi + 0.0000001262 \sin^6 \varphi + 0.0000000007 \sin^8 \varphi)$$

- Lähtötaso on kvasigeoidi. Se yhtyy geoidiin merenpinnan tasolla, mutta poikkeaa sitä enemmän mitä korkeammalla merenpinnasta havaintopaikka on.

# Korkeuden määritelmiä 3

- **Dynaaminen korkeus:** Saadaan jakamalla geopotentialiluku  $C$  normaalipainovoimalla leveysasteella  $45^\circ$ . Approksimoi ortometrista korkeutta huonommin kuin normaalikorkeus.
- **Korkeus ellipsoidista:** Saadaan suoraan GNSS-havainnoista. Ei yhteyttä painovoimaan, geopotentiaaliin. Ei kuvaa veden pinnan tasoa.

Korkeuden tyyppi	Edut	Haitat
Geopotentialiluku [m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> ]	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ fysikaalinen suure</li> <li>+ saadaan vaaituksesta</li> <li>+ liittyy suoraan painovoimaan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Epäintuitiivinen(?)</li> <li>- hankala käyttää (muunnos metrisiin yksiköihin)</li> </ul>
Ortometrinen korkeus [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ fysikaalinen suure (lähes)</li> <li>+ korkeus merenpinnasta</li> <li>+ vertauspintana geoidi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hankala laskea (painovoima ja maankuoren tiheys tunnettava)</li> </ul>
Normaali-korkeus [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ helppo laskea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ei fysikaalista eikä geometrista merkitystä</li> <li>- riippuu korkeudesta</li> <li>- vertauspinta kvasigeoidi</li> </ul>
Dynaaminen korkeus [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ vielä helpompi laskea</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ei fysikaalista eikä geometrista merkitystä</li> <li>- riippuu korkeudesta</li> <li>- vertauspinta kvasigeoidi</li> </ul>
Korkeus ellipsoidista [m]	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ saadaan GNSS-havainnoista</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ei fysikaalista merkitystä</li> <li>- ei tunne geopotentialia</li> </ul>

# Vaaitus

- + Tarkka
- + Antaa fysikaalisen tuloksen (vesi virtaa oikeaan suuntaan)
- + Geopotentiaalierot voidaan muuntaa fysikaalisesti oikein metrisiksi korkeuseroiksi
- Hidas ja työläs; kallis
- Herkkä systemaattisille virheille
- Virhekontrolli heikko (sulkuvirhe)

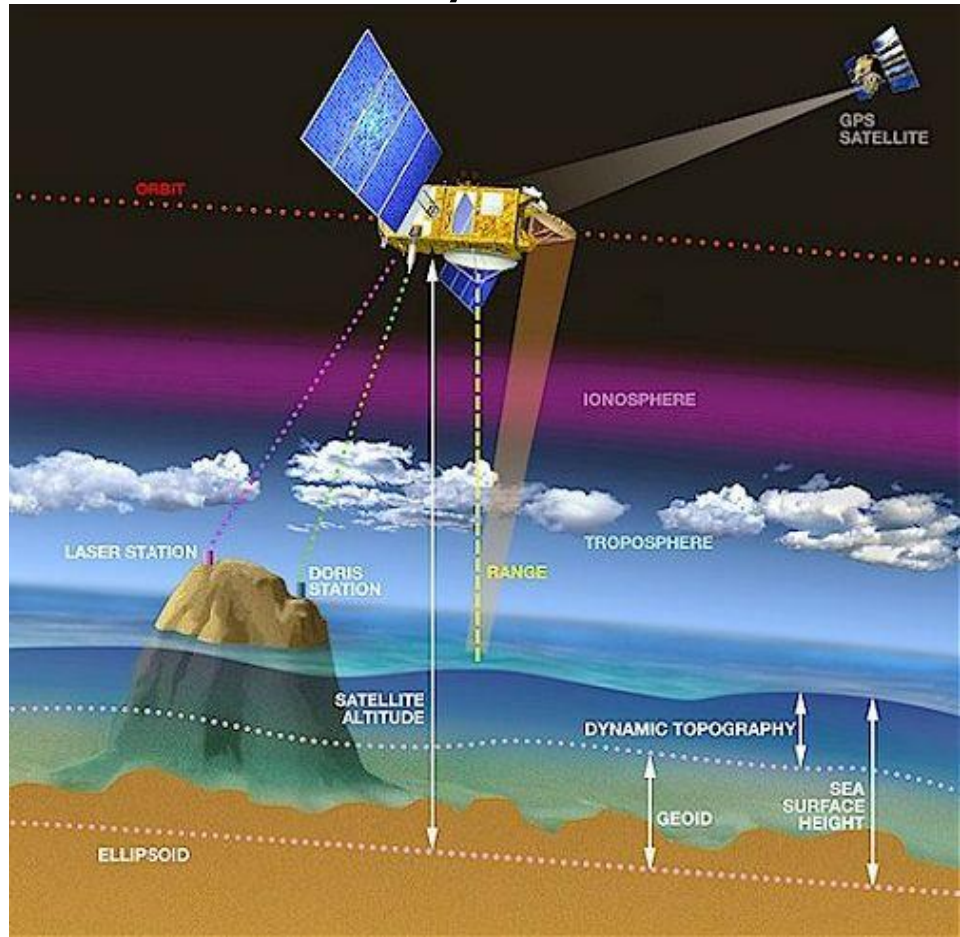
# GNSS korkeudenmäärittäminen

- + Nopea, "kustannustehokas"
- + 3-D virhekontrolli
- + Vaatukset pitkien matkojen päähän, vesistöylitykset, maastovaatukset yms.
- Ei-fysikaalinen suure, veden virtaussuunta ?
- Virheet vaatusta suuremmat
- Geometrisen suureen muuttaminen fysikaaliseksi suureeksi lisää virhettä
- Tarvitsee tarkan geoidimallin

# Muita korkeudenmäärittämissä menetelmiä

## ■ Satelliittialtimetria

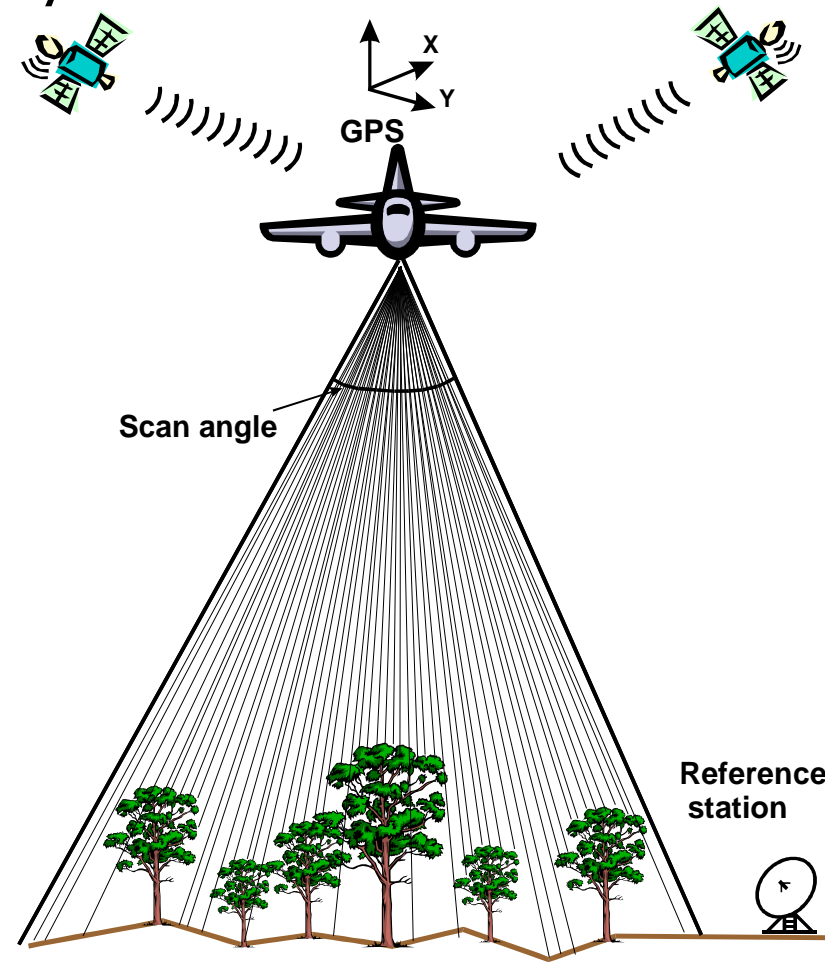
- Vain merialueilla; joskus myös mannerjäätiköille
- Ongelmana satelliittien radanmäärittäksen tarkkuus ja mikroaaltotutkan kalibrointi
- Merenkorkeuden globaalimuutosten seuranta



# Muita korkeudenmäärittämenetelmiä

## Laserskannaus

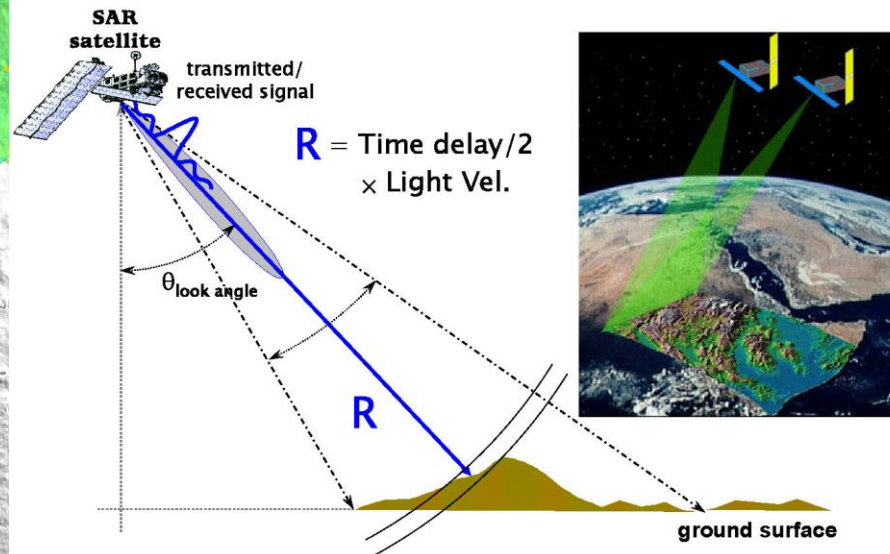
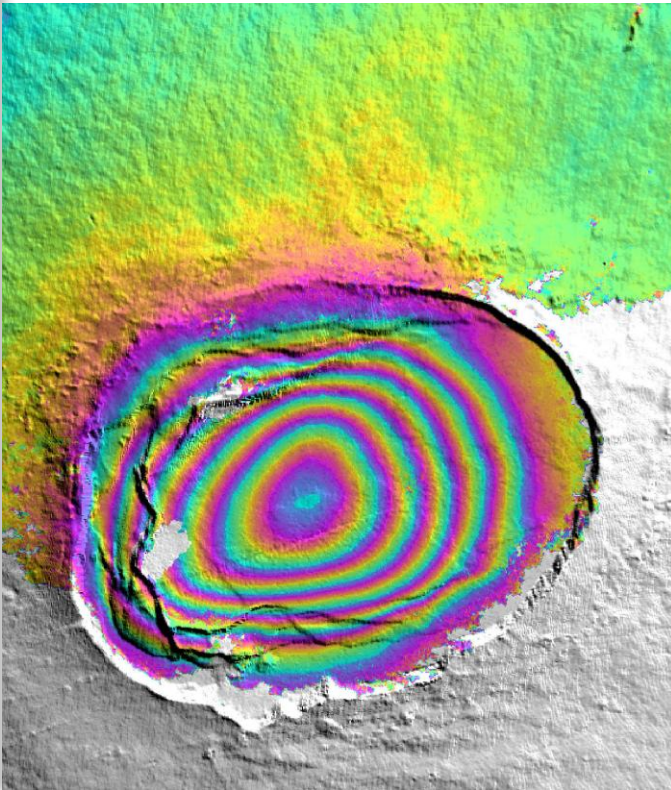
- Tarkkuus toistaiseksi desimetriluokkaa
- Lentokoneen paikanmäärityksen tarkkuus = ?
- Ei kokemusta tarkasta korkeudenmäärittäyksestä ja virhekontrollista



# Muita korkeudenmäärittysmenetelmiä

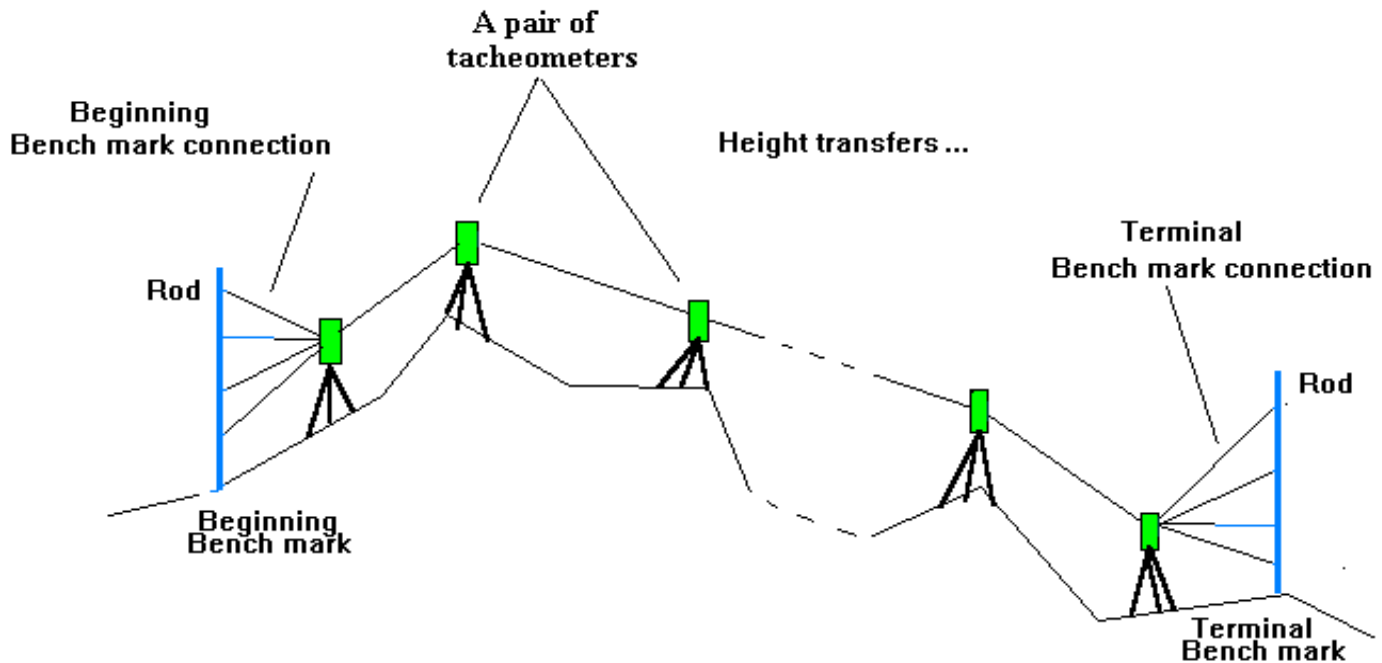
## ■ SAR interferometria

- Vain korkeudenmuutokset ; tarkka, laajat alueet
- Ei sovellu peitteisessä maastossa; pysyvien sirottajien puute
- Säätila ja troposfäärin vaikutus ongelmia



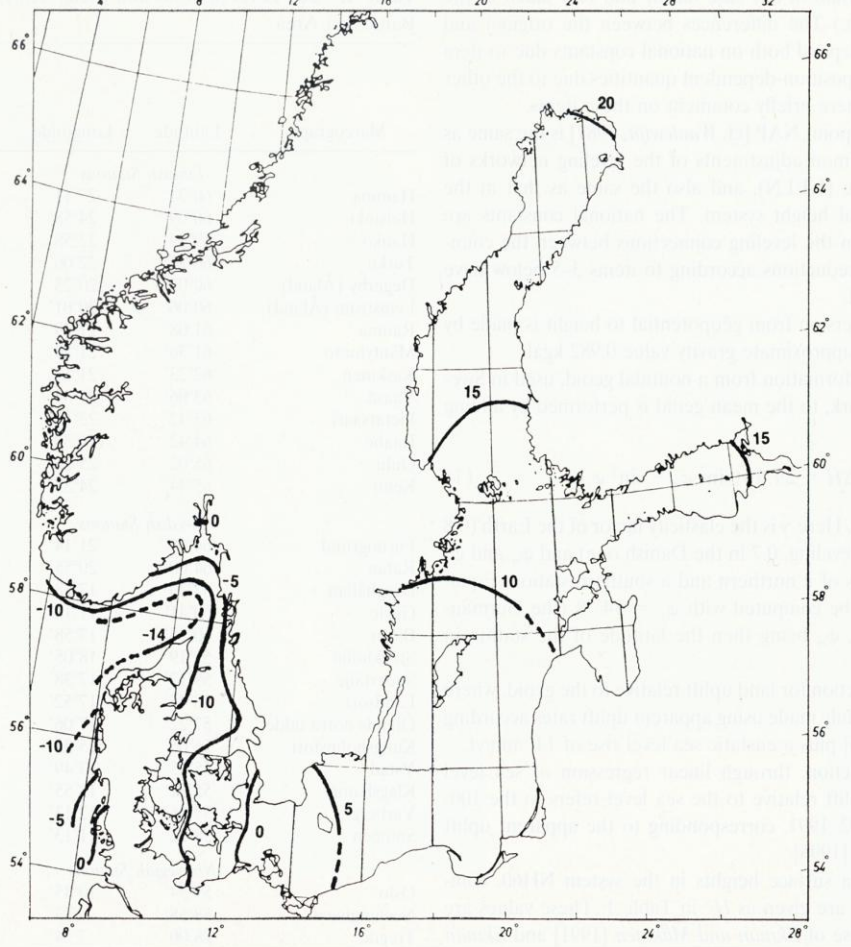
# Muita korkeudenmäärittämenetelmiä

- Trigonometrinen määrittäys
  - Vaaitusta nopeampi
  - Päästään lähes vaaituksen tarkkuuteen
  - Tornit, katot, jyrkät tähtäykset
  - GNSS-määrittäystä hitaampi, työläämpi, kalliimpi

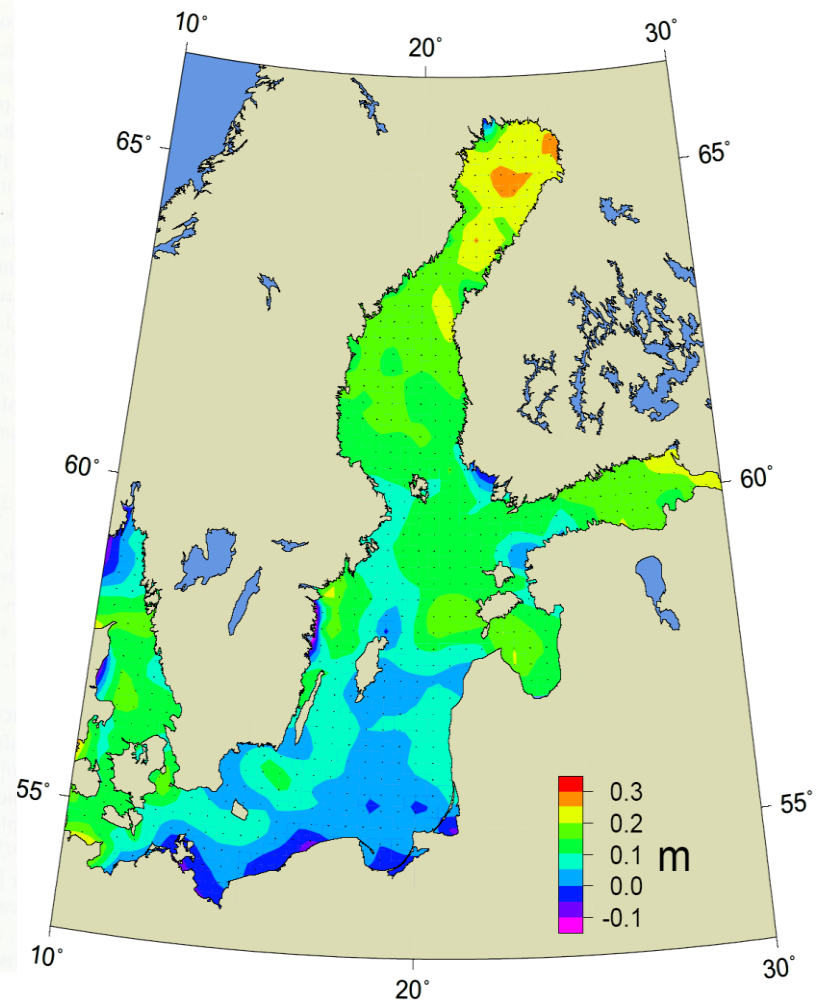


# Muita korkeudenmäärittämenetelmiä

- GPS, geoidi ja merimalleista laskettu keskimääräinen meren korkeus
  - Vaaitustulosten likimääräinen varmennus.
  - Joskus voidaan korvata puuttuva vaaitus.
  - Esimerkkejä:
    - Ahvenanmeren GPS-vaaitus; Suomen ja Ruotsin järjestelmien yhdistämien, korkeudet Ahvenanmaalle
    - Suomenlahden ylitys; yhteys Viron verkkoon

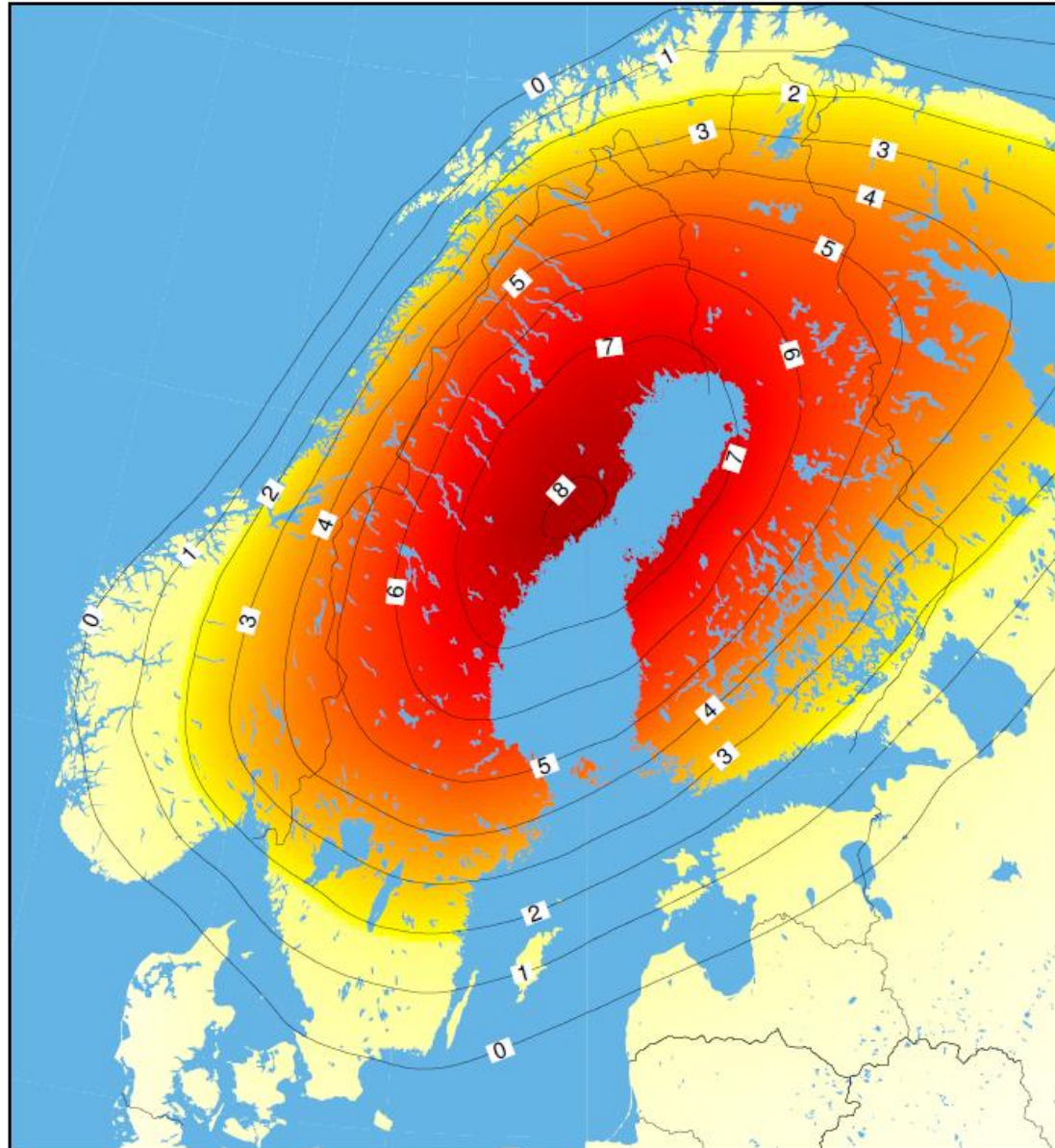


Itämeren meritopografia vaaitushavainnoista ja mareografiaikasarjoista (Ekman and Mäkinen 1996).



Itämeren meritopografia satelliittialtimetriasta (Poutanen, 2000)

# Maannousu muuttaa korkeuksia



# GPS vs. vaaitus

Avoimet pisteet: tarkkavaaituksen kalliopisteet; toistomittaukset

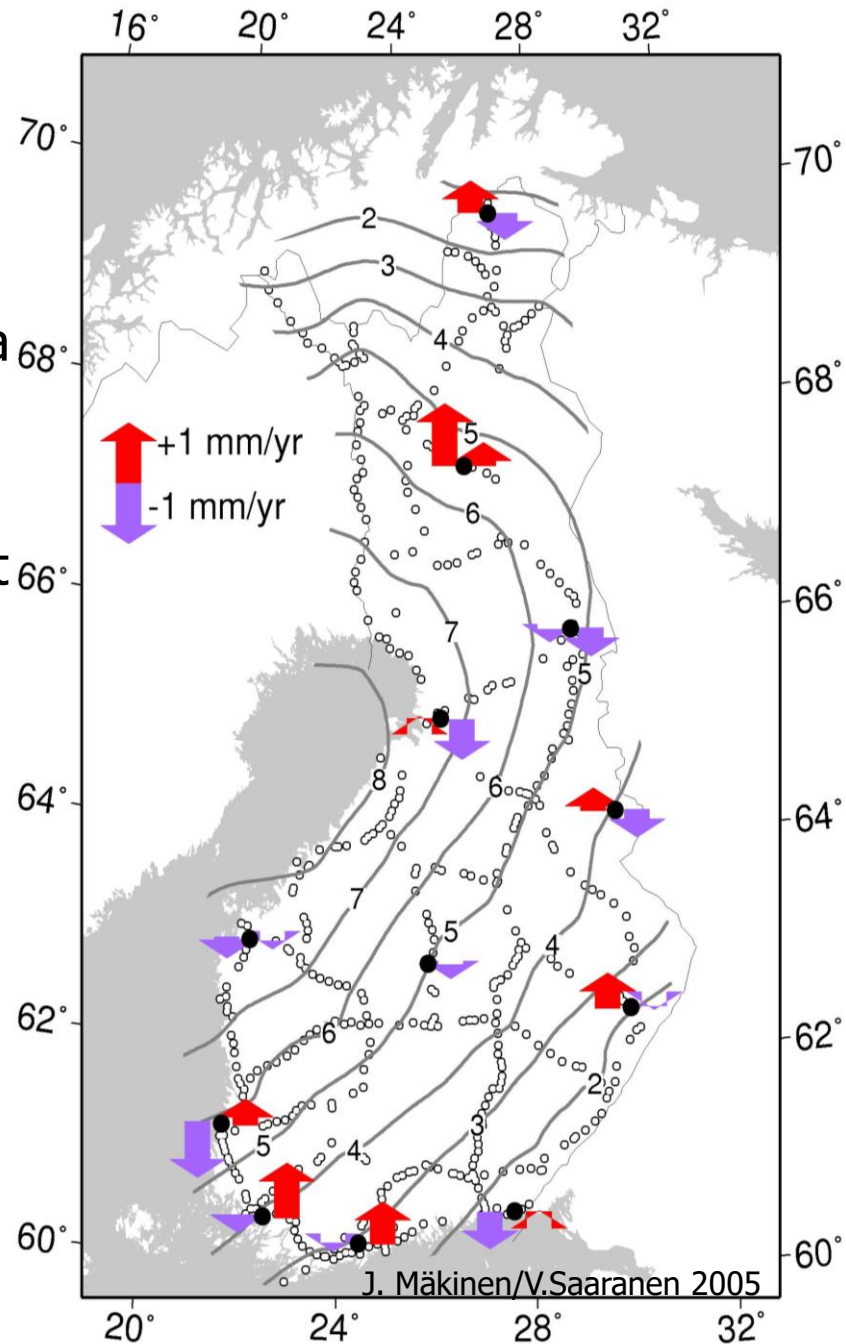
Käyrät: kolmesta tarkkavaaituksesta laskettu maannousu 1892-2004 (mm/v)

Mustat pisteet: pysyvät GPS-asemat

Vasemmanpuoleiset nuolet: BIFROST GPS – vaaitus

Oikeanpuoleiset nuolet: FINNREF GPS – vaaitus

**Kaksi eri GPS-ratkaisua poikkeaa toisistaan yhtä paljon kuin ne poikkeavat vaaituksesta; yhteensopivuus luokkaa 0.5 mm/v**



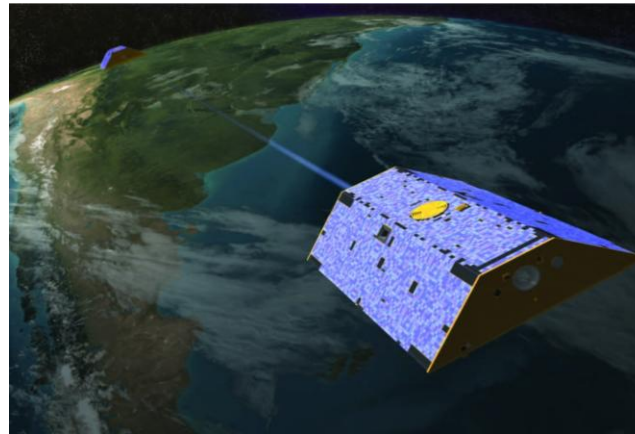
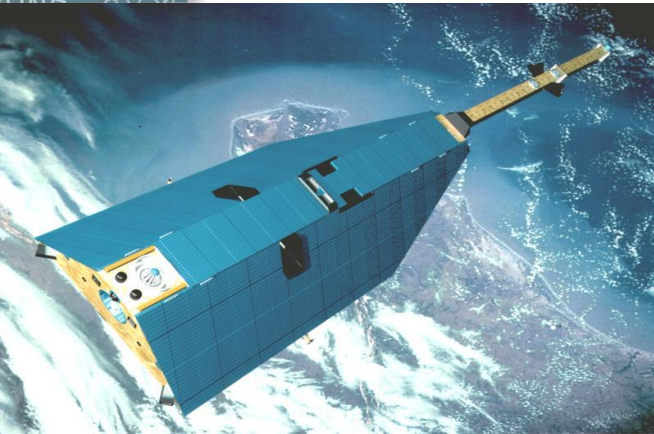
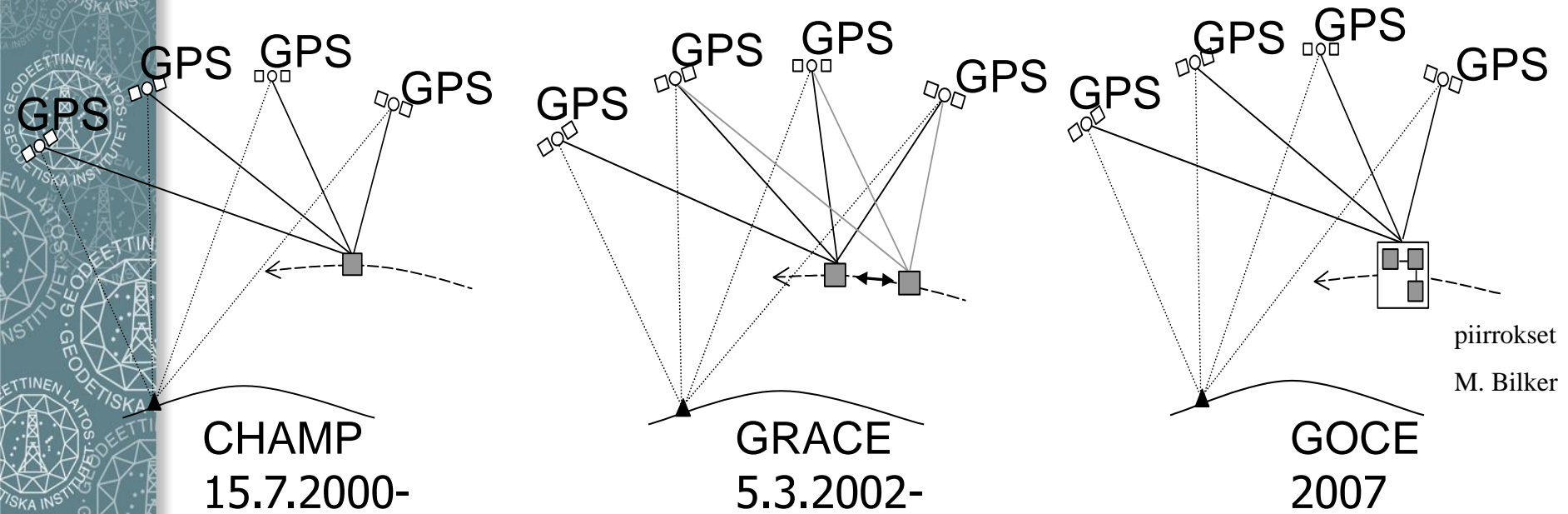
# Kansallinen muunnospinta

- GNSS-korkeuksien muuttamiseksi suoraan kansalliseen korkeusjärjestelmään
- Geoidimalli (tai kvasigeoidi) sovitettu korkeusjärjestelmään
  - Esim. FIN2000 avulla GPS-korkeudet saadaan suoraan N60-järjestelmän ortometrisiksi korkeuksiksi
  - $H_{N60} = h - N_{FIN2000}$
  - HUOM: muunnospinta ei ole enää potentiaalilin tasa-arvopinta!
  - FIN2005-muunnospinta N2000:n kanssa käytettäväksi – normaalikorkeuksia

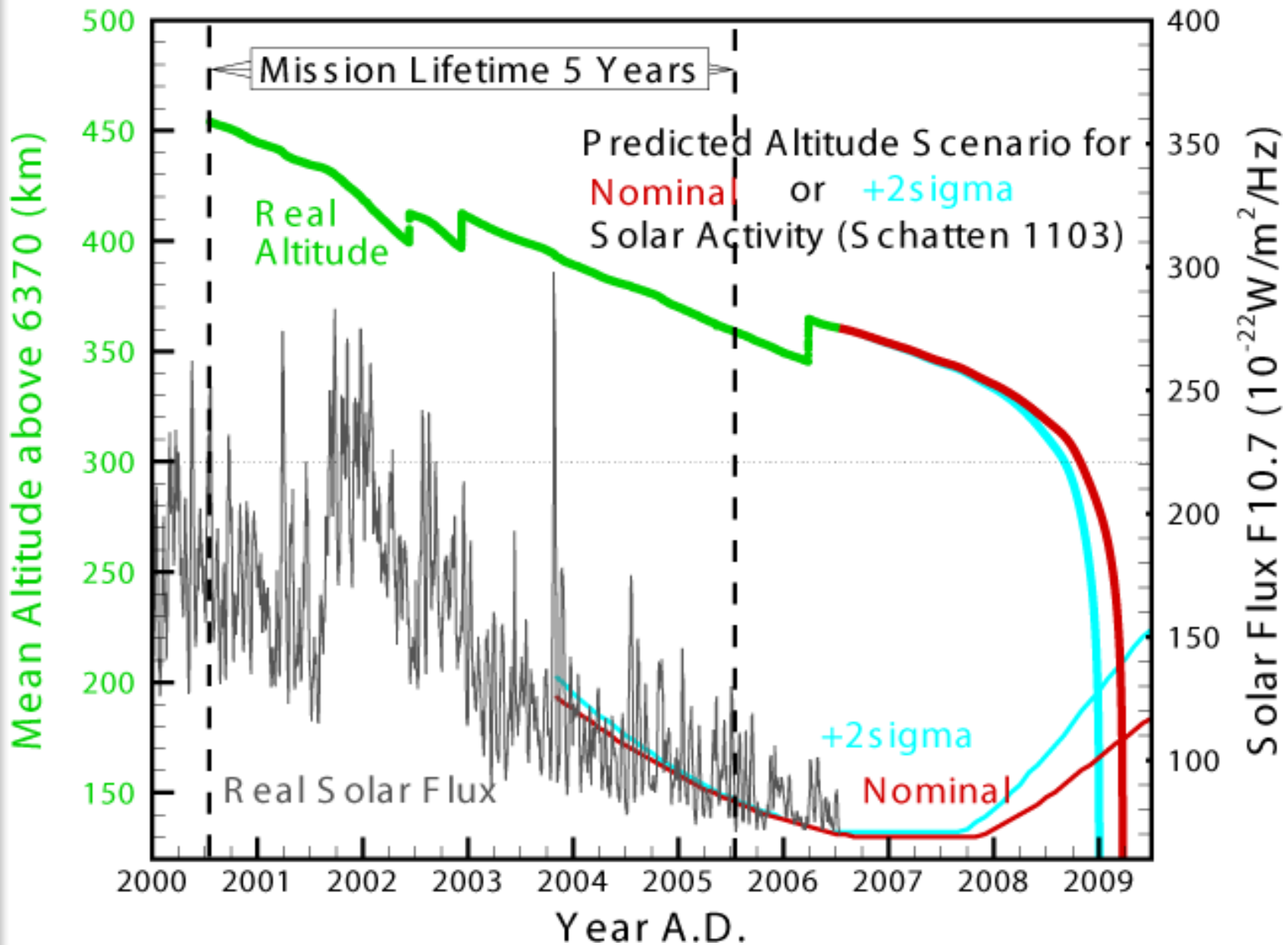
# Korkeus ja painovoima

- Tulevaisuuden korkeudenmäärittäminen tarvitsee entistä tarkemman globaalin geoidimallin ja erittäin tarkan paikallisen geoidimallin
- Yhtenäinen globaali korkeusjärjestelmä mahdollinen
- Painovoimamittauksien ja geoidimallin avulla voidaan luoda alueellinen korkeusjärjestelmä ilman fyysistä yhteyttä meren pintaan
- Painovoiman mittaus tärkeä (globaali mittaus painovoimasatelliiteilla (CHAMP, GRACE, GOCE); paikalliset mittaukset absoluutti-, relatiivi- ja suprajohdettavilla gravimetreilla)

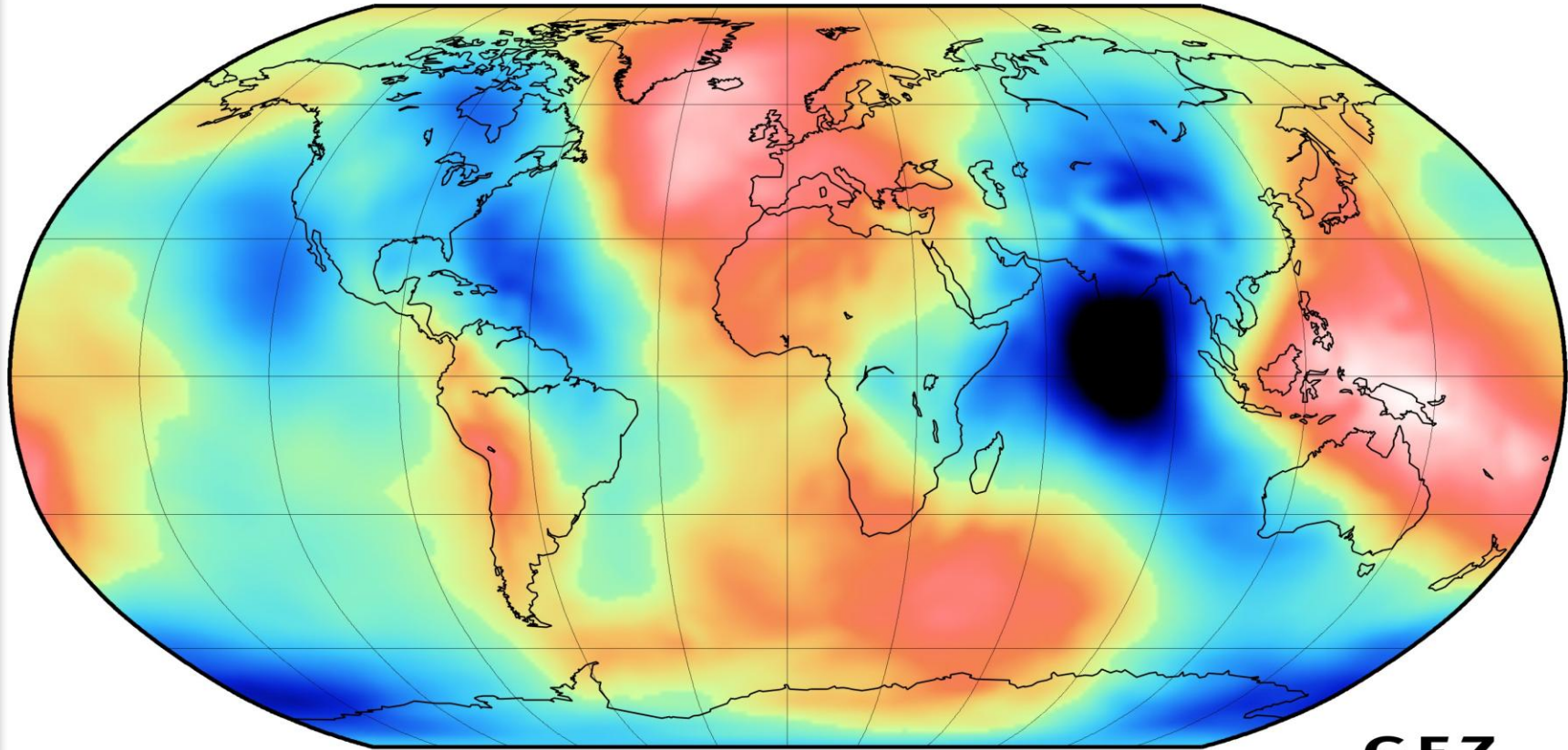
# Painovoimasatelliitit



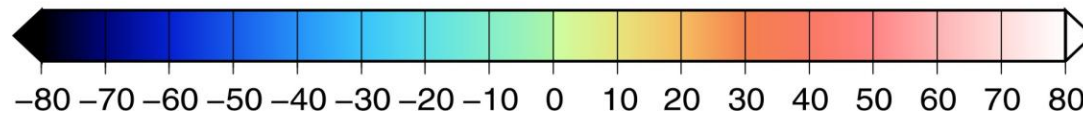
# CHAMP Decay Scenario (15-Jul-2006)



# 3 v. CHAMP-havainnoista laskettu geoidimalli



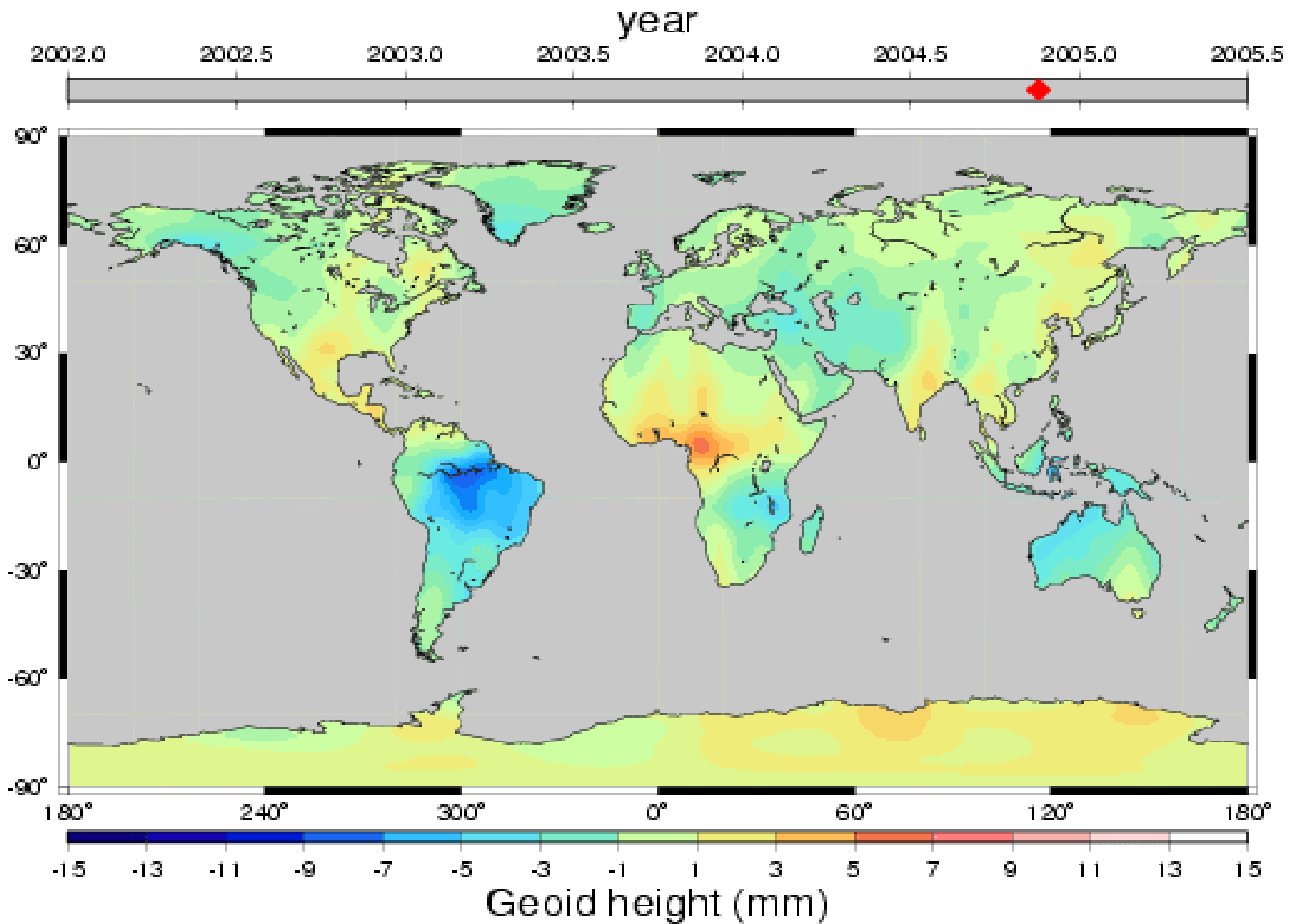
EIGEN-CHAMP03S



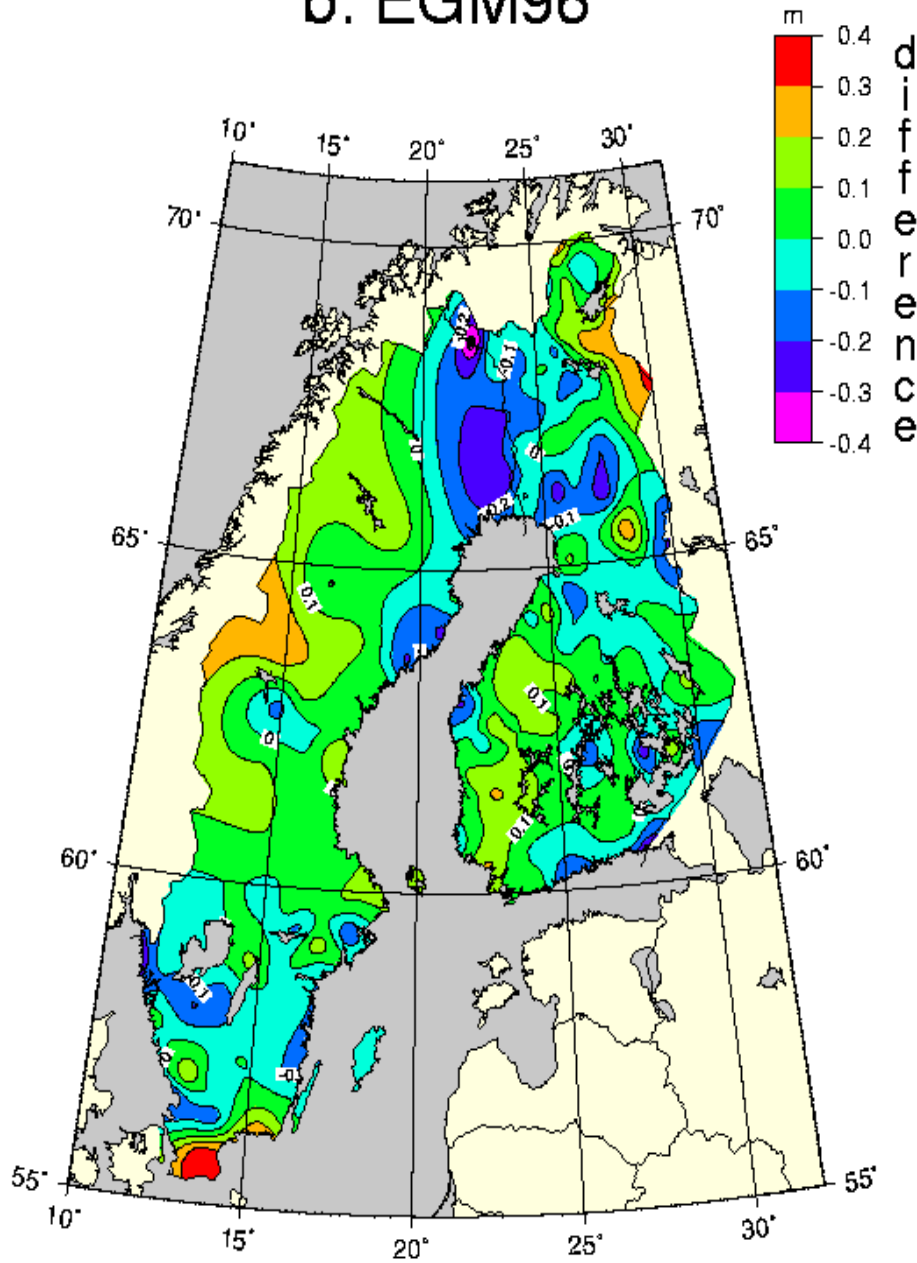
**GFZ**  
POTSDAM

EIGEN-CHAMP03S Geoid ( $a=6378136.46$ ,  $1/f=298.25765$ ) in meter

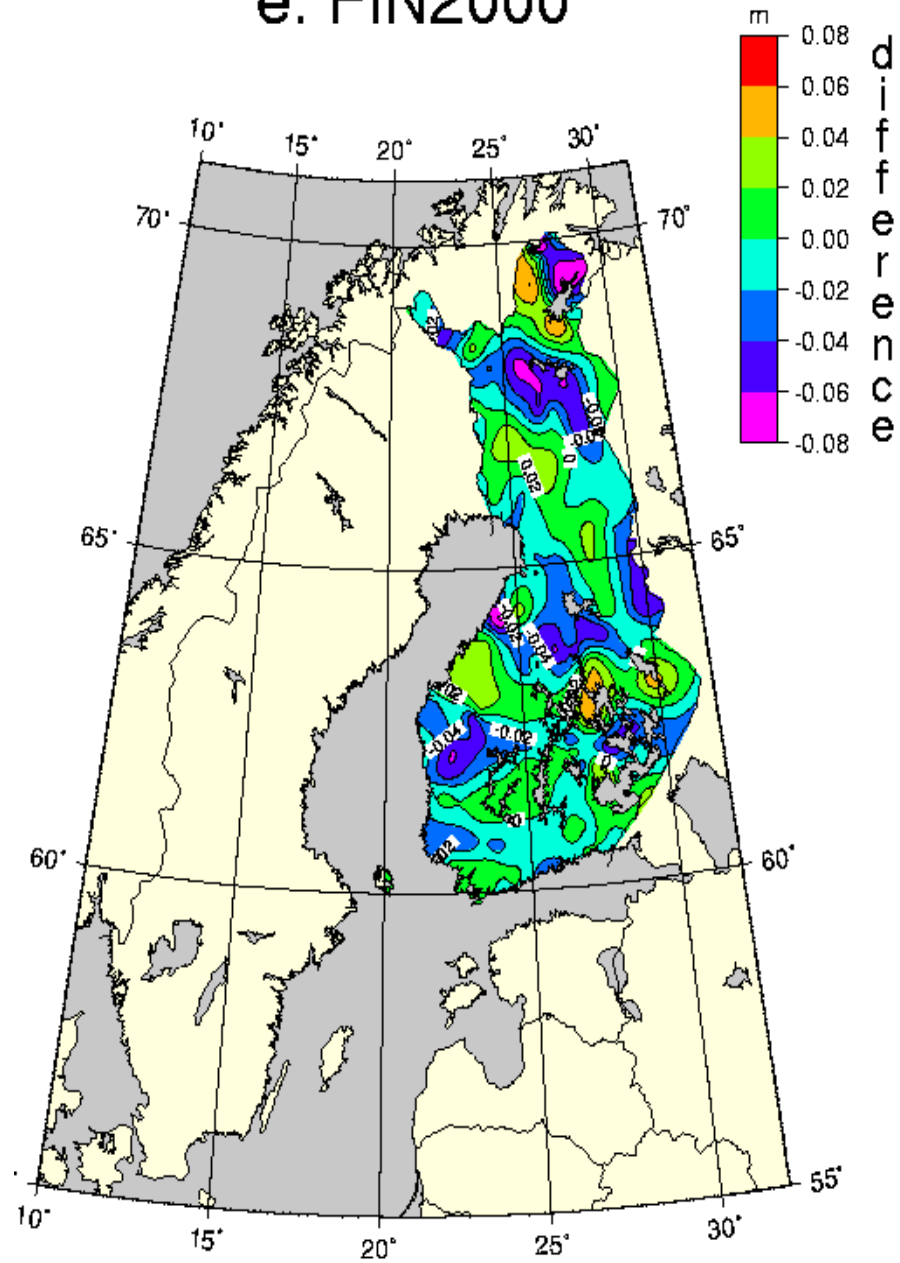
# Grace geoidivaihtelu



b. EGM96



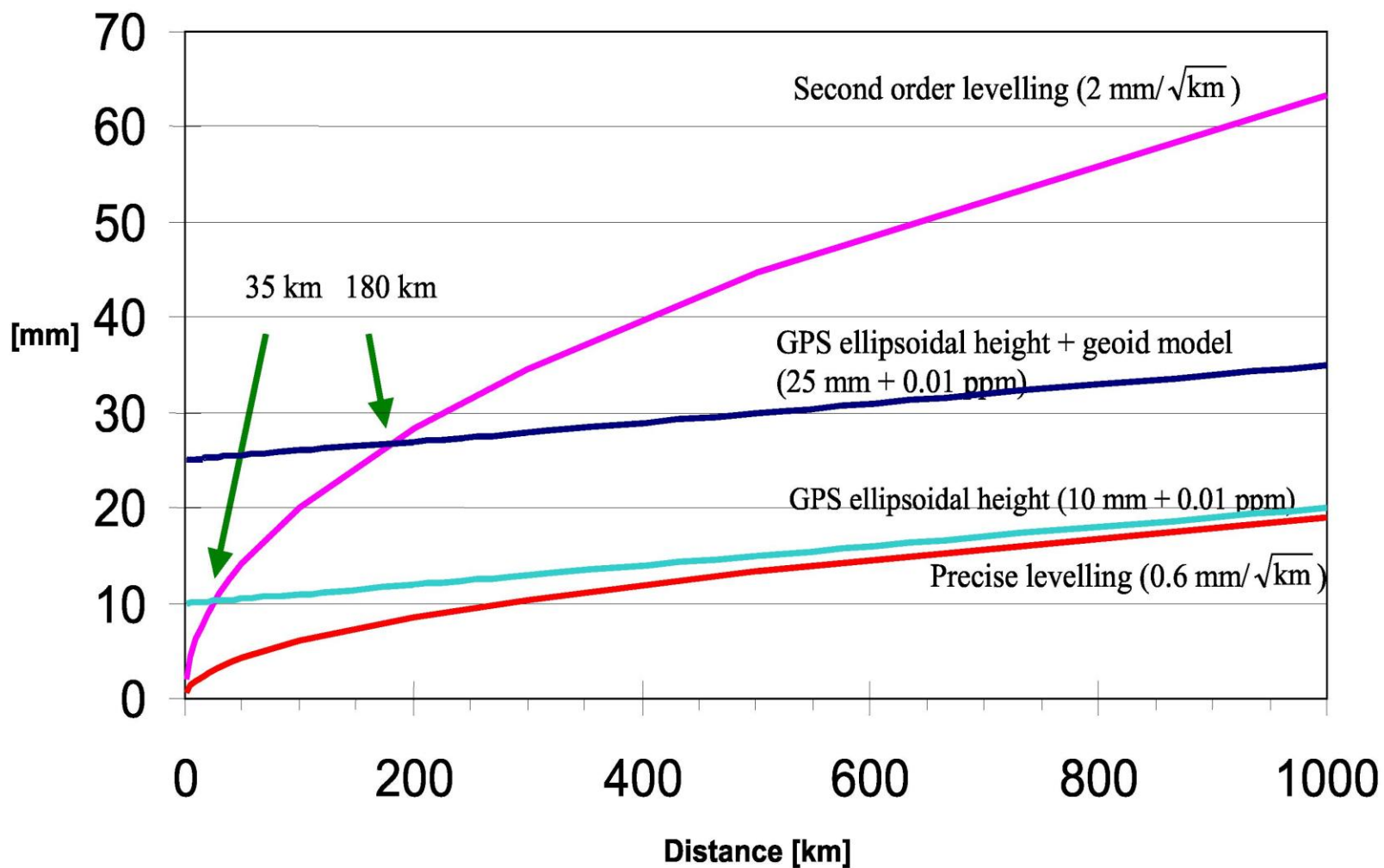
e. FIN2000



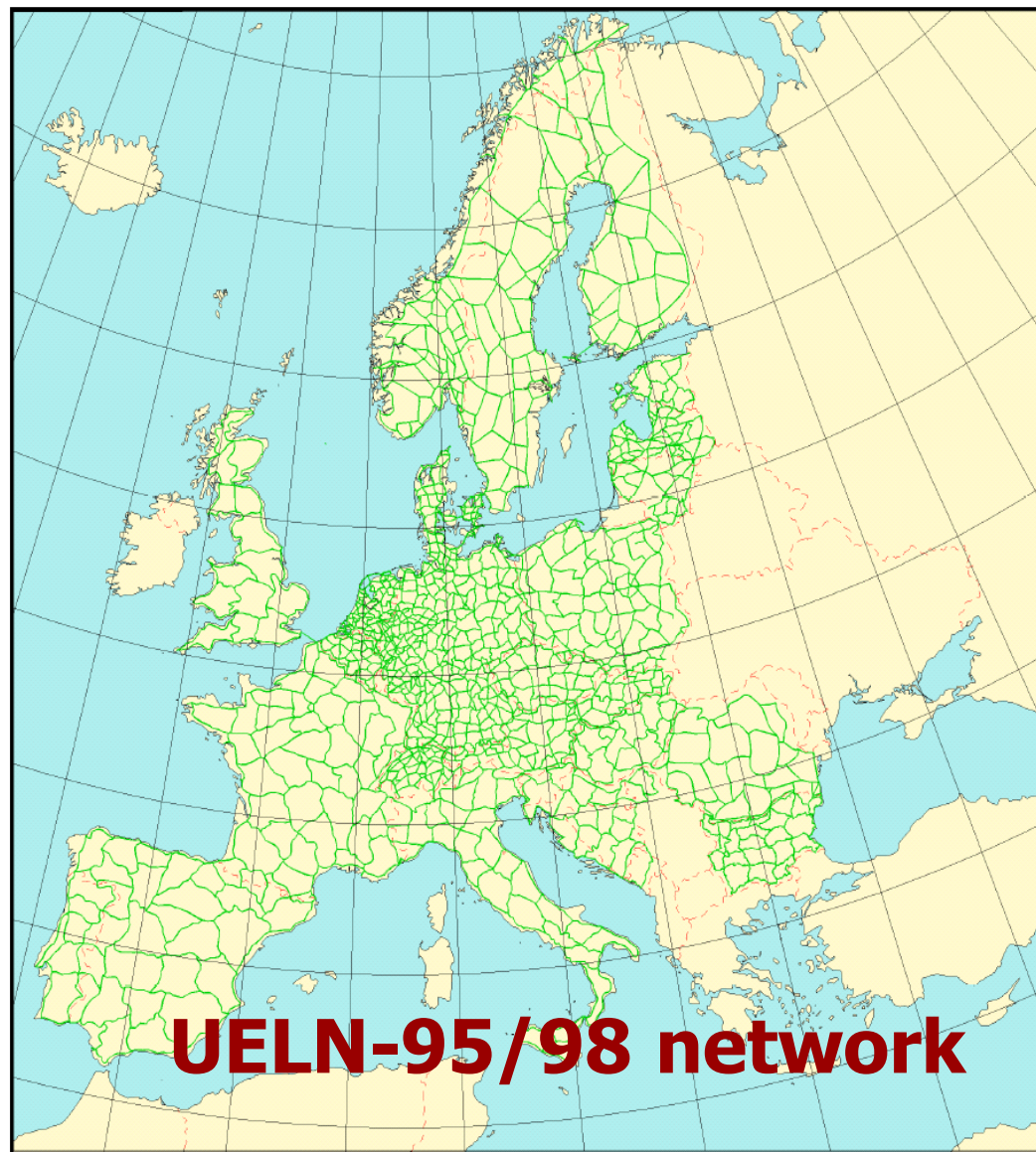
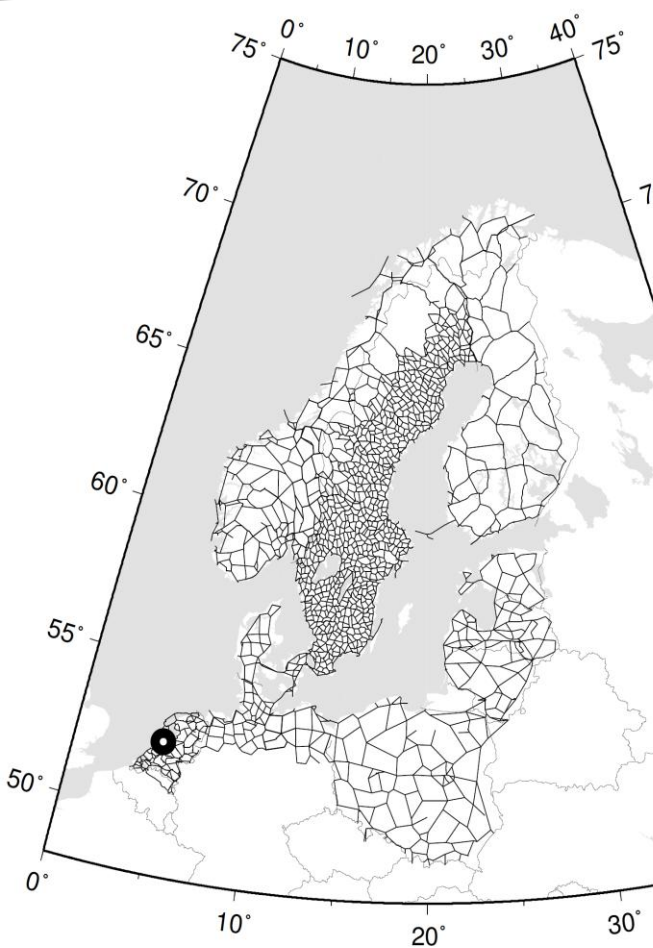
# Vaaitus on tarkka

## Levelling / GPS levelling errors

M.Poutanen, FGI

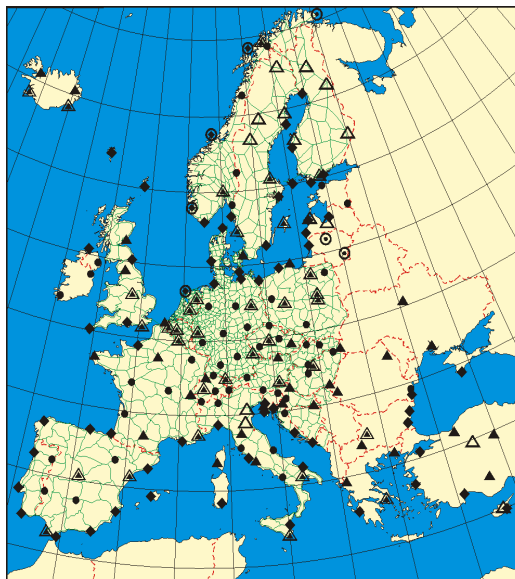


# Nykyisestä tulevaan

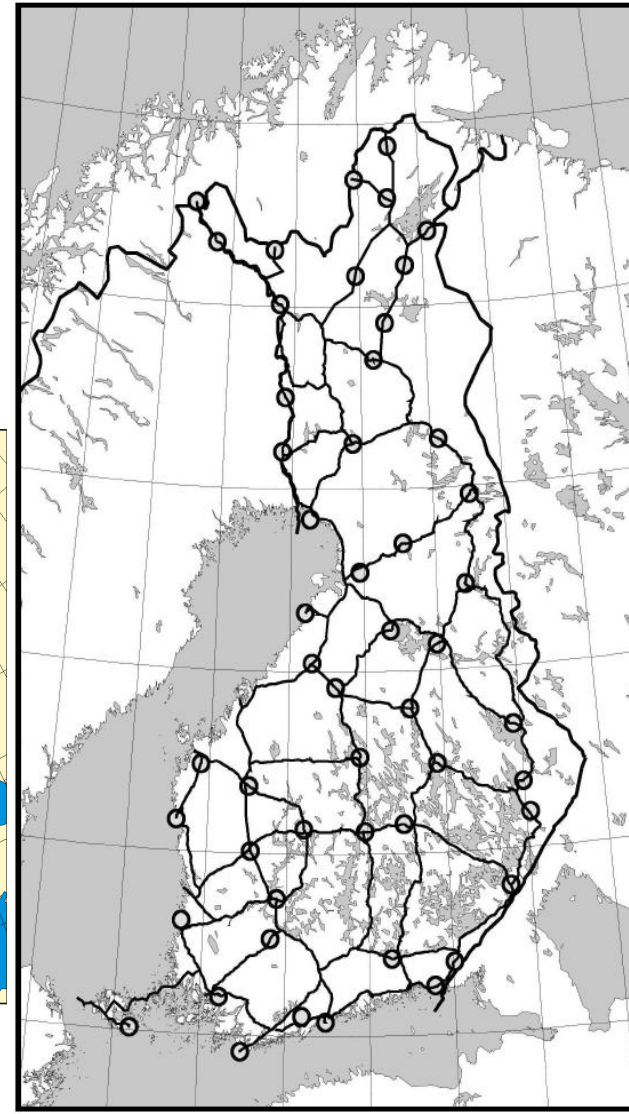


# European Unified Vertical Network (EUVN)

- EUVN-DA (Densification Action); mitattu 2005; julkaisu 2006 (M. Ollikainen)
- Osa Euroopan korkeusverkkoa; GNSS ja vaaitus



- ▲ EUREF sites
- ▲ GPS permanent stations - EUREF
- ▲ GPS permanent stations
- UELN & UPLN nodal points
- GPS permanent stations - nodal points
- ◆ Tide gauge sites
- GPS permanent stations - tide gauge
- UELN lines





# EVRS - WHS

The European Vertical Reference System (EVRS) is a gravity-related height reference system. It is defined by the following conventions:


- a) The vertical datum is the zero level for which the Earth gravity field potential  $W_0$  is equal to the normal potential of the mean Earth ellipsoid  $U_0$ :

$$W_0 = U_0.$$

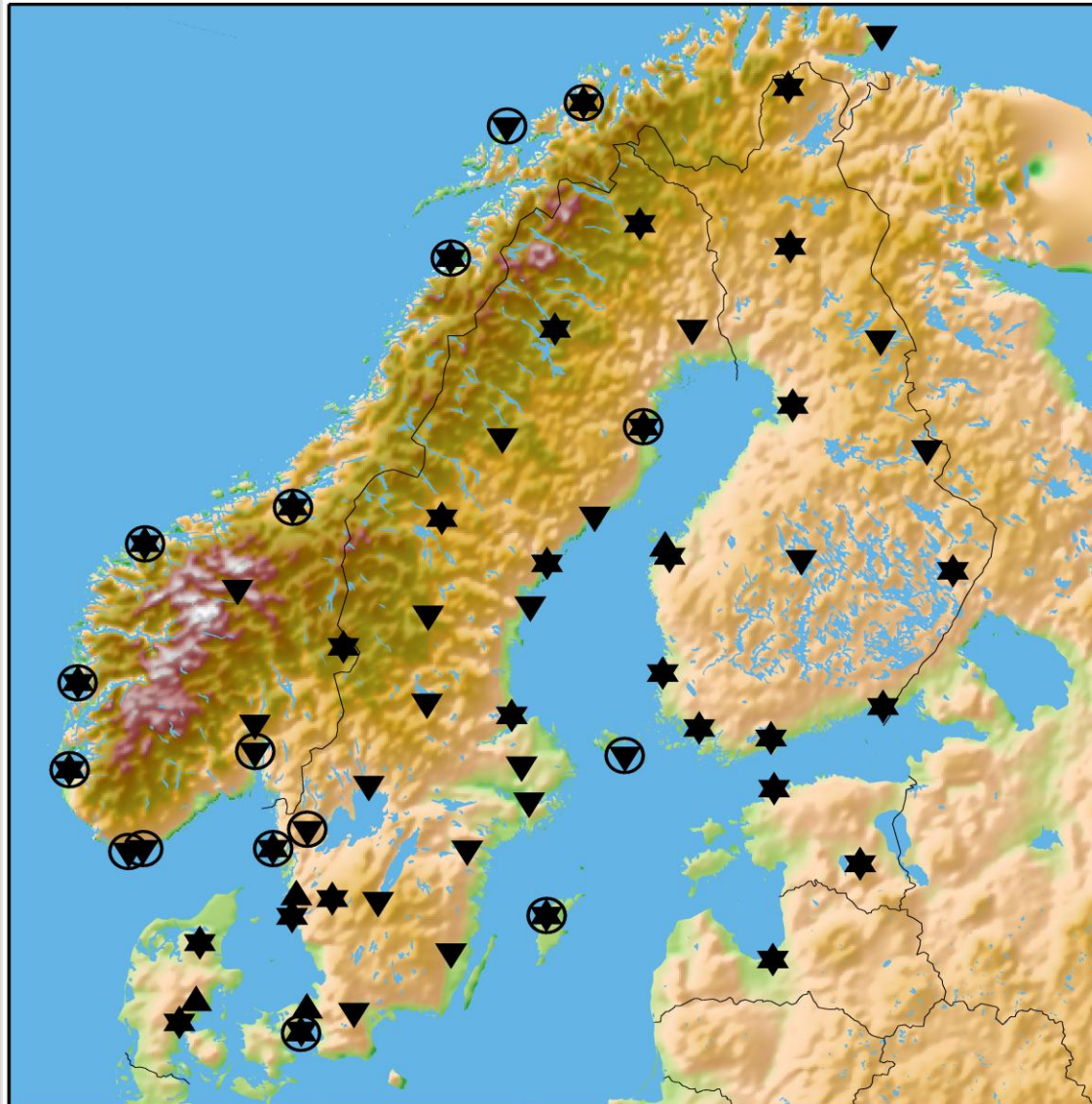
- b) The height components are the differences  $\Delta W_P$  between the potential  $W_P$  of the Earth gravity field through the considered points  $P$  and the potential of the EVRS zero level  $W_0$ . The potential difference  $W_P$  is also designated as geopotential number  $C_P$ :

$$\Delta W_P = W_0 - W_P = C_P.$$

Normal heights are equivalent to geopotential numbers.

- c) The EVRS is a zero tidal system, in agreement with the IAG Resolutions.
- 

# NGOS – Nordic Geodetic Observing System



Painovoima

GNSS

Mareografit

Havaintojen  
yhdistäminen

GGOS – Global  
Geodetic  
Observing  
System

# Tulevaisuuden ennustuksia

- Vaaitus ei kuole
- Neljättä valtakunnallista tarkkavaaitusta ei tehdä; uudet tekniikat korkeusjärjestelmän ylläpitoon
- GNSS-pohjainen korkeudenmääritys yleistyy
- Geoidimallien tarkkuus saavuttaa senttimetritason (GOCE + paikallinen)
- Globaali korkeusjärjestelmä käytettävissä 2010-luvulla; aluksi vain tieteellisissä sovelluksissa
- Uusi valtakunnallinen korkeusjärjestelmä v. 2050; perustuu globaaliin järjestelmään



TURUN KAUPUNGIN MITTAUSOSASTON  
PIIRTÄJÄN NÄKEMYS TARKKAVAAKI-  
TUKSESTA JA VAAKITUSREFRAKTIOSTA.