



Jonas höjdskola - Geoid- och landhöjningsmodeller

Jonas Ågren

Enheten för geodetisk infrastruktur
Lantmäteriet

Innehåll

Del 1 – introduktion och dagens situation

- Grundläggande begrepp
- Höjdsystem, geoidmodeller och landhöjningsmodeller i Sverige fram till idag*
- Gemensamma Europeiska höjdsystem

Del 2 – om den pågående* utvecklingen

- Om beräkningen av den nya Svenska geoidmodellen SWEN16_RH2000
- Mot effektivare och säkrare navigering i FAMOS-projektet (om införandet av Baltic Sea Chart Datum 2000)
- Den nya Nordiska landhöjningsmodellen NKG2016LU
- Det internationella höjdsystemet IHRS och dess (kommande) realisering



Grundläggande begrepp

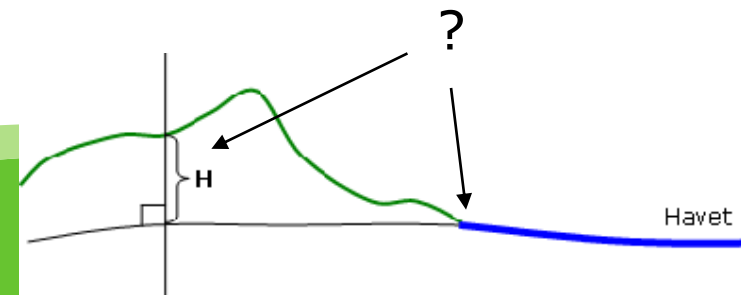
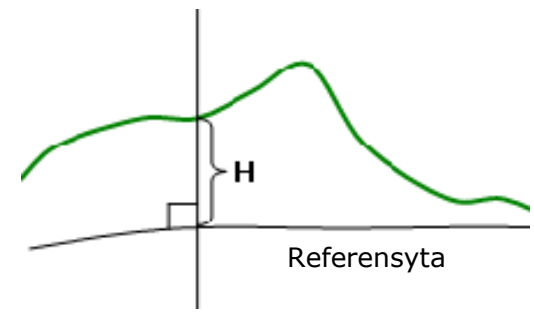


Vad är höjd?

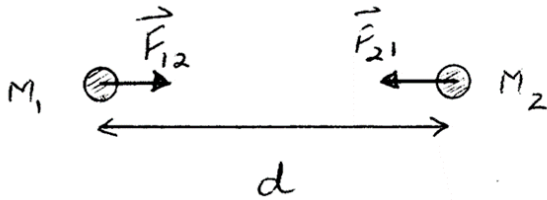
- Med **höjd** menar vi... det **vertikala avståndet över en referensyta**... den senare oftast på något sätt relaterad till havsytan.

Vi talar ju vanligen om "**höjd över havet**". Havet är en naturlig nollnivå, på något sätt.

- Vi tänker också vidare att alla punkter på en **opåverkad vattenyta** har samma höjd. Med hjälp av ett **vattenpass** kan vi bestämma vad som är vertikalt (upp) i en viss punkt och hur vattnet kommer att rinna.
- Höjd är ett oproblematiskt begrepp i vardags-språket, tills vi börjar fundera över hur en punkt på land kan relateras *i vertikalled* till havsytan, även fast havet är långt borta och inte alls rakt under punkten. Hur hänger det ihop?
- Och hur är det med havsytans variationer i tid och rum?



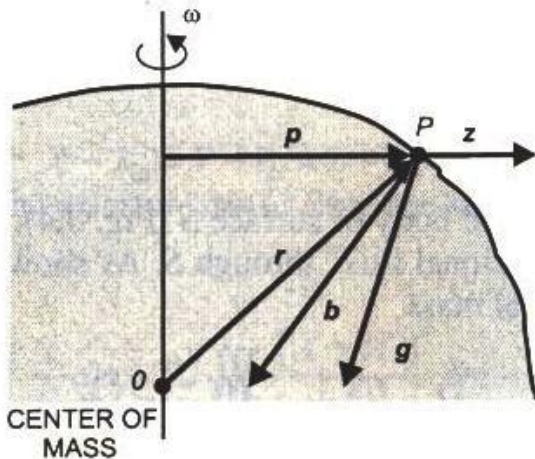
Jordens tyngdkraftsfält



- Newtons gravitationslag

$$F_{21} = F_{12} = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

- Inom geodesin studerar vi kraft på enhetsmassa, dvs. acceleration.
- Tyngdkraft = Gravitation + centrifugalkraft
- Enhet: m/s^2 eller Gal ($1 \text{ m/s}^2 = 100 \text{ Gal}$)



$$9.81456789 \text{ m/s}^2 = 981.456789 \text{ Gal}$$

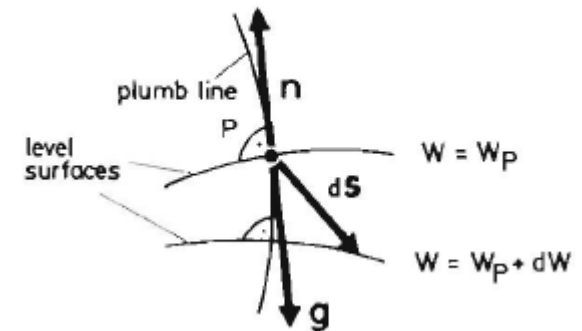
- Förhållande mellan tyngdkraftsvektorn och geopotentialen W :

$$\mathbf{g} = \nabla W = \text{grad}(W)$$

Tyngdkraftsvektorn, tyngdkraften, ekvipotentialytor och lodlinjer

Tyngdkraftsvektorn \mathbf{g} (i Kartesiska koordinater) och **tyngdkraften g**

$$\mathbf{g} = \left(\frac{\partial W}{\partial x}, \frac{\partial W}{\partial y}, \frac{\partial W}{\partial z} \right)^T \quad g = |\mathbf{g}| = \left| \frac{\partial W}{\partial n} \right|$$

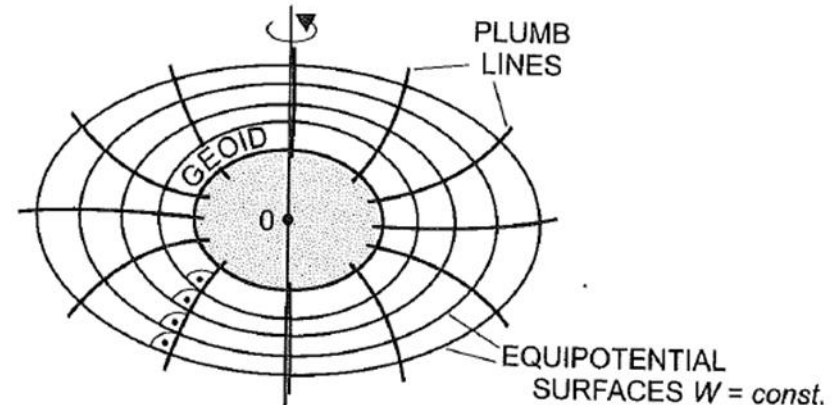


Ekvipotentialytor (eller **nivåytor**)

Ytor där $W = const$

$$dW = \mathbf{g} \cdot d\mathbf{s} = g \cdot ds \cdot \cos(\mathbf{g}, d\mathbf{s}) = 0 \text{ för } ds \text{ längs en nivåyta}$$

Tyngdkraftsvektorn \mathbf{g} är alltså vinkelrät mot ekvipotentialytan genom punkten.



Lodlinjerna (plumb lines) är linjer som tangenterar \mathbf{g} i varje punkt.

De är vinkelräta mot ekvipotentialytorna överallt.

Geoiden

- Geoiden definierades först som den "ekvipotentialyta i jordens tyngdkraftsfält som sammanfaller med havsytans medelnivå (MSL) över oceanerna" av C. F. Gauss 1828. Namnet föreslogs av Listing 1873.

$$W = W(\mathbf{r}) = W_0$$

- På grund av variationer i MSL (Mean Sea Level) både i rum och tid och geodynamiska rörelser, behöver definitionen ändras till "den ekvipotentialyta som bäst passar mot MSL i en viss epok" (e.g. Rapp 1995)
- Geoiden är alltså en utvald ekipotentialyta i tyngdkraftsfältet. Den kan beräknas ur tyngdkraftsobservationer med fysikaliska metoder/teorier, oberoende av havsytans krumbukter...
- Geoiden är en väldefinierad referensyta både på land och till havs.

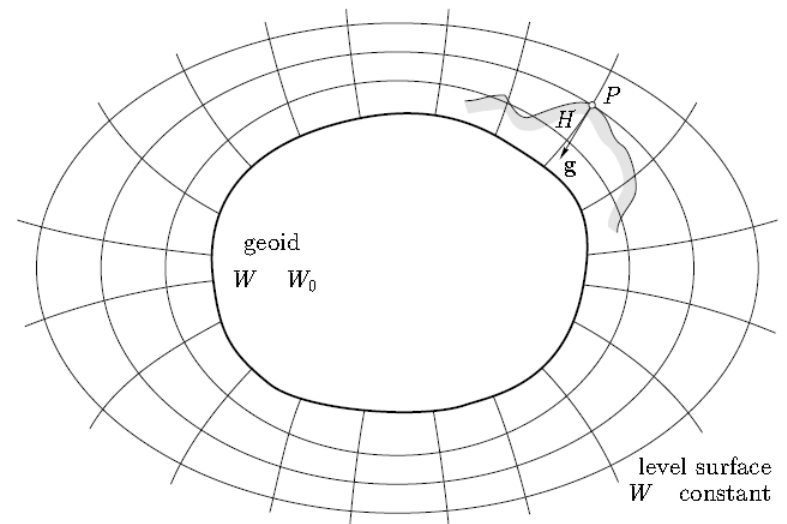
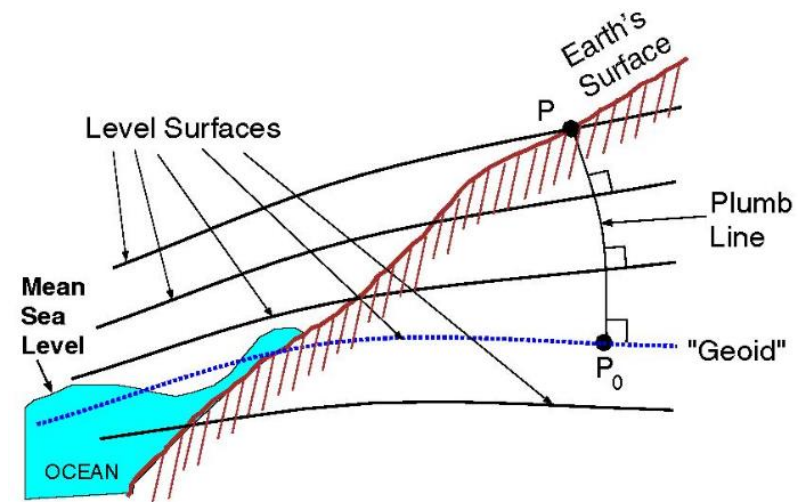
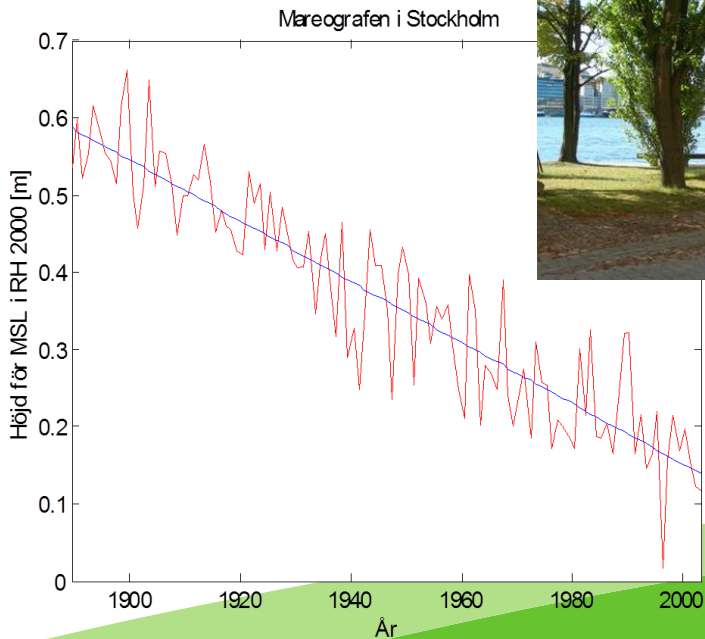
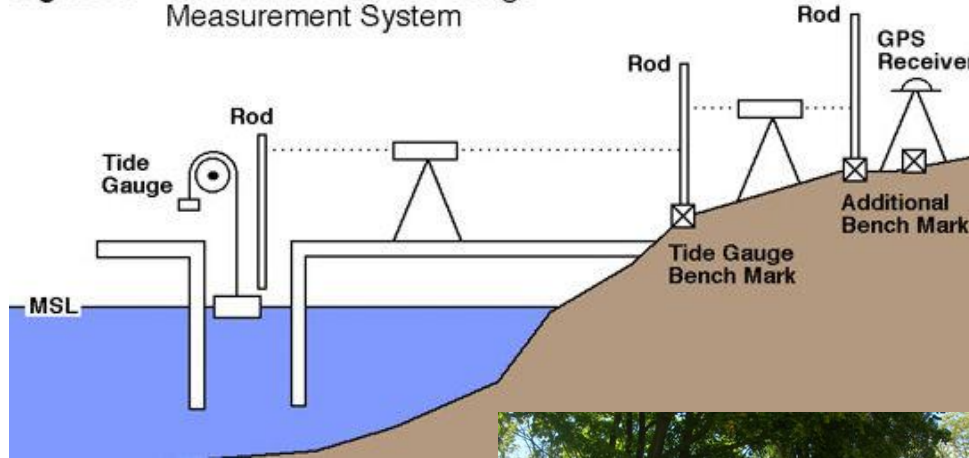


Fig. 2.2. Level surfaces and plumb lines

Havsytans variationer i en mareograf

Figure 1: Schematic of a Tide Gauge Measurement System



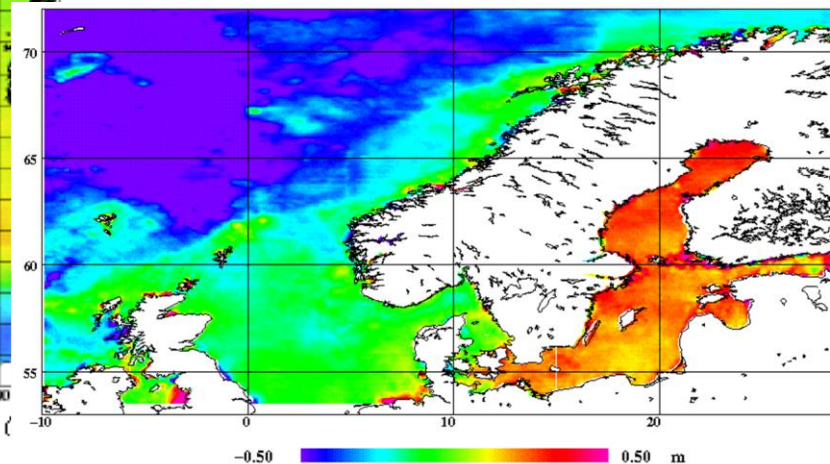
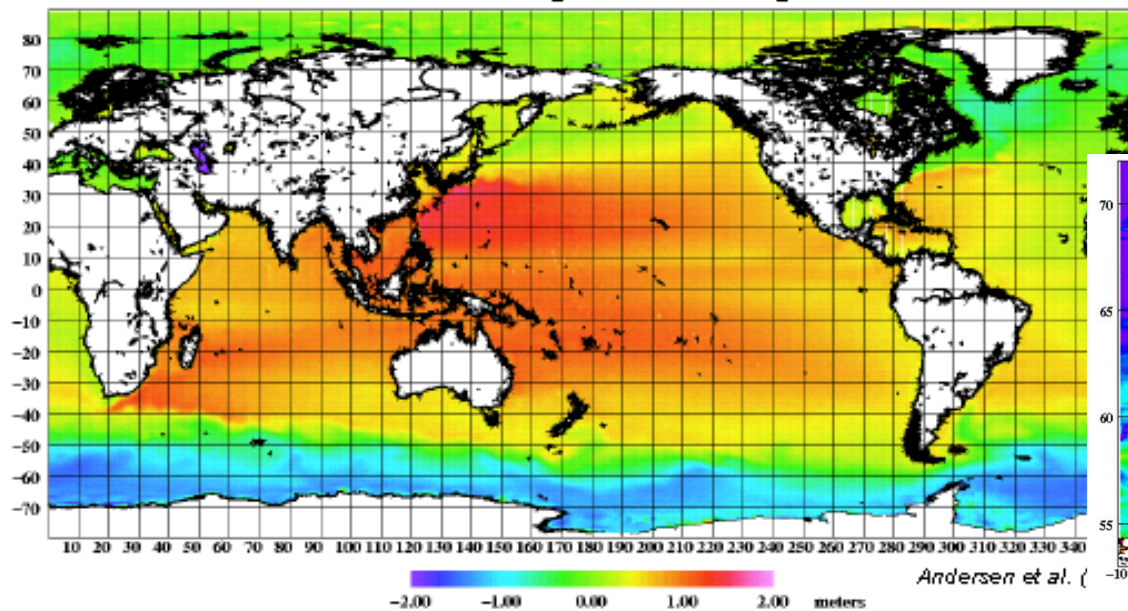
- I en **mareograf (pegel)** observeras höjden för havsnivån relativt en lokal höjdfix...
- Havsyntans tidsvariationer beror huvudsakligen på
 - Tidvatten (runt 70%, dock inte i Östersjön)
 - Meteorologiska faktorer (lufttryck, vindar...)
 - Oceanografiska faktorer (strömmar, densitetsförändringar beroende på temperatur och salinitet ...)
 - Förändrad vattenbudget (ändrad inströmning, etc.)
 - Geodynamiska rörelser som den postglaciala landhöjningen.
- Medelvärdesbildning över lång tid eliminerar det mesta av tidsvariationerna, men inte allt. Ofta görs detta över 18.6 år (lunar nutation cycle), men också mycket långa perioder används (t. ex. i Sverige).
- Figuren till vänster visar **årsmedelvärden** i mareografen i **Stockholm**. **Medelhavsytan för en viss epok** definieras här med hjälp av en regressionslinje (på grund av landhöjningen).

Illustration av hur havsytans medelnivå (MSL) varierar i förhållande till geoiden

- **Havsytans topografi** gör att MSL inte kan sammanfalla med geoiden även fast medelvärdesbildning sker över mycket lång tid.
- Skillnaden mellan MSL och geoiden kallas ofta **Mean Dynamic Topography (MDT)**.
- De rumsliga variationerna för MDT beror huvudsakligen på temperaturskillnader (temperaturutvidgning), permanenta strömmar, salinitetsskillnader, mm.
- Mean Sea Surface (MSS) är MSL relativt referensellipsoiden: $MSS = N + MDT$

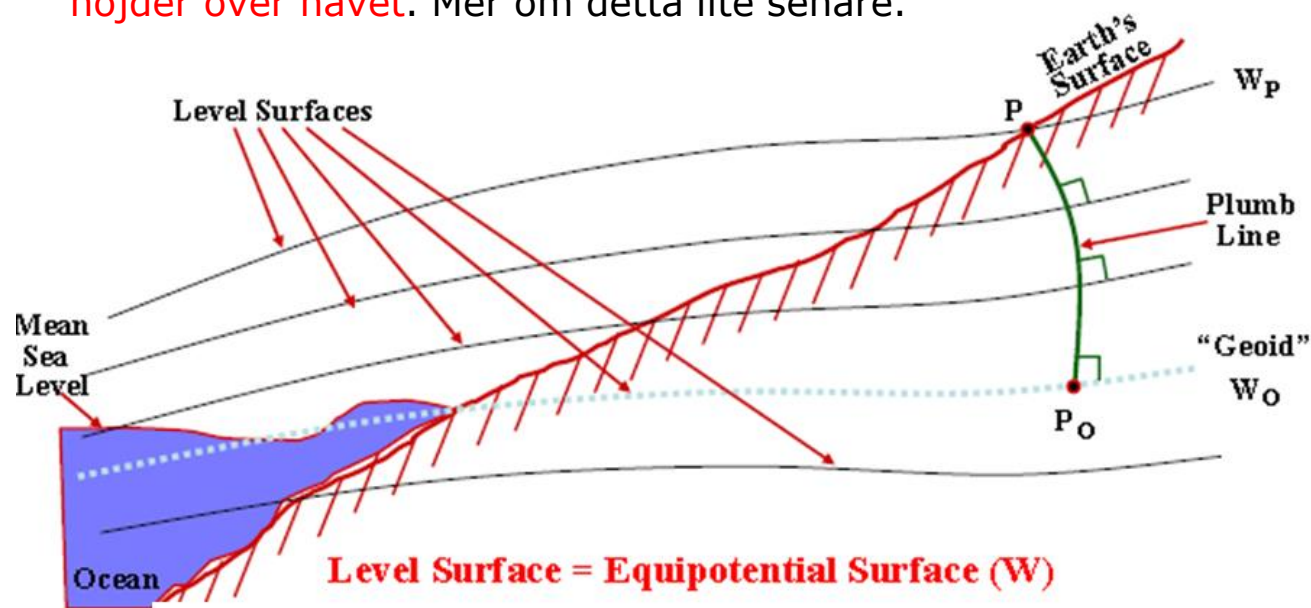
■ EXAMPLE: DNSC07 MDT

- DNSC08 MSS minus the EGM2008 global geoid model
- 1 min x 1 min resolution, global coverage



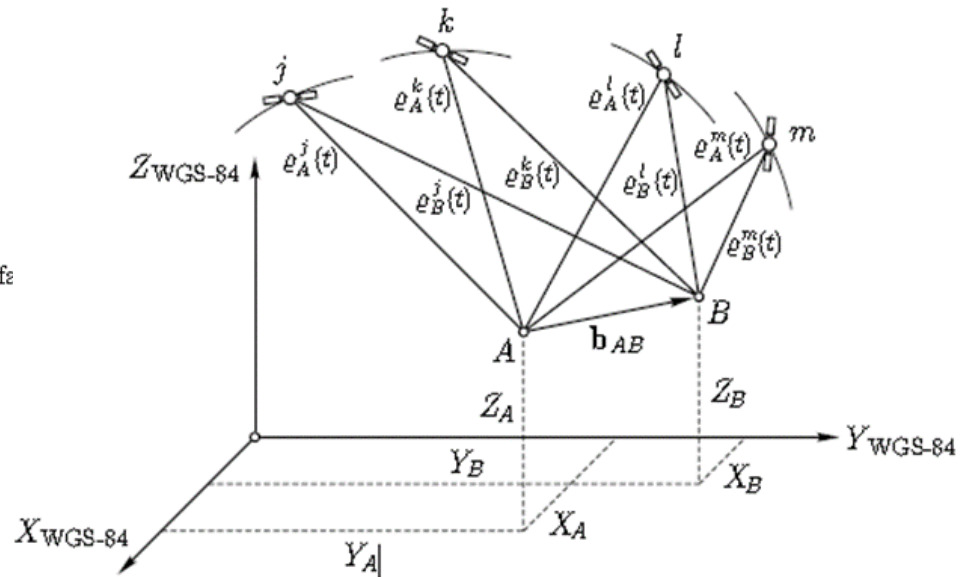
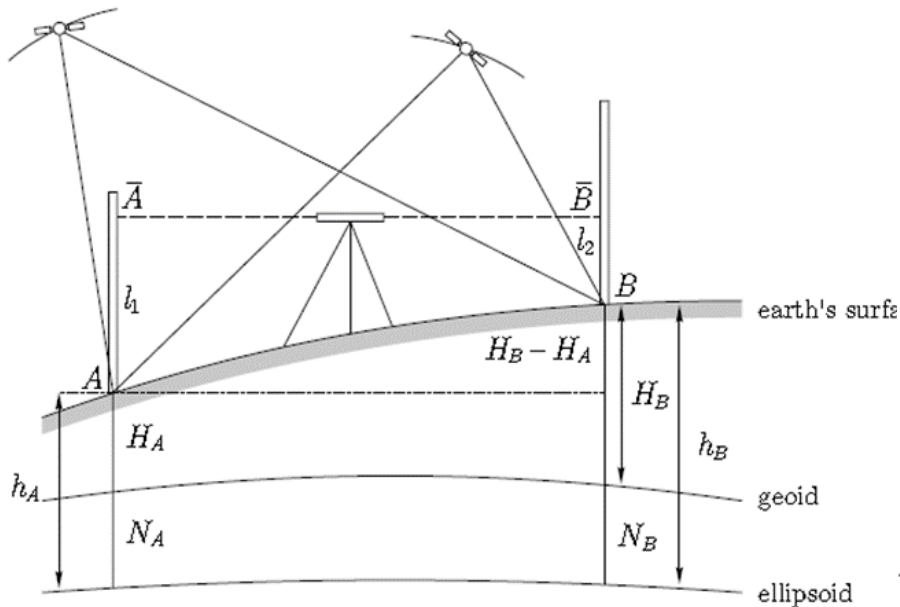
Ortometrisk höjd (och normalhöjd)

- Den **ortometriska höjden** är avståndet mellan geoiden och punkten **P** längs lodlinjen.
- Denna typ av **fysikalisk höjd** är intuitiv och vad vi normalt sett menar med höjd inom geodesin. Kallas ofta för bara **höjd över havet** i mer populära sammanhang.
- **MEN**, tyvärr så behöver **tyngdkraften längs lodlinjen vara känd** för att man exakt ska kunna bestämma den ortometriska höjden. Detta kräver i praktiken ett **antagande** av de **topografiska massornas densitet** (som vanligen inte känd med tillräckligt hög noggrannhet).
- Ett bra sätt att undvika detta är att använda så kallade **normalhöjder**, vilket är den typ av höjder vi strikt sett använder i Sverige och i stora delar av Europa. Dessa är approximativt sett lika ortometriska höjder. Normalhöjder kallas därför också för **höjder över havet**. Mer om detta lite senare.



Olika typer av höjdbestämning ger olika referensytor

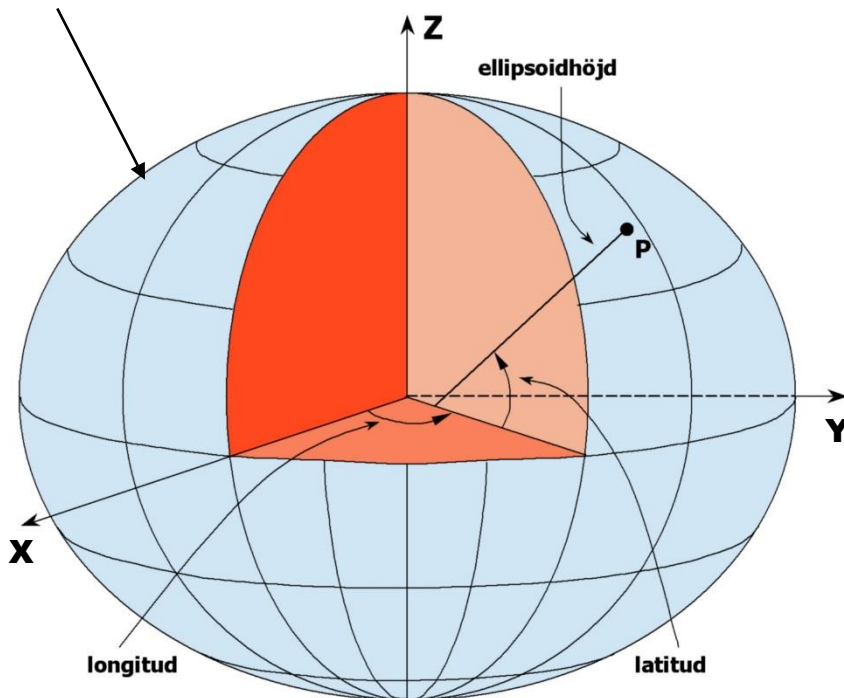
- Beroende på hur höjdbestämning görs fås olika typer av höjder.
- Noggrann höjdbestämning kan idag göras med **två principiellt olika metoder**:
 - **Precisionsavvägning** eller trigonometrisk höjdbestämning: Ger höjdskillnader i **jordens tyngdkraftsfält**. Referensytan är här **geoiden** (eller kvasigeoiden om normalhöjder används).
 - Höjdbestämning med **satellitmetoder som GNSS** (framförallt GPS): Ger **geometriska höjdskillnader oberoende av tyngdkraftsfältet**. Relaterar till **referensellipsoiden** (eller till ett 3-dimensionellt geocentriskt kartesiskt koordinatsystem)



Tredimensionella koordinater vid GNSS-mätning

- Kartesiska koordinater: X, Y, Z
- Geodetiska (geografiska) koordinater: latitud ϕ , longitud λ och **höjd över ellipsoiden h**

Referensellipsoiden

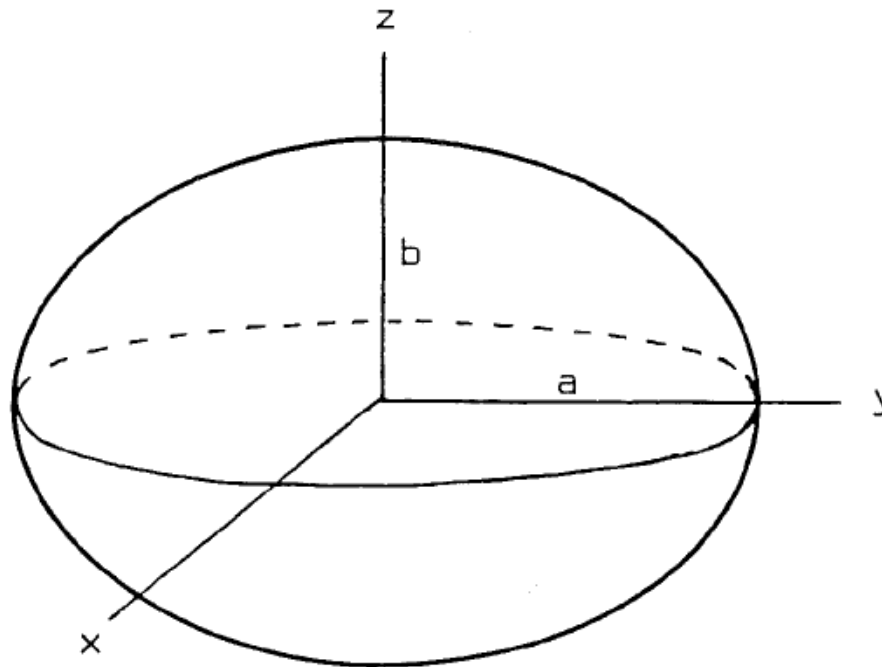


- Två olika sätt att säga samma sak!
- De geodetiska koordinaterna beror på referensellipsoiden.
- För att erhålla plana koordinater N, E används en kartprojektion.

Referensellipsoiden

- Referensyta för höjden över ellipsoiden h (bestäms med GNSS)
- Matematisk yta, rotationsellipsoid:

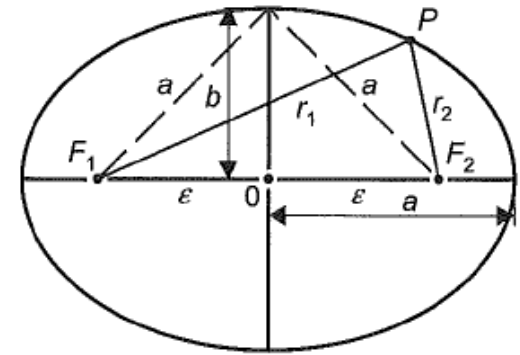
$$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$$



Parametrar som definierar referensellipsoiden

- Rotationsellipsoiden definieras entydigt av 2 parametrar, till exempel:

- ✓ Halva storaxeln a + halva lillaxeln b
- ✓ Halva storaxeln a + avplattningen f
- ✓ Halva storaxeln a + första excentriciteten e



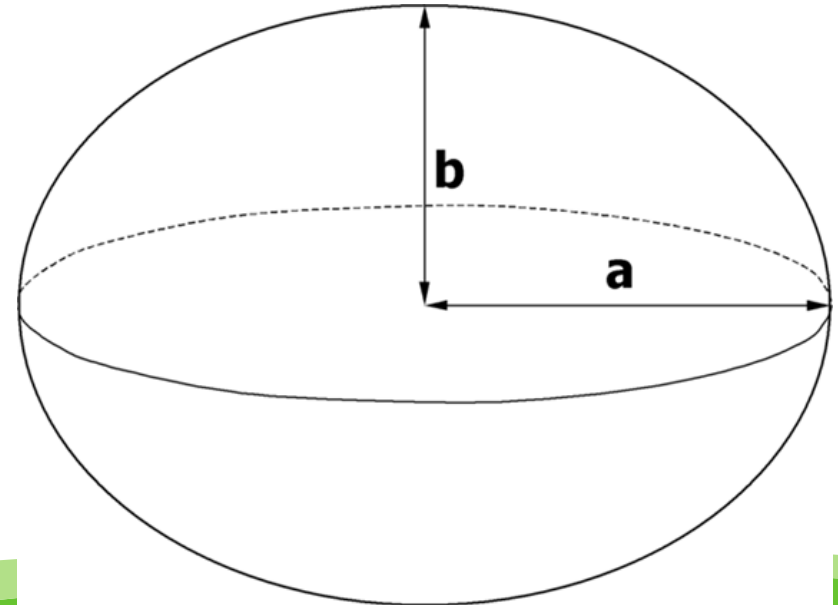
$$\epsilon = ae$$

- Avplattningen f :

$$f = \frac{a - b}{a}$$

- Första excentriciteten e :

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$$

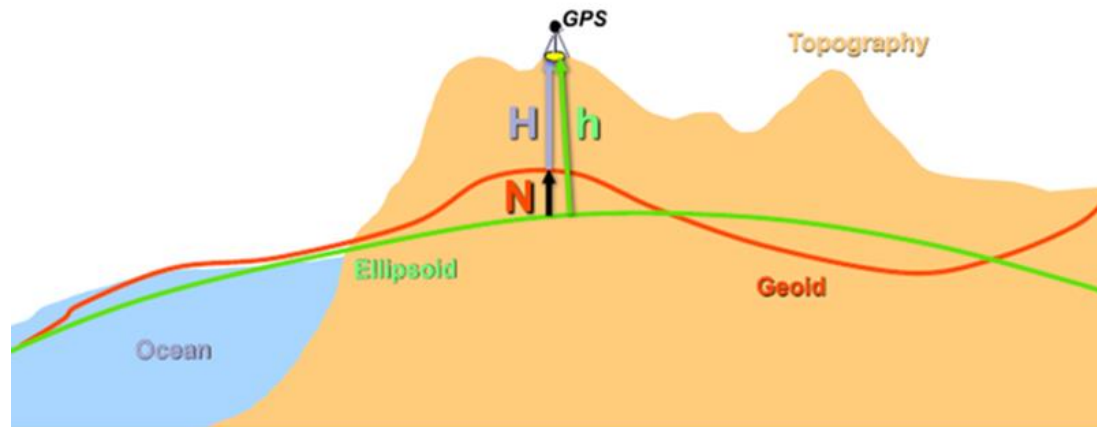


Några olika referensellipsoider

Ellipsoid	a (m)	1/ f
Svanberg 1817	6 376 797	304.250 6
Bessel 1841	6 377 397.155	299.152 812 8
Clarke 1880	6 378 249.145	293.456
Hayford 1910	6 378 388	297.0
GRS 1980	6 378 137	298.257 222 101
WGS 84	6 378 137	298.257 223 563

Geoiden och ellipsoiden

- **Geoiden** definieras som den **ekvipotentialyta** (nivåyta) i jordens tyngdkraftsfält som bäst sammanfaller med havsytans medelnivå (MSL).



$$H_{\text{(from leveling)}} = h_{\text{(from GPS)}} - N_{\text{(height of the geoid)}}$$

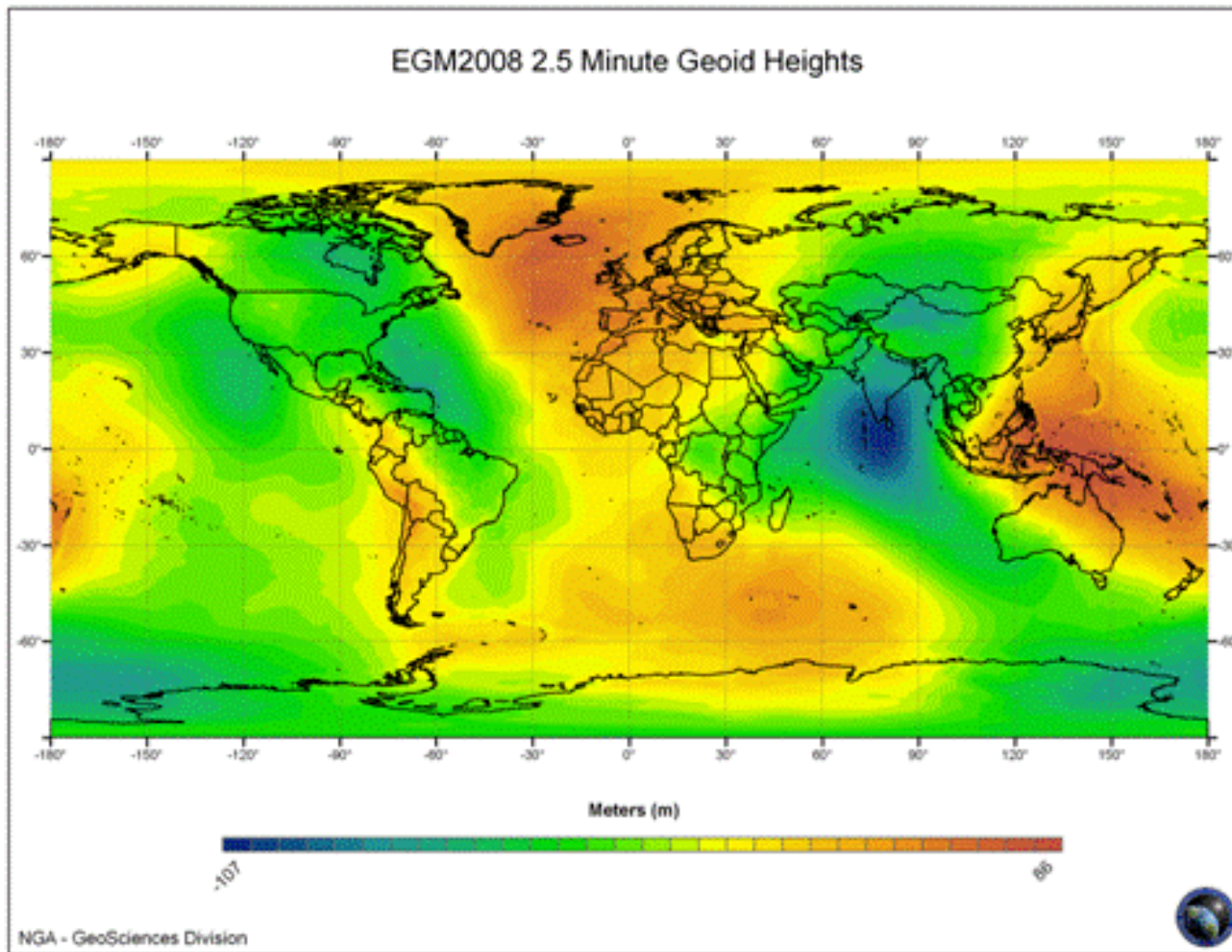
H = Höjd över geoiden (höjden över havet). Bestäms med avvägning.

h = Höjd över ellipsoiden i ett 3-dim referenssystem.
Bestäms med GNSS.

N = Geoidhöjd. Modelleras med en geoidmodell.

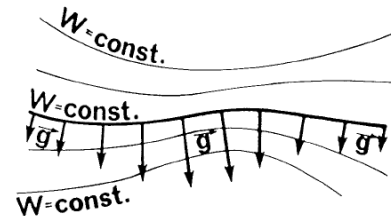
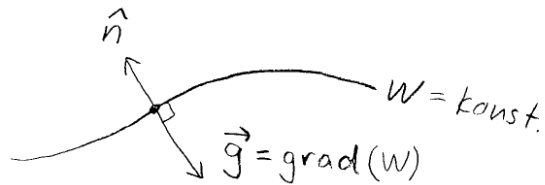
Globala geoidhöjder relativt GRS 80-ellipsoiden

- Moderna ellipsoider som GRS 80 överensstämmer med geoiden inom ca. ± 100 m



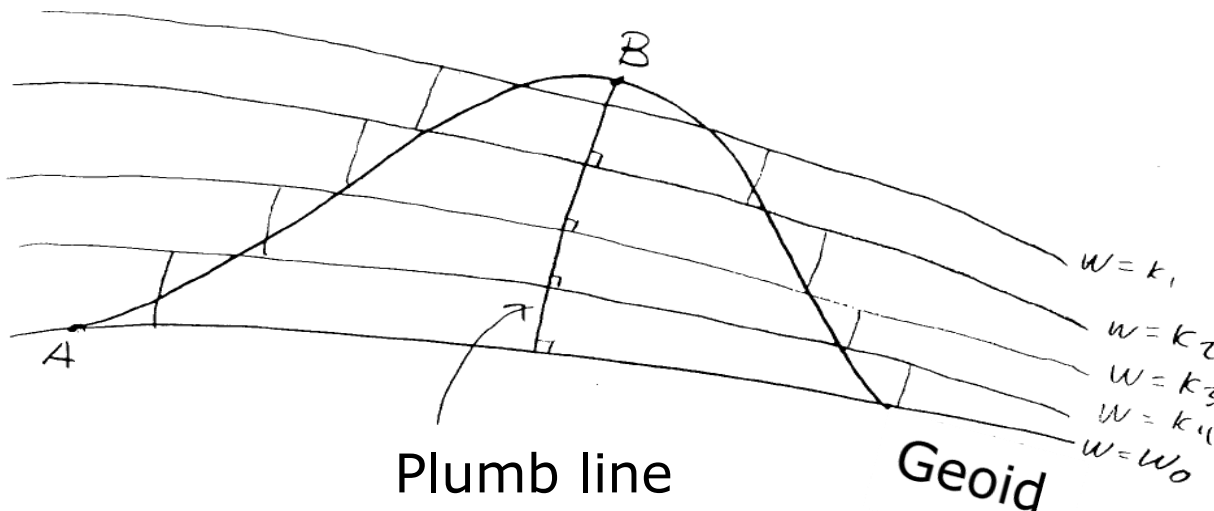
Fördjupning (1): Vägberonde vid avvägning

- Ekvipotentialytorna är inte parallella. Hur tätt de ligger beror på tyngdkraften (tätare där g är stor).



$$\frac{dW}{dn} = g \cdot dn \cdot \cos(\mathbf{g}, \mathbf{dn}) = -g \quad \Rightarrow \quad dW = -g \cdot dn = -g \cdot dH$$

- Denna icke-parallellitet medför att summan av de avvägda höjdskillnaderna beror på vilken väg man tar.



$$\delta n_{A,B} = \sum_A^B \delta n \approx \int_A^B \delta n$$

$$\int \delta n \neq 0$$

Fördjupning (2): Geopotentialtal

- Eftersom potentialen enbart beror på läget, har vi

$$\oint W = -\oint g dn = 0$$

- För att undvika vägberoendet vid utjämningsnät, konverterar man först om de avvägda höjdskillnaderna till potentialskillnader.

$$dW = W_B - W_A = -\int_A^B g dn \approx -\sum_A^B g \delta n$$

- Potentialskillnaden mellan varje utjämnad punkt och geoiden konverteras sedan tillbaka till höjder (det finns flera olika typer av höjder, se nästa bild för de två vanligaste)
- Det är standard att undvika minustecknet genom att introducera det så kallade **geopotentialtalet C**

$$C_A = W_0 - W_A \quad \Rightarrow \quad dC = -dW = g \cdot dn$$

$$\Delta C_{AB} = C_B - C_A = \int_A^B g \cdot dn \approx \sum_{i=1}^n g_i \delta n_i$$

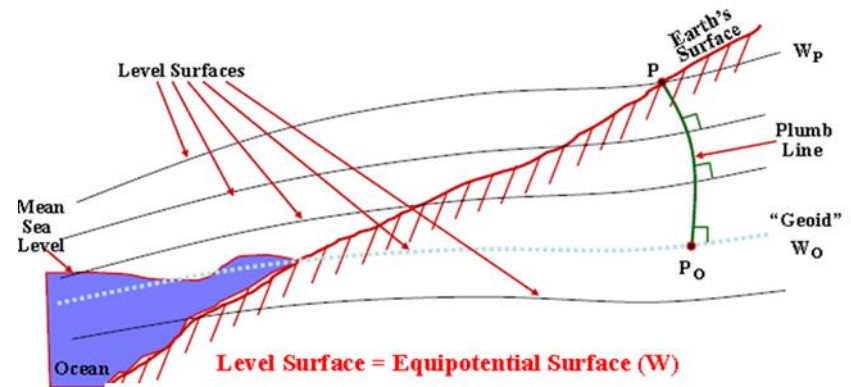
Enhet: 1 gpu = 10 m²/s² = 1 kGal m (approximativt samma storlek som höjd, ungefär 2% mindre)

Fördjupning (3): Beräkning av höjd ur potentialtal

Ortometriska höjder

$$H_P = \frac{C_P}{\bar{g}_P}$$

- Kräver en densitetshypotes för de topografiska massorna.
- Naturlig och intuitiv höjd.

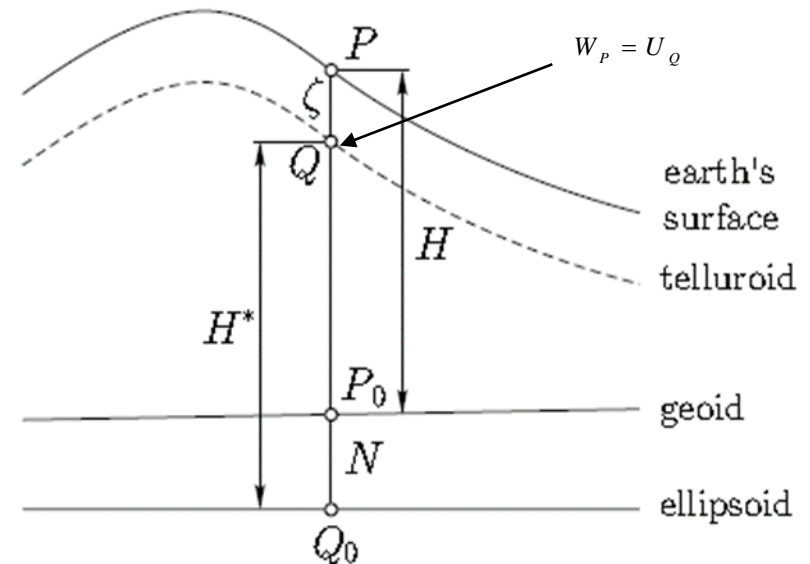


Normalhöjder

$$H_P^* = \frac{C_P}{\bar{\gamma}_P}$$

$$\bar{\gamma}_P = \gamma_0 \left(1 - \frac{1}{a} (1 + f + m - 2f \sin^2 \phi) H^* + \dots \right)$$

- Svårare att förstå.
- Kan bestämmas utan densitetshypotes.
- Genom att tänka sig **höjdanomalin ζ** som angiven över ellipsoiden erhålls **kvasideoiden**.



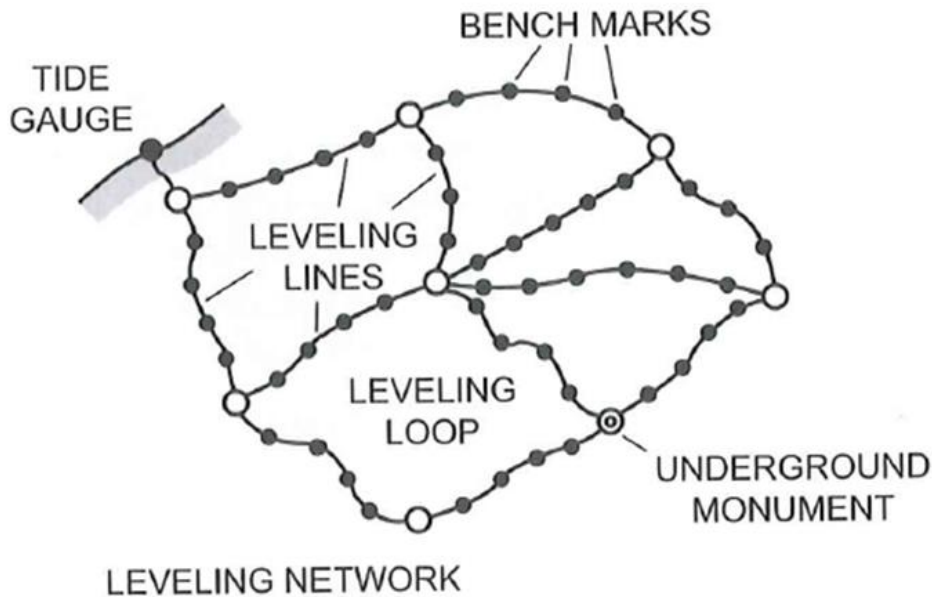
Höjdsystem, geoidmodeller och landhöjningsmodeller i Sverige fram till idag*



Geodetiska referenssystem

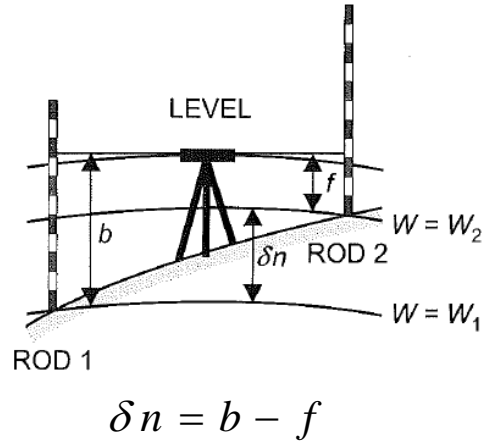
- För att kunna bestämma olika punkters läge med hjälp av geodetiska mätningar så behöver vårt **koordinatsystem relateras till jorden** på något sätt.
- När vi har gjort det så har vi lagt fast vårt **geodetiska referenssystem** (tidigare ofta geodetiskt datum)
- Mer precist: Ett geodetiskt referenssystem består av
 - ✓ ett nät av referenspunkter (ett referensnät),
 - ✓ mätningar,
 - ✓ och en systemdefinition (jordmodell, ellipsoid, koordinatsystem, etc.)
- vilket ger oss
 - ✓ fastställda lägen för referenspunkterna
- Koordinaterna för dessa punkter sägs **realisera** referenssystemet.
- I ett geodetiskt **höjdsystem** har vi bara en koordinataxel vars nollpunkt sammanfaller med referensytan (geoiden/kvasigeoiden) överallt, etc.

Traditionella geodetiska höjdsystem

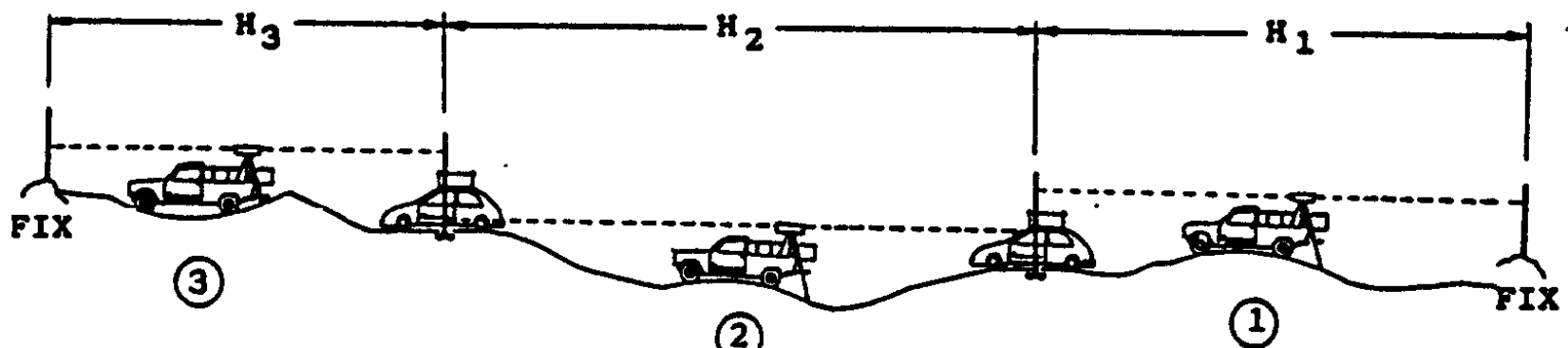


- **Geoiden (eller kvasigeoiden)** används som referensyta.
- **Precisionsavvägning** (ev. motoriserad) används för relativ höjdbestämning.
- **Nollnivån** läggs fast på ett lämpligt sätt, t ex i förhållande till medelhavsytan (MSL) i en eller flera **mareografer**, eller för att stämma med andra höjdsystem.
- För att undvika vägberoende konverteras de mätta höjdskillnaderna om till **geopotentialskillnader** (genom att multiplicera med tyngdkraft).
- De slutgiltiga så kallade **geopotentialtalen** konverteras slutligen om till höjd, vanligtvis **ortometrisk höjd** eller **normalhöjd**.
- En geodynamisk korrektionsmodell (**landhöjningsmodell**) kan behövas för att räkna om alla avvägningar till en vald **referensepok**.
- System måste väljas för den **permanenta tidjorden** (dvs. hur den tidsberoende delen av månens och solens inverkan hanteras).

Precisionsavvägning

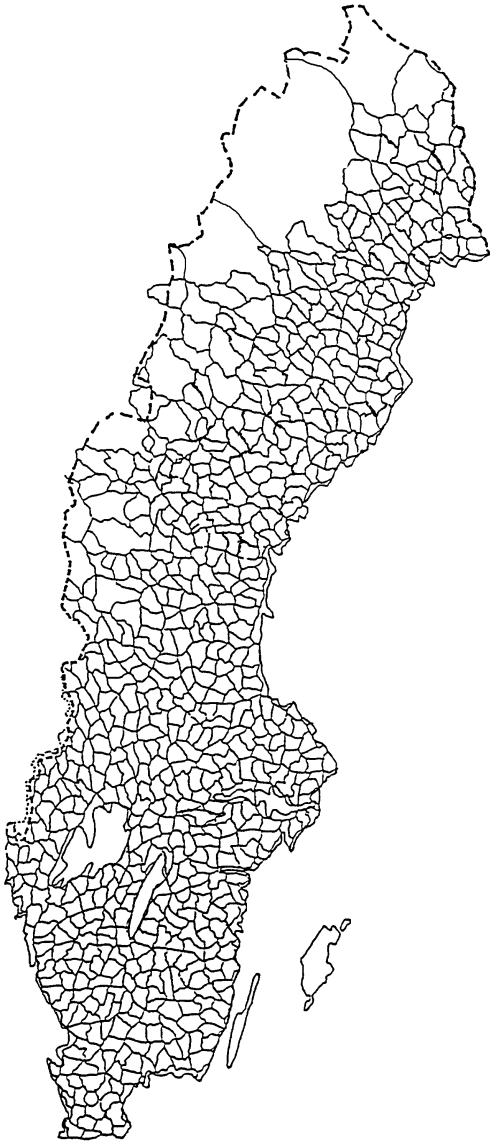


- Det noggrannaste sättet att bestämma höjder över korta och medellånga avstånd är att använda (precisions-)avvägning.
- Instrumentet sätts vanligen upp mitt emellan avvägningstångerna för att eliminera vissa fel. Avståndet mellan avvägningssinstrumentet och stängerna väljs vanligen till ca 30 till 50 meter.
- För längre avstånd används ett så kallat avvägningståg used (illustreras ned för **motoriserad avvägning**)



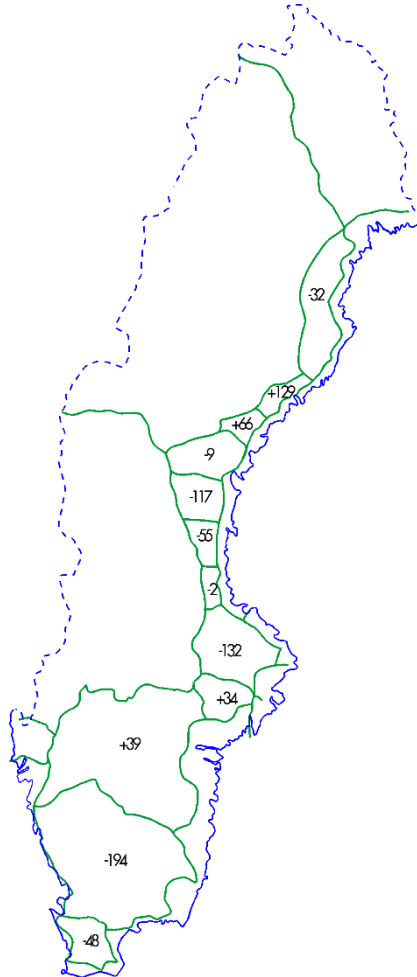
Det svenska nationella höjdsystemet RH 2000

- Traditionellt geodetiskt höjdsystem.
- Baserat på den tredje svenska riksavvägningen: 1979 – 2003.
- Motoriserad avvägning, se fig.



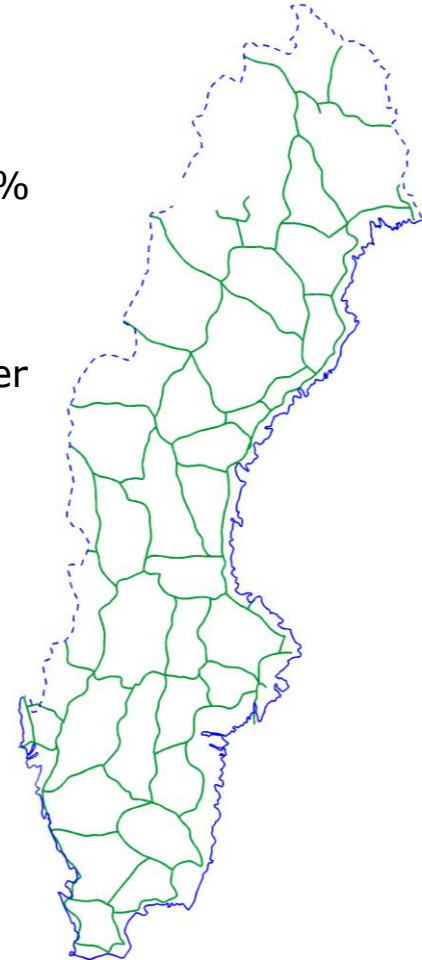
Den första precisionsavvägningen ... resulterade i höjdsystemet RH 00

- 1886-1905
- 4857 km
- ca 2500 fixpunkter
- avvägning till fots längs järnvägar
- Avvägningsstänger av trä
- ...



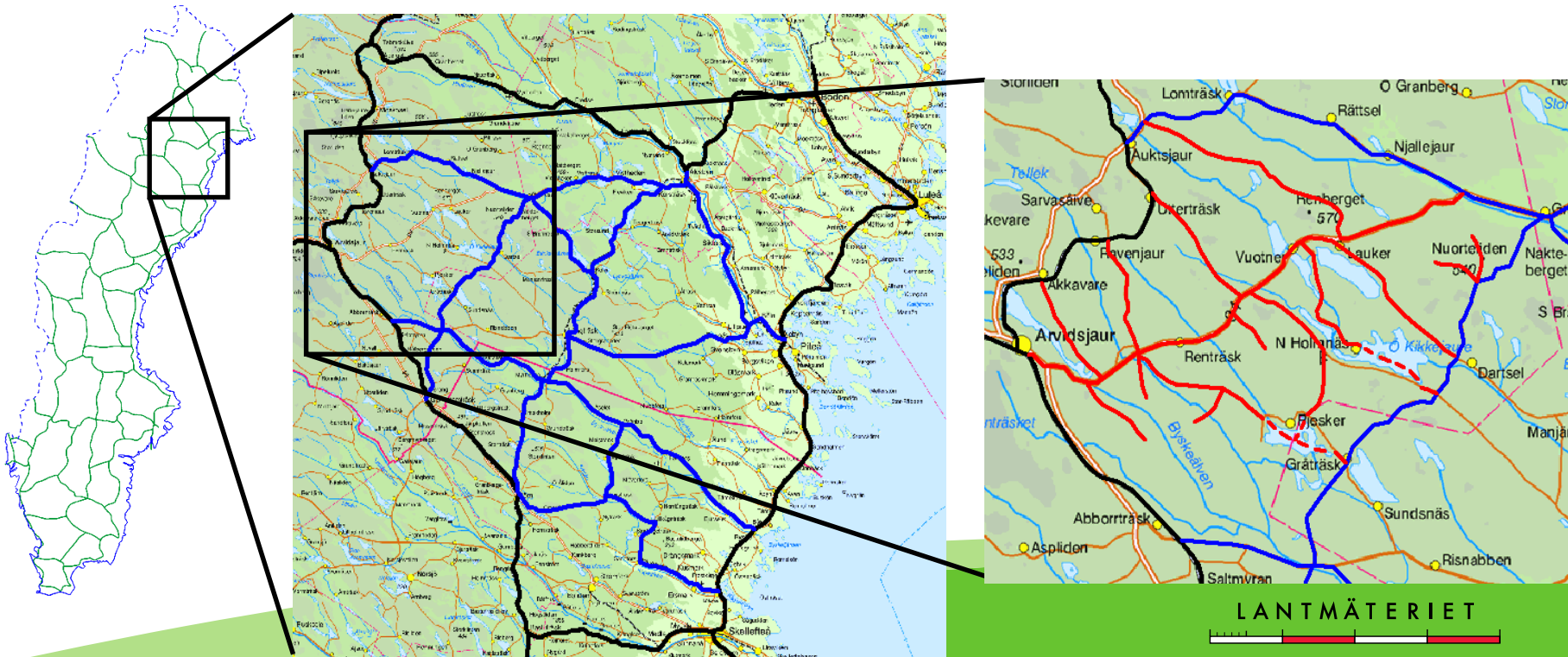
Den andra precisionsavvägningen ... resulterade i höjdsystemet RH 70

- 1951-1967
- 10389 km
- ca 9700 fixpunkter
- avvägning till fots, 75 % längs järnvägar, resten längs landsvägar
- dubbelskaliga kalibrerade invarstänger
- ...



Förtätning av RH 00 och RH 70 för allmän kartläggning (linjeavvägningen)

- Andra och tredje ordningens nät (huvud- och detaljlinjer)
- Pågick 1913-1975
- MYCKET (!) lägre noggrannhet än precisionsavvägningarna



Varför en tredje precisionsavvägning och ytterligare ett höjdsystem?

- RH 70 höll inte måttet.
- Tidigare förtätningar avsedda för den allmänna kartläggningen (linjeavvägningen), ej för anslutning av lokala nät.
=> Mycket begränsad tillgång till anslutningspunkter av godtagbar kvalité.

I praktiken omöjligt för många användare att ansluta lokala kommunala höjdnät

- Svårtillgängliga och förstörda punkter
- m.m.

Den tredje precisionsavvägningen ... resulterade i höjdsystemet RH 2000

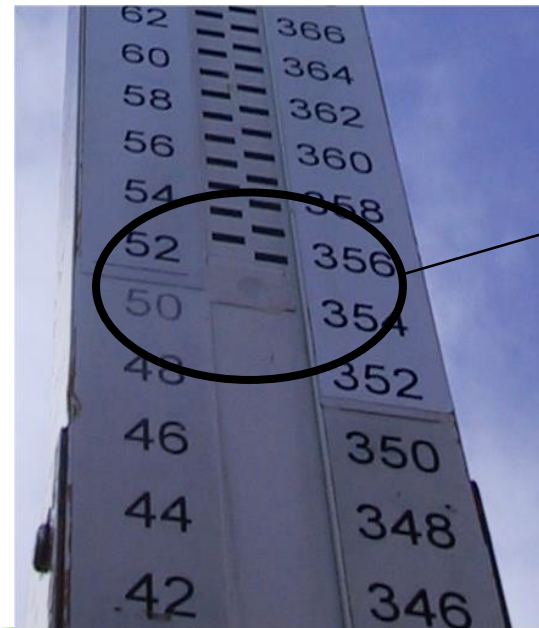


- 1979 - 2003
- Slingor med en omkrets av ca 100 km
- Ca 1 km mellan fixpunkterna
- Ca. 50 000 fixar
- Anslutningsmöjligheter för lokala/kommunala nät planerades från början.
- Ca. 50 000 km dubbelavvägning (totalt 122 582 km avvägning)
- Teknik, definition, slutberäkning och landhöjningsmodell behandlas nedan.

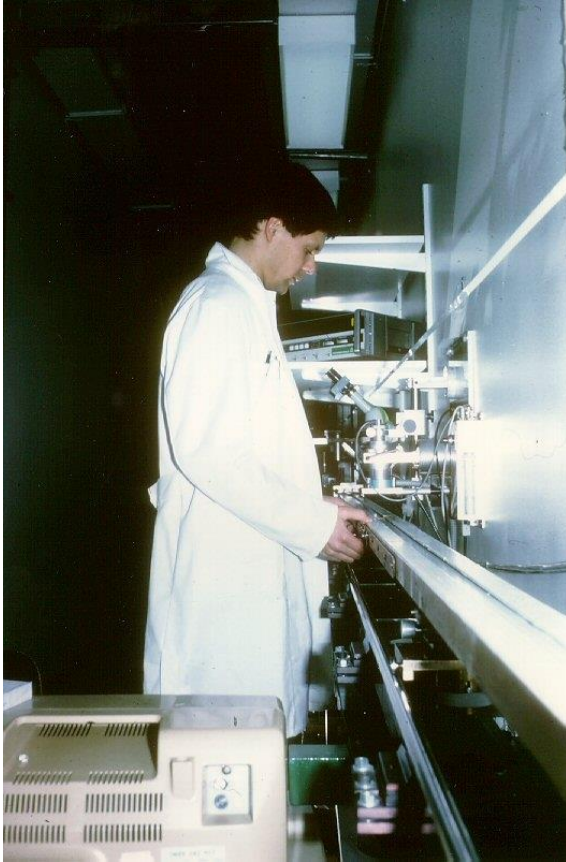


Tekniken

- Motoriserad avvägning
- Dubbelskaliga kalibrerade invarstänger.

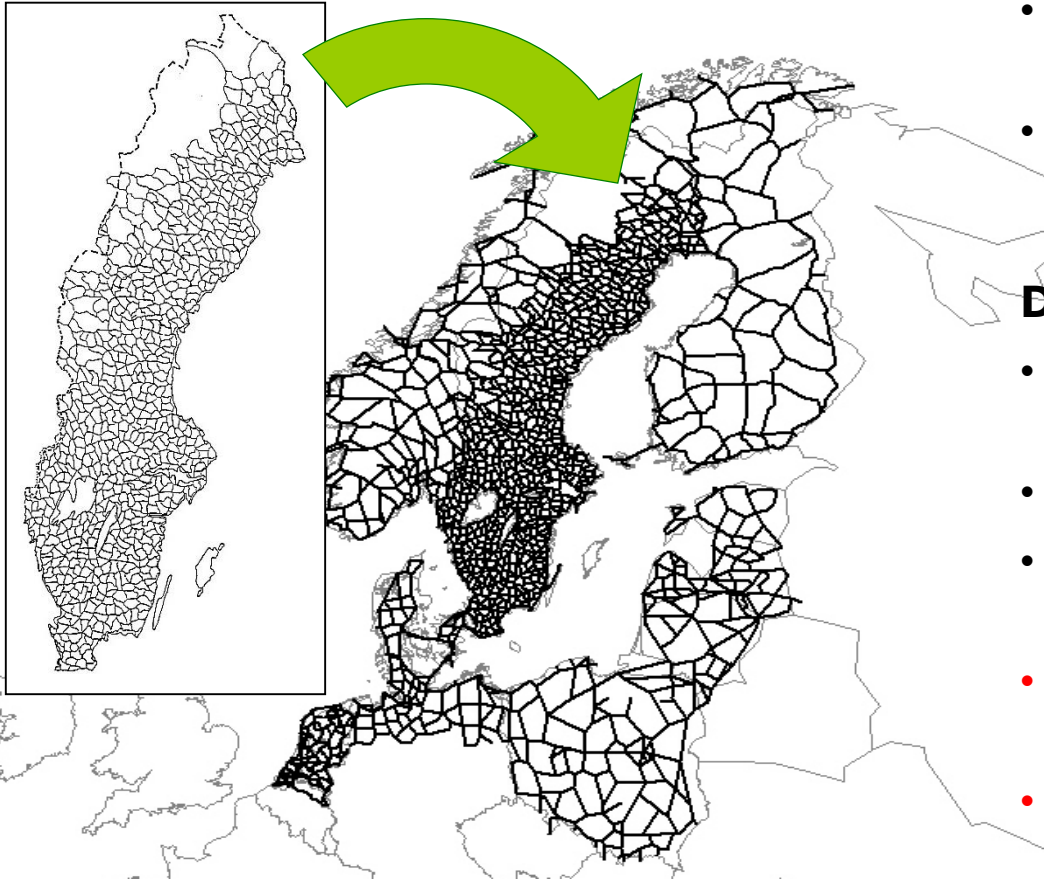


Kalibrering/korrektioner



- skala/gradering
- temperatur
- jordkrökning
- tidjord (påverkan måne/sol)

Slutberäkning av RH 2000



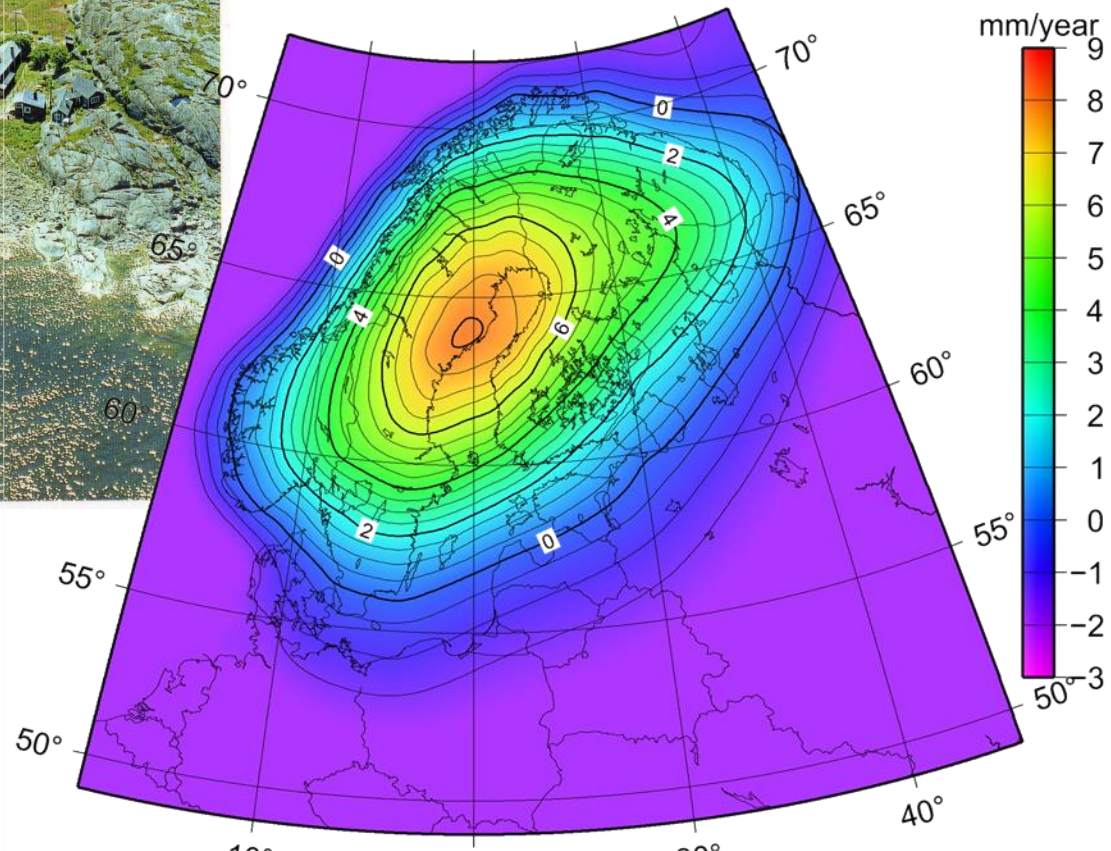
Baltic Levelling Ring (BLR)

- Samarbete med övriga nordiska länder (NKG) och EUREF, klart 2005.
- Beräknad i överensstämmelse med European Vertical Reference System (EVRS).

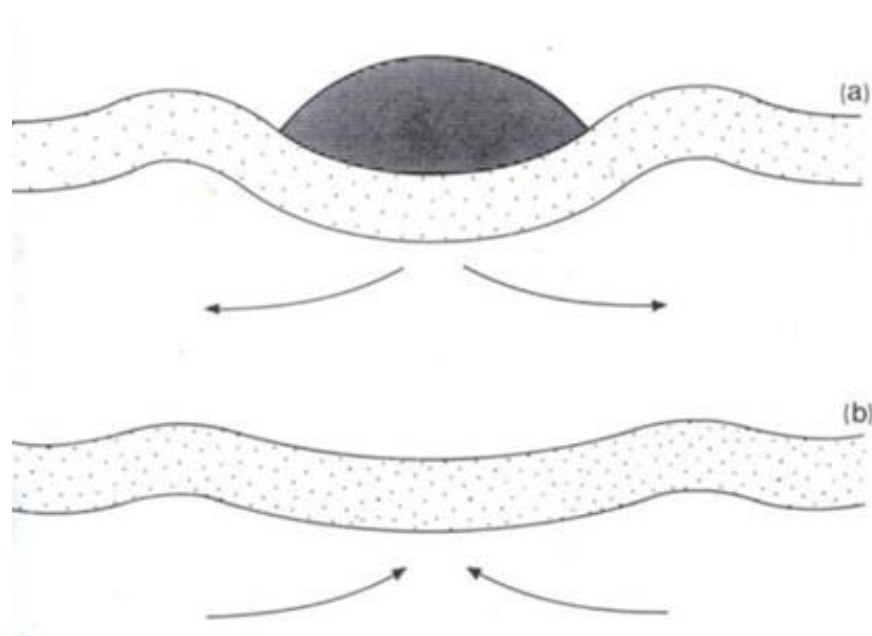
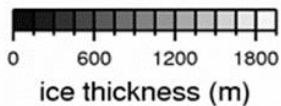
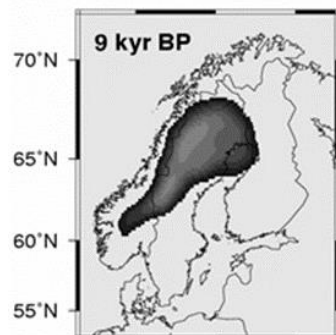
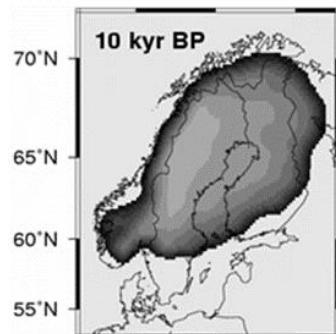
Definition av RH 2000

- Nollnivå: Normal Amsterdams Peil (NAP)
- Normalhöjder
- Nollsystem för den permanenta tidjorden
- Landhöjningsmodell: NKG2005LU (RH 2000 LU)
- Landhöjningsepok 2000.0

Postglacial land uplift in Fennoscandia



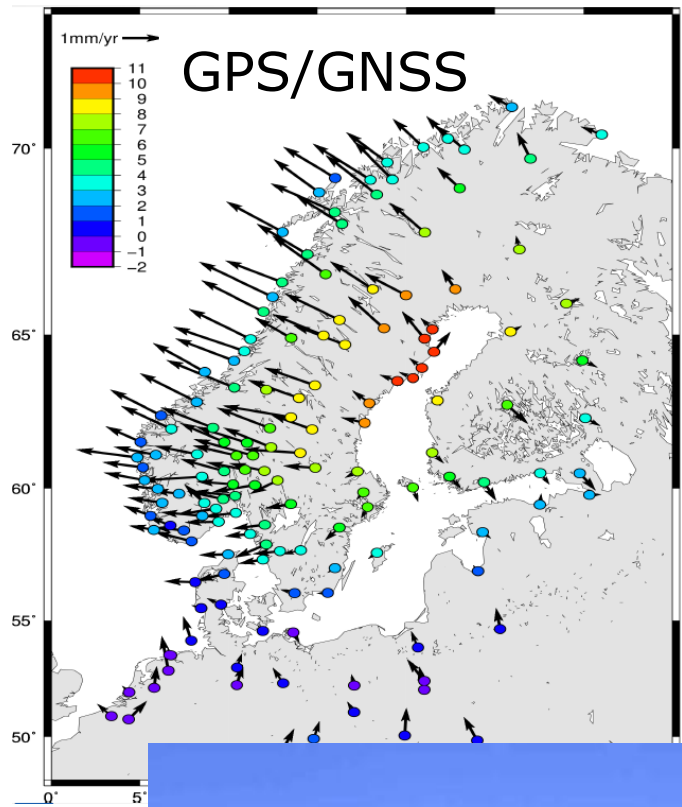
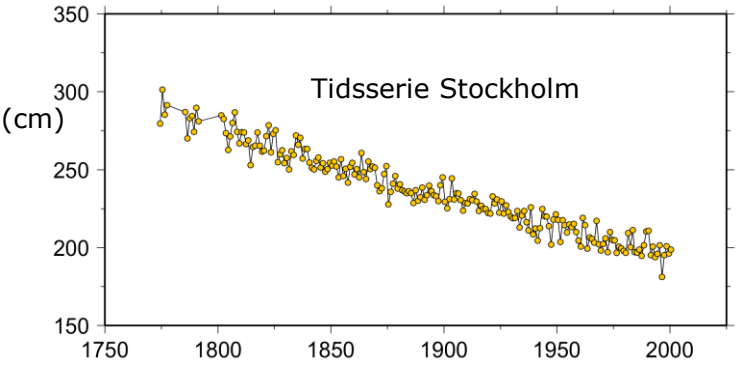
Den postglaciala landhöjningen...



...kan mätas till exempel genom...



Mareografer



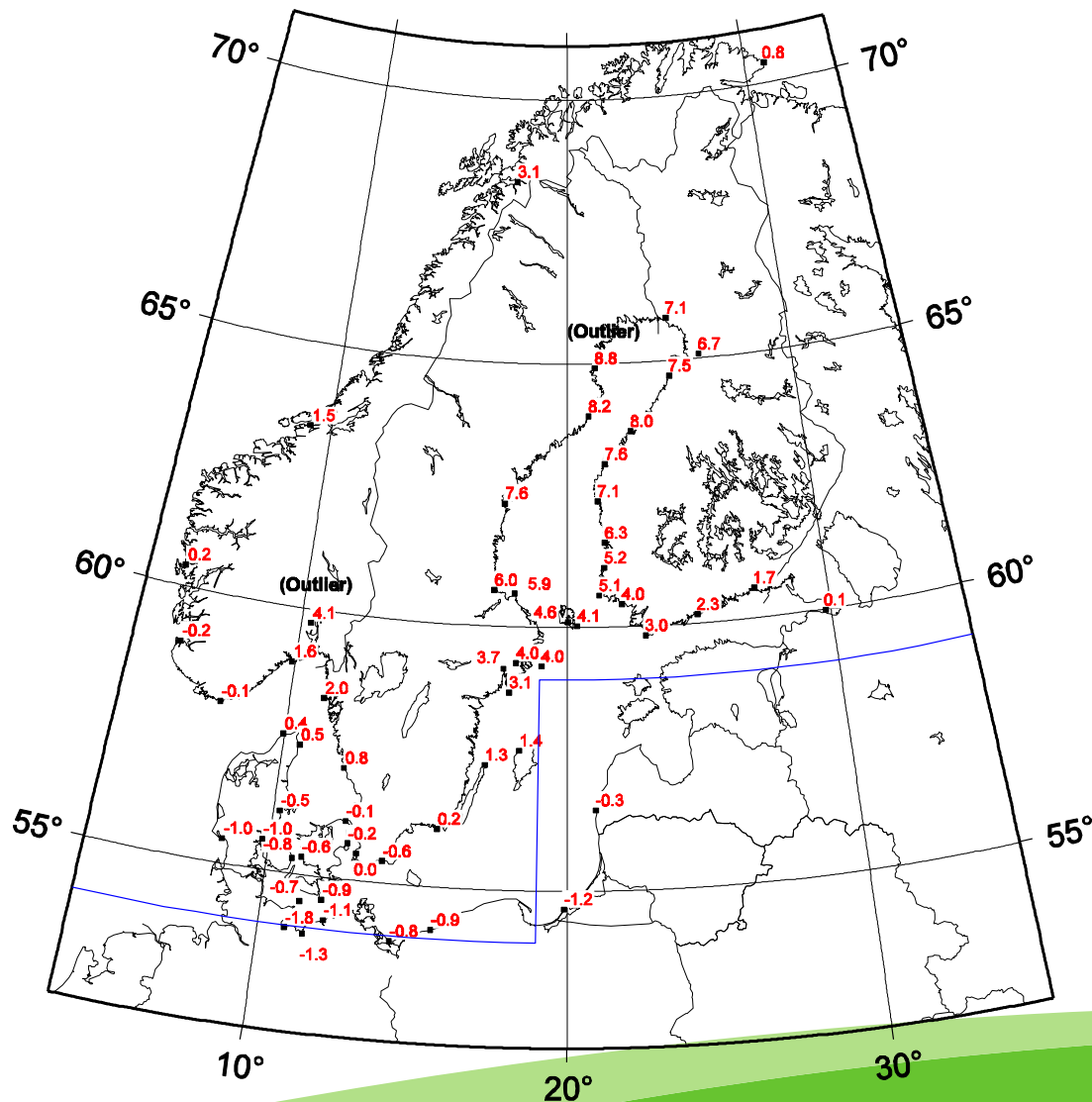
Upprepad avvägning



Två olika typer av landhöjningsmodeller

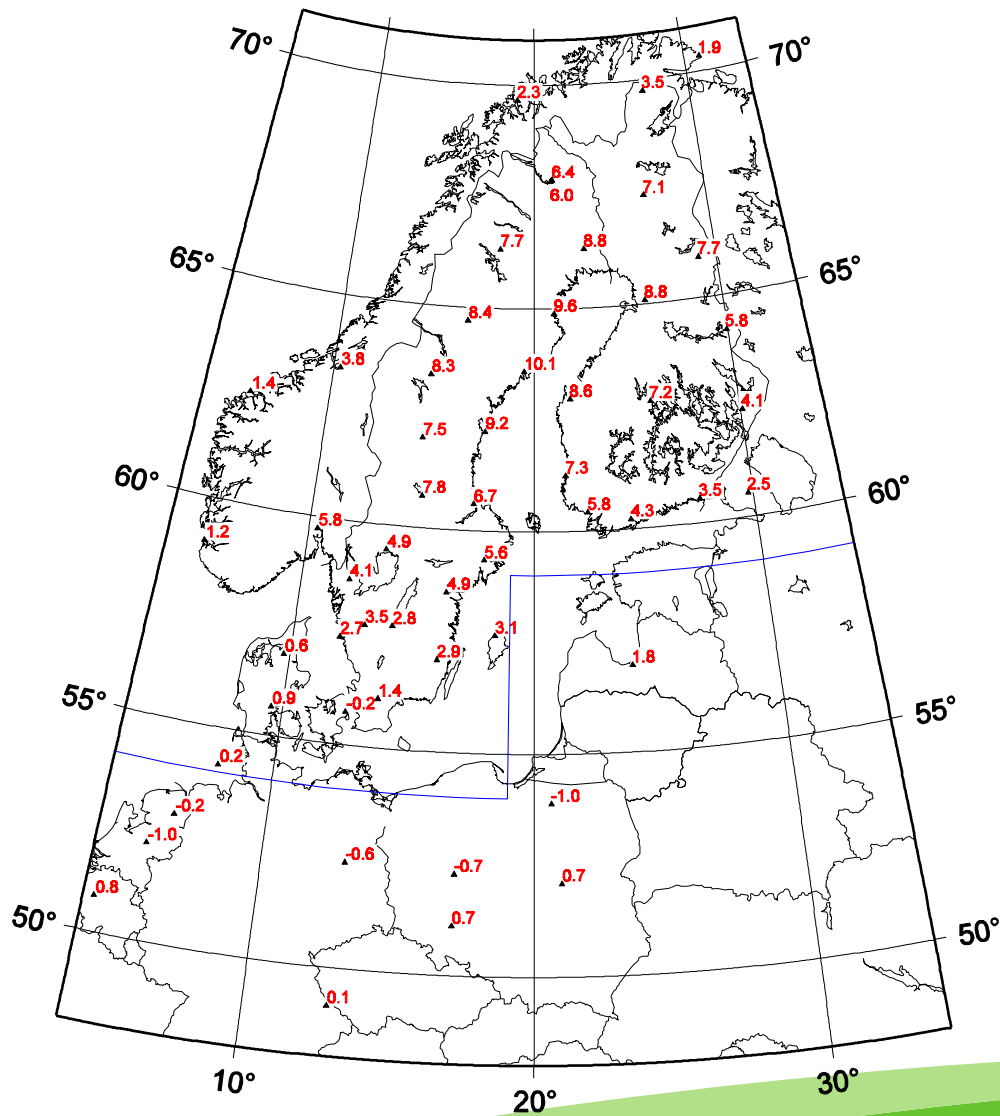
- Empirisk (matematisk) modell
 - Matematiskt definierad yta skattad ur tillgängliga observationer
- Geofysisk GIA modell
 - Fysisk modell för hur jorden reagerar på issmältningen
 - Till exempel Lambeck et al. (1996)
 - Elastisk litosfär av viss tjocklek
 - Mantel bestående av två lager med olika viskositet
 - Modell för isens tjocklek och avsmältning.

Mareografobservationer



- Ekman (1996)
- 58 mareografer
- 1892 – 1991 (100 år)
- Apparent landhöjning (i förhållande till MSL)

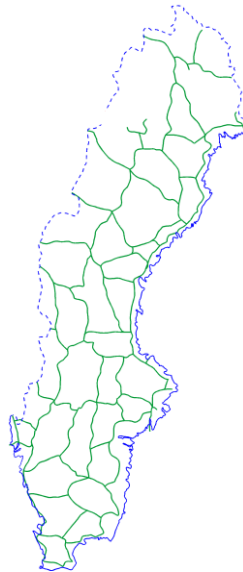
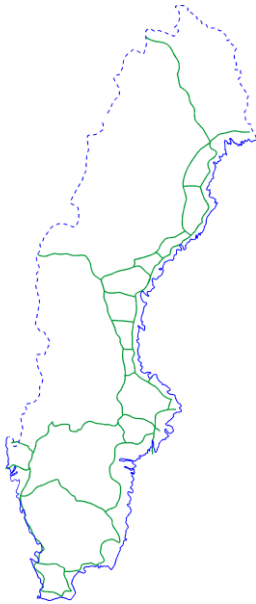
Permanenta GPS observationer



- Lidberg (2004)
- 55 stationer
- 1996 – 2004
- Absolut landhöjning i ITRF2000 (i förhållande till jordens masscentrum)

Upprepad avvägning i Sverige

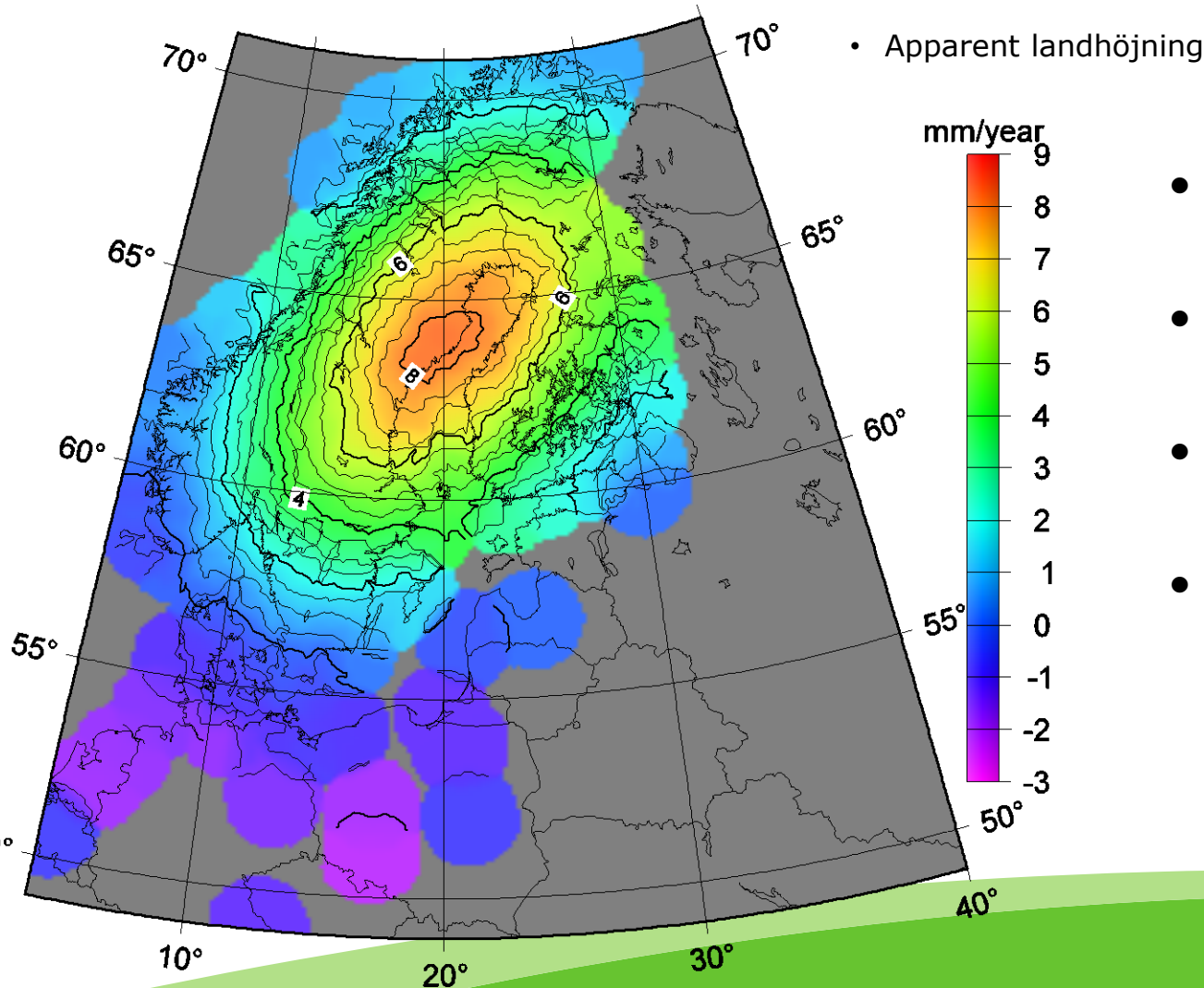
Levelling	Time	Mean Epoch	\hat{s}_0 [mm/ $\sqrt{\text{km}}$]	System
1 st	1886 – 1905	1892	4.4	RH 1900
2 nd	1951 – 1967	1960	1.6	RH 1970
3 rd	1979 – 2003	1990	1.0	RH 2000



Vestøls strikt empiriska landhöjningsmodell

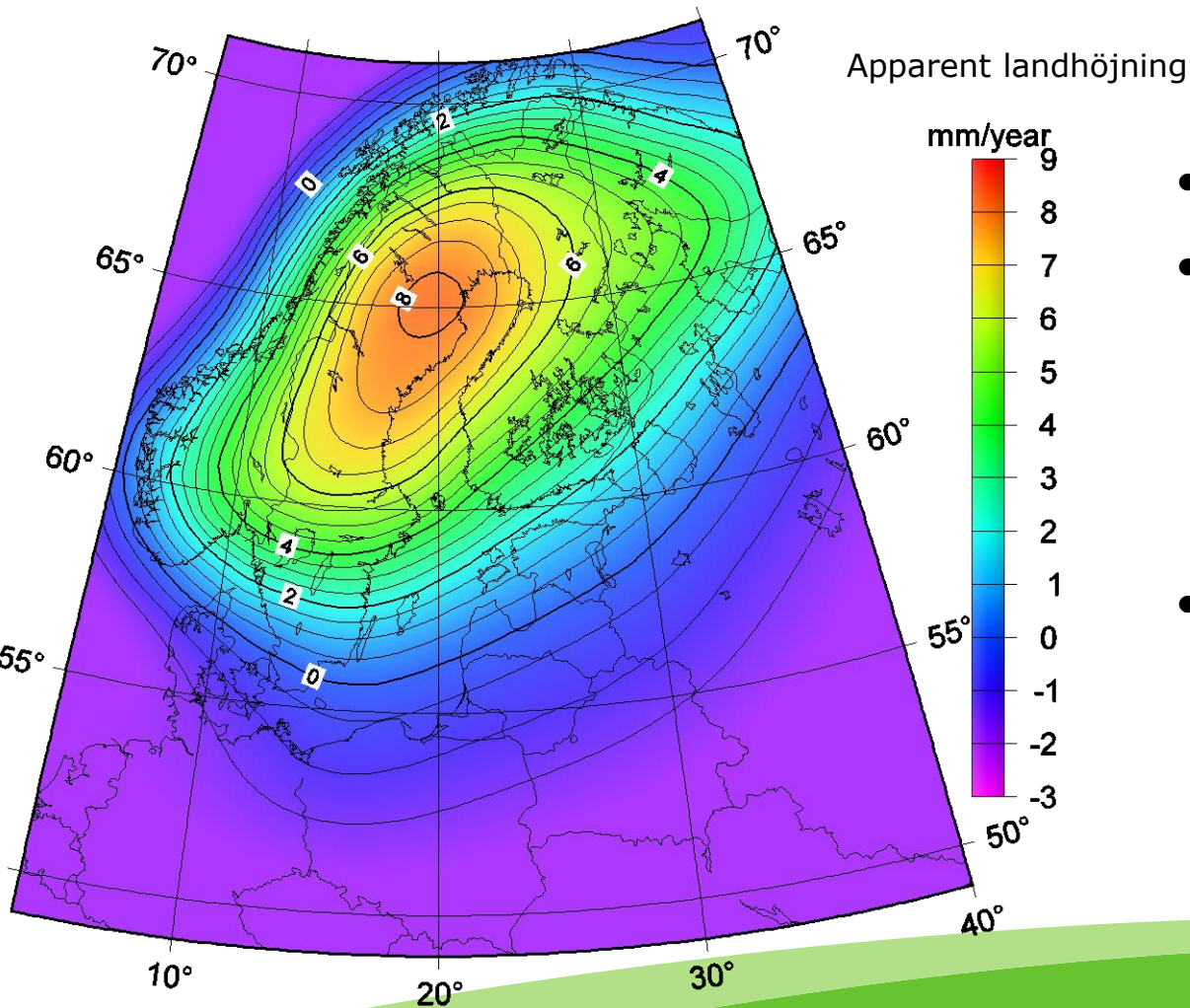
- Vestøl (2005)
- Yta skattad ur följande landhöjningsobservationer (kollokation med obekanta parametrar):
 - Mareografdata (Ekman 1996)
 - Permanenta GPS stationer (Lidberg 2004)
 - Upprepad avvägning i Sverige, Finland och Norge (Svensson, Saaranen och Vestøl)

Vestøls empiriska landhöjningsmodell (2005)



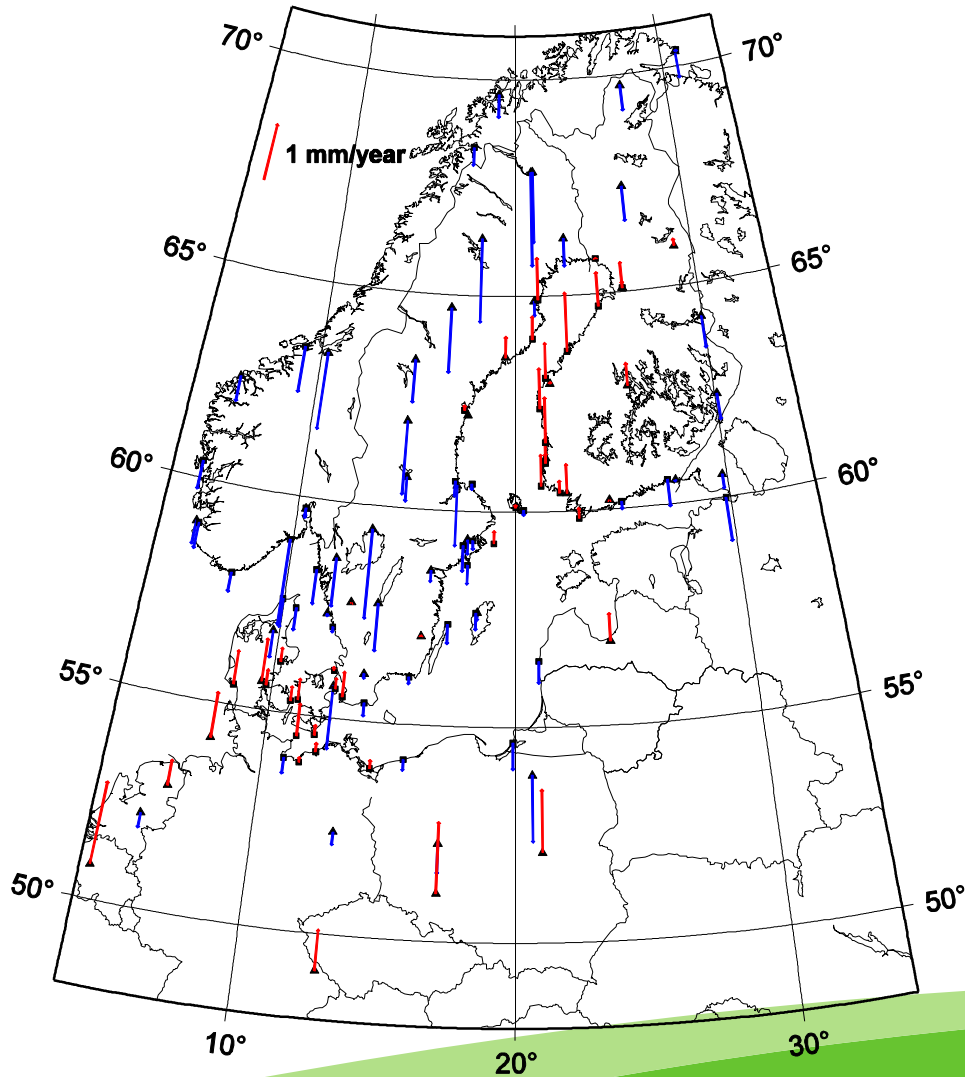
- Passar bra till observationerna.
- Täcker ej hela området (BLR)
- Trappstegscylinrar i utkanterna
- Krokiga konturlinjer. Ser ej ut som landhöjning.

Lambecks geofysiska GIA modell



- Lambeck et al. (1998)
- Anpassad till
 - landhöjningen ur de nordiska mareograferna (Ekman 1996)
 - Strandlinjedata
- Mycket komplicerad!

Hur passar Lambeck's modell till observationerna?

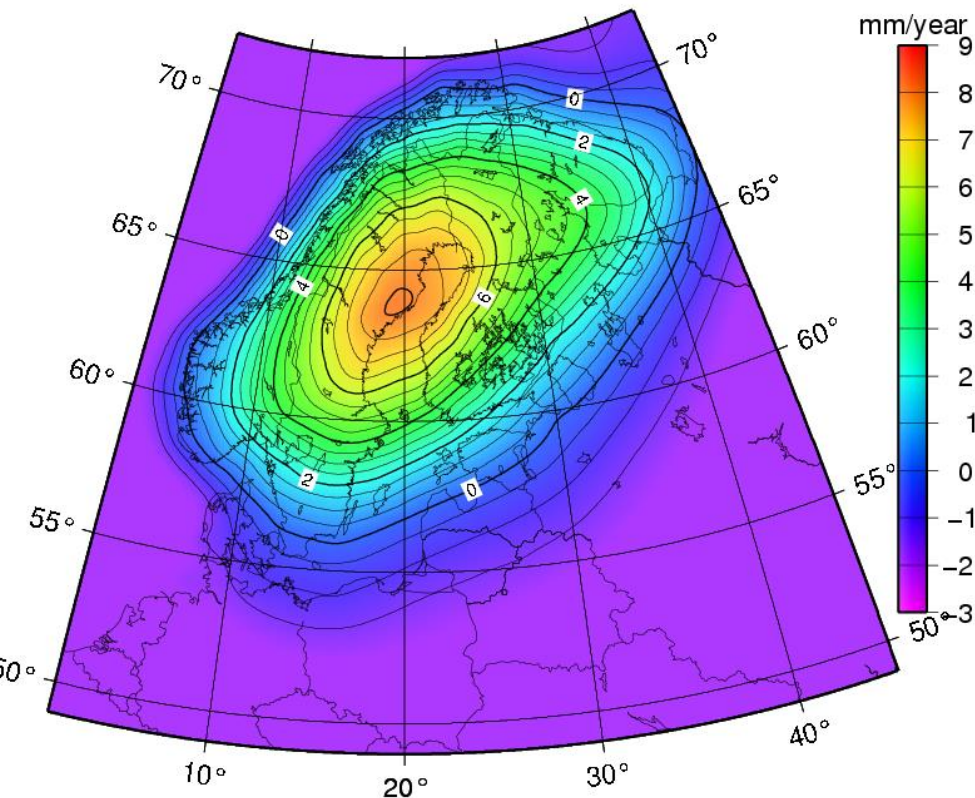


- Residualer i mareograferna och de permanenta GPS stationerna.
- Stora fel i Sveriges inland! Inte acceptabelt.

Den semi-empriska landhöjningsmodellen NKG2005LU

(Kallades ursprungligen RH 2000 LU)

Apparent uplift

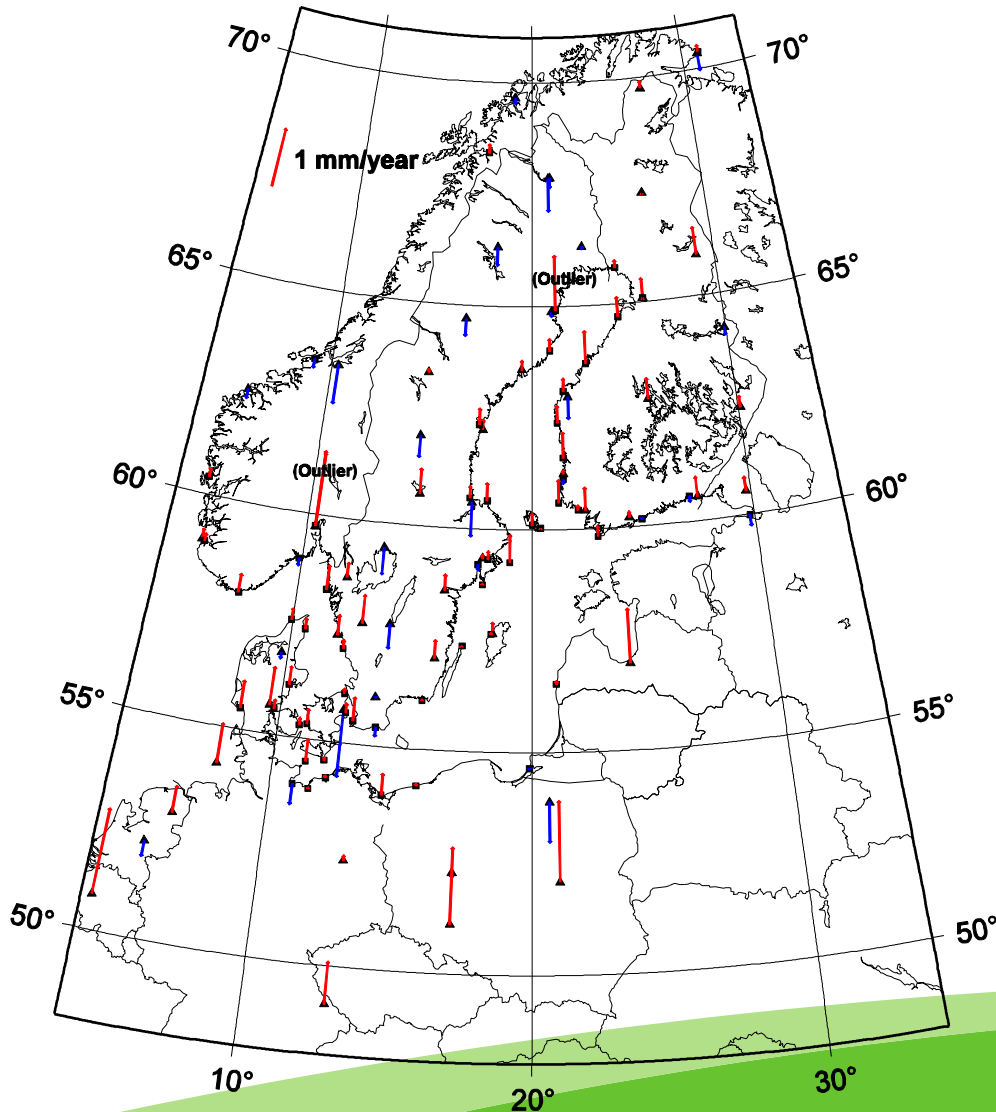


- Den "officiella" NKG-modellen beräknad av arbetsgruppen för höjdbestämning.
- Användes för att beräkna "Baltic Levelling Ring" (BLR) och det senaste Europeiska höjdsystemet EVRF2007.
- En kombination av GNSS, mareografer och upprepad avvägning (Vestøl 2005) med den geofysiska GIA-modellen av Lambeck et al. (1998)
- Det släppta griddet innehåller apparent landhöjning (relativt MSL 1892-1991).
- Men modellen inkluderar även följande linjära samband till andra typer av landhöjning:

$$\begin{aligned} \text{Absolut landh. (in ITRF2000)} &= \\ &= (\text{Apparent landh.} + 1.32 \text{ mm/year}) \cdot 1.06 \end{aligned}$$

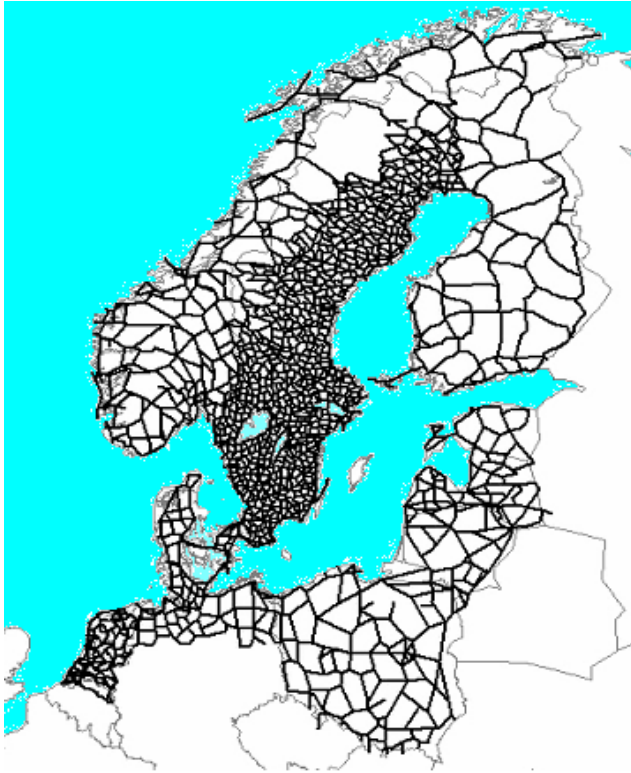
$$\begin{aligned} \text{Avvägd landh. (rel. geoiden)} &= \\ &= (\text{Apparent landh.} + 1.32 \text{ mm/year}) \end{aligned}$$

Hur passar NKG2005LU till observationerna?



- Residualer i mareograferna och de permanenta GPS stationerna.
- Överlag ungefär lika stora som standardosäkerheten i dessa observationer.
- Korrektion mellan olika typer av landhöjning gjord med de publicerade linjära relationerna på förra sidan.

RH 2000 – Beräkning

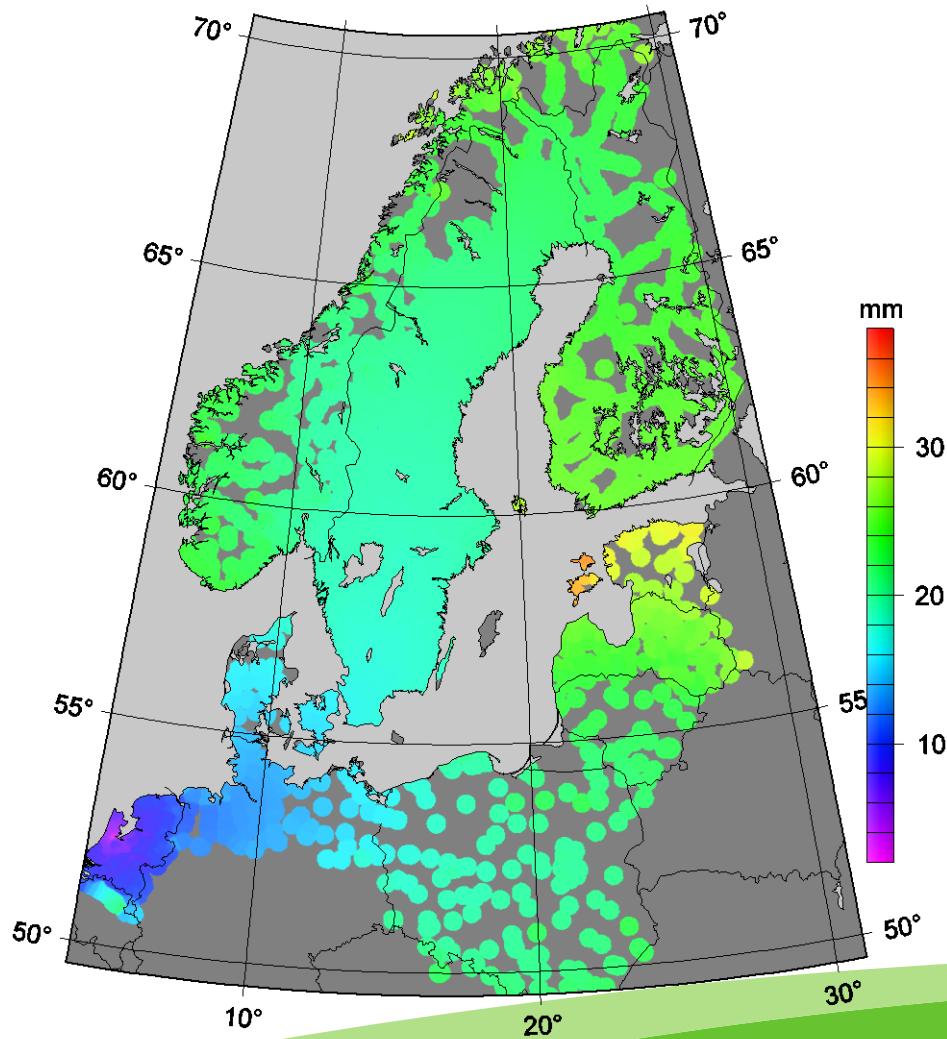


Baltic Levelling Ring (BLR)

- Minsta kvadratmetodsutjämning av hela den **Baltiska avvägningringen (BLR)** med **NAP fast**.
- Landhöjningsmodell NKG2005LU med epok 2000.0
- Utjämning av geopotentialtal ($dh \cdot g$) => vägoberoende.
- Slutlig konvertering till normalhöjder.
- Den bestämda höjderna på de svenska fixarna i BLR definierar RH 2000.
- Medelfel för svenska data: ca. $1 \text{ mm} / \sqrt{\text{km}}$

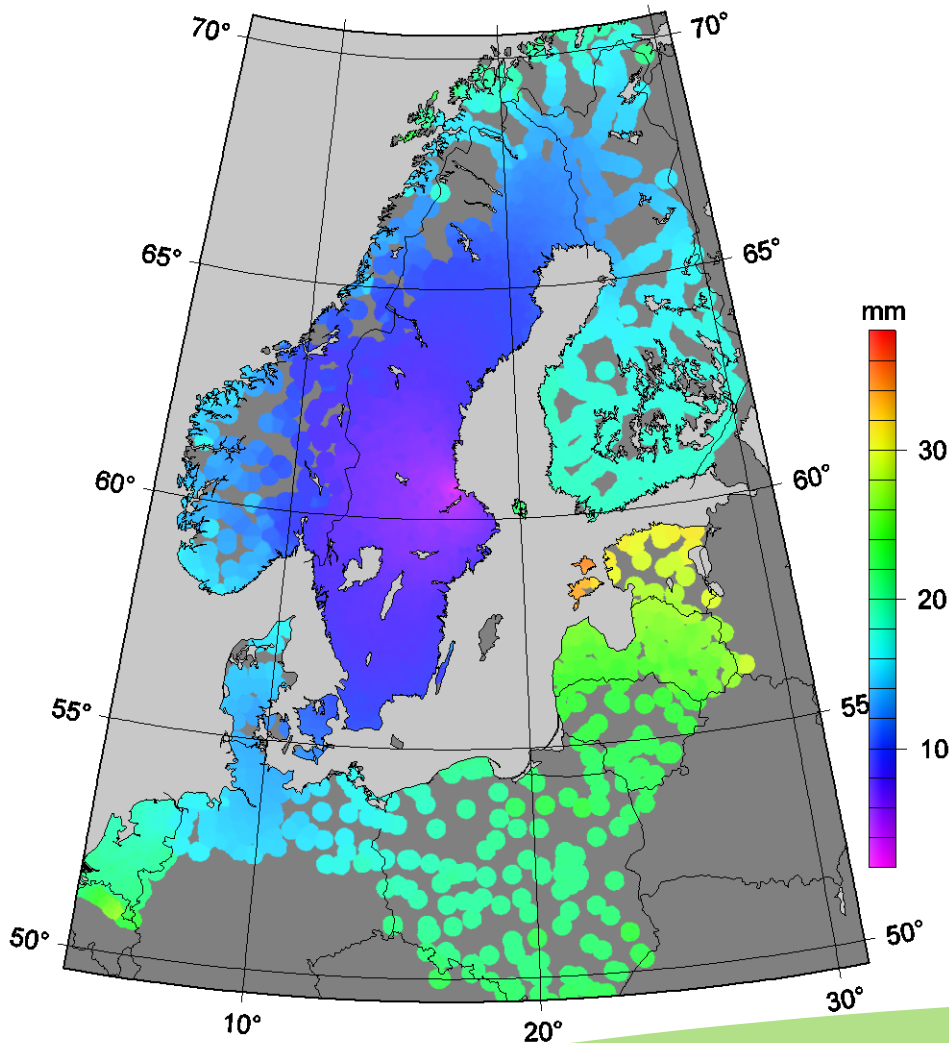
Baltiska avvägningssringen - felfortplantning

- Skattade standardosäkerheter relativt NAP (Amsterdam)



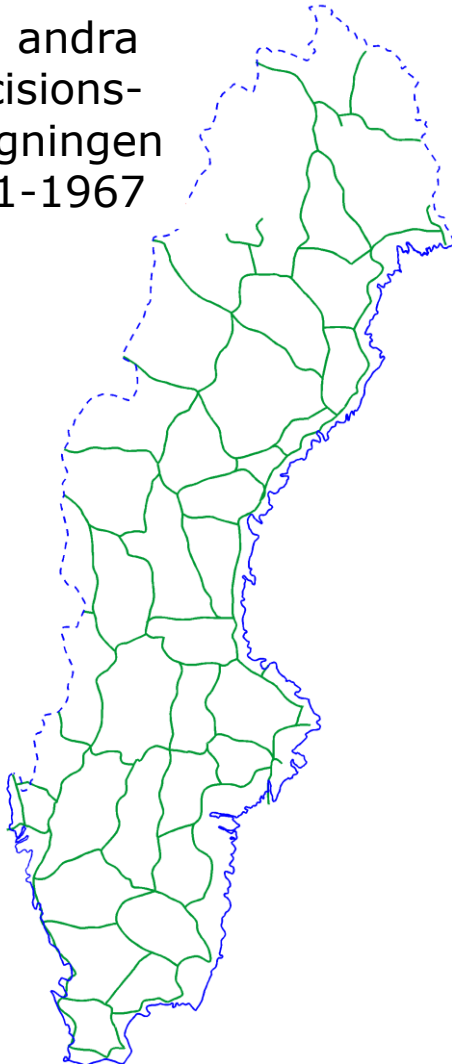
Baltiska avväggningsringen - felfortplantning

- Skattade standardosäkerheter relativt Gävle



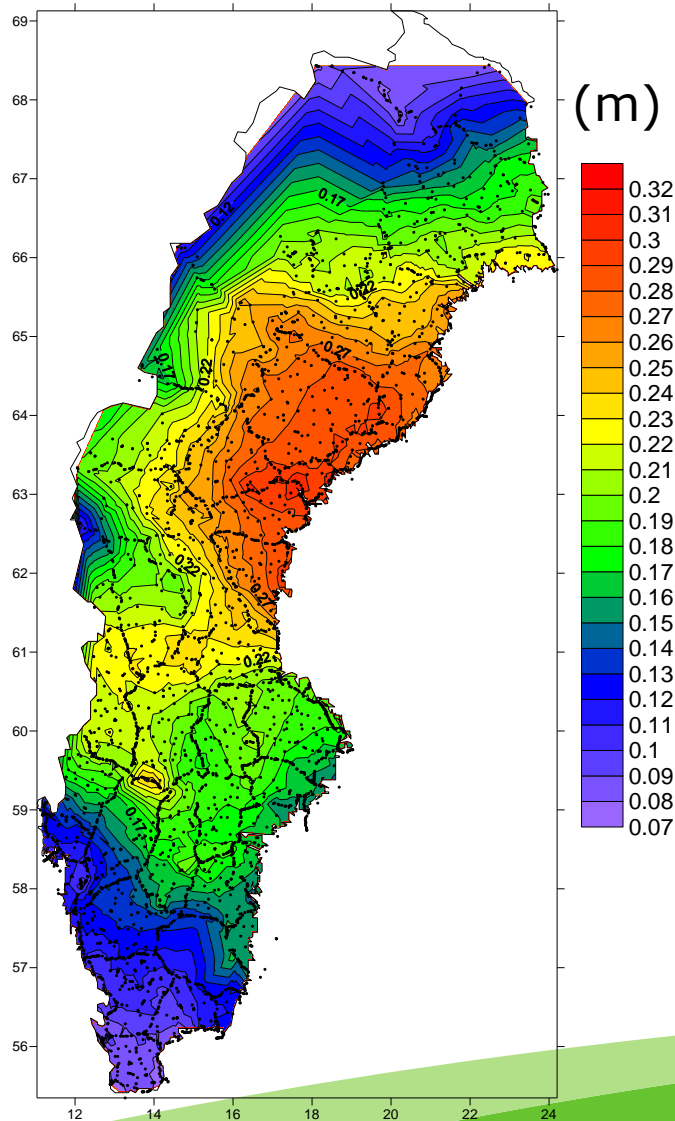
RH 70

Den andra
precisions-
avvägningen
1951-1967



- $H=0$ i NAP (via UELN 55 i Helsingborg)
- Landhöjningen beräknad ur 1:a och 2:a precisionsavvägningarna samt 11 mareografer.
- Epok: 1970.0
- Permanent tidjordssystem: tidjordsfri
- 3:e riksavvägningen har fortlöpande beräknats i RH 70 => RHB 70 höjder.

Skillnad RH 2000 och RH 1970



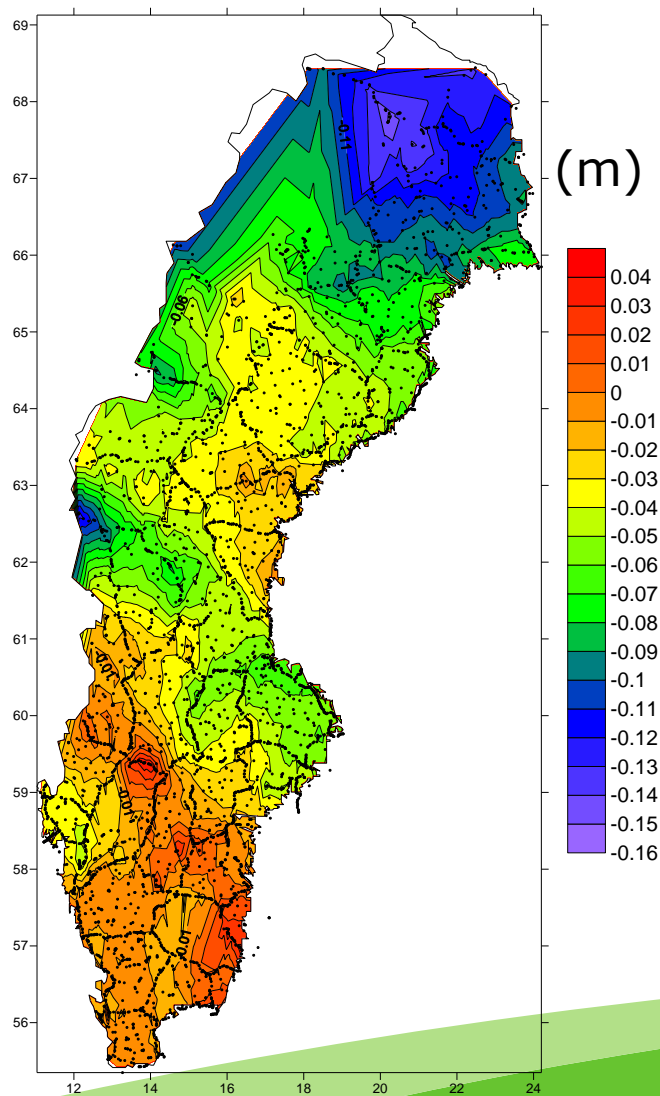
- Statistiska mått för skillnaden (meter):

#	Min	Max	Medel	StdAvv	RMS
4751	0.072	0.311	0.191	0.060	0.200

- Största delen är landhöjning!

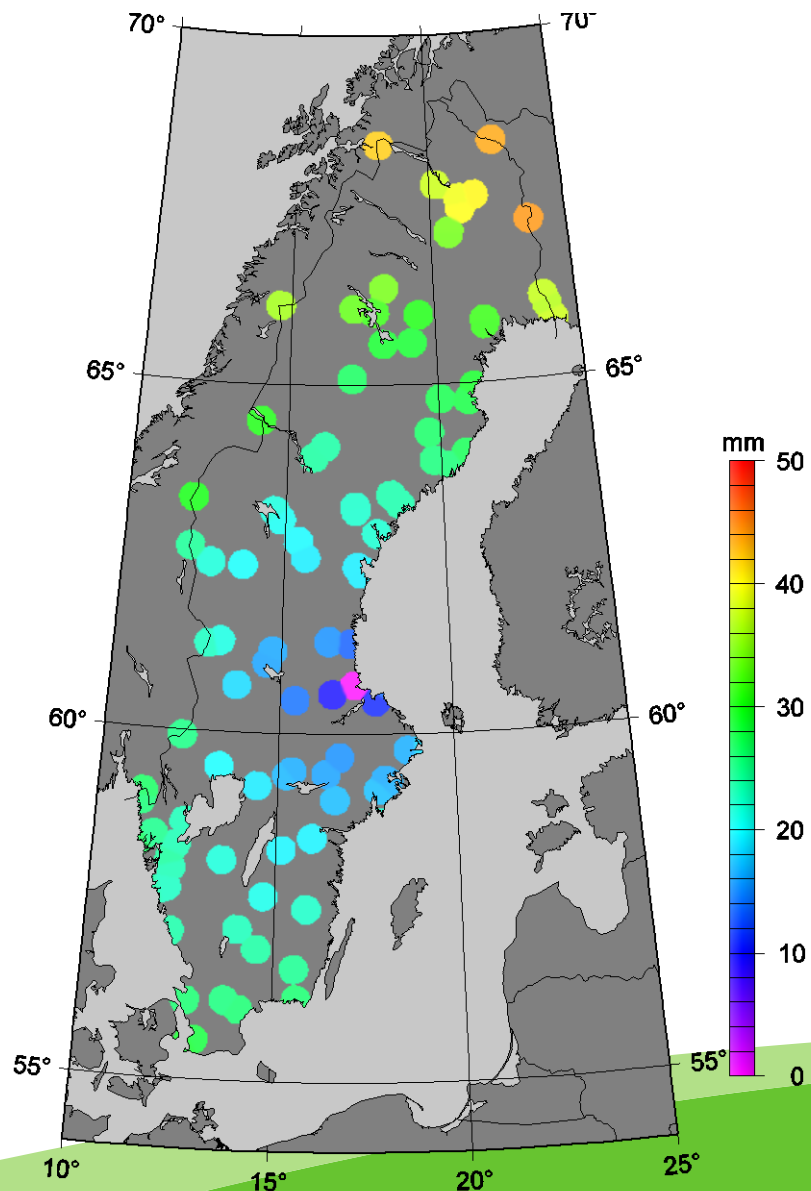
Skillnad mellan RH 2000 och RH 70 efter reduktion av kända effekter

- Korrektion har gjorts för
 - Olika landhöjningsepok (2000.0/1970.0)
 - Olika system för den permanenta tidjorden (noll/tidjordsfri)
- Statistiska mått för skillnaden efter korrektion(meter):



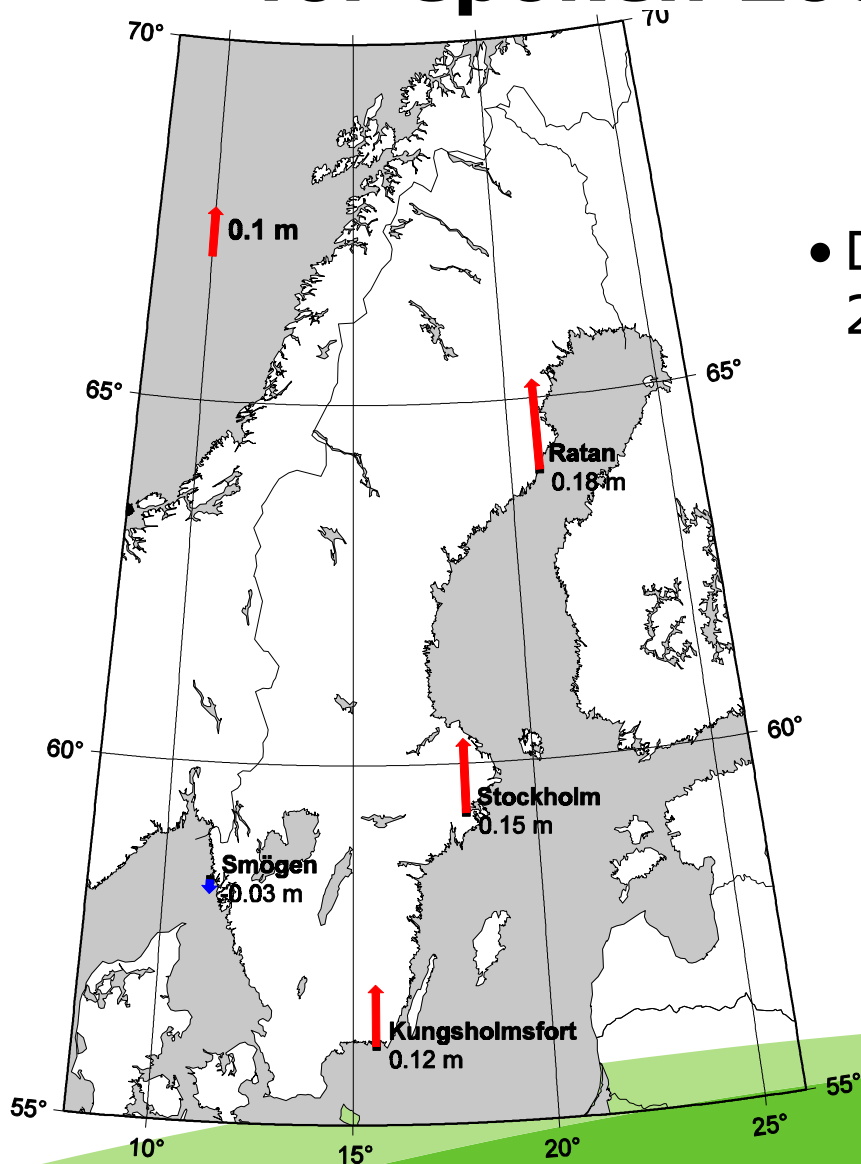
#	Min	Max	Medel	StdAvv	RMS
4751	-0.155	0.048	-0.035	0.031	0.047

Skattade osäkerheter för RH 70



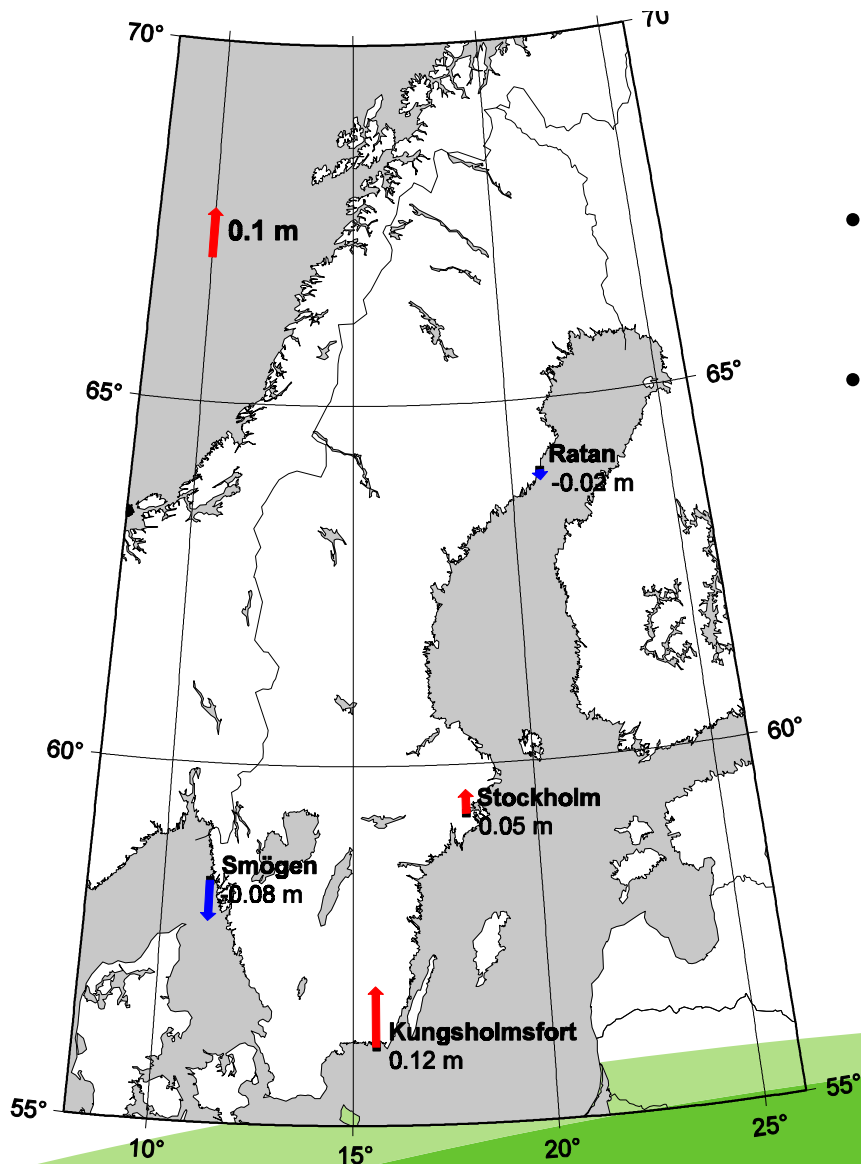
- Relativt Gävle
- Slutsats: Statistiskt sett är de ganska stora skillnaderna vad som kan förväntas.

Medelhavsytan (MSL) i RH 2000 för epoken 2000.0



- Data (årsmedelvärden) till och med 2003.

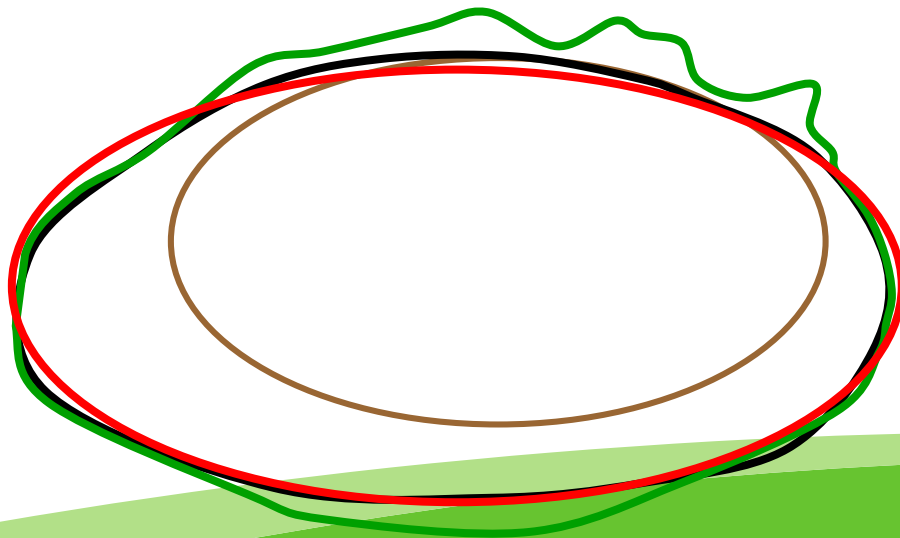
Medelhavsytan (MSL) i RH 2000 för epoken 2026



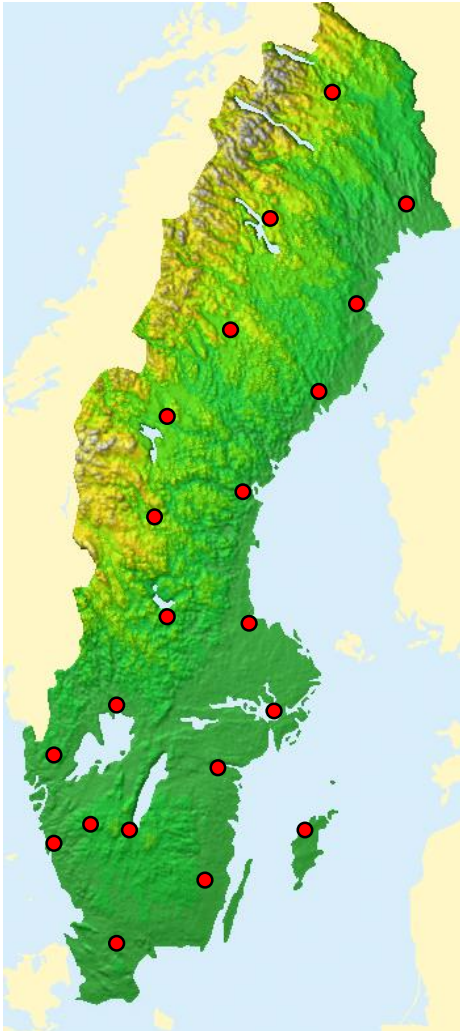
- Data (årsmedelvärden) till och med 2003.
- Regressionslinje fortsatt till 2026

Globalt anpassade 3-dimensionella referenssystem

- GNSS (GPS, etc.) och andra rymdgeodetiska mätmetoder (3-dimensionella)
- Referensellipsoidens storlek och form (GRS 80) överensstämmer väl med den verkliga jordens (geoidens) storlek och form.
- Origo (centrum för ellipsoiden) i jordens tyngdpunkt. Ellipsoiden ansluter sig väl till geoiden över hela jorden.



Det svenska 3-dimensionella referenssystemet SWEREF 99



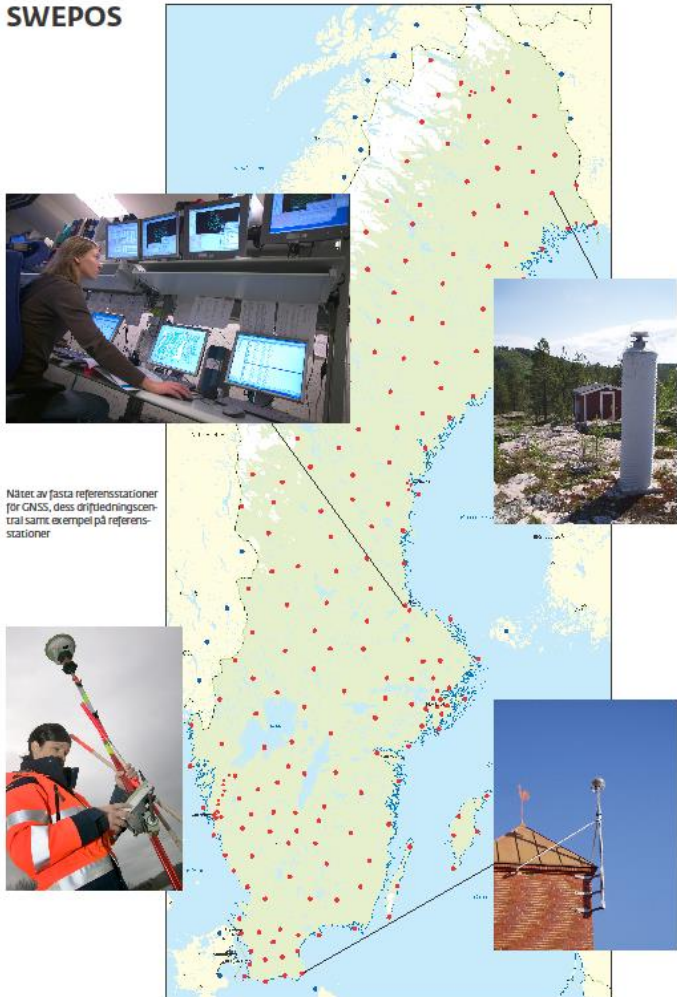
- Baserat på observationer från drygt 20 permanenta referensstationer för GPS (SWEPOS) samt data från ett antal stationer i våra grannländer
- Ellipsoid: GRS 1980 (globalt anpassad)
- Fast i förhållande till den Europeiska plattan. SWEREF 99 är en certifierad ETRS 89-lösning.
- Mätetik: 1999.5, Platteetik: 1989.0
- Nationellt referenssystem i horisontalled.
- Har förtätats till ett 50 km nät (SWEREF-punkter) och sedan till 5-10 km (RIX 95-punkter), men det är fortfarande fundamentalstationerna som realiserar (bär upp) SWEREF 99.
- Nationell kartprojektion: SWEREF 99 TM (+ 12 projektionszoner för kommunerna)

SWEPOS

Det svenska nätet av permanenta referensstationer för GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, ...)

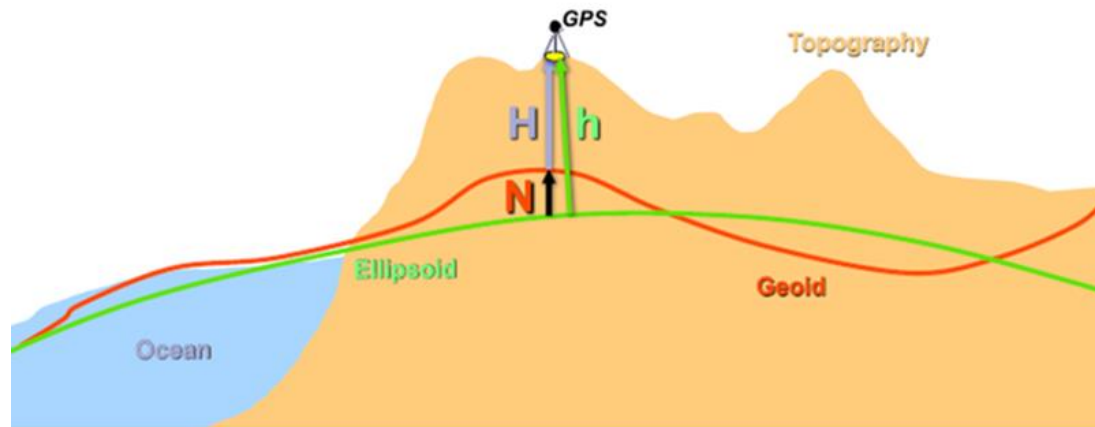
Mätning med nätverks-RTK

SWEPOS



Geoiden

- **Geoiden** definieras som den **ekvipotentialyta** (nivåyta) i jordens tyngdkraftsfält som bäst sammanfaller med havsykans medelnivå (MSL).



$$H_{\text{(from leveling)}} = h_{\text{(from GPS)}} - N_{\text{(height of the geoid)}}$$

H = Höjd över geoiden (höjden över havet). Bestäms med avvägning.

h = Höjd över ellipsoiden i ett 3-dim referenssystem.
Bestäms med GNSS.

N = Geoidhöjd. Modelleras med en **geoidmodell**.

Varför behövs en geoidmodell?



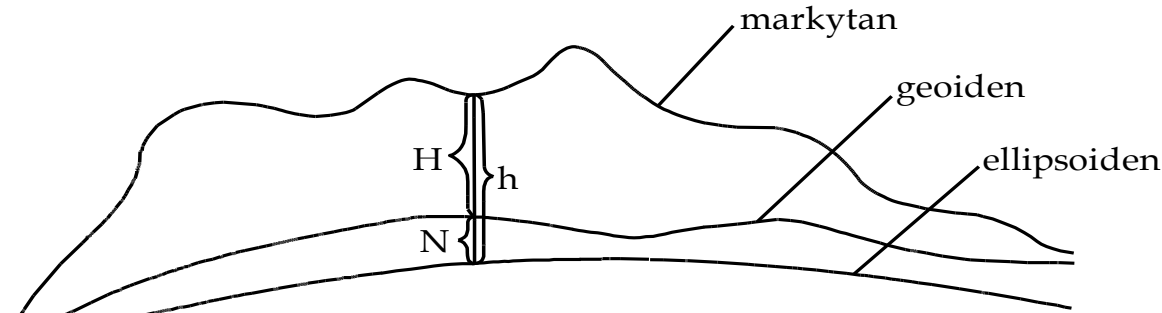
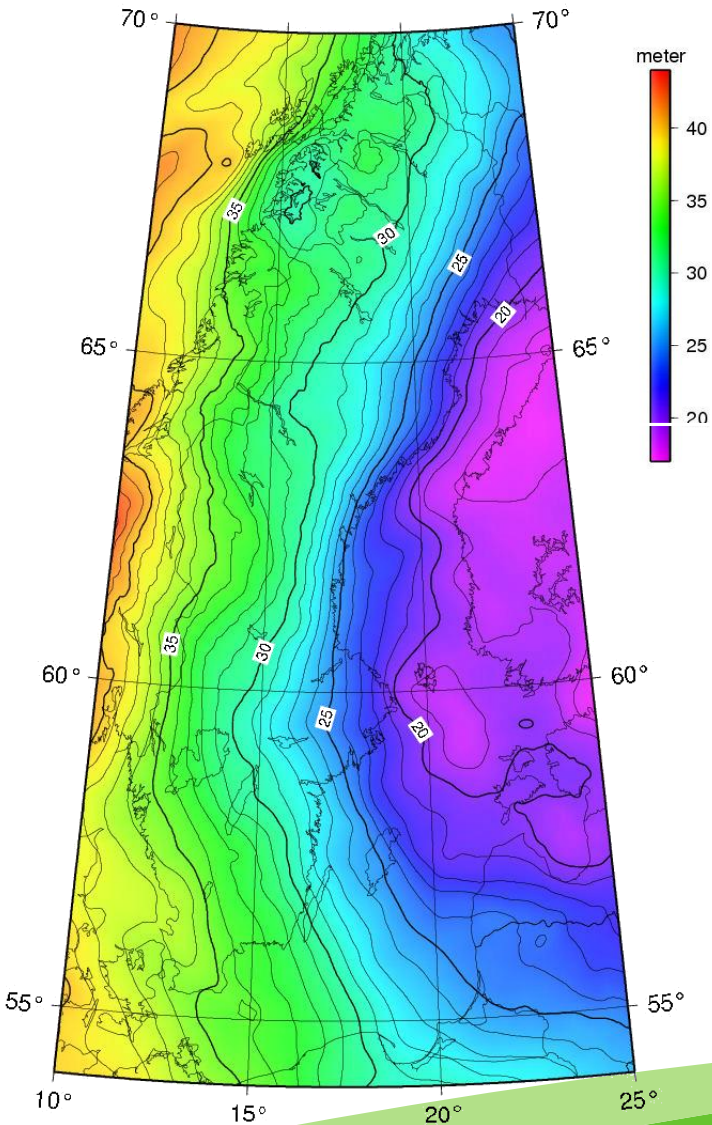
- Framförallt för att räkna om höjder mätta med GNSS till traditionella höjder över havet.

$$H = h_{\text{GNSS}} - N_{\text{Geoidmodell}}$$

- Höjder kan bestämmas mycket snabbare och lättare med GNSS jämfört med traditionell avvägning, särskilt långt från existerade höjdfixar.
- Höjdnoggrannheten beror på geoidmodellens kvalité, men **också** på höjdnoggrannheten för GNSS!

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{\text{GNSS}}^2 + \sigma_{\text{Geoidmodell}}^2}$$

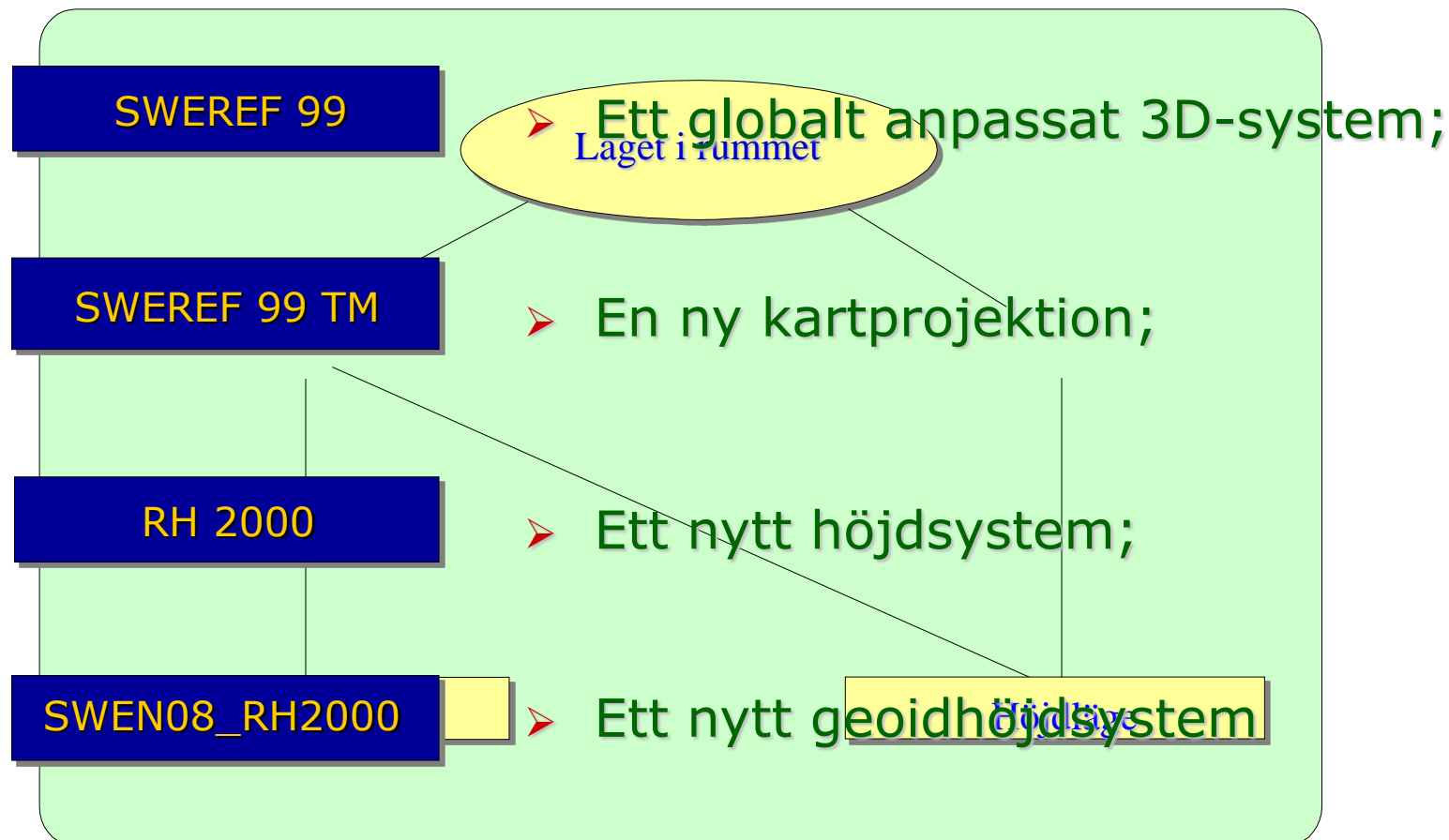
Den nationella geoidmodellen SWEN08_RH2000



$$H_{RH\ 2000} = h_{SWEREF\ 99} - N_{SWEN08_RH2000}$$

- Nationell geoidmodell anpassad till SWEREF 99 och RH 2000.
- Bygger på den gravimetriska geoidmodellen KTH08
- Medelfel 10-15 mm i hela Sverige (utom högst upp i fjällen i sydväst och till havs)
- Mer om KTH08 och SWEN08_RH2000 senare.

De nationella referenssystemen i Sverige



Målsättningen med det pågående arbetet med referenssystem

- Nationellt
 - Ett 3D system (SWEREF 99)
 - Ett plansystem (baserat på SWEREF 99)
 - Ett höjdsystem (RH 2000)
- Lokalt
 - Så få lokala plana system som möjligt
 - Så få lokala höjdsystem som möjligt
- Nationella geoidmodeller och geodynamiska korrektionsmodeller av hög kvalitet
- Våra referenssystem övervakas och deras hållbarhet över tiden säkerställs.



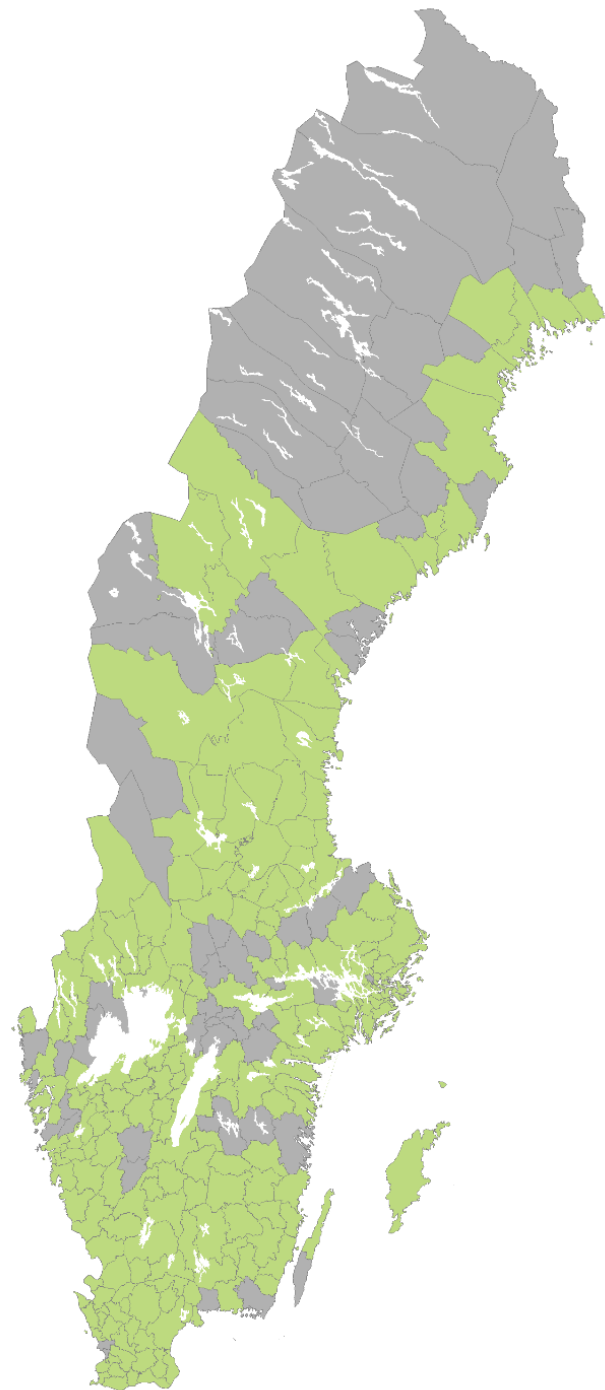
Status för kommunernas byte till RH 2000

Fler än 75% av de 290 kommunerna använder
nu RH 2000..

Fram tills nu har 92 493 kommunala höjdfixar
beräknats i RH 2000

Status i början av mars 2017 (inom parentes
visas läget för 1 år sedan):

- Infört RH 2000, 230 (187)
- Kvarvarande kommunala
system, 60 (103)



Gemensamma Europeiska höjdsystem



Europeiska referenssystem (1)

- Genom åren har flera gemensamma utjämnings gjorts av Europas höjdnät.
- Huvudsyftet har varit att relatera de nationella höjdsystemen till varandra.
- UELN = United European Levelling Network
- UELN 55
 - Den första gemensamma utjämnings av Västeuropas höjdnät
 - En mindre del av den 2:a svenska precisionsavvägningen ingår (och en liten bit av den 1:a).
- UELN 73/86
 - Den andra gemensamma utjämnings för Västeuropa
 - Hela den 2:a svenska precisionsavvägningen ingår.
 - Slutfördes 1986 => EULN 73/86

UELN 55 and UELN 73



Ny internationell geodetisk terminologi om referenssystem

- Två termer, nämligen

- ✓ **Reference system**

Den teoretiska systemdefinitionen (Det som teoretiskt behöver antas för att komma från mätningar till koordinater vid etableringen)

- ✓ **Reference frame**

Realisering i enlighet med definitionen (Fastslagna koordinater på punkterna i referensnätet)

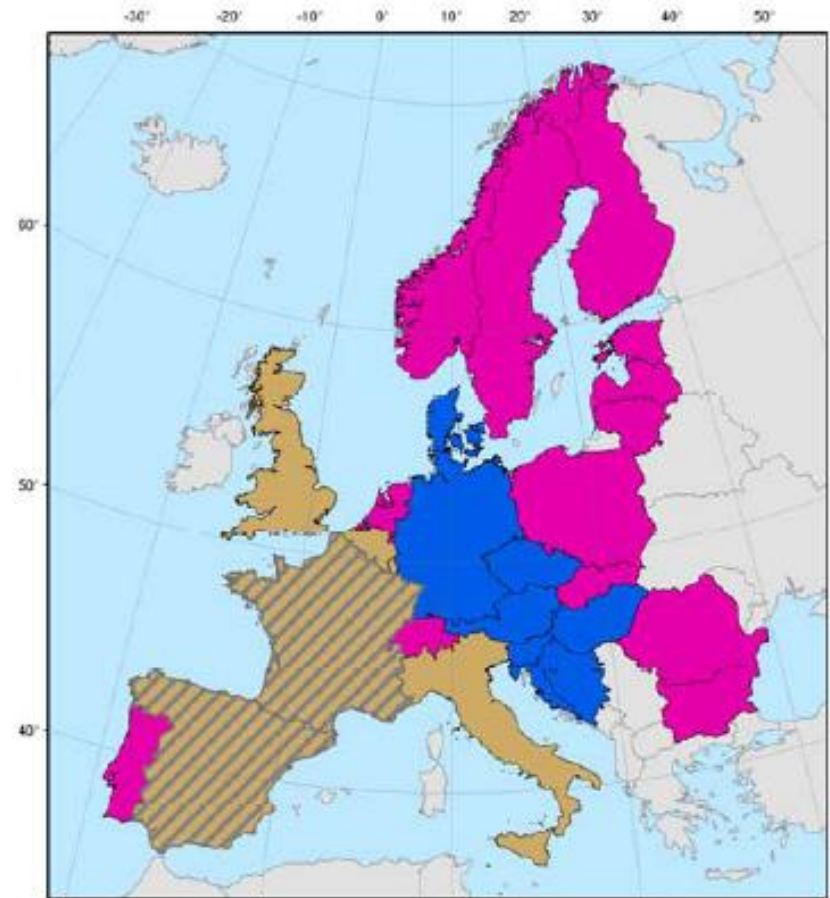
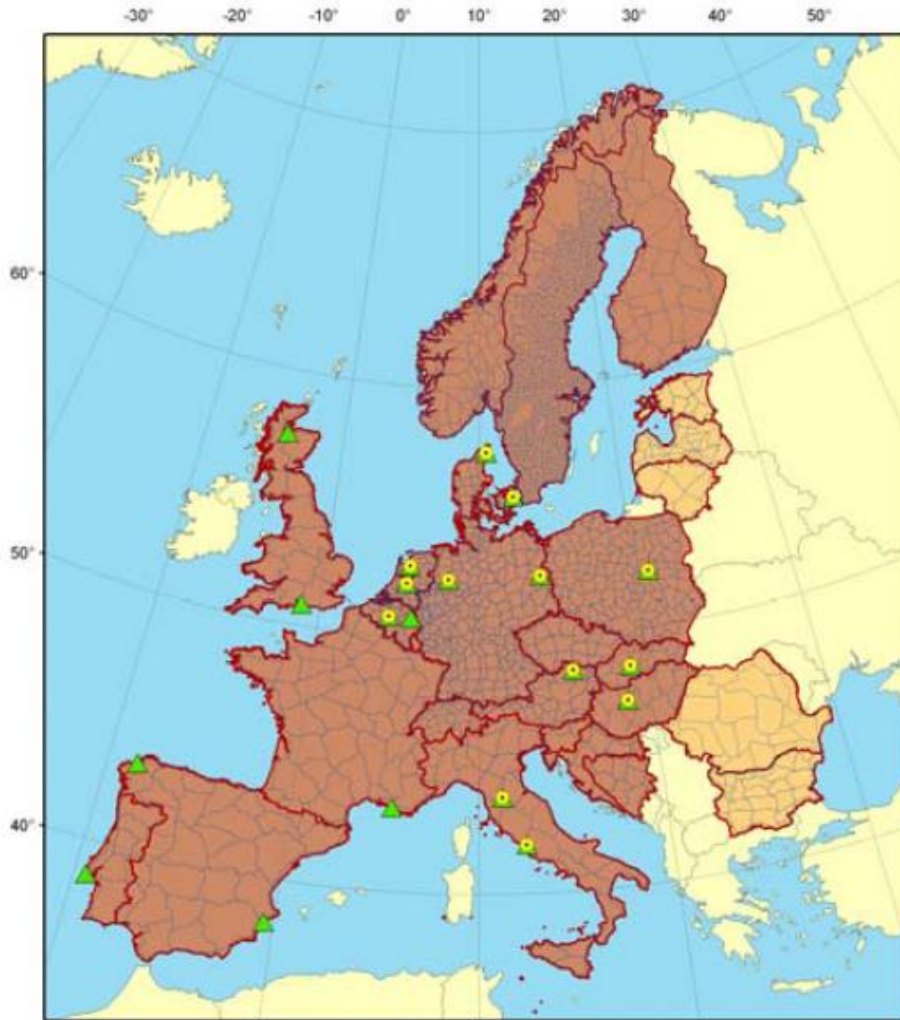
- Den svenska termen **referenssystem** kan sägas inkludera båda dessa komponenter.
- Denna terminologi används numer vid internationellt samarbete om referenssystem inom IAG och EUREF.



Europeiska referenssystem (2)

- UELN 95/98
 - ✓ Ny utjämning inkluderande även delar av det forna Östeuropa.
 - ✓ För Sveriges del ingick hela den 2:a precisionsavvägningen.
- Introduktion av ny terminologi
 - ✓ EVRS (European Vertical Reference System)
 - ✓ Realiseras av EVRF XXXX (European Vertical Reference Frame)
- EVRF2000 = Nytt namn för UELN 95/98. Samma sak.
- EVRF2007
 - ✓ Det senaste europeiska höjdsystemet.
 - ✓ Inkluderar hela den 3:e svenska precisionsavvägningen.

EVRF2000 (UELN 95/98) och EVRF2007



- data part of UELN 73/86
- data part of UELN 95/98
- data provided after 1998
- ▨ new data announced

Rödbrun = Länder i EVRF2000 (UELN 95/98)
Orange = Nya länder i EVRF2007

Skillnad mellan RH 2000 och de gemensamma Europeiska höjdsystemen

- Vi koncentrerar oss nu på hur RH 2000 förhåller sig till EVRF2000 och EVRF2007.
- De olika systemen skiljer sig åt på grund av att
 - olika mätningar delvis har använts vid etableringen.
 - systemen är definierade (beräknade) på olika sätt med olika antaganden, korrekationer och beräkningsmodeller.
- För att förstå varför systemen är olika behöver vi titta på hur de är definierade och beräknade.
- Det pågår en debatt om vad som ska räknas som definition (EVRS) och vad som är beräkningsdetaljer (realiseringsdetaljer).
- Nedan kommer vi tala om de konkreta definitioner som faktiskt använts för att beräkna systemen ifråga (oavsett om de bör ingå i en specifikation av EVRS eller inte).



EVRF2000 (UELN 95/98)



- Nollnivån är den traditionella Europeiska nollpunkten i Amsterdam, **NAP**.
- **Landhöjningskorriger** bara för avvägningssdata från **Sverige, Norge och Finland** och då till referensepoken **1960.0**. Landhöjningsmodell av tveksam kvalitet.
- Normalhöjder
- I praktiken blandade system för den permanenta tidjorden, dock mestadels så kallad medeltidjord.

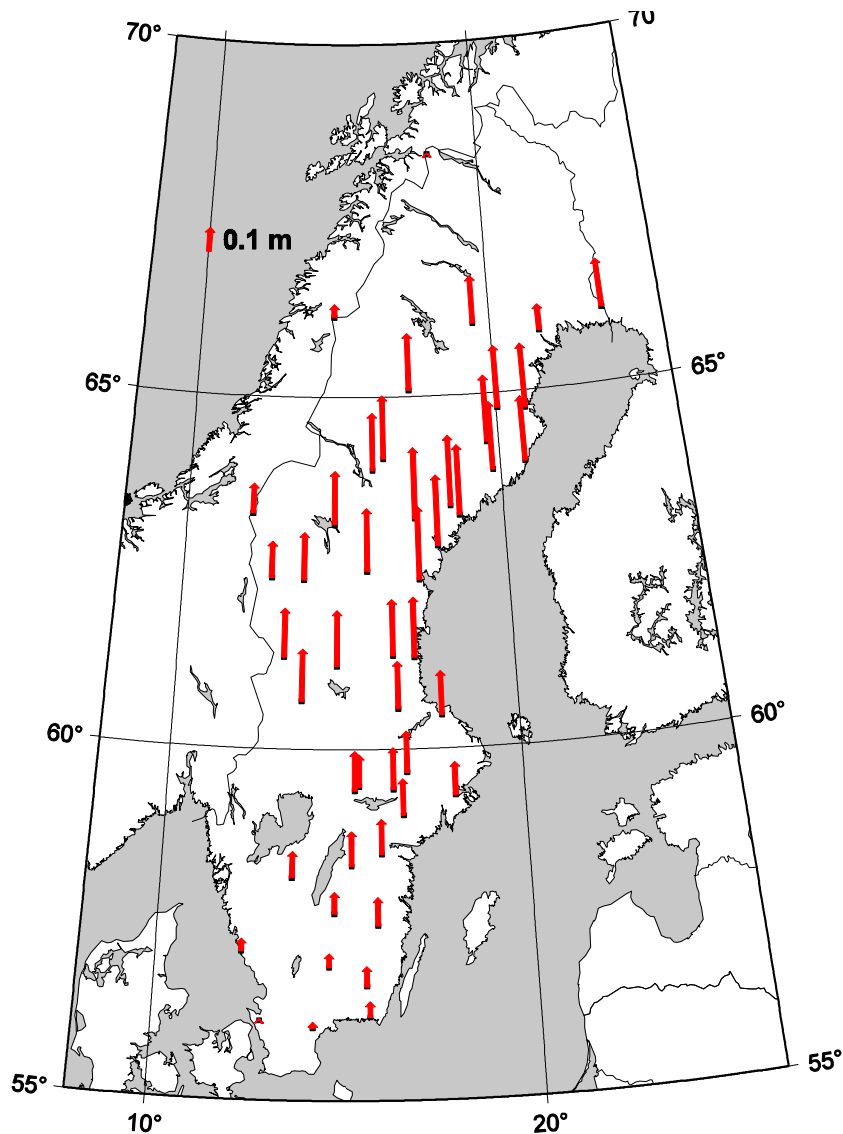
Den gemensamma nordiska beräkningen av den Baltiska avvägningsringen BLR



- Resultatet av BLR-utjämnningen
 - ✓ är identiskt med **RH 2000** i Sverige
 - ✓ användes för att ge höjden för den punkt utanför Helsingfors som sedan användes som nollpunkt för beräkningen av det nya finska höjdsystemet **N 2000**.

Små skillnader i resten av Finland (< ett par mm vid gränsen till Sverige)
 - ✓ användes för att ge utgångshöjder för det nya norska höjdsystemet **NN 2000** (RH 2000/BLR höjder fasta längs svensk-norska gränsen)
- Observera att BLR inte utgör ett publicerat höjdsystem. (Ibland används beteckningen **BLR2000**. Vi undviker detta eftersom det då ser ut som om det vore ett regelrätt höjdsystem.)

Skillnad RH 2000 och EVRF2000



- Stora skillnader framförallt på grund av olika landhöjnings-epoker:
 - EVRF2000: epok 1960.0
 - RH 2000: epok 2000.0
- **Varning!!** EVRF2000 innebär inte att landhöjningsepoken är 2000.0.

EVRS och EVRF2007

NAP: The last remaining in situ Hudde benchmark in the Eenhoorn lock in Amsterdam



Denna **NAP-**
nivå var
ursprungligen
medelnivån vid
högvatten under
sommartid
1683-1684.

- **EVRS** (European Vertical Reference System, version 2007) definieras med hjälp av följande fyra konventioner,

- Det vertikala datumet (nollnivån) definieras som ekvipotentialytan i **nivå med Normal Amsterdams Peil (NAP)**.
- Enheten för längd är meter (SI) och enheten för tid är sekund (SI).
- Höjdkomponenten specificeras med **normalhöjder**, eller ekvivalent med geopotentialtal.
- **Nollsystem** för den permanenta tidjorden.

- Notera särskilt att **ingen referensepok** nämns i definitionen av **EVRS**.

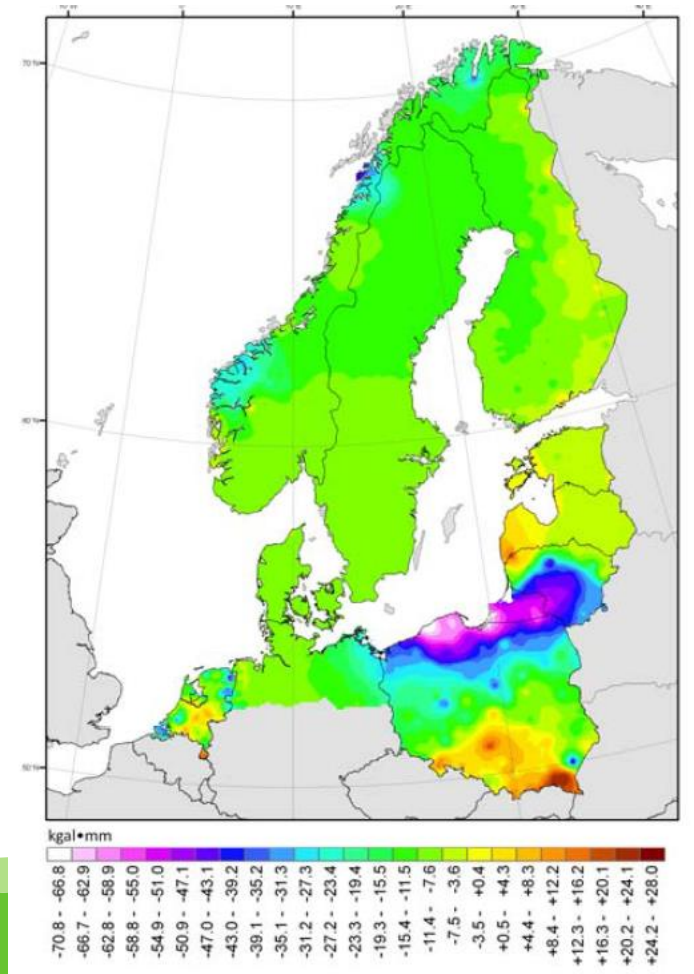
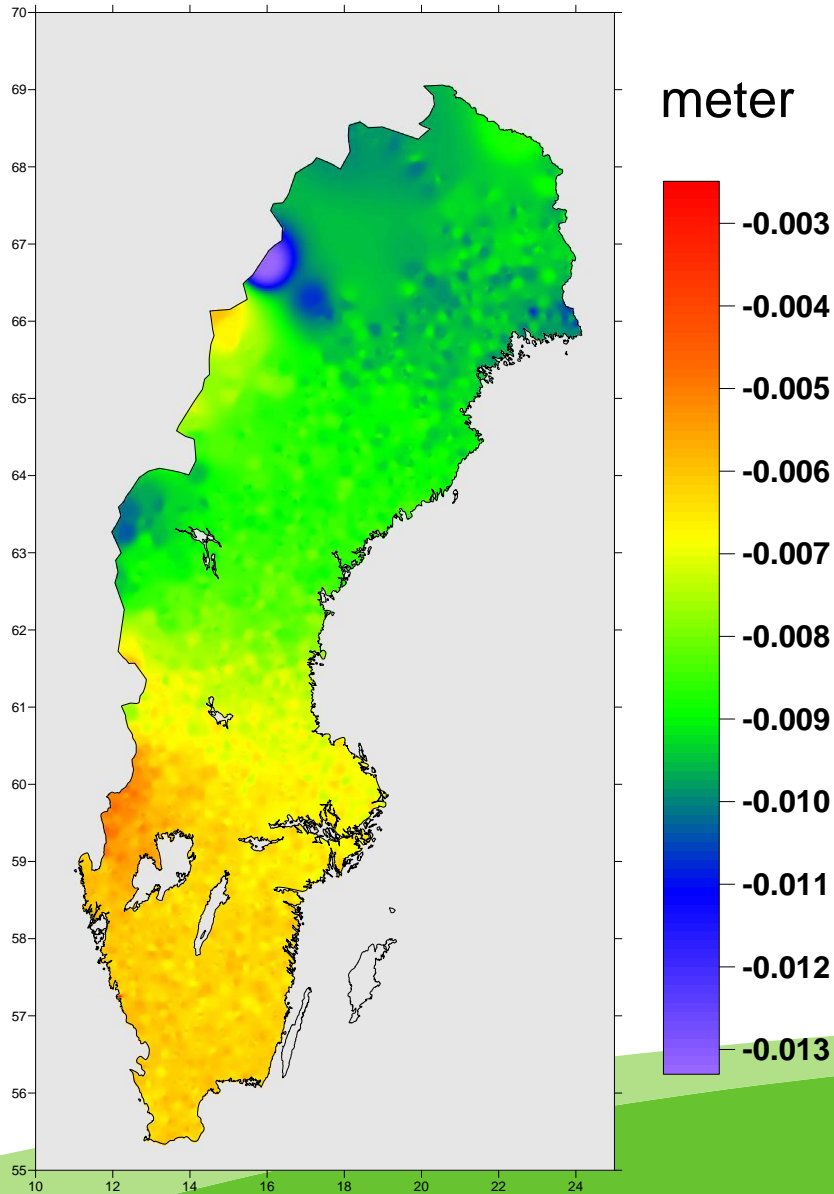
- Den senaste gemensamma Europeiska **EVRS-realiseringsen** är **EVRF2007**,

- I landhöjningsområdet reducerades landhöjningen till epok **2000.0** med **NKG2005LU**.
- En annan skillnad är att den traditionella europeiska **nollnivån (NAP)** nu **ges av 13 stabila "nollpunkter"** fördelade över centrala Europa.



Skillnad mellan EVRF2007 och RH 2000 (BLR)

- Mycket små skillnader i Sverige: från -13 till -3 mm, medel -7 mm.



From Sacher et al. (2008)

Nationella höjdsystem runt Östersjön (på land)

Siffrorna visar medelskillnader i cm från EVRF2007



- De moderna nationella höjdsystemen i **Sverige**, **Norge** och **Finland** har beräknats utgående från ovanstående EVRS-definition genom att utnyttja **BLR**.
- De nya höjdsystemen i **Lettland** och **Litauen** (snart också **Estland**) är också EVRS-realiseringar, men är baserade på **EVRF2007** (på lite olika vis).
- För alla ovanstående realiseringar gäller att landhöjningens inverkan har reducerats till referensepoken **2000.0** med hjälp av **NKG2005LU**.
- Det nya **Tyska** höjdsystemet **DHHN2016** är inte en strikt realisering av EVRS då det använder medeltidjord, men överensstämmer ändå med EVRF2007 inom ett par cm.
- Samma sak för **Danmark**, **DVR90** har tidjordsfritt system och ortometriska höjder, men stämmer ändå inom någon cm med EVRF2007.

Om beräkningen av den nya Svenska geoidmodellen SWEN16_RH2000

Jonas Ågren

Geodesienheten
Lantmäteriet

LANTMÄTERIET



Introduktion

- En bra geoidmodell är en förutsättning för noggrann **höjdbestämning med GNSS**.
- Det är nu ungefär 8 år sedan den svenska geoidmodellen **SWEN08_RH2000** publicerades.
- Sedan dess har arbete pågått med att förbättra den, bland annat genom att göra omfattande tyngdkraftsmätningar i Fjällen och på Vänern.
- En ny Nordisk gravimetrisk geoidmodell, **NKG2015**, har också beräknats i internationellt samarbete.
- GNSS-observationerna av höjden över ellipsoiden på fixar med avvägd höjd över havet (GNSS/avvägning) har uppdaterats.
- DOCK, tyvärr, den nya svenska geoidmodellen **SWEN16_RH2000 är ännu inte färdig** (framförallt arbete med GNSS/avvägning återstår).
- Syftet med detta föredrag är att presentera beräkningen av en **preliminärversion** av modellen, kallad **SWEN16_RH2000(BETA7)**, som har beräknats genom att specialanpassa den Nordiska geoidmodellen NKG2015 till GNSS/avvägning över Sverige.

Innehåll

- Olika typer av geoidbestämning
- Kort om den nuvarande nationella geoidmodellen SWEN08_RH2000
- Sammanfattning av vad som gjorts för att förbättra geoidmodellen
- Den nya Nordiska geoidmodellen NKG2015
- Nya tyngdkraftsmätningar i Sverige (Vänern, Fjällen och även andra områden)
- Kontrollerade GNSS/avvägningsobservationer (försäkringspunkter)
- Om beräkningen av den preliminära modellen SWEN16_RH2000(BETA7).
- Slutord (tidsplan)

Olika typer av geoidbestämning

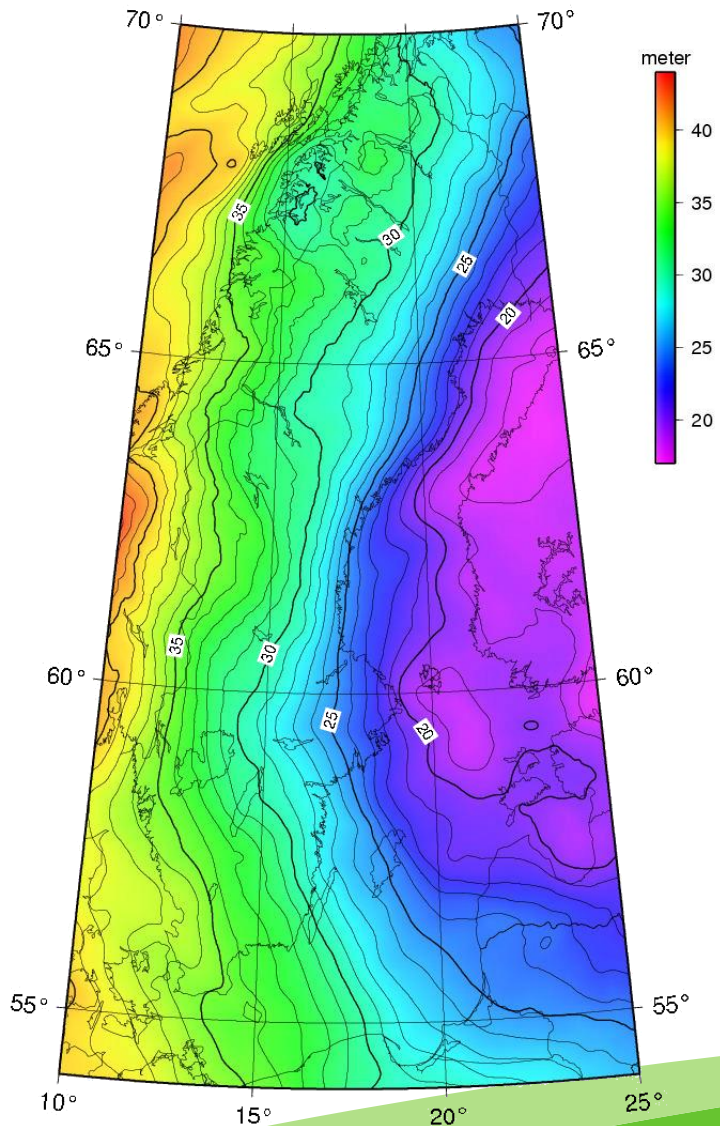
- **Gravimetrisk** geoidbestämning
 - Geoidhöjden beräknas ur tyngdkraftsobservationer, dynamiska satellitobservationer (GRACE, GOCE) och en höjdmmodell (DEM).
 - Komplicerad matematisk/fysikalisk metod, t ex KTH metoden.
 - Kontinuerlig yta (grid), Globalt anpassad nollnivå, inte anpassad till nationella referenssystem.

- **Geometrisk** geoidbestämning (**GNSS/avvägning**)
 - Geoidhöjder bestäms genom GNSS-mätning på enstaka avvägda höjdfixar,

$$N_{GNSS/avvägning}(P) = h_{GNSS}(P) - H_{avvägning}(P)$$

- Punktvis bestämning, anpassad till de nationella referenssystemen.
- Vanligtvis beräknas den **nationella geoidmodellen** genom att anpassa en gravimetrisk geoidmodell till GNSS/avvägningsobservationer.
- Detta görs fördelaktigast genom att addera ett skift och en jämn (smooth) korrektionssyta (restfelsyta) till den gravimetriska modellen (korrigerar för olika nollnivåer, långvägiga fel i höjdsystemet och i den gravimetriska geoidmodellen).

Den nuvarande nationella geoidmodellen SWEN08_RH2000



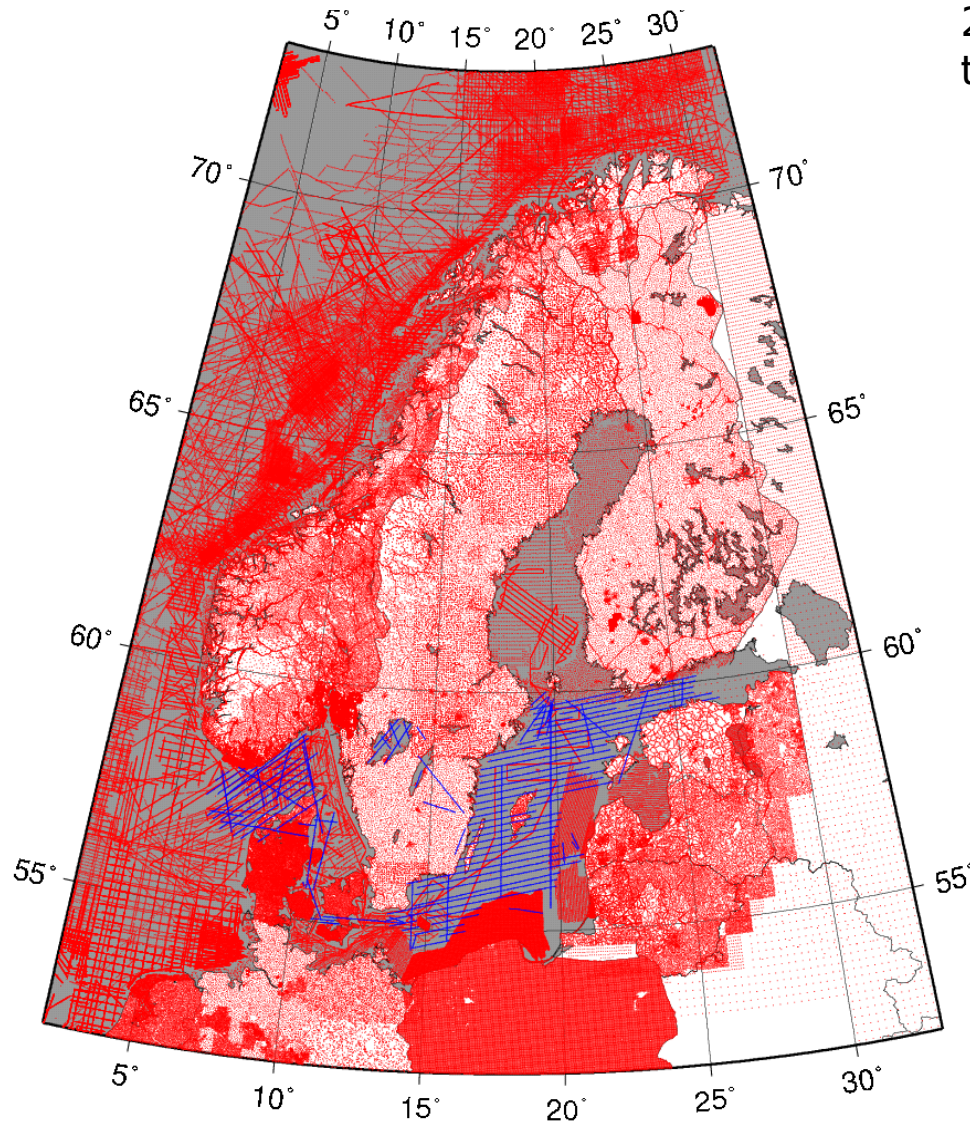
- Beräknad genom att anpassa den gravimetriska geoidmodellen **KTH08** (beräknad med KTH metoden) till de svenska nationella referenssystemen **SWEREF 99** och **RH 2000**,
- Detta har gjorts genom att addera ett skift och en jämn restfelsyta baserad på jämförelse mot GNSS/avvägning:

$$N_{\text{SWEN08_RH2000}} = N_{\text{KTH08}} + \text{Skift} + \Delta N_{\text{Restfelsyta}} \left(+ \Delta h_{\text{noll} \rightarrow \text{tidjordsfri}} \right)$$

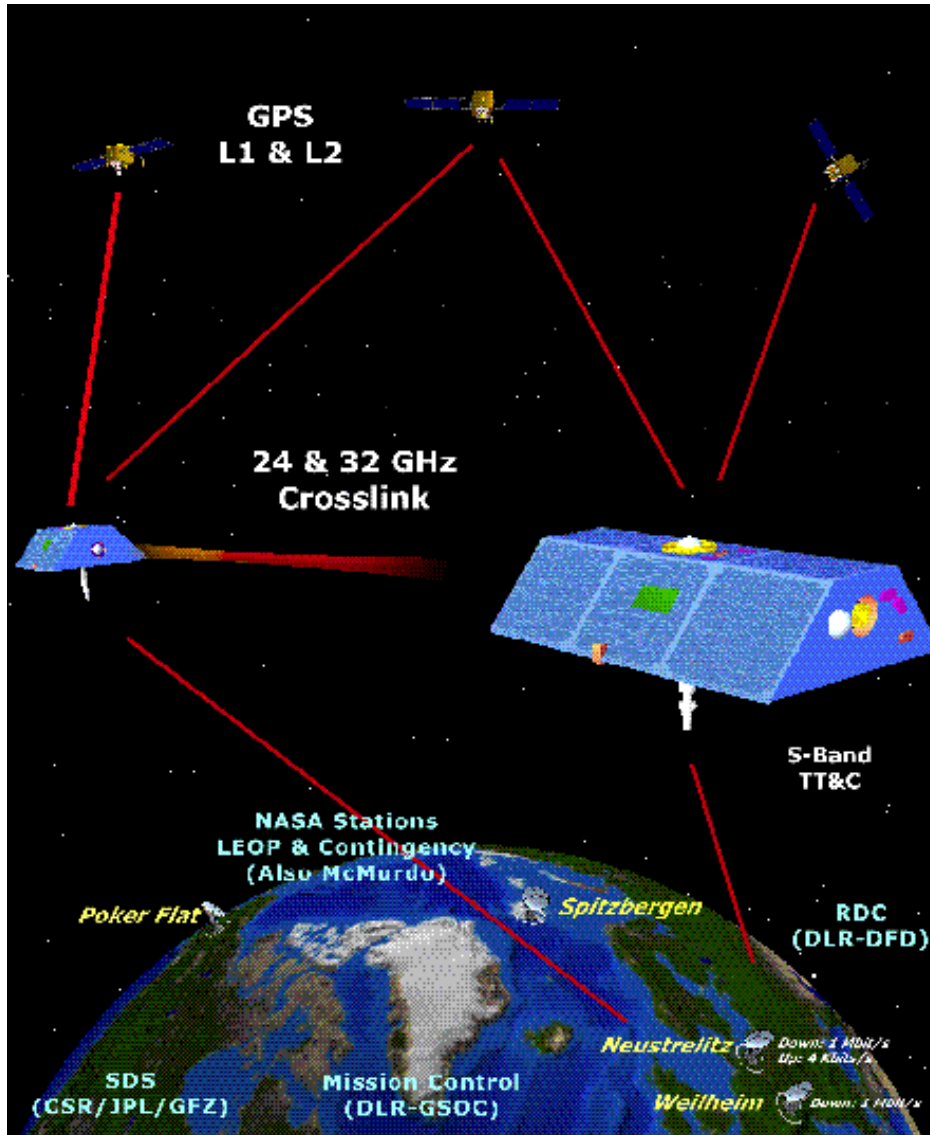
- **GNSS/avvägningsobservationer**: 25 SWEPOS, 181 SWEREF och 1364 RIX 95.
- **Standardosäkerheten** (medelfelet, 1σ) för SWEN08_RH2000 är 10-15 mm i hela landet (utom i "de högsta fjällerna i nordväst"; se figur)
- Standardosäkerheten i "de högsta fjällerna i nordväst" och till havs ligger förmodligen runt 5-10 cm. Mycket osäkert.
- En systemmodell för **RHB 70** har också släppts, **SWEN08_RH70**, vilken beräknats utgående från SWEN08_RH2000 genom att addera en modell för höjdsystemsskillnaden.

Tyngdkraftsdata för KTH08 (underliggande gravimetrisk modell för SWEN08_RH2000)

270 204 tyngdkraftsobservationer ur NKGs tyngdkraftsdatabas användes för KTH08



Global Geopotentialmodell (GGM) från GRACE användes för KTH08

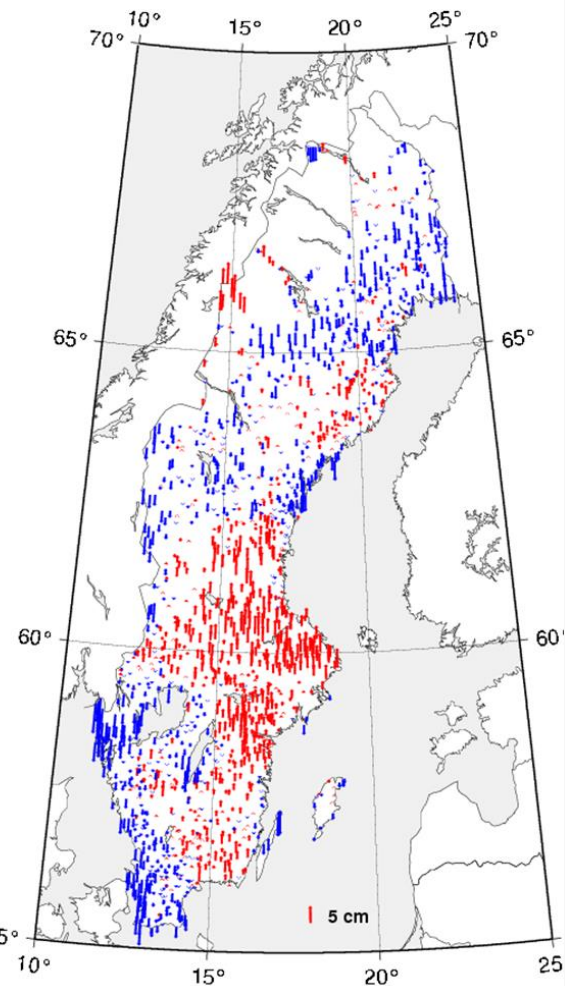


- GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)
- Två satelliter 220 km ifrån varandra.
- Höjd: ≈ 480 km
- Uppskjutning i mars 2002, fortfarande aktiva (men sjunger på sista versen nu)
- Den tidiga GRACE-modellen GGM02C används för KTH08.

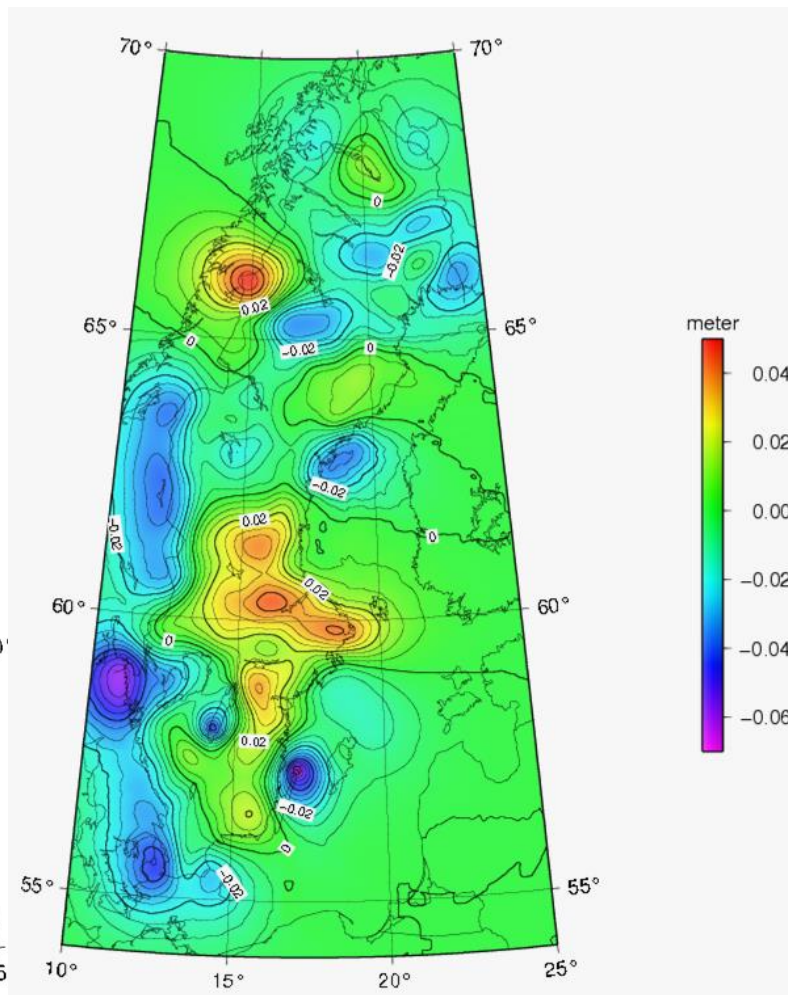
Beräknad av CSR vid Universitet I Texas (Tapley et al. 2005)

Anpassning av SWEN08_RH2000 till GNSS/avvägning

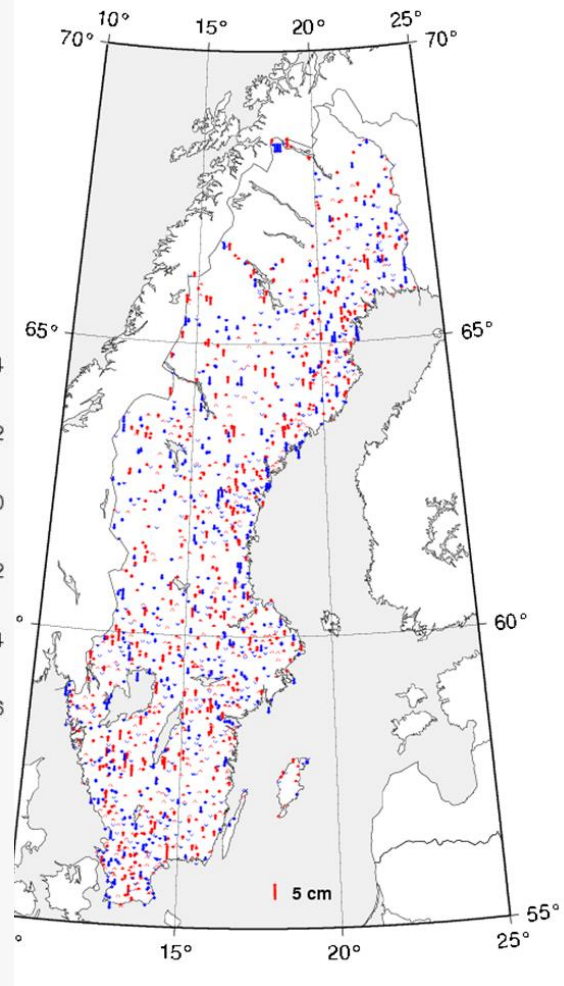
Residualer för KTH08
(efter ett skift)



Jämn korrektionsyta
(restfelsyta) beräknad med
Kollokation



Residualer för
SWEN08_RH2000

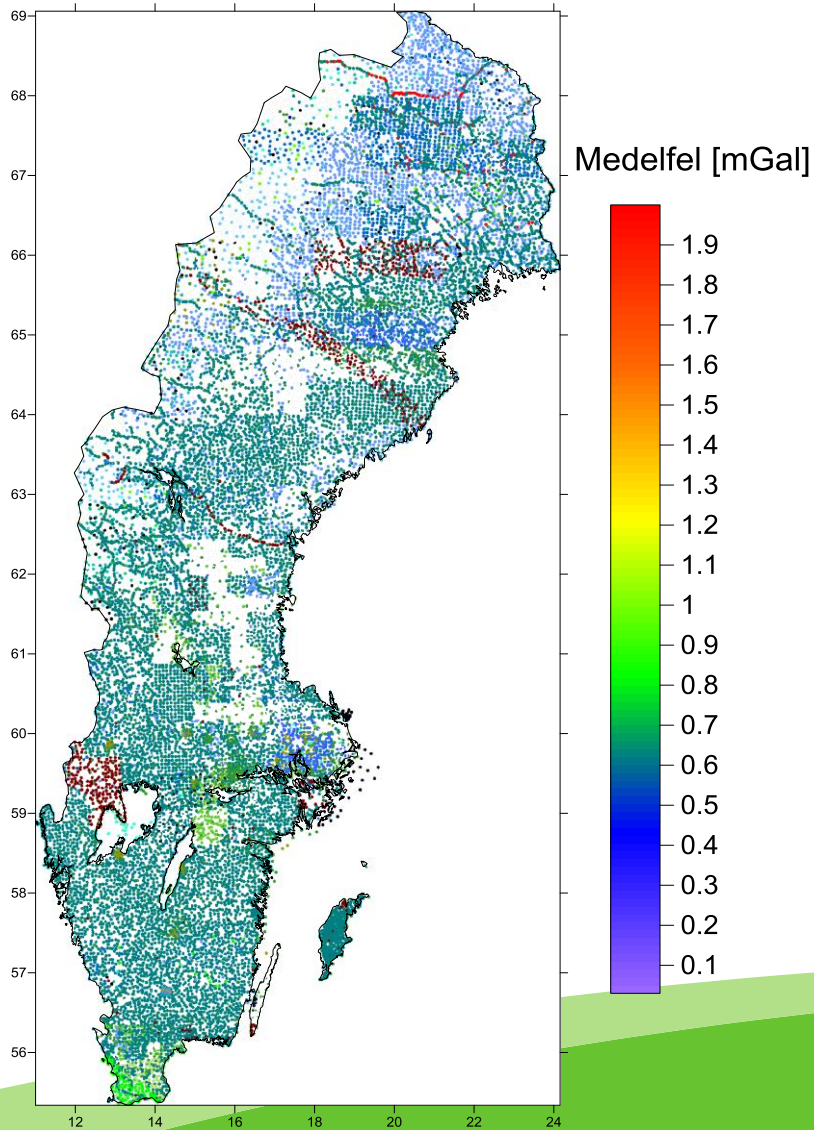


Sammanfattning av aktiviteter för att förbättra den svenska geoidmodellen efter SWEN08

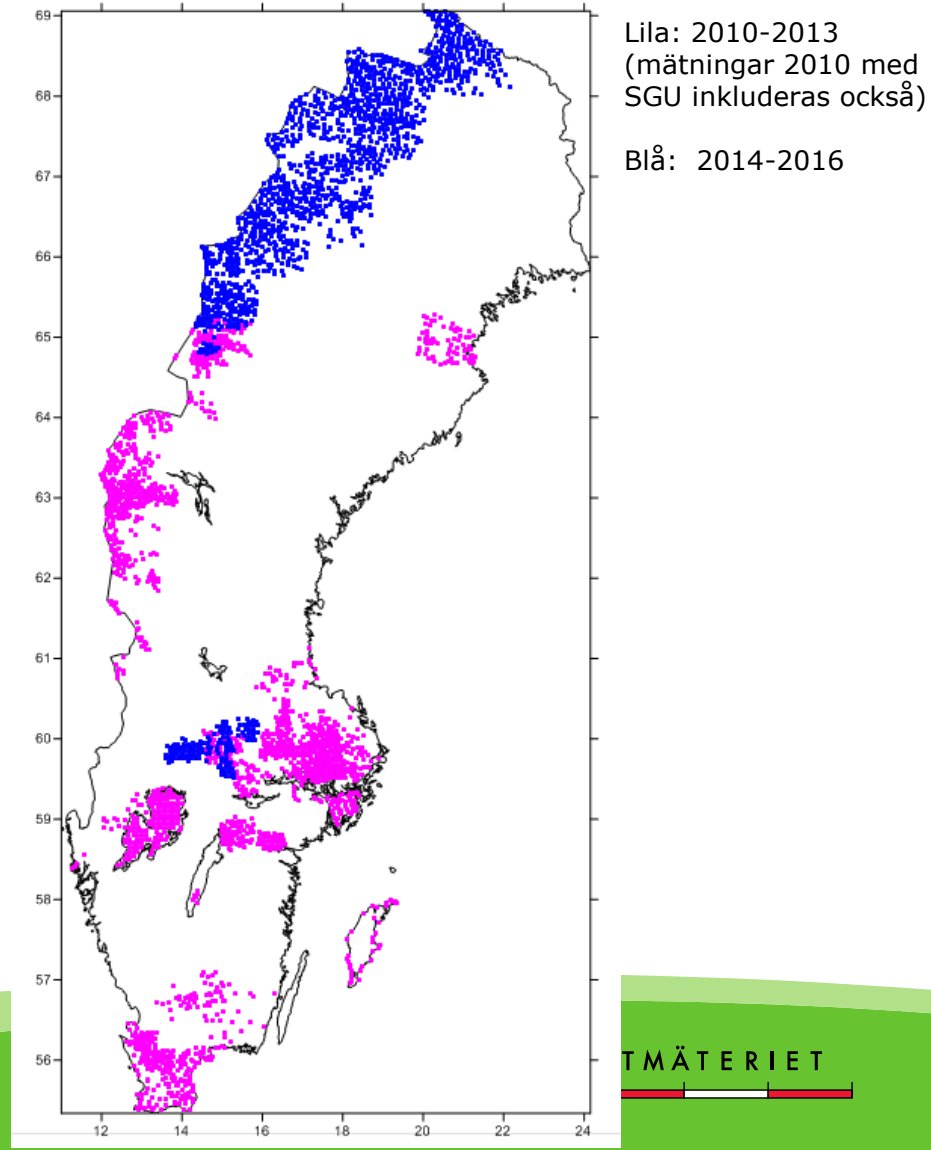
- Den svenska **detaljtyngdkraftsdatabasen** har kompletterats och kontrollerats, framförallt i Fjällen och i Vänern.
- En ny Nordisk geoidmodell **NKG2015** har beräknats inom den Nordiska Kommissionen för Geodesi (NKG).
- De flesta av de noggrannaste GNSS/avvägningspunkterna (SWEREF-punkterna, 48 timmars observationstid, choke ring antenner) har blivit så kallade **försäkringspunkter** och återbestäms nu vart 6:e år enligt ett löpande schema.
- Arbete pågår med ett nytt nationellt tyngdkraftssystem **RG 2000**.
- Lantmäteriet deltar i de delar av **FAMOS** projektet som syftar till att förbättra geoidmodellen **till havs** i Östersjön; se nedan.

Lantmäteriets tyngdkraftsarkiv (detaljdata)

Vid tiden för beräkningen av
KTH08/SWEN08_RH2000
(ca 26 000 observationer)



Nymätta punkter sedan 2010,
(~3200 observationer)



Metod vid detaljmätning av tyngdkraft (sedan 2011)

- **Relativ** tyngdkraftsmätning med **Scintrex CG5**.
- Anslutning på känd punkt (oftast A10) morgon och kväll.
- Mätning med CG5 under 5 minuter.
- Höjd och horisontellt läge bestäms med **SWEPOS Nätverks RTK tjänst** (Virtuell RINEX i punkter med dålig mobiltäckning).



Foto: Andreas Engfeldt



Tyngdkraft på Vänern 2011



Tyngdkraftsmätning i fjällen (2012-2016)

- Testmätningar startade i augusti 2012
- Helikopter för förflyttning mellan punkterna
- I övrigt samma mätprocedur som ovan.
- Konceptet fungerar bra.

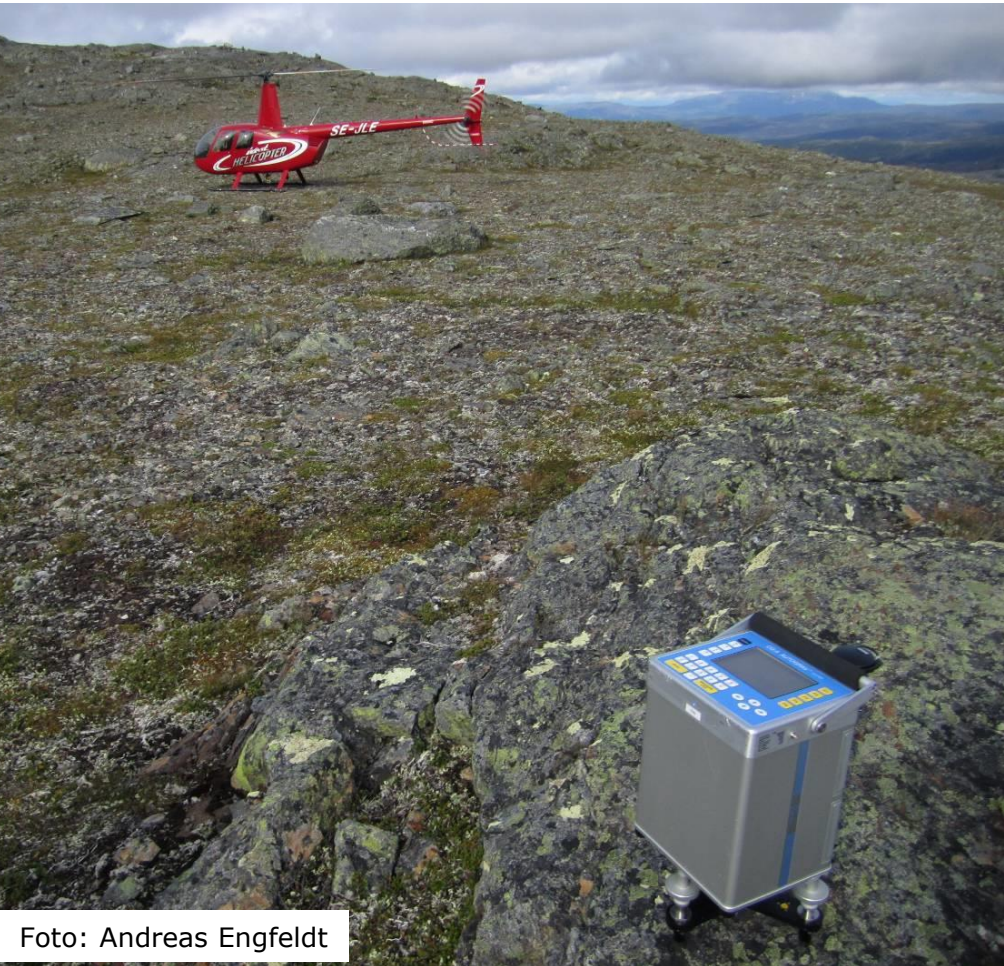
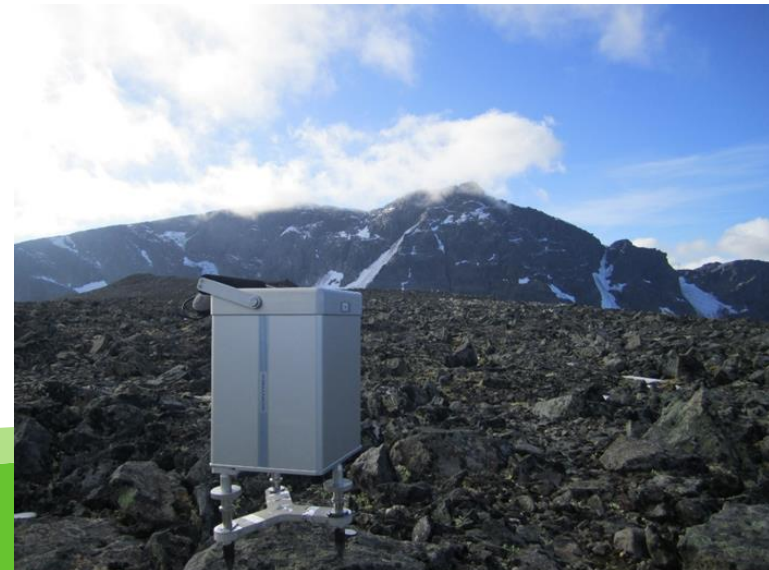


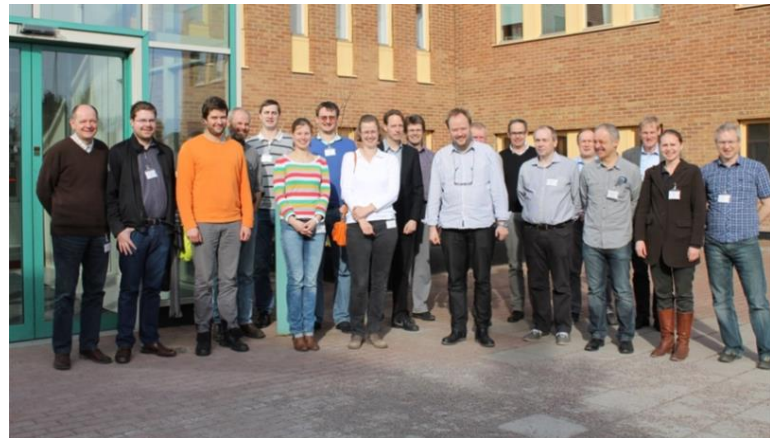
Foto: Andreas Engfeldt



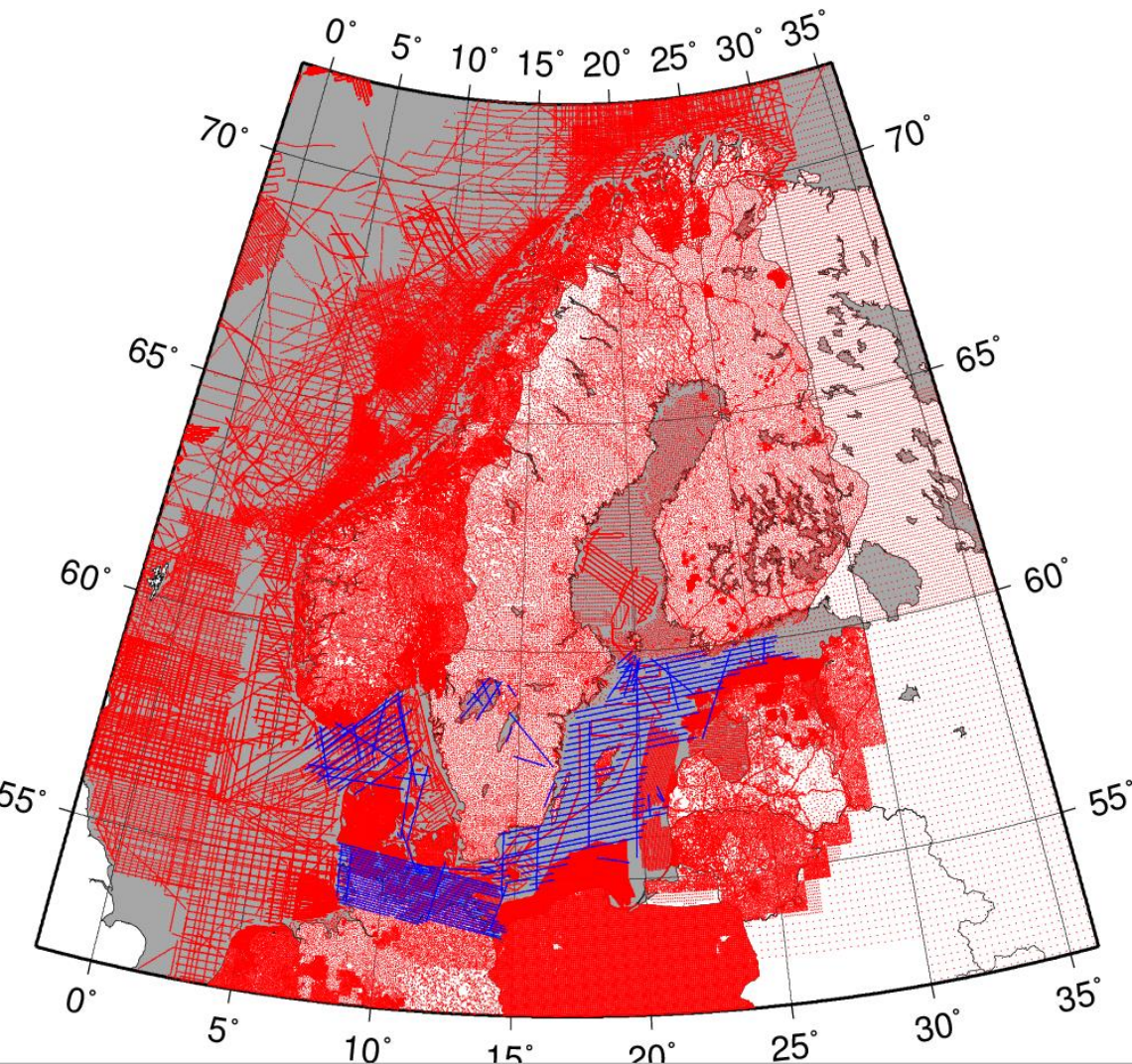
Den nya Nordiska geoidmodellen NKG2015



- Genom åren har ett antal **gravimetriska geoidmodeller** beräknats av den Nordiska Kommissionen för Geodesi (NKG), nämligen:
 - NKG1986 (Tscherning and Forsberg 1986)
 - NKG1989 (Forsberg 1990)
 - NKG1996 (Forsberg et al. 1996)
 - NKG2004
- **NKG2015-projektet** startade 2011 och syftade till att beräkna nästa officiella NKG- (kvasi)geoidmodell i Nordiskt/Baltiskt samarbete. Projektledare: Jonas Ågren
- Den slutgiltiga **NKG2015-modellen släpptes den 6 oktober 2016** (Ågren et al. 2016).
- Projektet har bestått av följande fyra delar:
 - **Specifikation** (bestämma vad göra, definitioner/konventioner om referenssystem, permanent tidjorden, referensepok för landhöjningen, mm.)
 - **Uppdatering av data och databaser** (Tyngdkraftsdatabasen, DEM, GNSS/avvägning, Istjockleksmodell för de större norska glaciärerna)
 - **Beräkning** (fem beräkningscentra, kompletterande undersökningar rörande griddning av tyngdkraftsdata)
 - **Publicering** (pågående).

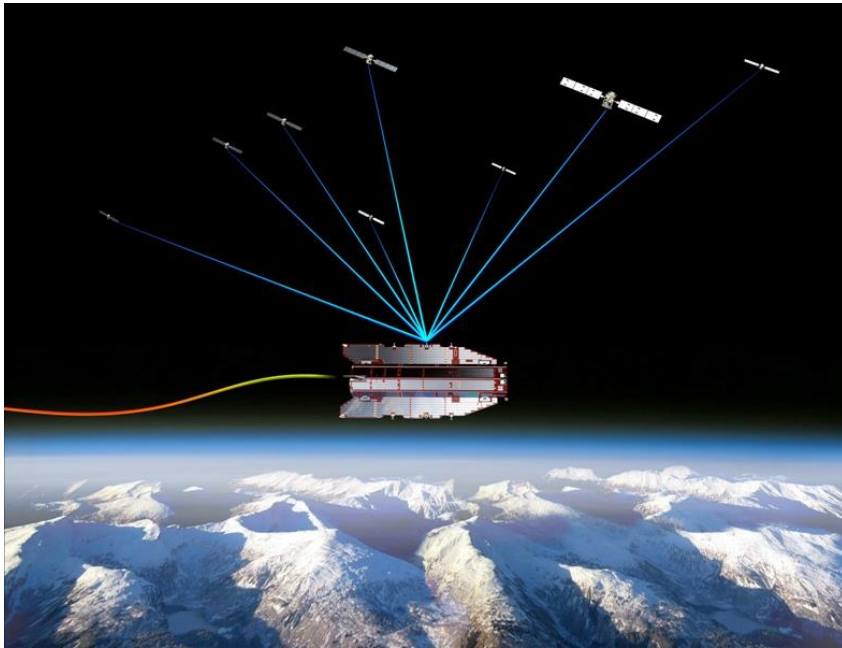


NKGs tyngdkraftsdatabas

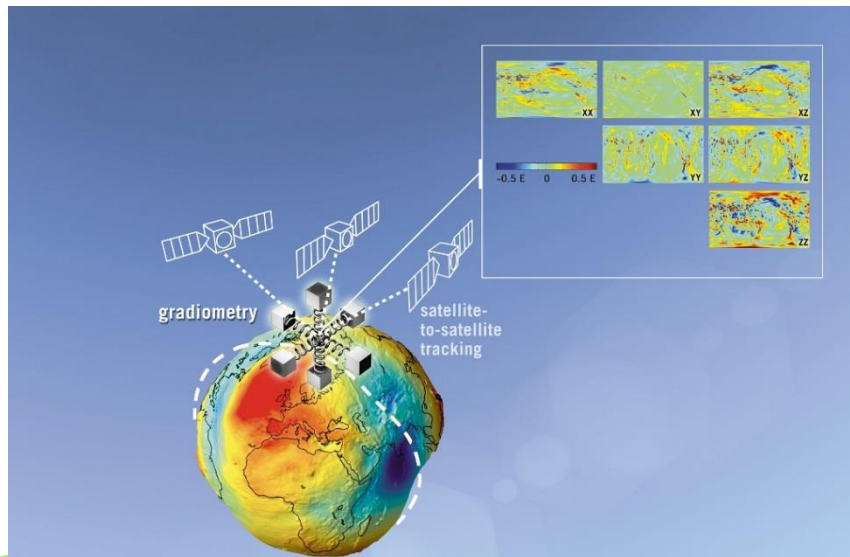


- Databasen har **moderniserats** med en ny databashanterare, men med samma underliggande **80-character format** som förut.
- Tyngdkraftsdata **uppdaterade och kvalitetskontrollerade** i alla de Nordiska och Baltiska Länderna
- Horisontella positioner och höjder transformerade till de nationella ETRS89- and EVRS-realiseringsarna.
- Tyngdkraftsdata i IGSN71 eller modernt absoluttyngdkraftsbaserat system, transformerade till **nolltidjord** och **epok 2000.0** om möjligt/meningsfullt...

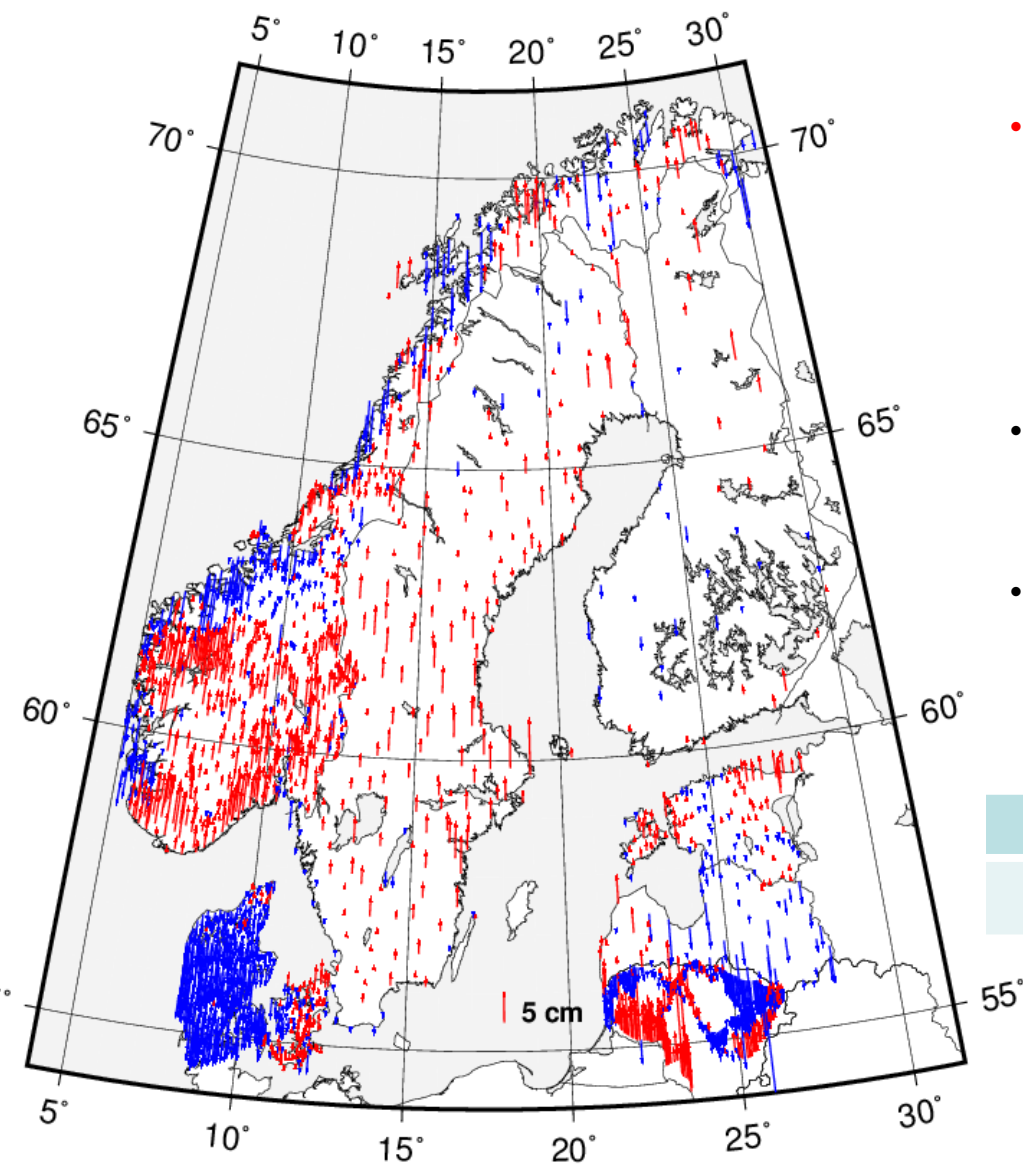
GOCE (Global Ocean steady state Circulation Explorer)



- Tyngdkraftssatellit uppskjuten i mars 2009, kraschade i november 2013.
- Höjd: ca 250 km
- Satellitgradiometri och
- "Satellite-to-satellite tracking" mot GPS
- GOCE möjliggör bestämning av finare detaljer än GRACE
- Den globala "satellite-only" geopotentialmodellen **GO_CONS_GCF_2_DIR_R5** (Bruinsma et al, 2013) användes för NKG2015. Har beräknats ur både GRACE och GOCE.



Den slutgiltiga NKG2015-modellen



- The slutgiltiga gravimetriska modellen beräknades med **KTH-metoden (Sjöberg, m.fl.)**.
- **Den släppta NKG2015-modellen** beräknades sedan med ett skift (och en permanent tidjordskorrektion) enligt

$$N_{NKG2015} = N_{gravimetrisk} + Skift + (\Delta h_{noll \rightarrow tidjordsfri})$$

- Den **relativa noggrannheten** för NKG2015 uppskattas till **ca 15-20 mm (1 sigma) på land (i medeltal över hela området)**.
- I flera länder och områden är den relativa noggrannheten högre än så (standard-osäkerhet runt ca **10-15 mm, däribland i Sverige**).

#	Min	Max	Mean	StdAvv
2538	-0.1740	0.1740	0.0000	0.0285

Jämförelse med andra gravimetriska geoidmodeller tillgängliga över hela Norden/Baltikum

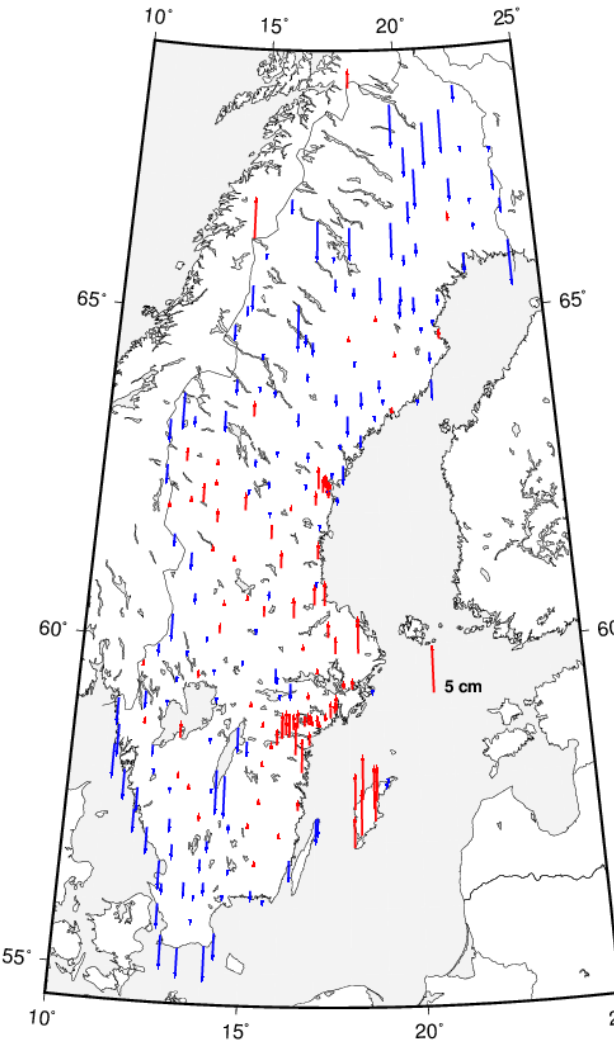
Model	Standard deviation in 1-parameter fit (meter)							
	All	Denmark	Estonia	Finland	Latvia	Lithuania	Norway	Sweden
NKG2015	0.0285	0.0168	0.0147	0.0215	0.0246	0.0333	0.0285	0.0186
NKG1996	0.0907	0.0305	0.0356	0.0737	0.0240	0.0308	0.1078	0.0499
NKG2004	0.0908	0.0274	0.0362	0.0367	0.0782	0.0418	0.0698	0.0431
EGG08	0.0436	0.0198	0.0238	0.0201	0.0336	0.0389	0.0537	0.0253
EGM2008 to 2190	0.0468	0.0227	0.0361	0.0577	0.0285	0.0299	0.0597	0.0287
EIGEN-6C4 to 2190	0.0421	0.0216	0.0341	0.0436	0.0292	0.0366	0.0503	0.0283
EGG2015	0.0351	0.0169	0.0214	0.0209	0.0207	0.0321	0.0412	0.0225

Om beräkningen av SWEN16_RH2000(BETA7)

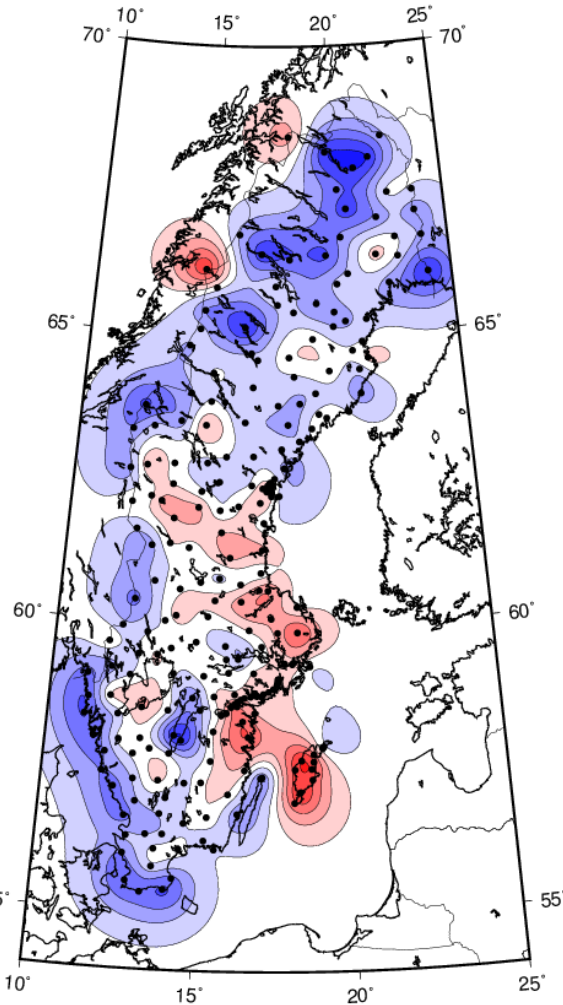
- SWEN16_RH2000 (BETA7) beräknades med en **liknande metod** som SWEN08_RH2000.
- Istället för KTH08 används nu den gravimetriska modellen **NKG2015** (ningen modifierad i Sverige med de senaste tyngdkraftsdata från Lantmäteriet).
- NKG2015 skiftas inte innan restfelsytan beräknas med Kollokation. Det innebär att SWEN16_RH2000 kommer att ansluta sig till NKG2015 strax utanför Sverige.
- **Enbart de noggrannaste GNSS/avvägningsobservationerna** utnyttjas: 24 SWEPOS och 186 SWEREF (de flesta av dessa är **försäkringspunkter** som mäts om vart 6:e år).
- Även GNSS/avvägning mätta minst 4 timmar med den projektanpassade beräkningstjänsten (L1) inkluderas.
- **Ingen SWEN16_RH70** kommer att släppas.

SWEN16_RH2000(BETA7)

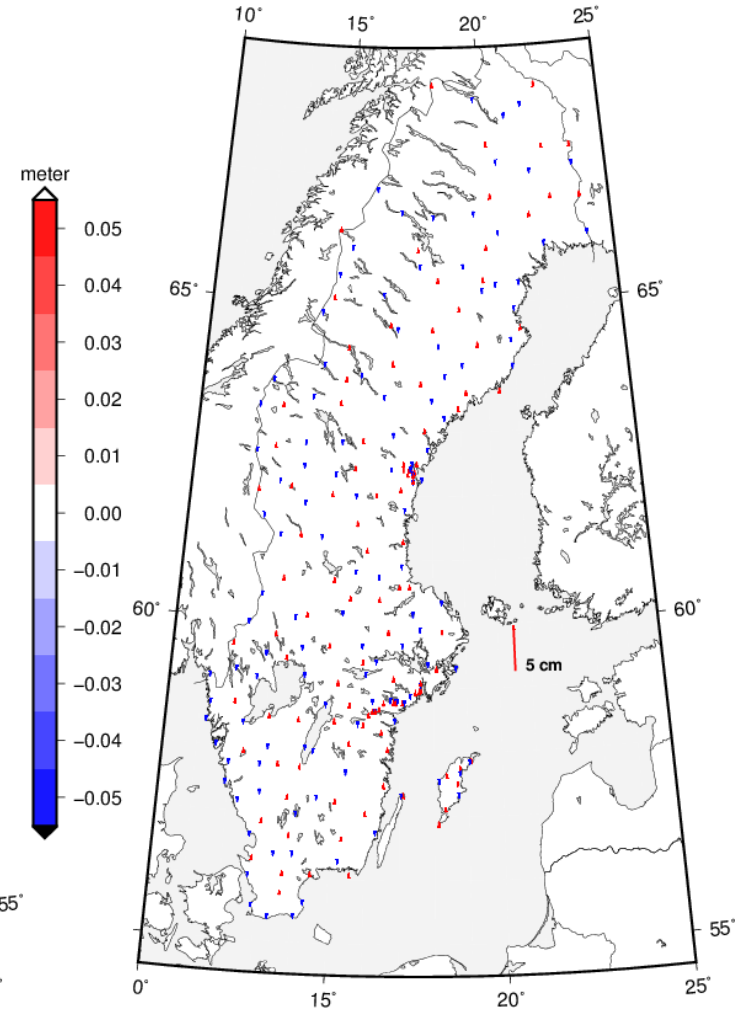
Residualer för NKG2015



Jämn korrektionsyta
(restfelsyta) beräknad med
Kollokation



Residualer för
SWEN16_RH2000

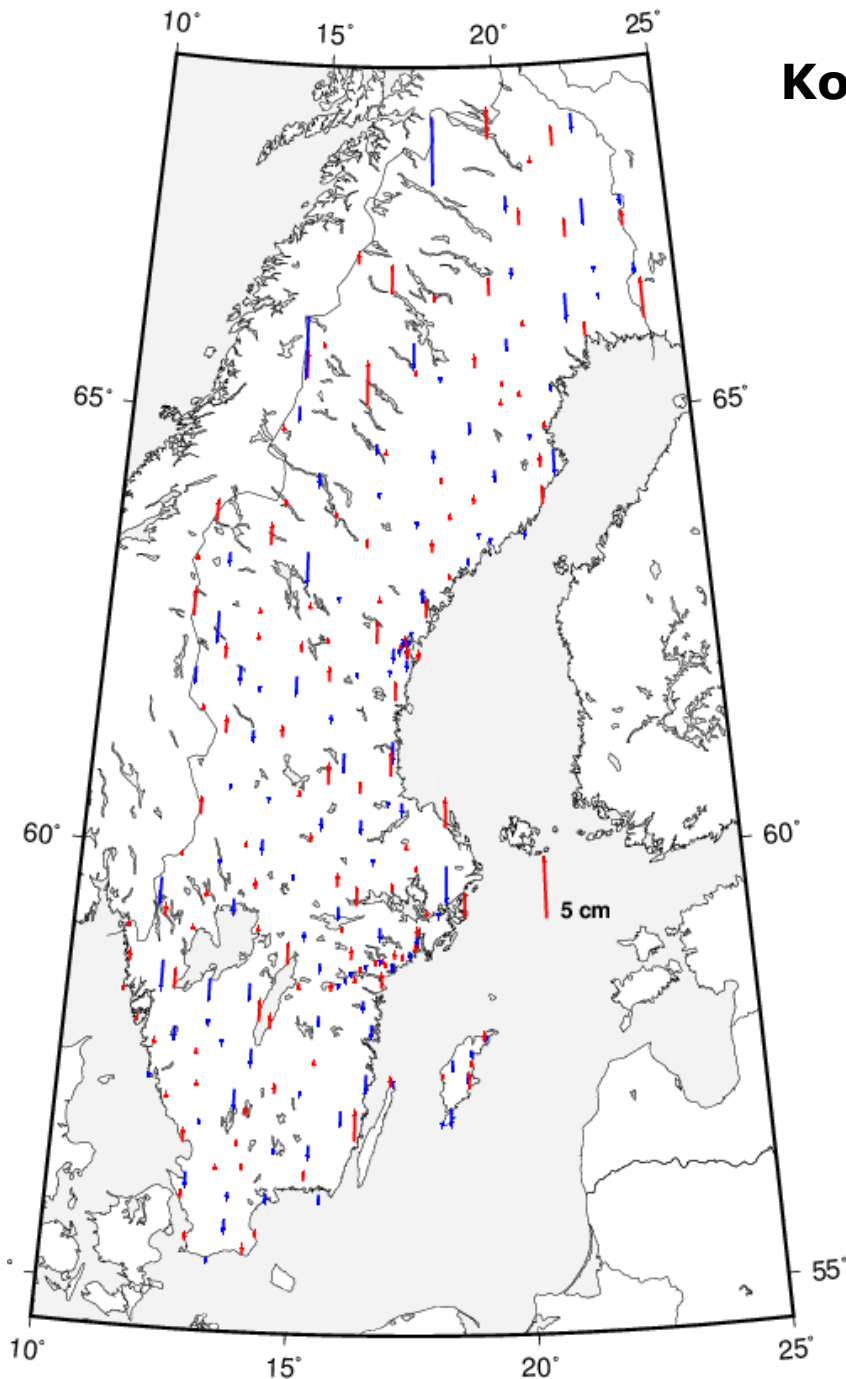


#	Min	Max	Mean	StdAvv
239	-0.048	0.047	-0.003	0.019

#	Min	Max	Mean	StdAvv
239	-0.007	0.012	0.000	0.002

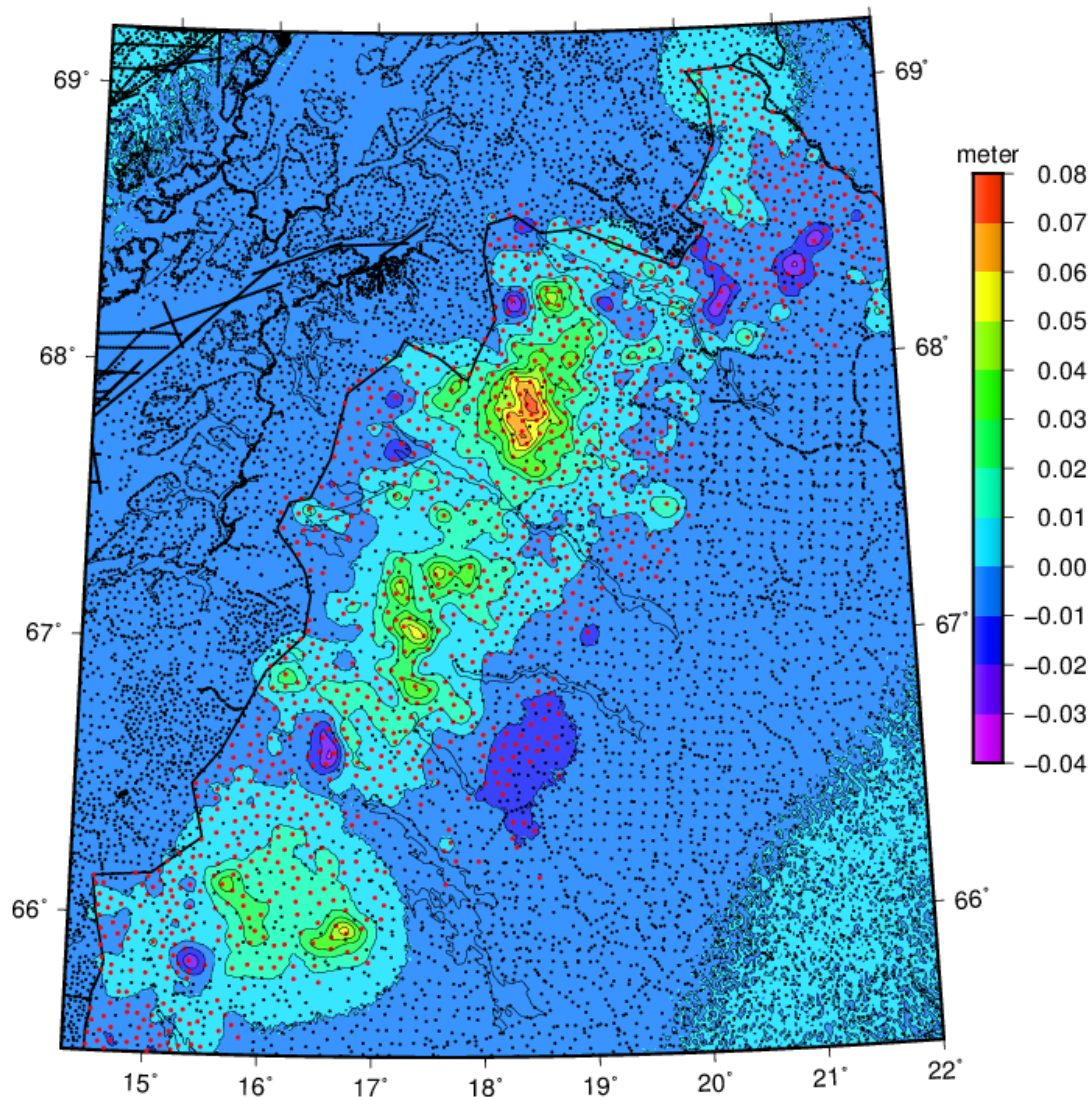
Korsvalidering av skillnaderna mellan GNSS/avvägning och NKG2015

- Korsvalidering innebär att en observation i taget tas bort och interpoleras från kvarvarande observationer. Detta upprepas för alla observationer.
- För varje borttagen observation fås en SWEN-modell beräknad exakt som förut men utan GNSS/avvägningspunkten ifråga.
- Eftersom den borttagna punkten inte är med och påverkar ger detta en mer oberoende utvärdering av noggrannheten.
- Resultatet visar att standardosäkerheten för SWEN16_RH2000(BETA7) ligger runt ca **1 cm** eller bättre (beroende på antagen mätnoggrannhet för GNSS-höjderna).



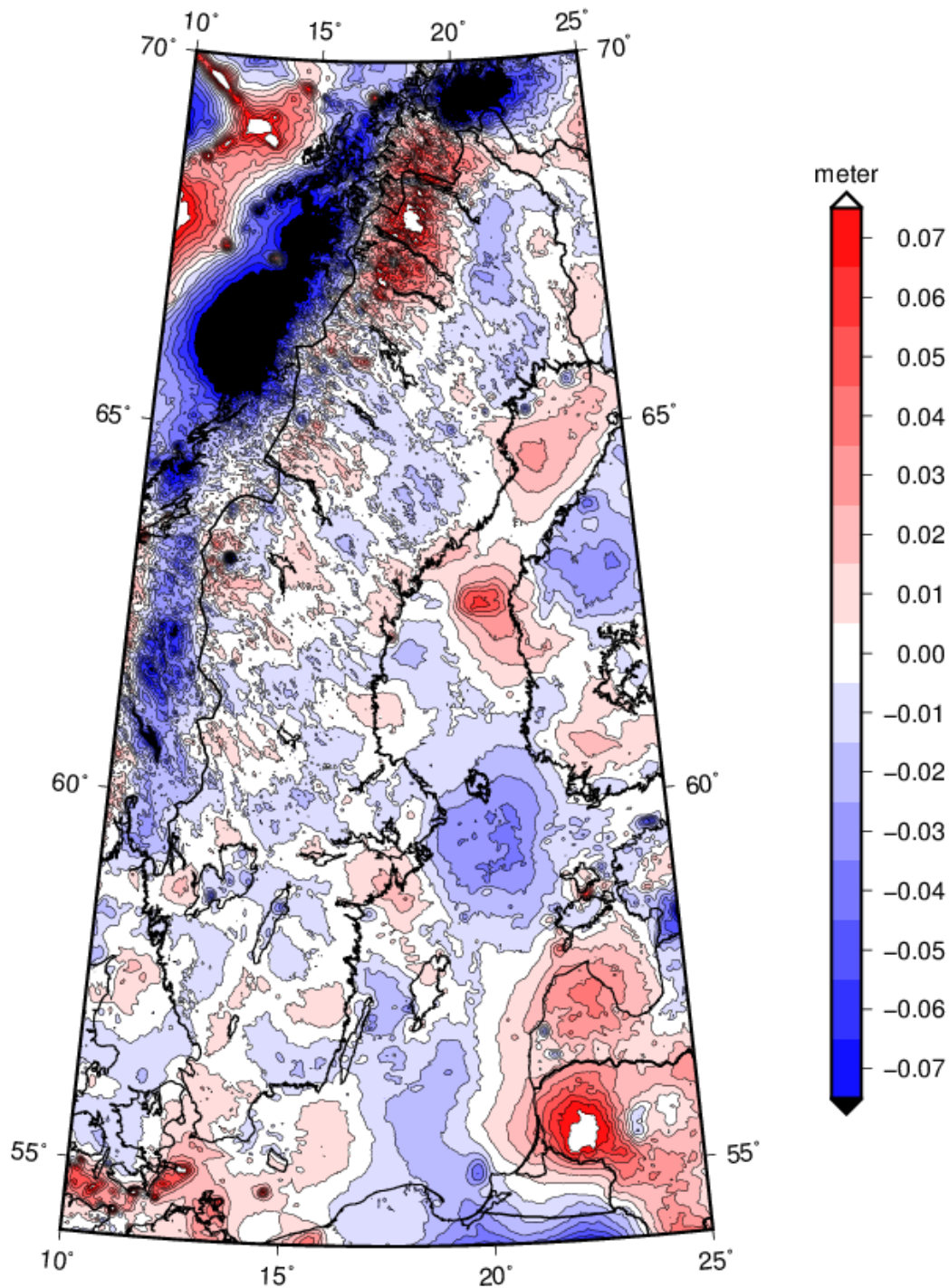
#	Min	Max	Mean	StdAvv
235	-0.055	0.035	0.000	0.012

Förbättring av geoidmodellen i de "högsta fjällen i nordväst"



- Figuren visar skillnaden mellan att använda de nya tyngdkraftsdata i fjällen eller inte i beräkningen av den gravimetriska geoidmodellen.
- De nya data har lagts som en helt svensk korrektion till NKG2015 inom Sverige.
- Resultatet visar att de gamla tyngdkraftsdata inte var så dåliga.
- Men det visste vi inte innan.

Skillnad mellan SWEN16_RH2000(BETA7) och SWEN08_RH2000

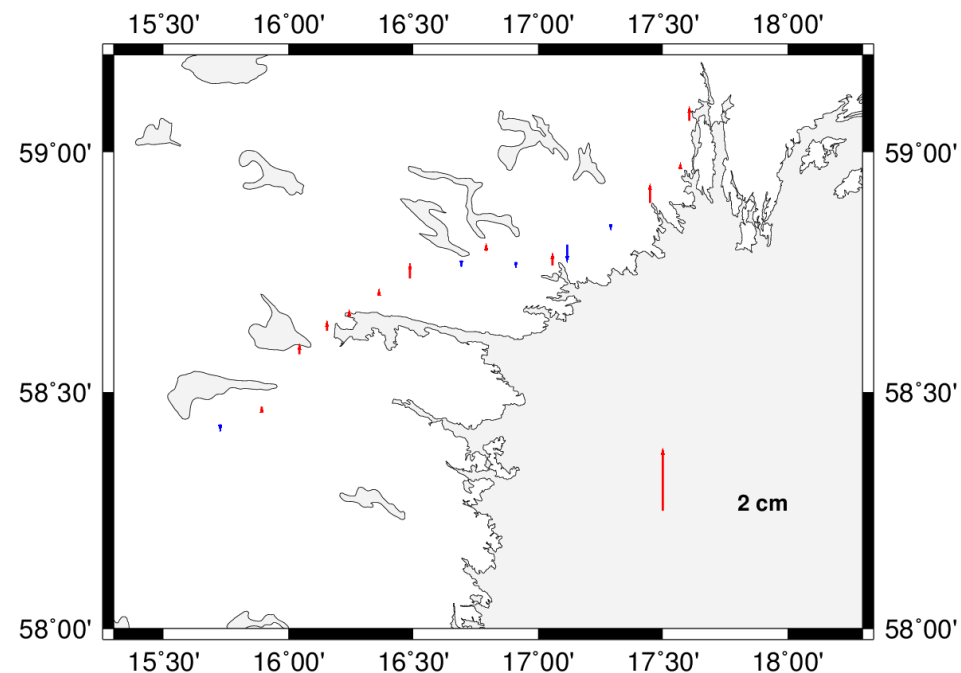
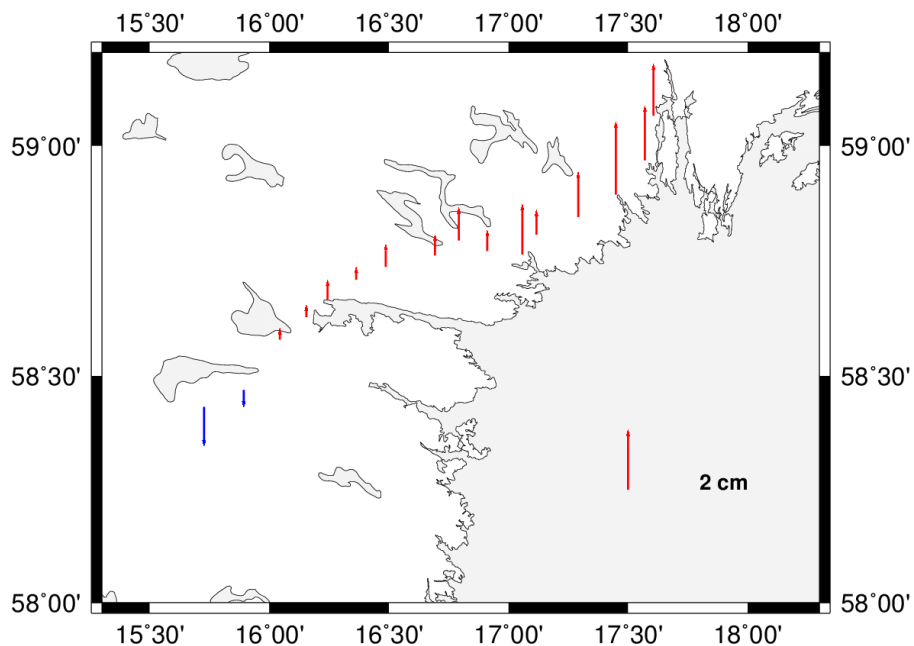


- Skillnaden beror framförallt på
 - Nya tyngdkraftsdata, både i och utanför Sverige.
 - GNSS/avvägning från RIX95 (statisk GNSS) används inte längre.
 - Ny och bättre Global Geopotentialmodell från GRACE/GOCE => Skillnader utanför Sverige.
 - DEM med högre upplösning i hela Norden.
 - Uppdaterade tyngdkraftsdata från våra grannländer.
 - Små skillnader i beräkningsmetoden.

GNSS/avvägningsresidualer längs Ostlänken

SWEN08_RH2000

SWEN16_RH2000(BETA7)



Slutord

- Standardosäkerheten för SWEN16_RH2000(BETA7) uppskattas till **ca 1 cm på land, i hela landet och på Gotland**.
 - Lite sämre längst upp i norr *nära* gränsen mot Norge och i Vättern (~2-3 cm).
 - Fortfarande sämre ute till havs (~2 cm i kustnära vatten, 10 cm längre ut, ?). Marin gravimetri från FAMOS har ännu inte inkluderats.
- Situationen är betydligt **mer tillförlitlig** nu än när SWEN08_RH2000 beräknades, men det finns sannolikt fortfarande problem i enstaka områden (här och där).
- För att nå högsta noggrannhet vid **GNSS-mätning** bör metoden vara **kompatibel** med den metod som använts för GNSS/avvägningsdatasetet för SWEN16_RH2000 (dvs. för försäkringspunkterna).
- Det som framförallt **återstår** innan SWEN16_RH2000 kan släppas är en slutgiltig beräkning av försäkringspunkterna och en sista kontroll av de senaste tyngdkraftsmätningarna. Även förbättringar i Vättern.
- SWEN16_RH2000 planeras bli klar innan **halvårsskiftet 2017** och kommer sedan att lanseras.

Mot effektivare och säkrare navigering i FAMOS-projektet

(Om införandet av Baltic Sea Chart Datum 2000)

Jonas Ågren

Lantmäteriet, Sweden



Co-financed by the European Union
Connecting Europe Facility

- EU-infrastrukturprojekt (CEF transport) för att öka **effektivitet, säkerhet och noggrannhet** för navigering och sjömätning i Östersjön.
- Projektet leds av **Sjöfartsverket** i Sverige, projektledare är Benjamin Hell.
- Löper under perioden **2014-2020**, tre delprojekt (**Freja, Odin och Thor***).
- Andra deltagande organisationer
 - FTA (finska motsvarigheten till SjöV)
 - VTA (estniska motsvarigheten till SjöV)
 - MAL (lettiska motsvarigheten till SjöV)
 - LMSA (litauiska motsvarigheten till SjöV)
 - GST (danska motsvarigheten till SjöV)
 - BSH (tyska motsvarigheten till SjöV)
 - LM (Lantmäteriet)
 - BKG (German Federal Agency for Cartography and Geodesy)
 - GFZ (Geoforschungszentrum Potsdam)
 - DTU (Danmarks Tekniska Universitet)
 - TUT (Tallinn University of Technology)
 - NLS/FGI (Finnish National Land Survey)



FAMOS-projektets upplägg

Projektet består av **fyra aktiviteter**:

1. Hydrografisk sjömätning

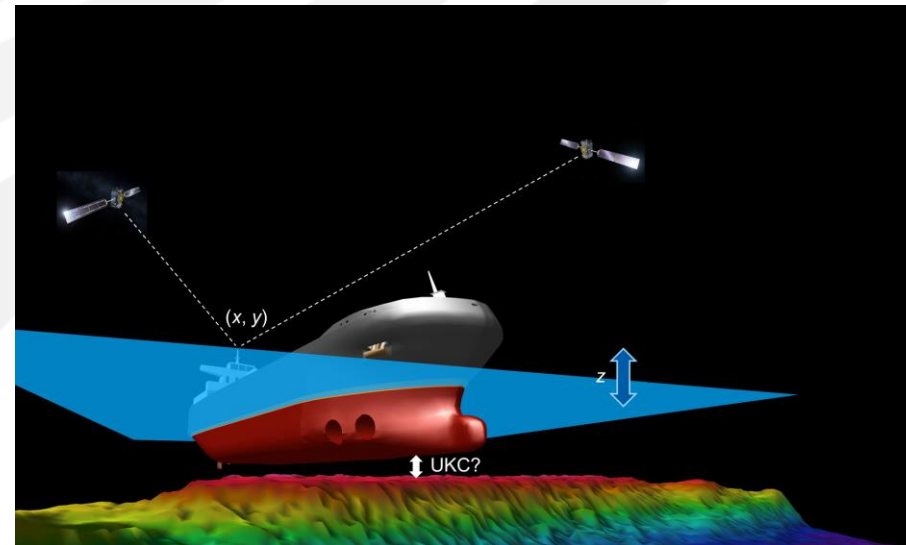
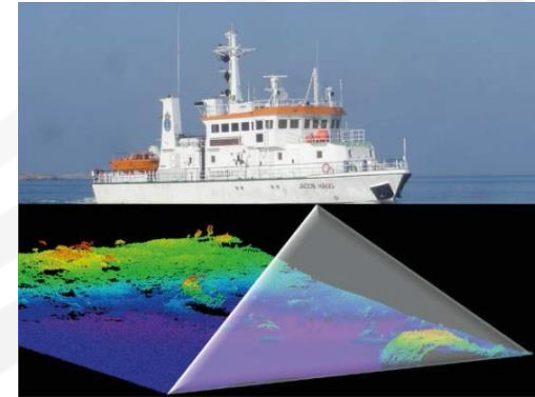
Den ojämförligt största delen av projektet, syftar till att slutföra modern sjömätning av prioriterade områden i Östersjön.

2. Homogent referenssystem för höjd och djup, förbättring av framtidens navigering

- Stödja införandet av **Baltic Sea Chart Datum 2000** (RH 2000) som gemensamt referenssystem för djup i Östersjön.
- Förbättra och kontrollera **geoidmodellen** över Östersjön genom att göra nya **marina tyngdkraftsmätningar** från sjömätningssartygen.
- Studera och förbättra **realtids-GNSS till havs**
Viktigt för framtidens navigering!
- “Under Keel Clearance (**UKC**) aware navigation”
- mm.

3. Utrustning för effektiv hydrografisk mätning.

4. Förbättrat dataflöde från hydrografisk mätning till sjökort.



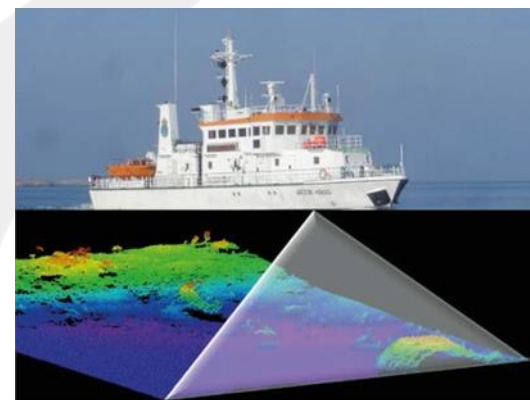
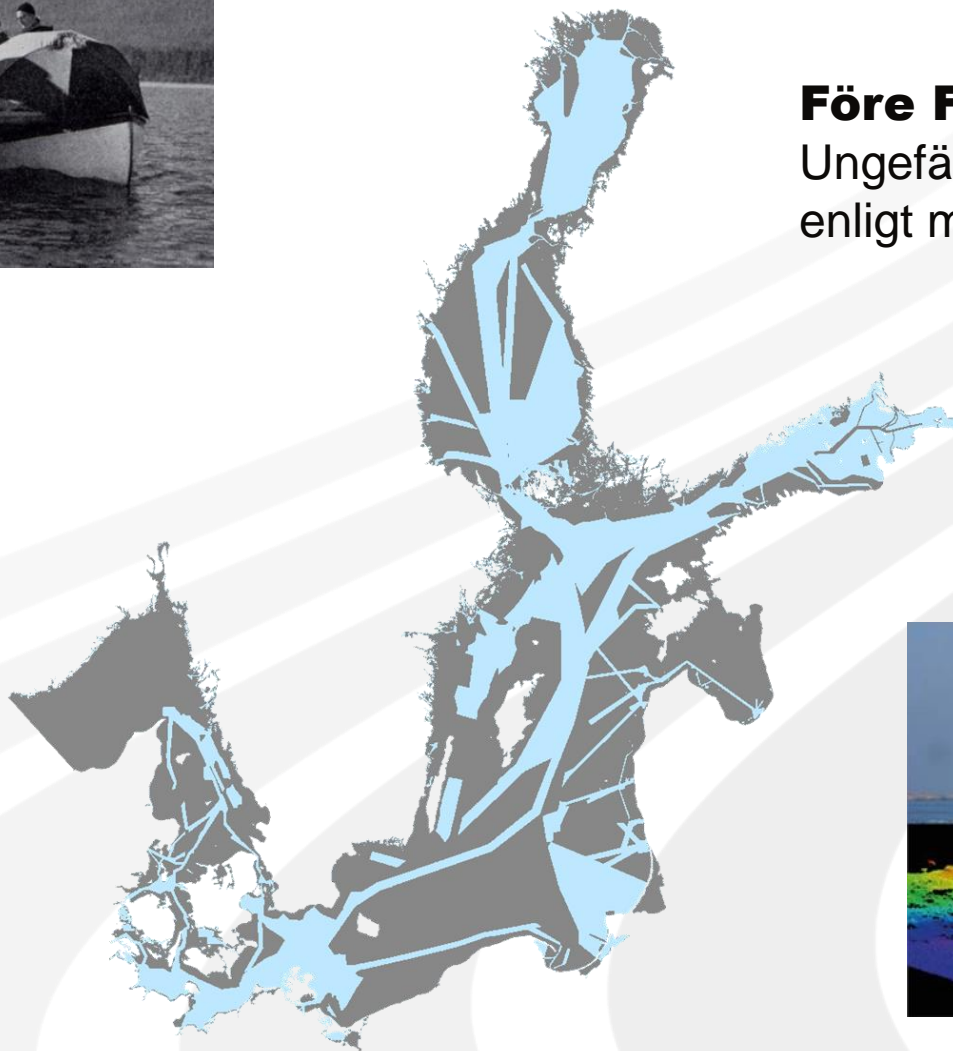
**Goda nyheter:
Östersjön är uppmätt till 100%**

50%

50%

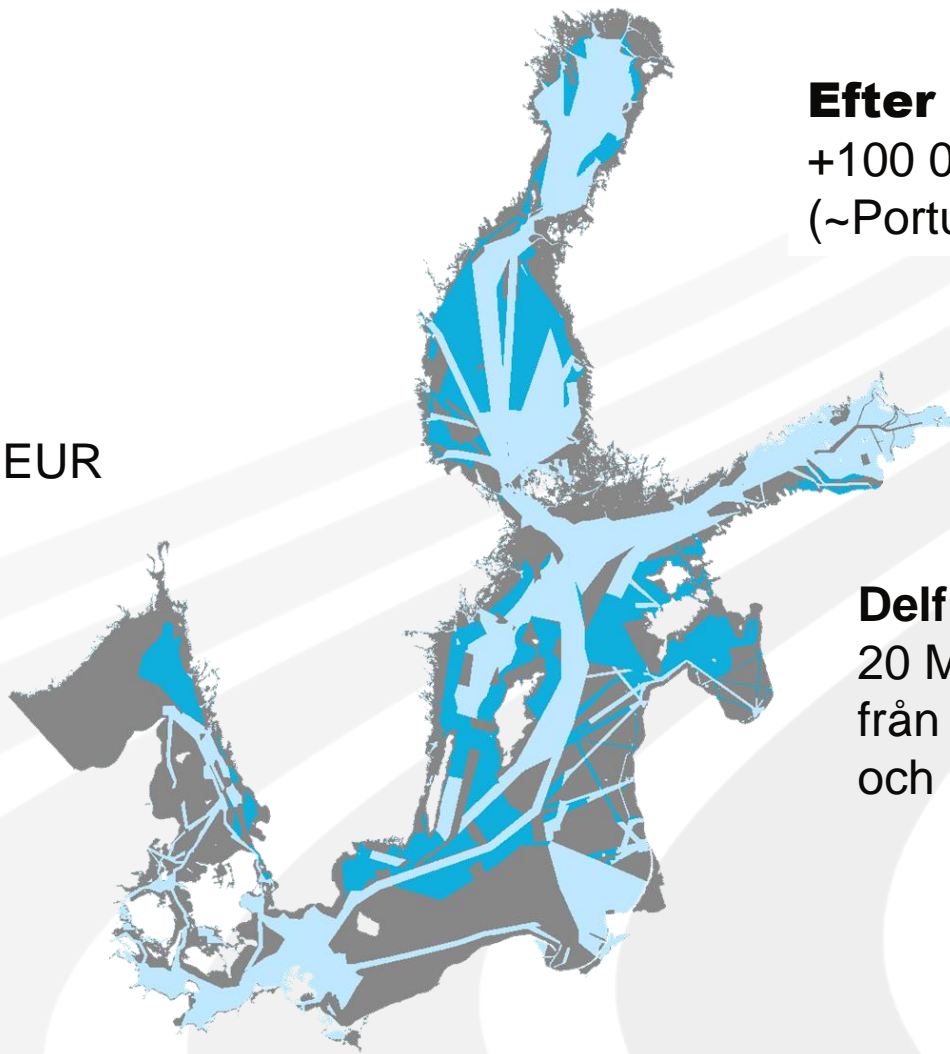


Före FAMOS:
Ungefär 50% mätt
enligt modern standard



Co-financed by the European Union
Connecting Europe Facility

Approx. 80 MEUR



Efter FAMOS:

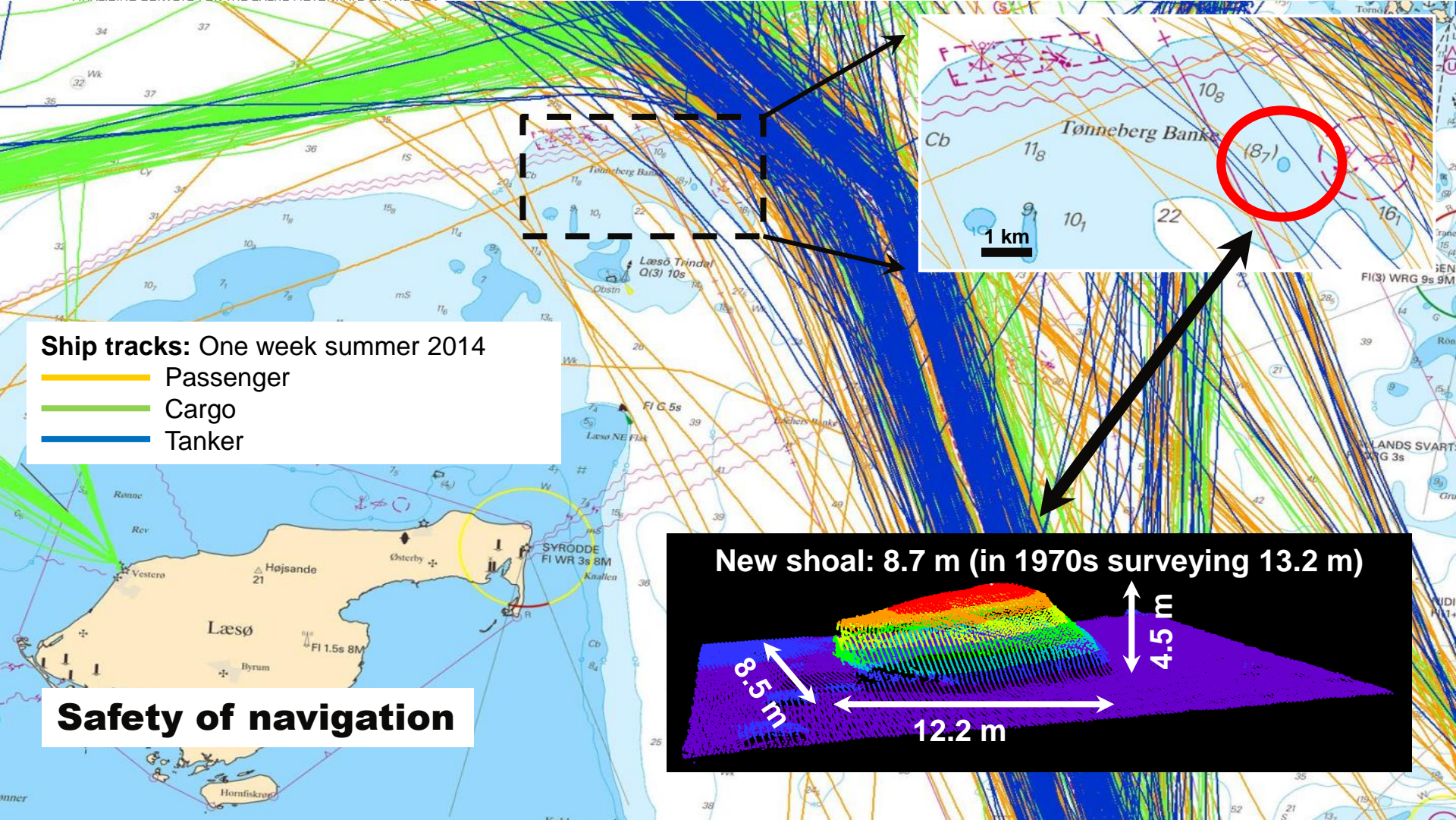
+100 000 km²
(~Portugals yta)

Delfinansiering:

20 MEUR 2014-2018
från EU medel för transport
och infrastruktur



Co-financed by the European Union
Connecting Europe Facility



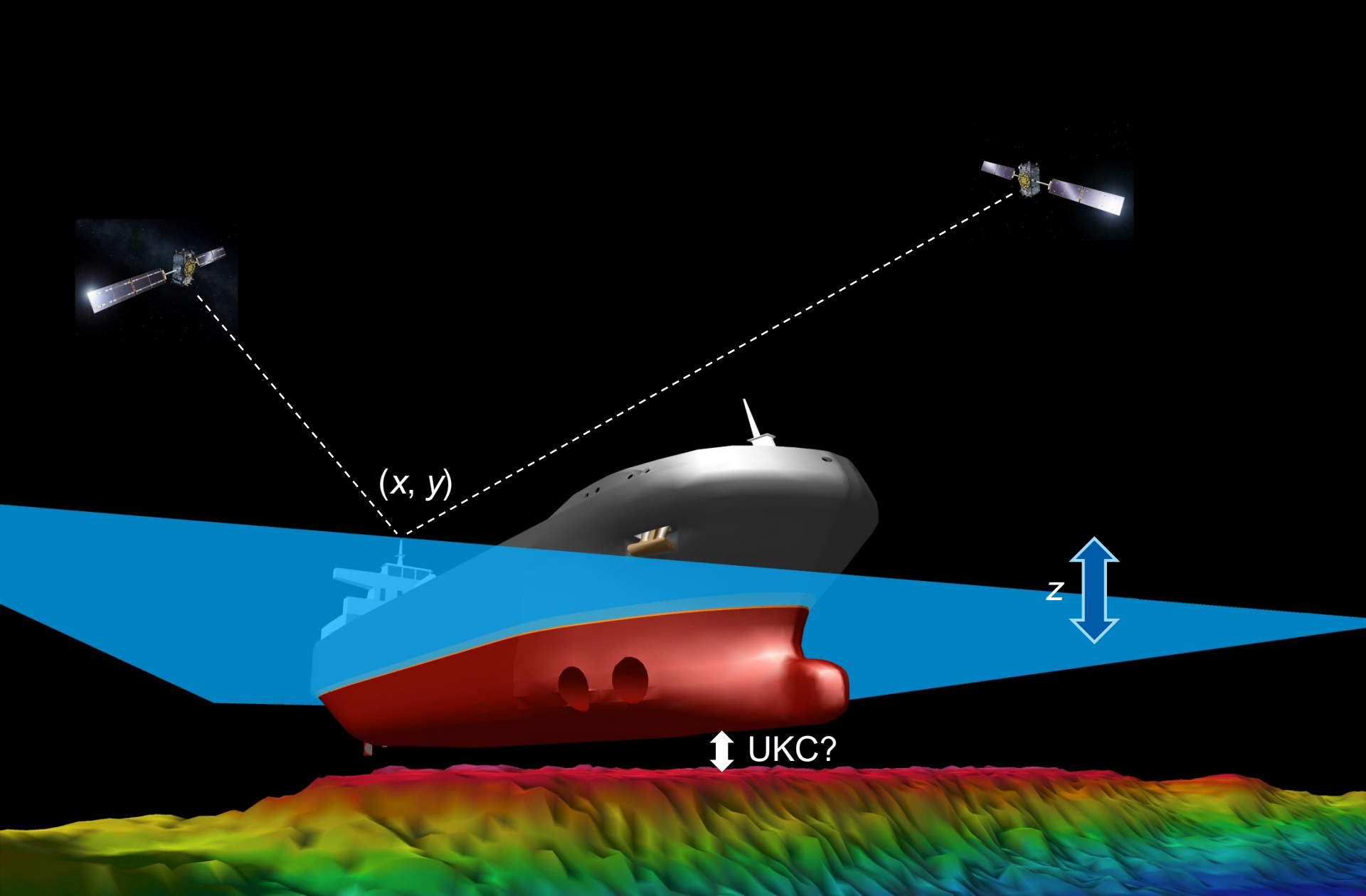
Ship tracks: One week summer 2014

- Passenger
- Cargo
- Tanker

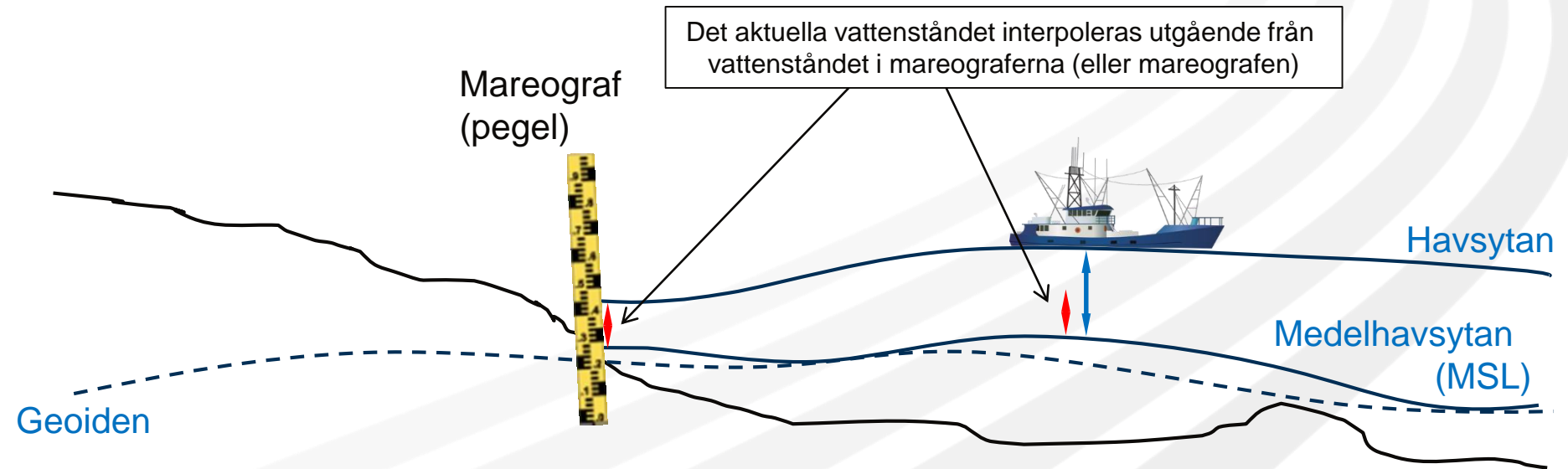
Safety of navigation

New shoal: 8.7 m (in 1970s surveying 13.2 m)





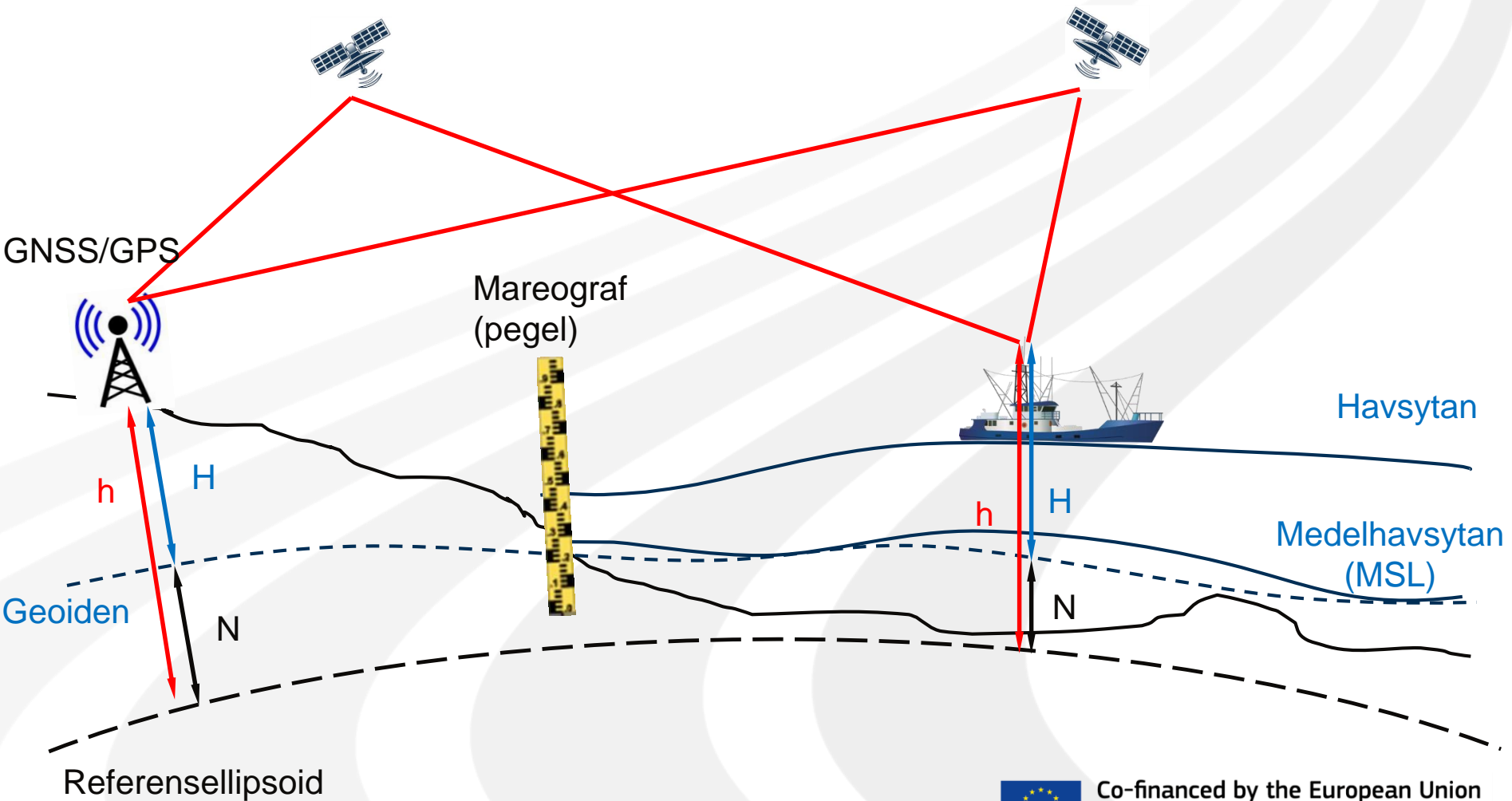
Höjd/djupbestämning till havs med mareografer



- Fram till idag har vanligtvis **medelhavsytan (MSL)** använts som referensnivå för sjökorten i Östersjön (referenssystem för djup, Ekman 2002, på engelska "chart datum").
- Genom åren har många sådana **referenssystem för djup** använts i Östersjön, bland annat med olika **referensepoker** för den postglaciala landhöjningen.
- Denna uppsjö av medelhavsytor och landhöjningsepoker har blivit mycket **förvirrande** för sjöfarten, vilket i praktiken resulterat i att **högre säkerhetsmarginaler** än nödvändigt måste användas.
- Ett annat problem är att det är svårt att interpolera vattenståndet med hög noggrannhet långt ut till havs. Metoden är inte heller anpassad för noggrann höjd/djupbestämning med **GNSS**. I det senare fallet är **geoiden** en lämpligare referensyta än medelhavsytan (MSL).



Höjd/djupbestämning i ett geodetiskt höjdsystem med GNSS och geoidmodell



Baltic Sea Chart Datum 2000

- För att undvika ovanstående problem och underlätta användningen av 3D GNSS i framtiden har BSHC (Baltic Sea Hydrographic Commission) beslutat att införa **Baltic Sea Chart Datum 2000** som nytt gemensamt referenssystem för sjökort och publikationer i Östersjön från och med **2020**.
- **Baltic Sea Chart Datum 2000** är ett **geodetiskt höjdsystem** (geoiden är nollnivå) som definieras i enlighet med **EVRS**, men med landhöjningsepoken explicit fastlagd till **2000.0**.
- **På land** kommer **Baltic Sea Chart Datum 2000** att realiseras på samma sätt **som de nationella höjdsystemen**, dvs. nu primärt med hjälp av avvägning, bärs upp av höjder på fixar, etc.
- **RH 2000** är den svenska nationella realiseringen av Baltic Sea Chart Datum 2000.
- **Till havs** kommer **Baltic Sea Chart Datum 2000** i princip att realiseras med hjälp av **GNSS** (nationella näten av permanenta referensstationer, etc.) **och en gemensam gravimetrisk geoidmodell**.
- En **noggrann gravimetrisk geoidmodell** över hela Östersjön är mycket **viktig** för realiseringen av Baltic Sea Chart Datum 2000



Tyngdkraften kan mätas
på ett skepp till havs med
en relativ noggrannhet
runt 10^{-6} (~1 mGal)



Utgående från tyngdkraftsdata
kan sedan **geoiden** beräknas.

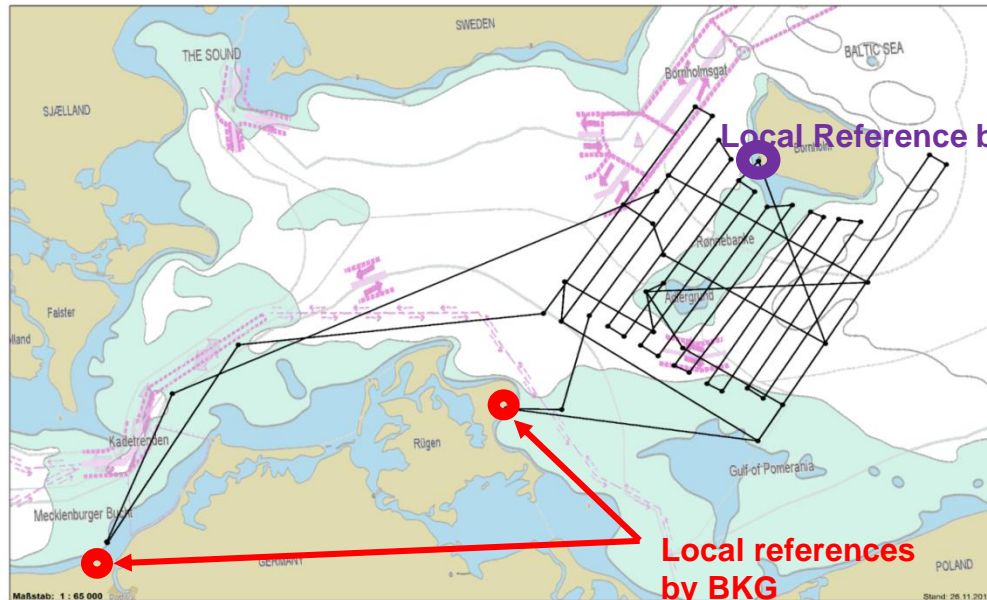
Ambitionen i FAMOS:
Standardosäkerhet **< 5 cm**
(med hög tillförlitlighet)



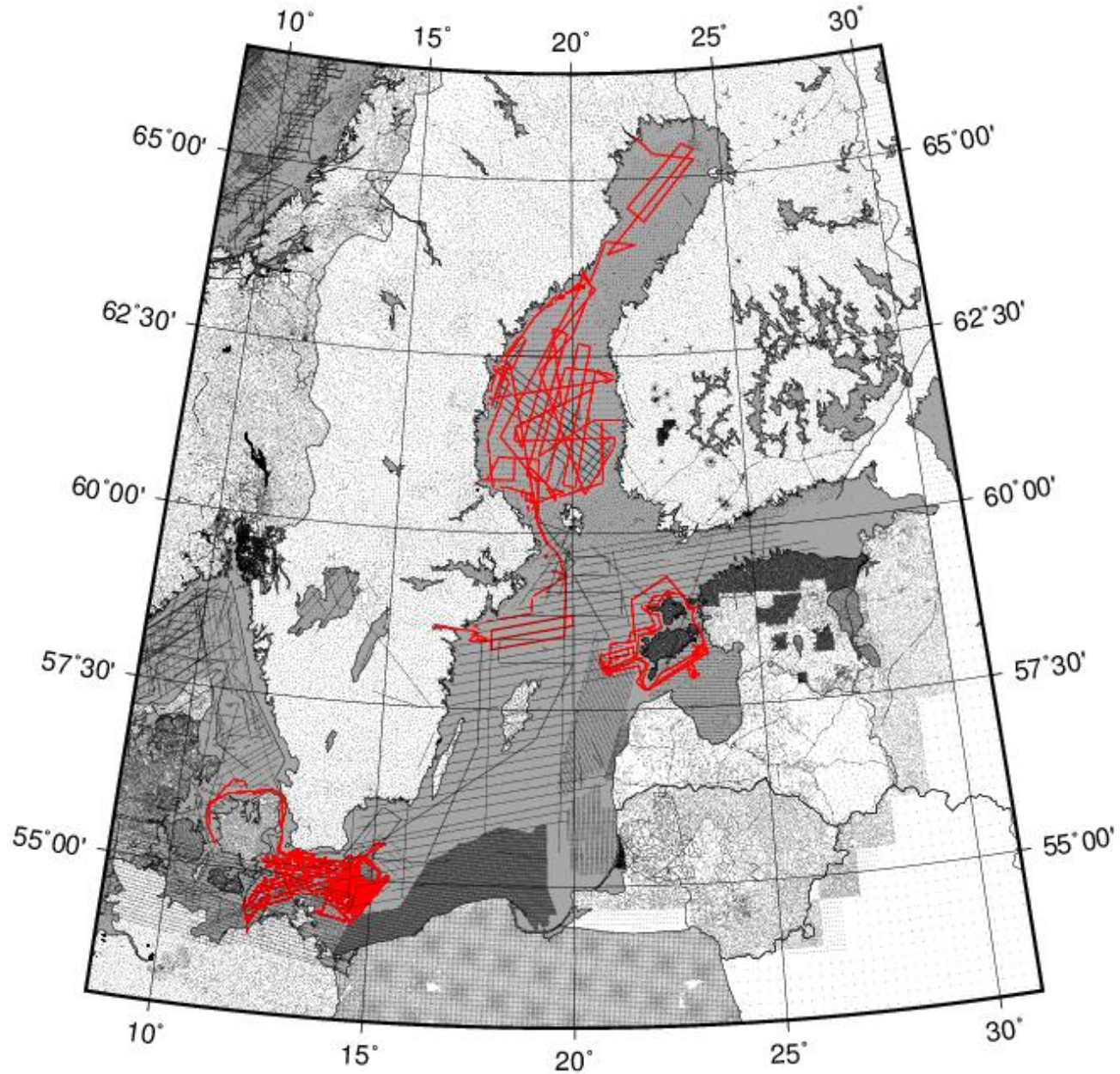
Co-financed by the European Union
Connecting Europe Facility

Exempel på en marin tyngdkraftskampanj: DENEb 20-29 april 2015

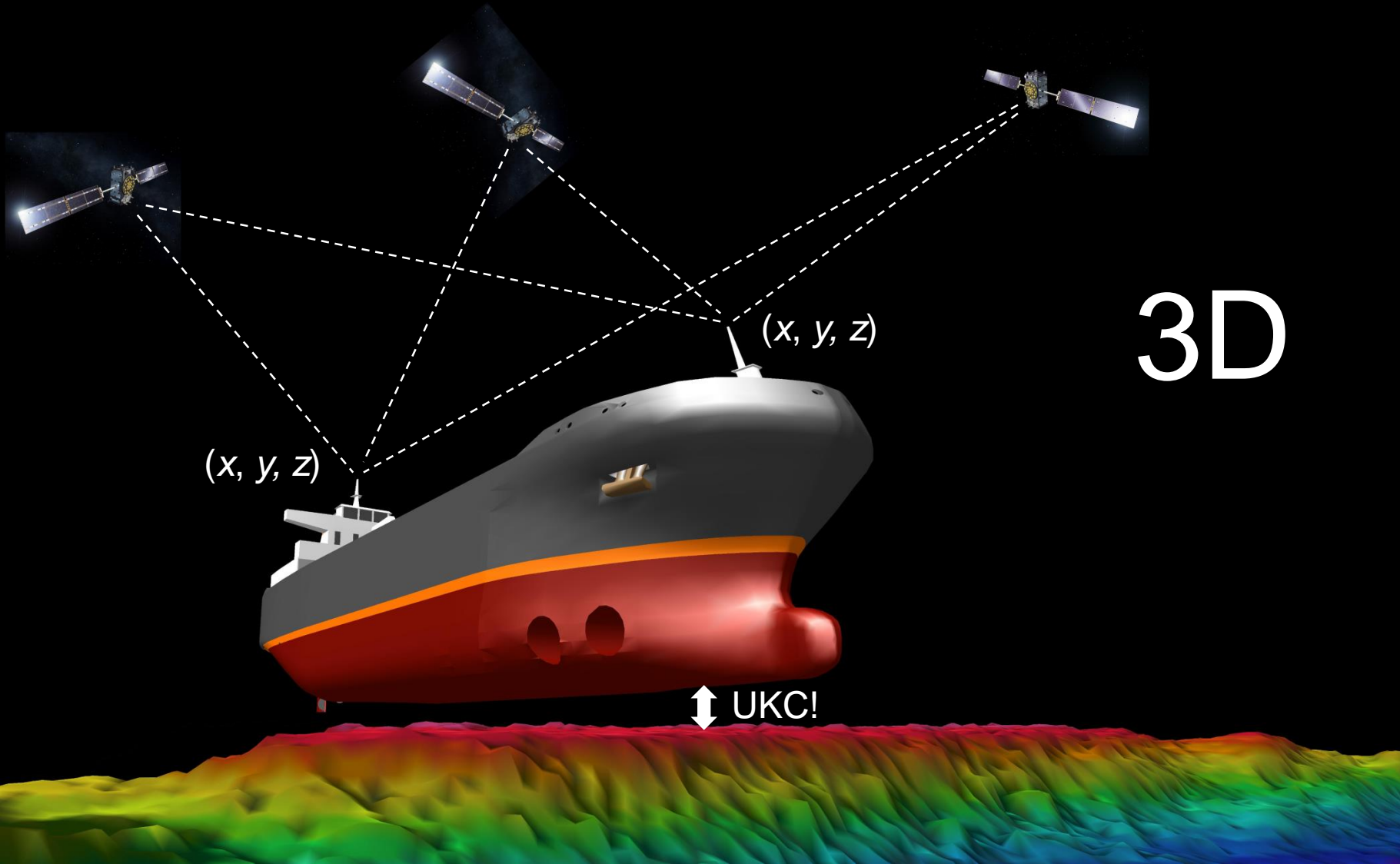
GFZ, BKG och BSH



Marina tyngdkraftskampanjer i FAMOS Freja 2015-2016



3D-navigering i realtid med GNSS (och geoidmodell)



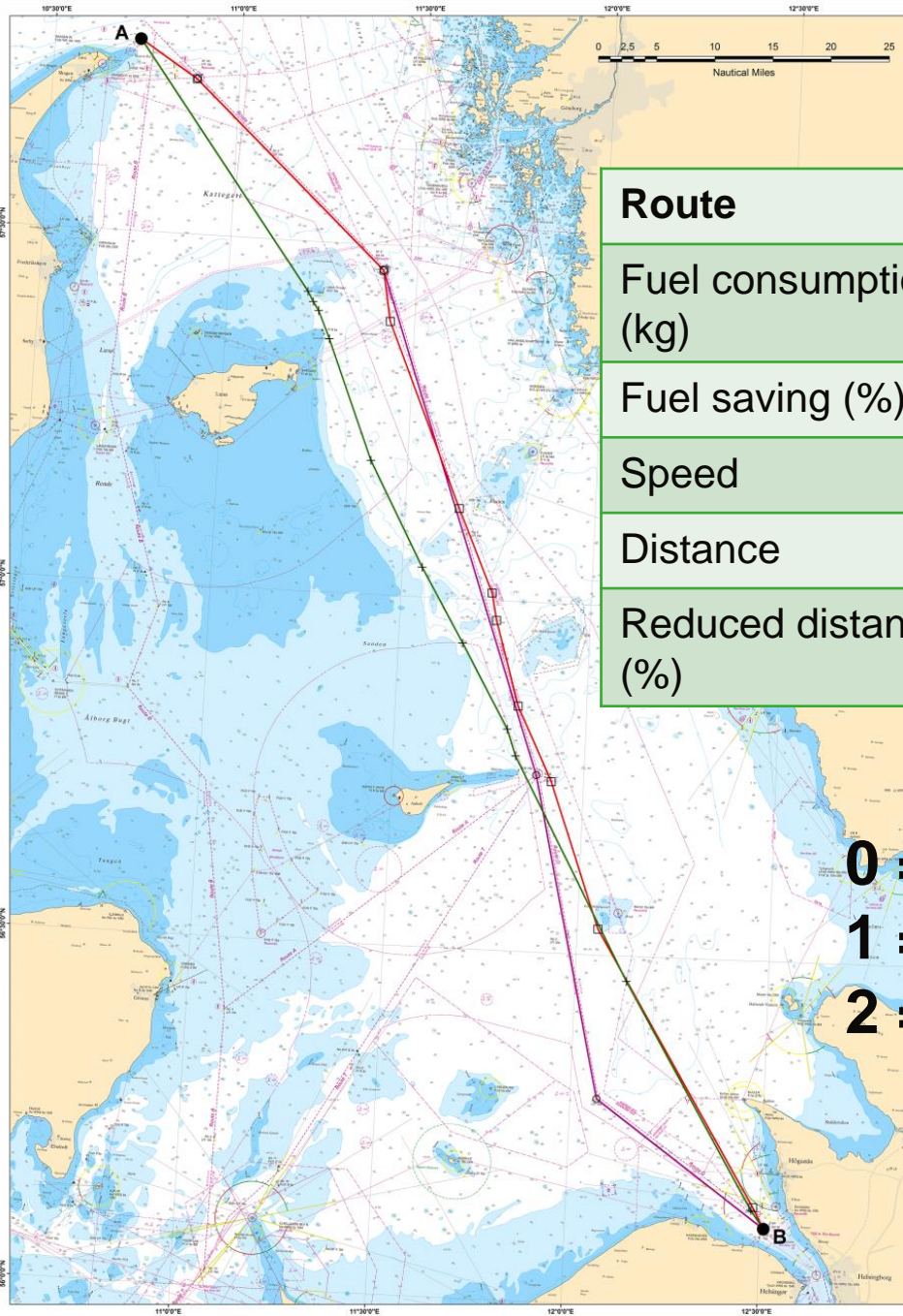
+ 10 cm draft → + 20 kUSD profit
(per port call)

assuming typical Aframax tanker, 3 USD profit per barrel



Co-financed by the European Union
Connecting Europe Facility

“Under Keel Clearance (UKC) aware navigation”



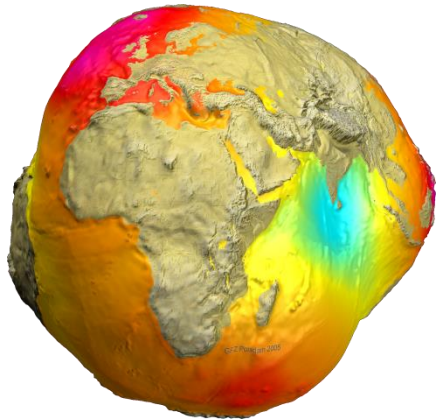
Route	0	1	2
Fuel consumption (kg)	5364	4927	4700
Fuel saving (%)	0	8,1	12,4
Speed	13,4	13,1	12,8
Distance	147	144	141
Reduced distance (%)	0	2,0	4,1

0 = Purple
 1 = Red
 2 = Green



Co-financed by the European Union
 Connecting Europe Facility

Vad krävs för GNSS till havs?



Sjökort i ett referenssystem för djupkompatibelt med GNSS-kordinater (som Baltic Sea Chart Datum 2000 med en kompatibel geoidmodell)

Test of SWEPOS at the Baltic Sea using VSAT-satellite link for RTK-corrections

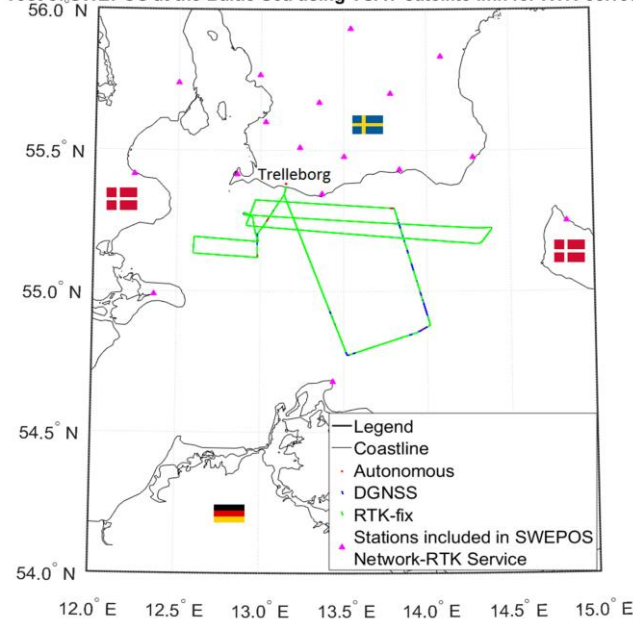


Figure 6: The trajectory of the journey, with RTK fixed solutions in green, for RTK corrections via VSAT satellite link

Referensstationsnät och datadistribution, som möjliggör realtidsmätning med tillräcklig noggrannhet, tillförlitlighet och täckning.

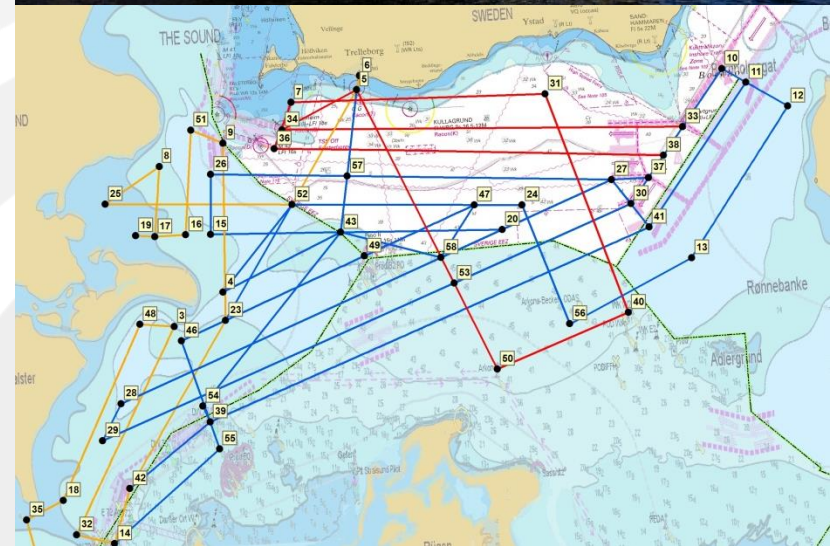


Fartyg med avancerad GNSS-utrustning, satellitlänk för dataöverföring, ECDIS, etc.



Realtids-GNSS inom FAMOS

- Studera realtids-PPP till havs.
- Etablera testmiljö baserat på öppna standarder:
 - Referensstationsnät i Östersjön
 - Datacenter och distribuering av korrektionsdata
 - Testmätningar på fartyg till havs
- Verifiera 1...2 dm noggrannhet möjlig och testa tillförlitligheten
- Jämför med realtids-RTK i kustzoner
- Även jämföra med andra realtids-metoder.



Lantmäteriets roll i FAMOS

- Lantmäteriet kommer att delta i Aktivitet 2 (homogent referenssystem, framtidens navigering) och avsätta ca en heltidstjänst under perioden 2015-2020.
- Arbetet kommer bland annat att innefatta
 - aktivitetsledning,
 - sjö- och landgravimetri,
 - datahantering, analys och databaser,
 - geoidmodellering,
 - mareografinmätning i RH 2000 (Baltic Sea Chart Datum 2000) och
 - Realtids-GNSS (testa även andra koncept än PPP).
- **Lantmäteriet har nu investerat i en egen marin gravimeter i FAMOS-projektet, som kommer att levereras under våren 2017.**



Den nya Nordiska landhöjnings- modellen NKG2016LU

Jonas Ågren

Geodesienheten
Lantmäteriet



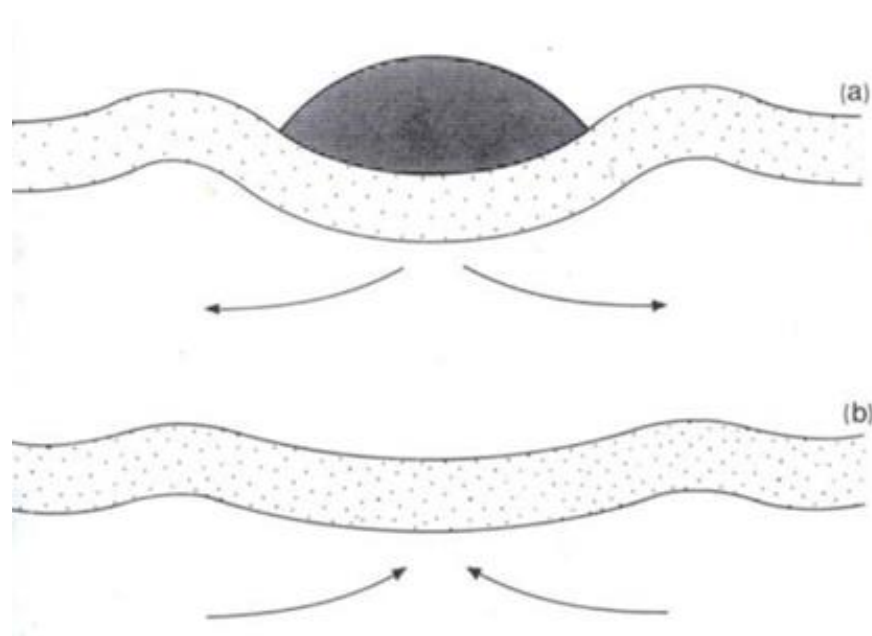
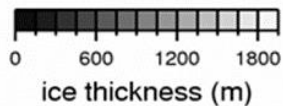
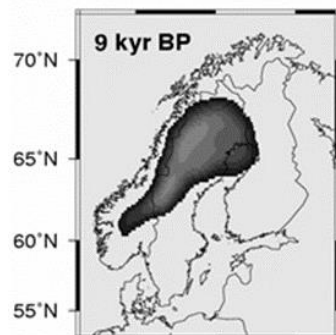
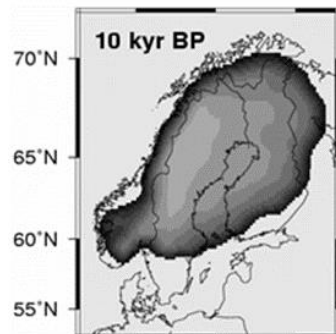
LANTMÄTERIET



Introduktion

- I allt arbete med geodetiska referenssystem i Sverige och Norden är det viktigt att korrigera för inverkan av den **postglaciala landhöjningen** (om korrektionen är signifikant).
- Detta görs med fördel genom att utnyttja en **landhöjningsmodell** som är anpassad för ändamålet.
- Detta föredrag presenterar den nya **semiempiriska** landhöjnings-modellen **NKG2016LU** som tagits fram i internationellt samarbete inom den Nordiska Kommissionen för Geodesi (NKG)
- Modellen **ersätter NKG2005LU** som togs fram för beräkningen av BLR och RH 2000 (se ovan).
- Modellen har beräknats genom att på ett optimalt sätt kombinera
 - absolut landhöjning ur långa tidsserier av **GNSS**-observationer,
 - upprepad **avvägning** av de Nordiska och Baltiska höjdnäten och
 - den nya Nordiska geofysiska landhöjningsmodellen **NKG2016GIA_prel0306**.
 - **OBS! Mareografdata har inte använts för den slutgiltiga beräkningen av modellen.**

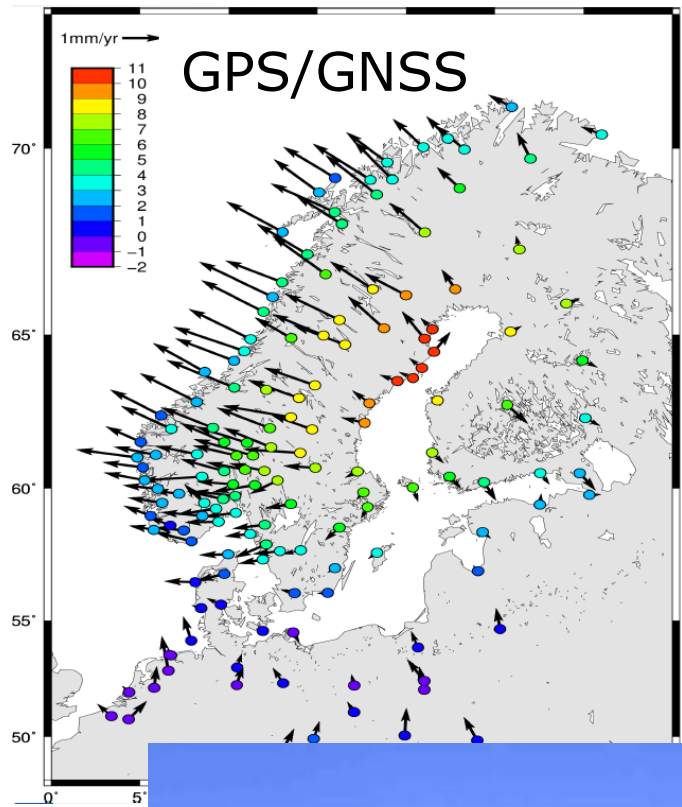
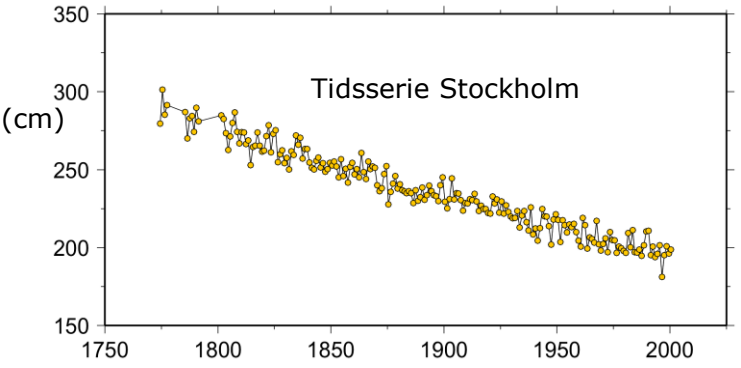
Den postglaciala landhöjningen...



...kan mätas till exempel genom...



Mareografer



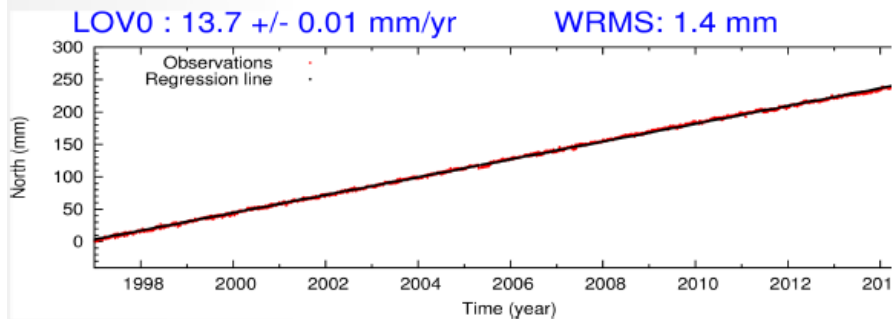
Upprepad
avvägning



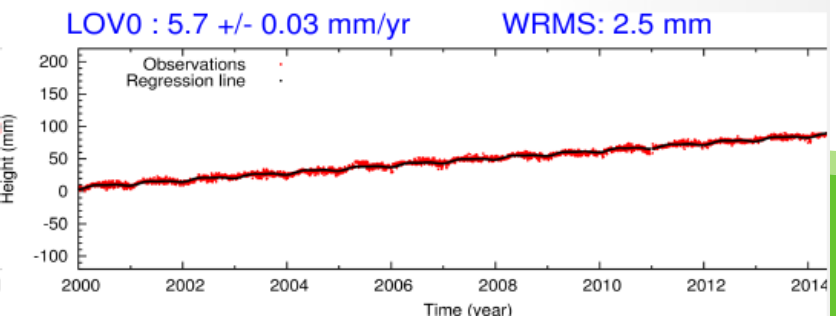
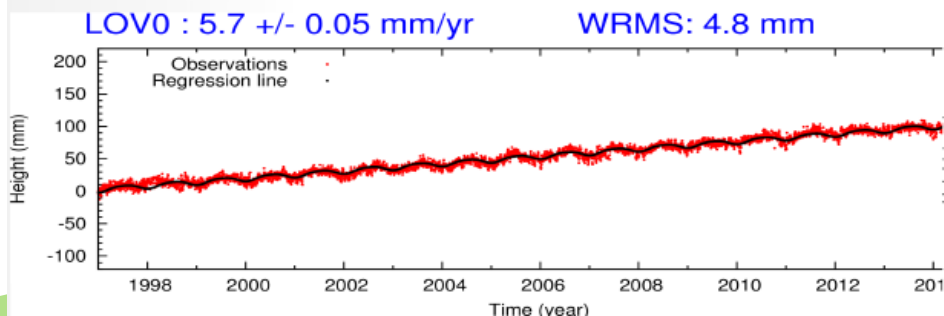
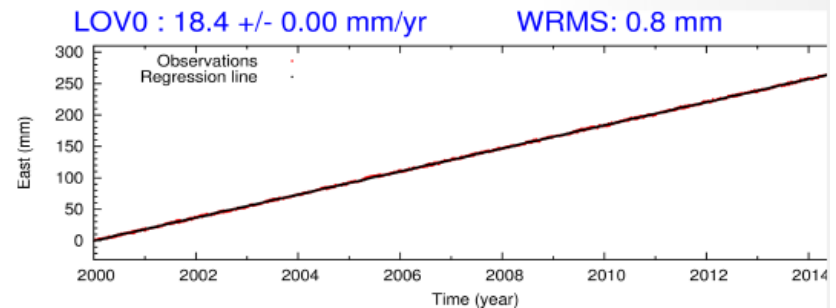
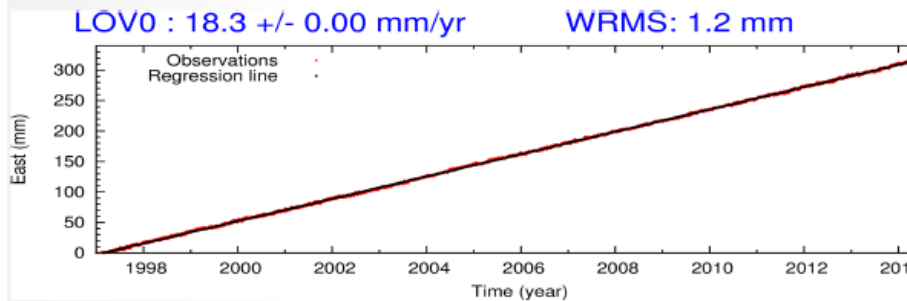
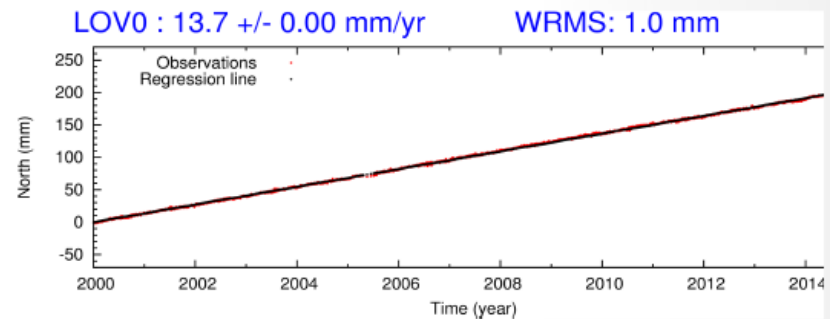
Exempel på en rå GNSS-tidsserie (BIFROST, GAMIT-lösning, Kierulf m.fl. 2016)

Timeseries LOV0

ITRF2008-Global realization

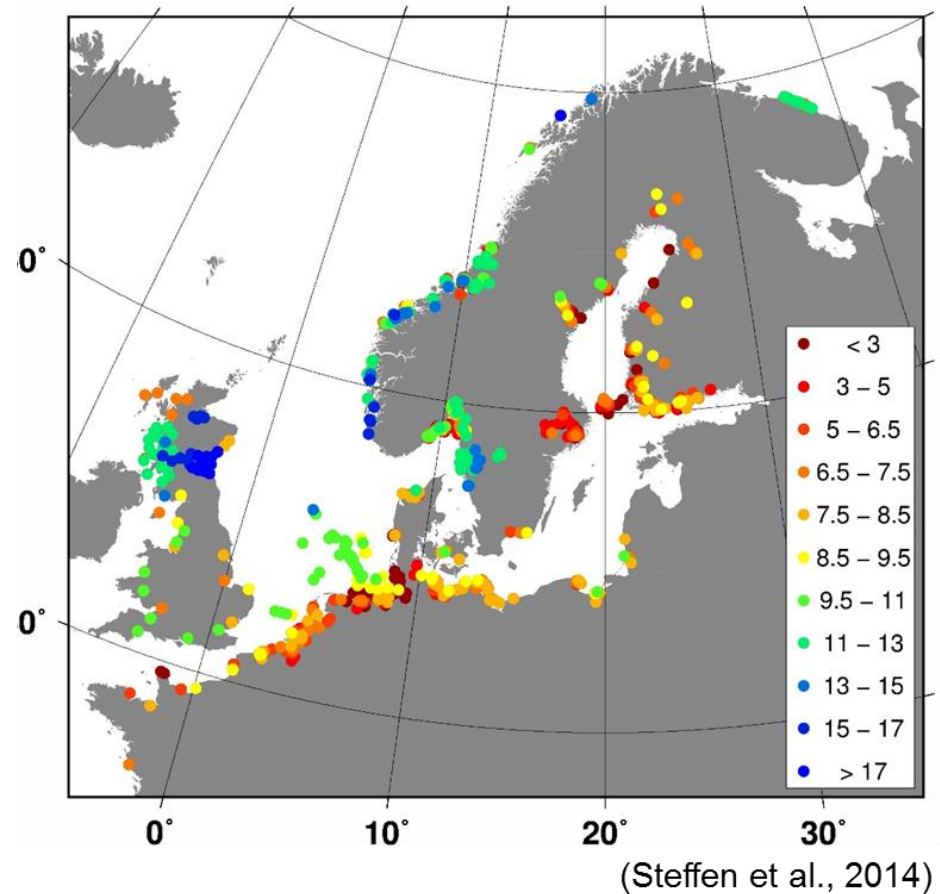
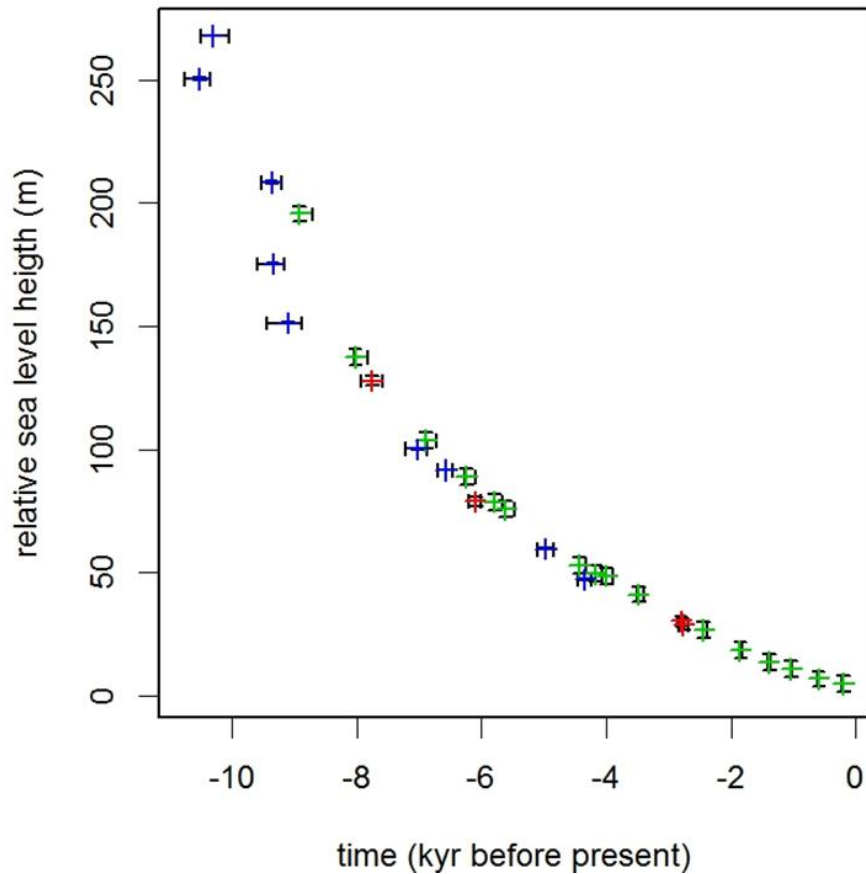


ITRF2008-Regional realization



... men historiska strandlinjer ger också viktig information...

Ångermanälven:



(Nordman et al. 2015 och referenser givna däri)

Olika typer av landhöjning

Olika observationer ger olika typer av landhöjning:

- GNSS-tidsserier =>

Absolut landhöjning, dvs. landhöjning i förhållande till jordens masscentrum, eller mer precist, i ett globalt anpassat geodetiskt referenssystem (t ex ITRF2008)

- Upprepad avvägning =>

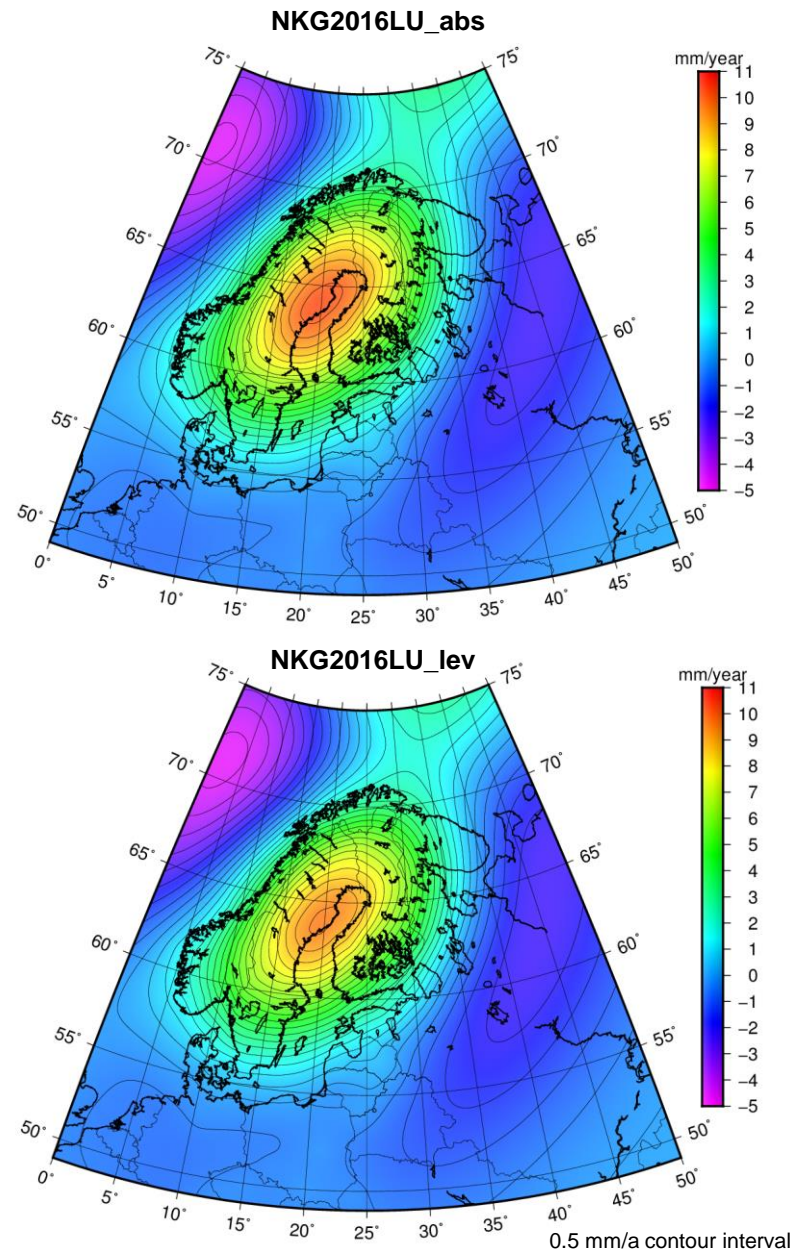
Avvägd landhöjning ("levelled uplift"), dvs. landhöjning i förhållande till geoiden (som höjer sig p.g.a. gamla nedisningar)

- Vattenståndsserier vid mareografer =>

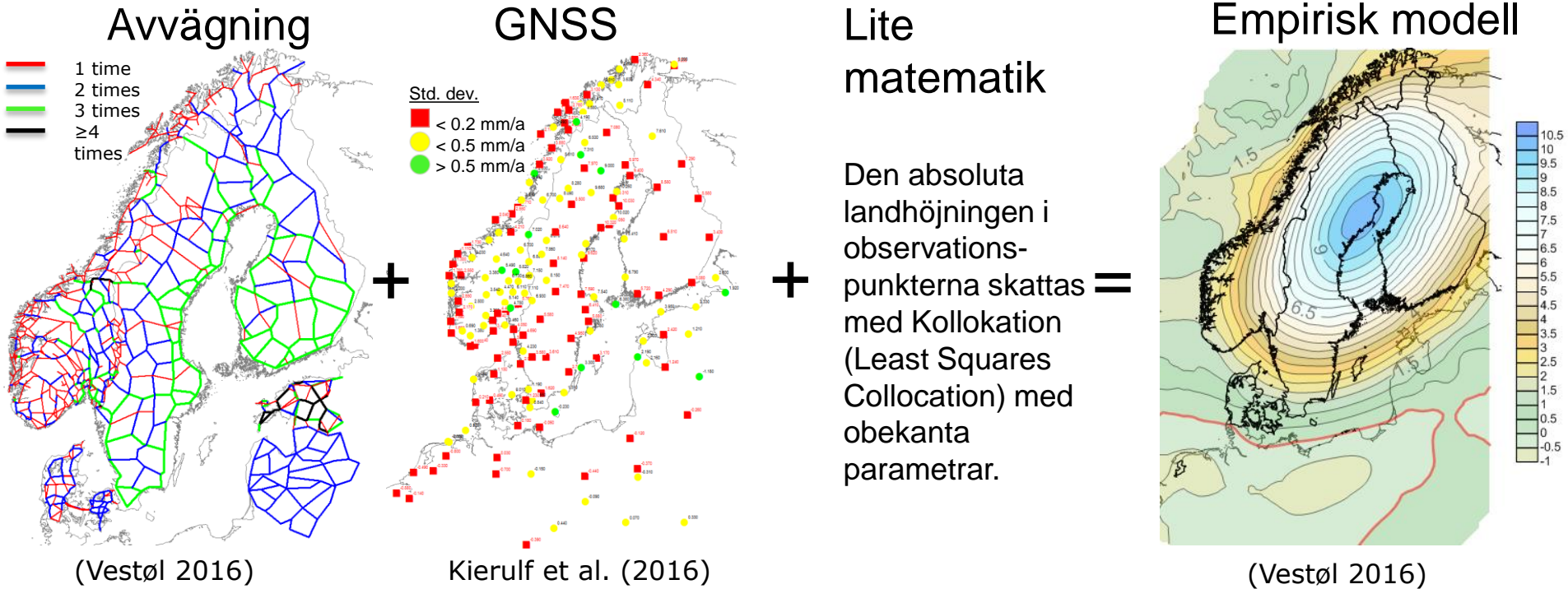
Apparent landhöjning, dvs. landhöjning i förhållande till medelvattenytan (Mean Sea Level, MSL) för ett visst tidsintervall (t ex 1892-1991, 1956-2012, etc).

NKG2016LU

- **Semiempirisk landhöjningsmodell** beräknad i Nordiskt Baltiskt samarbete inom **NKGs** arbetsgrupp för geoid och höjdsystem.
- Vertikal landhöjningshastighet på två olika sätt (upplösning 5' lat., 10' long):
 - **NKG2016LU_abs**: Absolut landhöjning i ITRF2008 (rel. jordens masscentrum)
 - **NKG2016LU_lev**: Avvägd landhöjning, dvs. landhöjning relativt geoiden
- NKG2016LU har beräknats utgående från
 - En **empirisk landhöjningsmodell** beräknad av Olav Vestøl (2016) baserat på geodetiska observationer (NKGs arbetsgrupp för geoid och höjdsystem)
 - Den preliminära geofysiska GIA-modellen **NKG2016GIA_preI0306** beräknad av Steffen et al. (2016) (NKGs arbetsgrupp för geodynamik).

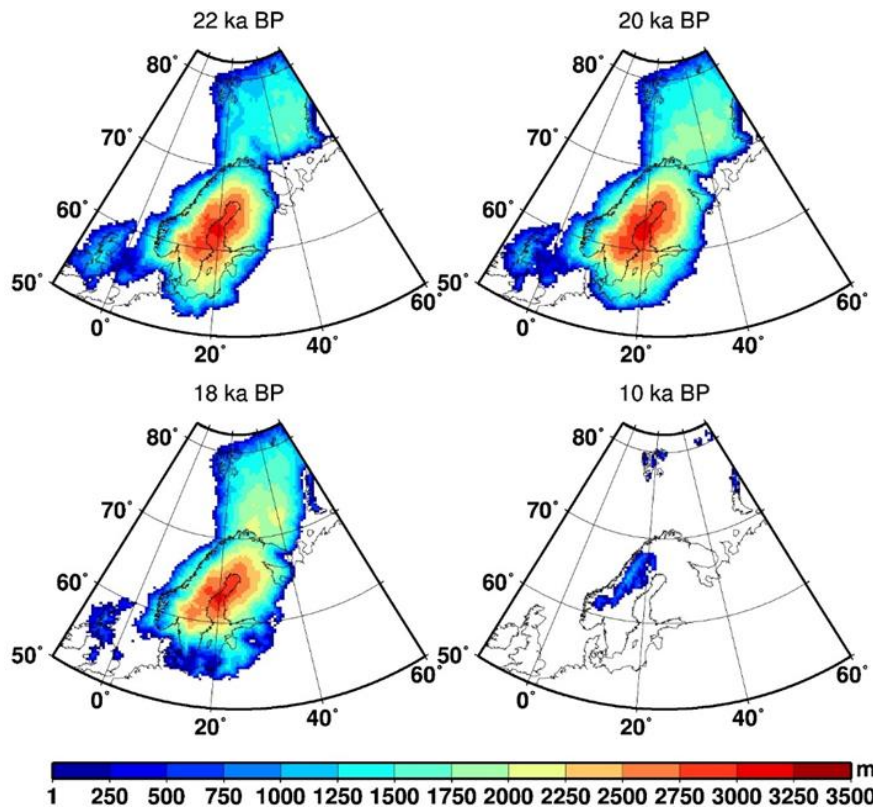
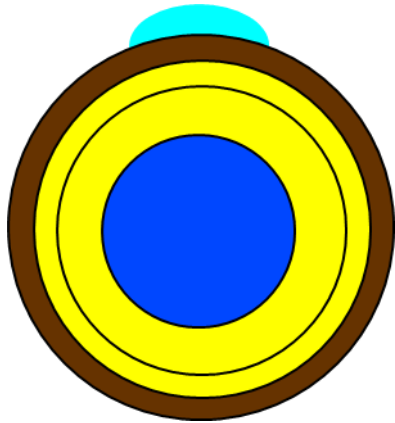


Empirisk landhöjningsbestämning



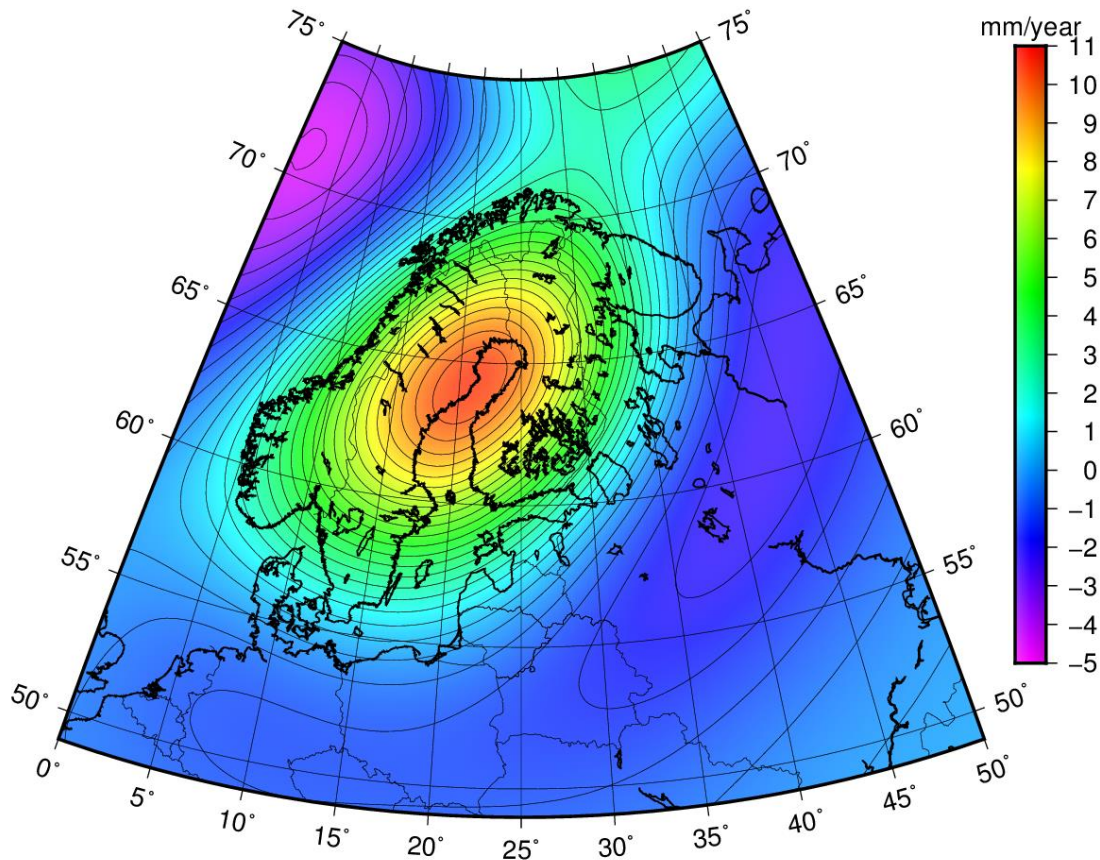
- Med **empirisk modell** menas här att enbart geodetiska observationer och en rent matematisk metod används i modelleringen (ingen fysikalisk modellering).
- Denna modell kan kombineras (jämnas ut och utökas) med en geofysisk GIA-modell → **semiempirisk modell**
- Observationerna och metoden som användes för den empiriska modellen bakom **NKG2016LU** visas ovan.

Geofysisk landhöjningsbestämning



- Geofysiskt meningsfull modellering. Kallas ofta för **GIA-modellering** (**GIA** = Glacial Isostatic Adjustment)
- Baseras på en **jordmodell**, en **ismodell** (isavsmältningshistoria) och fysikaliska/ mekaniska lagar + fysisk-matematisk beskrivning av relaterade havsnivåförändringar (sea-level equation)
- Observationer behövs för att justera in beräkningen/modellen.
- **NKG2016GIA_prel0306** beräknades av Holger Steffen med en 1D-jordmodell och ismodellen GLAC-71340 av Lev Tarasov (2016)
- Beräkning justerades in mot BIFROST **GNSS** och historiska **strandlinjedata**.

NKG2016GIA_prel0306 – Absolut landhöjning



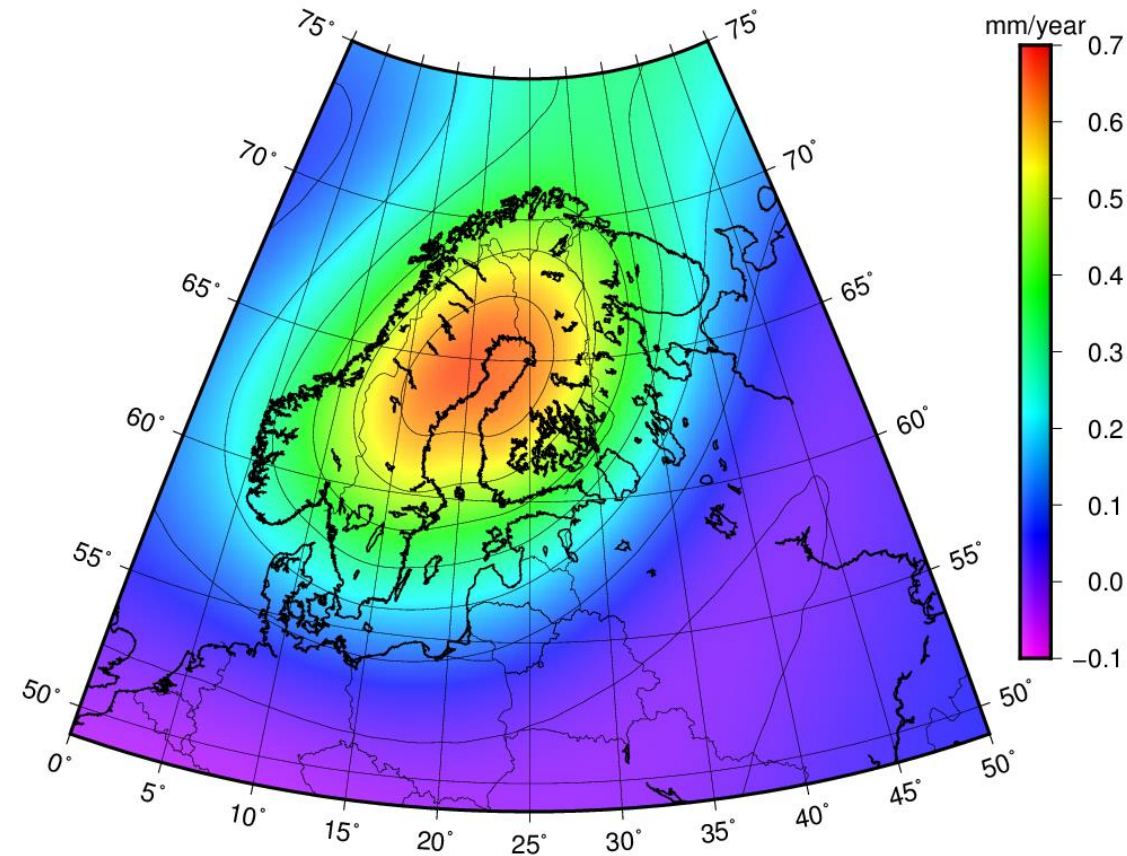
- Griddad vertikal landhöjningshastighet

- Statik:

#	313 x 301
Min	-4.55
Max	10.49
Medel	0.90
StdAvv	3.22

- Ekvidistans: 0.5 mm/år

NKG2016GIA_prel0306 – Geoidens höjning (ur GIA-modellen)



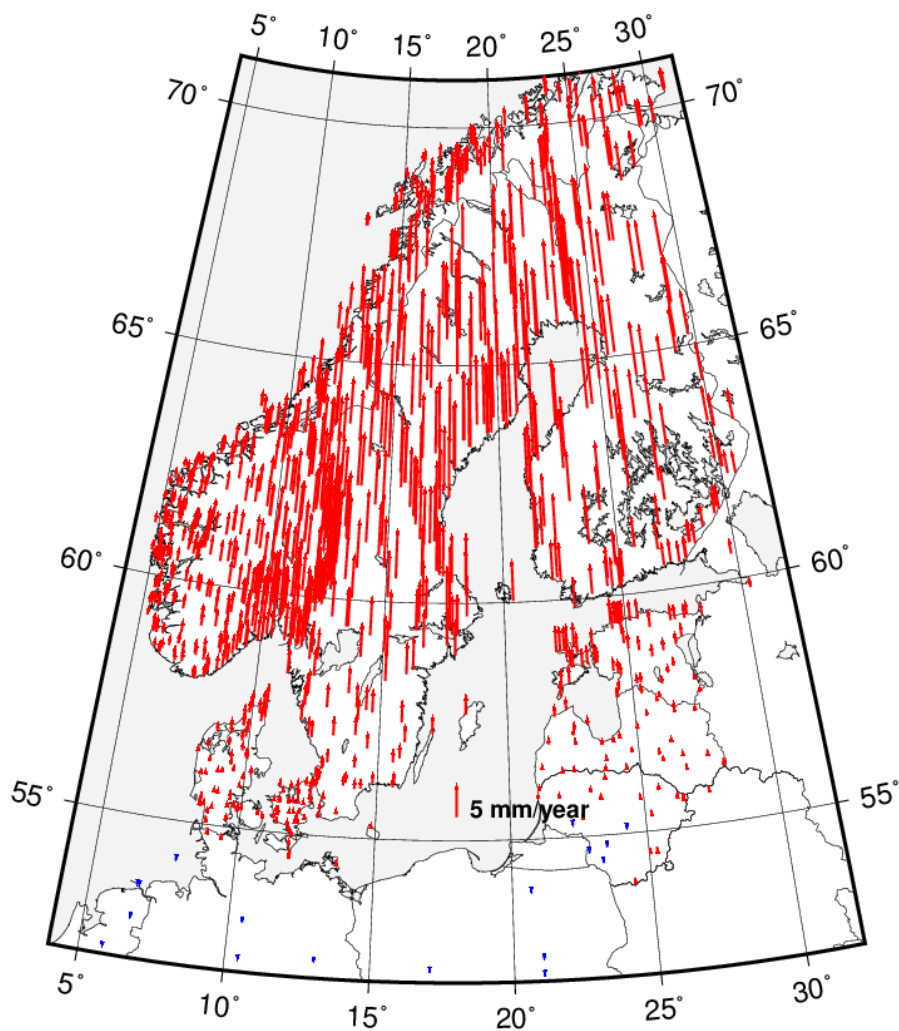
- Griddad geoidhöjnings-hastighet.

- Statistik:

#	313 x 301
Min	-0.05
Max	0.66
Medel	0.21
StdAvv	0.28

- Ekvidistans: 0.1 mm/år

Vestøl's empiriska modell i observationspunkterna

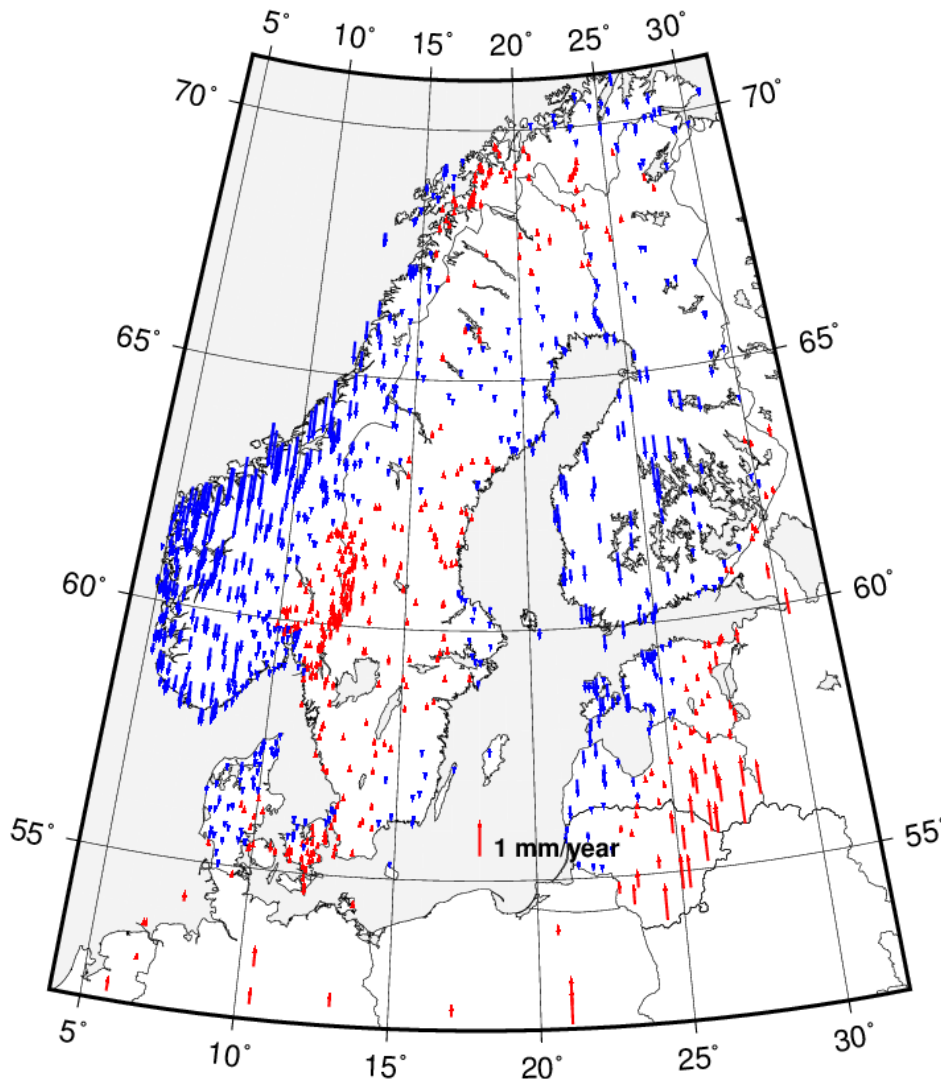


$$= \dot{h}_{\text{empirical_abs}}^{\text{obs. points}}$$

- Absolut landhöjning i ITRF2008.
- mm/år
- Statistik:

#	1111
Min	-0.75
Max	10.29
Medel	4.19
StdAvv	2.71

Skillnad mellan den empiriska modellen i observationspunkterna och GIA-modellen

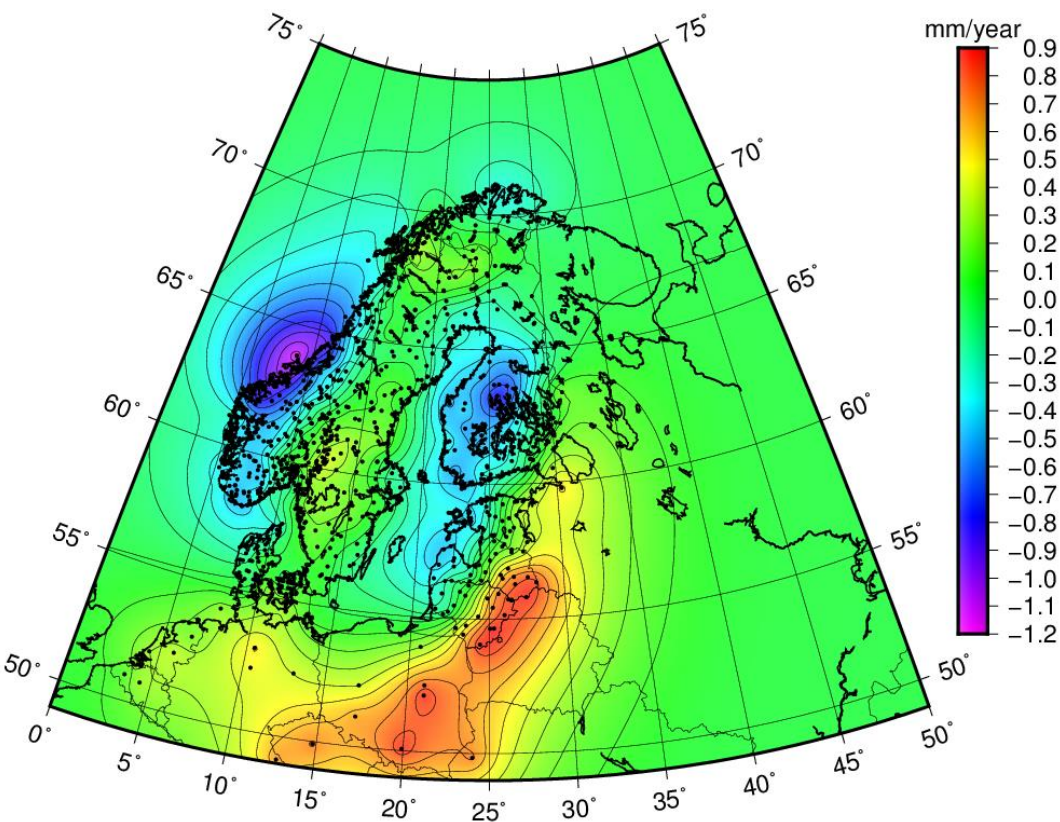


$$= \dot{h}_{\text{empirical_abs}}^{\text{obs. points}} - \dot{h}_{\text{NKG2016GIA_pre10306}}^{\text{obs. points}}$$

- mm/år
- Statistik:

#	1111
Min	-1.23
Max	1.24
Medel	-0.13
StdAvv	0.34

Residualyta (griddad skillnad mellan den empiriska modellen i observationspunkterna och GIA-modellen)



$$= LSC \left\{ \overbrace{\dot{h}_{\text{empirical_abs}}^{\text{obs. points}} - \dot{h}_{\text{NKG2016GIA_preI0306}}^{\text{obs. points}}}^{\text{Residual surface (grid)}} \right\}$$

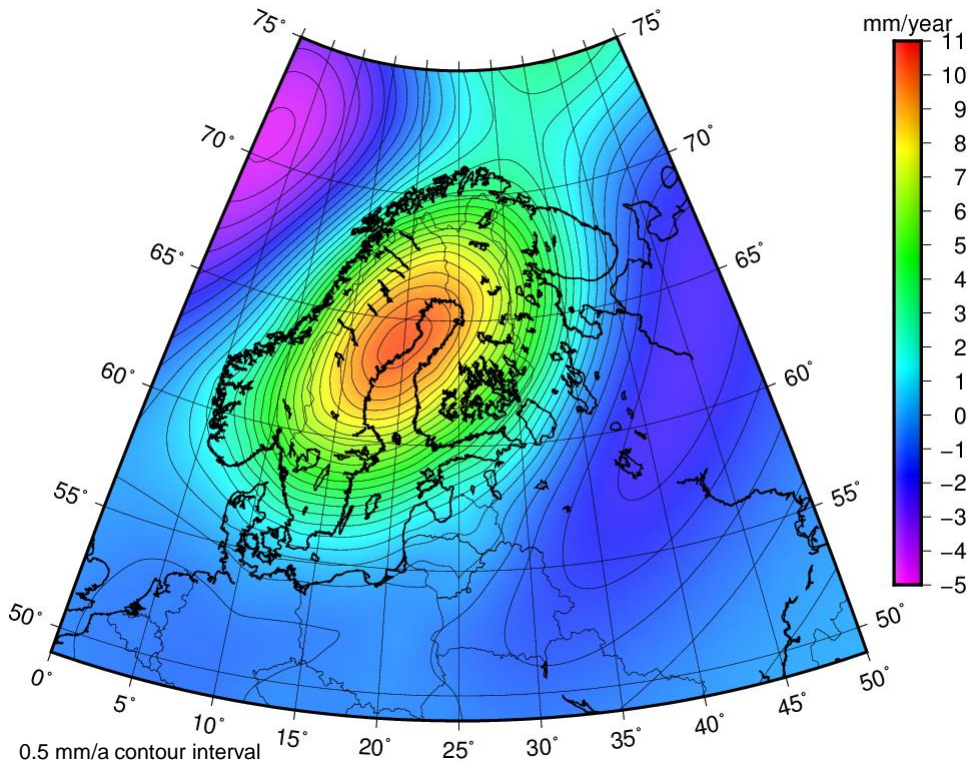
- Interpolationsmetod: **Least Squares Collocation (LSC)**. En första ordningens Gauss Markov kovariansfunktion med korrelationslängden 150 km användes (vald baserat på kovariansanalys). De uppskattade standardosäkerheterna från den empiriska modellen användes för observationerna.

- Statistik:

#	313 x 301
Min	-1.14
Max	0.88
Medel	0.00
StdAvv	0.27

- Ekvidistans: 0.1 mm/år

NKG2016LU_abs



- Absolut landhöjning i ITRF2008 (relativt Jordens masscentrum)

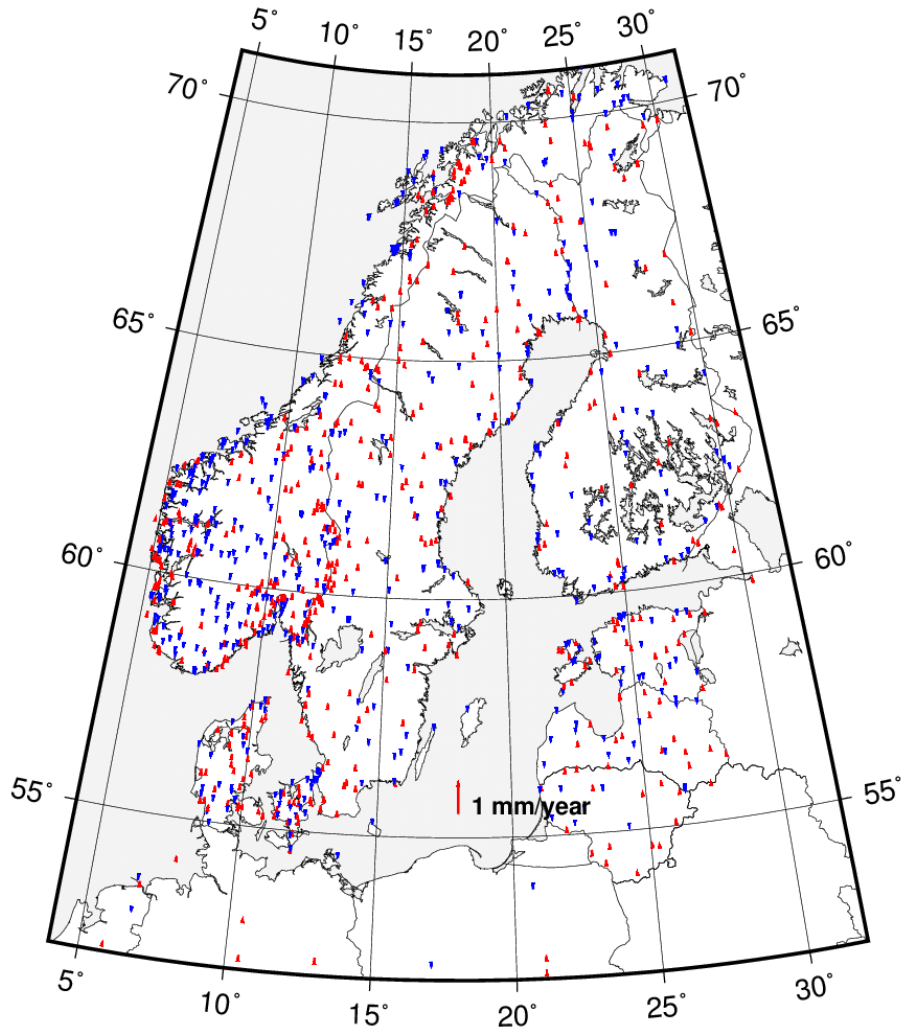
• Statistik:

#	313 x 301
Min	-4.61
Max	10.29
Medel	0.90
StdAvv	3.14

- Används för korrektion av GNSS och andra rymdgeodetiska tekniker, t ex vid beräkning i ett äldre referenssystem (om mätning görs över långa avstånd).
- Används till exempel också vid transformation från ITRF2014 (nutid) till SWEREF 99 (1999.5). mm.

$$\dot{h}_{\text{NKG2016LU_abs}}^{\text{grid}} = \dot{h}_{\text{NKG2016GIA_preI0306}}^{\text{grid}} + \overbrace{LSC \left\{ \dot{h}_{\text{empirical_abs}}^{\text{obs. points}} - \dot{h}_{\text{NKG2016GIA_preI0306}}^{\text{obs. points}} \right\}}^{\text{Residual surface (grid)}}$$

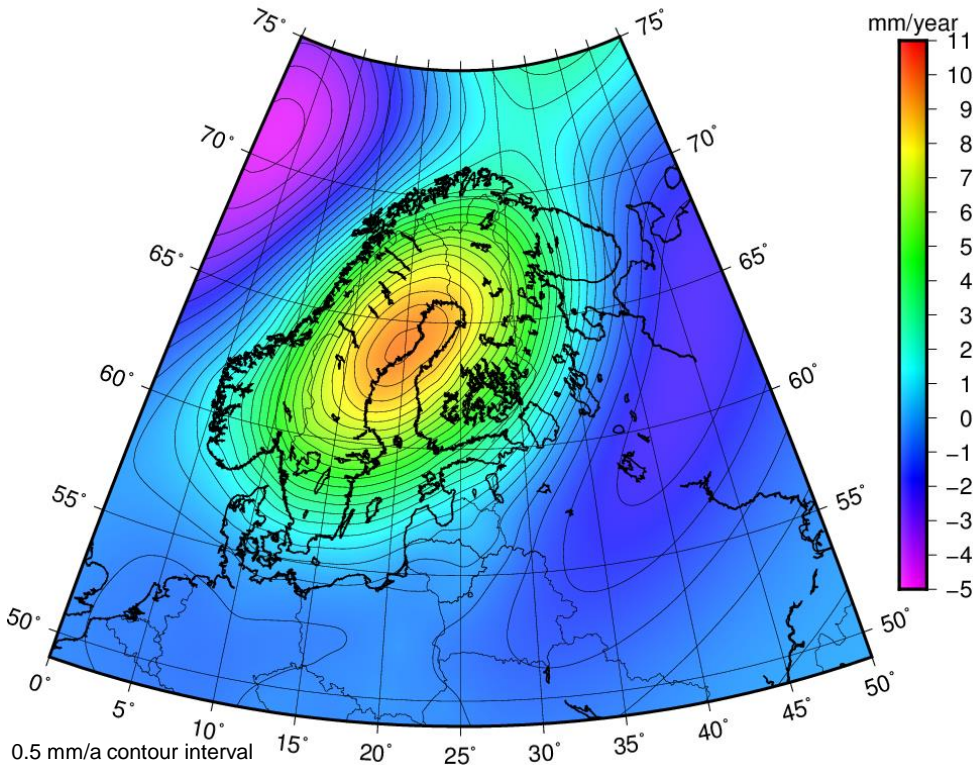
Residualer (skillnad mellan den empiriska modellen i observationspunkterna och NKG2016LU_abs)



- mm/år
- Statistics:

#	1111
Min	-0.15
Max	0.45
Mean	0.00
StdDev	0.04

NKG2016LU_lev

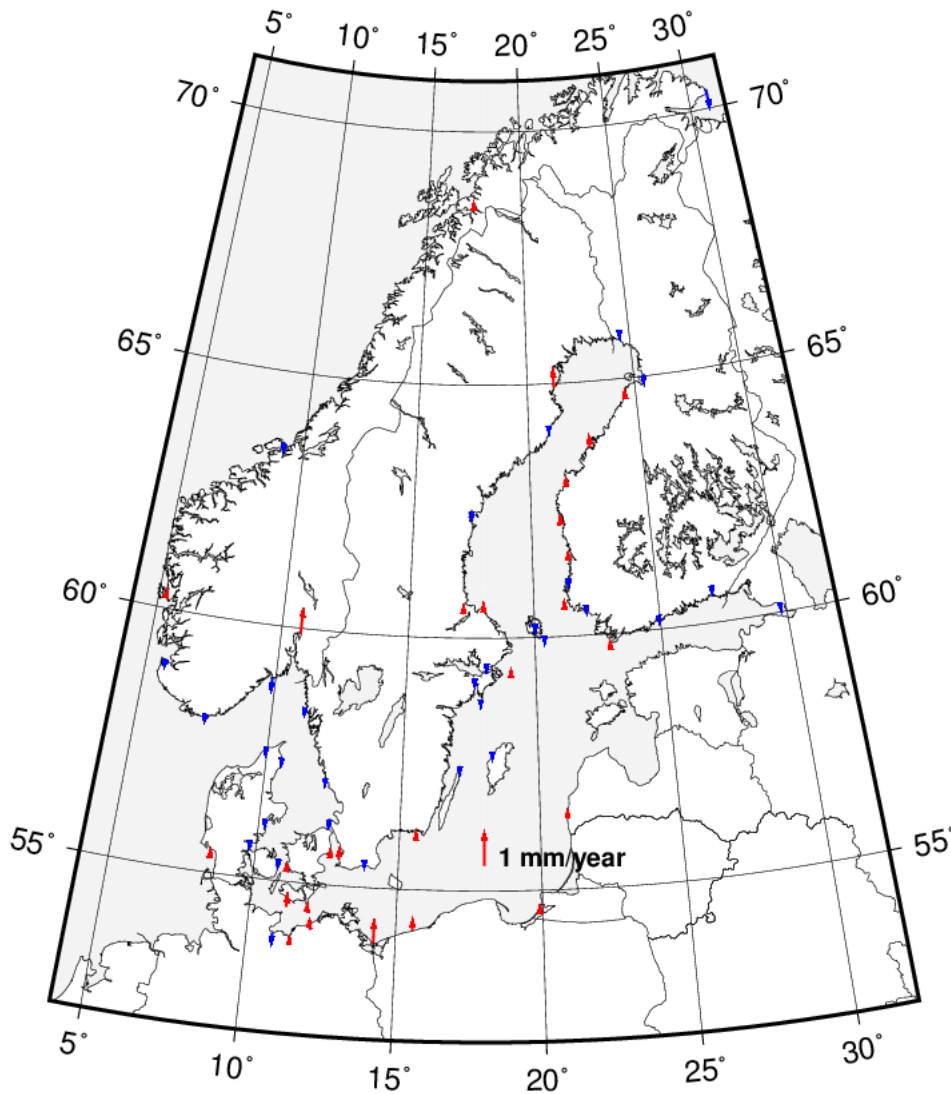


$$\dot{H}_{\text{NKG2016LU_lev}}^{\text{grid}} = \dot{h}_{\text{NKG2016LU_abs}}^{\text{grid}} - \dot{N}_{\text{NKG2016GIA_pre10306}}^{\text{grid}}$$

- **Avvägd landhöjning** = landhöjning i förhållande till geoiden.
- Geoiden ska här tolkas som en **ekvipotentialyta** som fortfarande höjer sig efter gamla historiska isavsmältningar, men inte på grund av nutida klimatrelaterade (accelererande) havsnivåförändringar (orsakade av temperaturhöjning, nutida isavsmältning, osv.)
- Statistik:

#	313 x 301
Min	-4.67
Max	9.63
Mean	0.69
StdDev	2.98
- Kan användas för korrektion av **avvägning** vid beräkning av ett nytt höjdsystem, eller för att korrigera höjder över havet (normalhöjder eller ortometriska höjder) i ett visst höjdsystem till en annan epok.
- Kan också användas för att ta om hand den postglaciala landhöjningen från gamla historiska nedisningar i **nutida havsnivåstudier**.

Skillnad mellan apparent landhöjning vid mareografer och NKG2016LU_lev korrigerad med en konstant extra havsnivåhöjning (1)



$$\dot{H}_{app,1892-1991} = \dot{H}_{NKG2016LU_lev} - 1.29 \text{ mm/year}$$

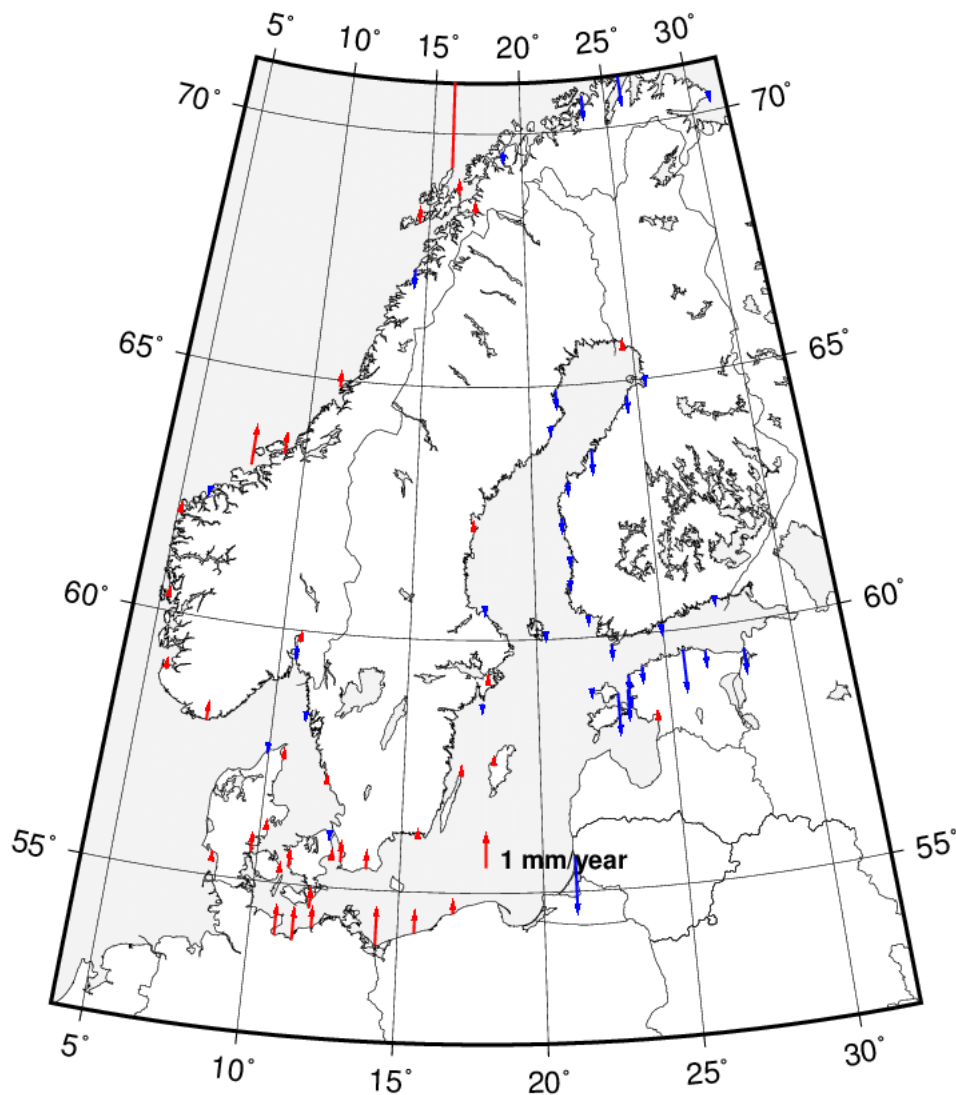
- Ekman (1996).
- Tidsinterval: 1892-1991
- Standardosäkerhet skattad av by Ekman (1989) till 0.2 mm/year
- Statistik (mm/år):

#	58
Min	-0.61
Max	0.75
Mean	0.00
StdDev	0.27

- Detta är en mycket god överensstämmelse (med tanke på ovanstående noggrannhet och på att NKG2016LU_lev beräknats helt utan mareografdata).

Skillnad mellan apparent landhöjning ur mareografer och NKG2016LU_lev korrigerad med konstant extra havsnivåhöjning (2)

$$\dot{H}_{app,1892-1991} = \dot{H}_{NKG2016LU_lev} - 2.38 \text{ mm/year}$$



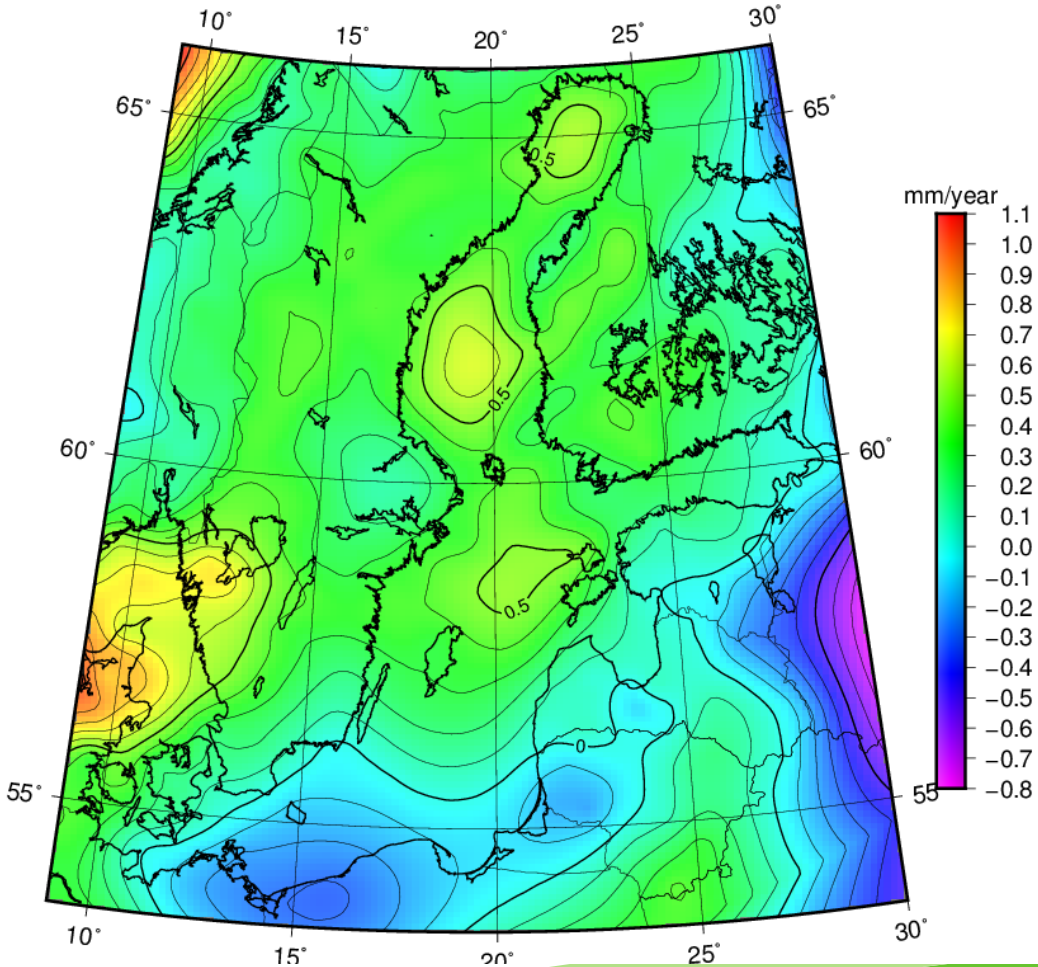
- **PSMSL**, preliminär apparent landhöjning beräknad av Olav Vestøl.
- Tidsintervall: **1956-2012** (57 år)
- Statistik (mm/år):

#	71
Min	-1.62
Max	2.80
Medel	0.00
StdAvv	0.63

- Några klart systematiska geografiska skillnader. Ett mycket stort grovt fel på Svalbard.
- Djupare undersökning behövs.

Skillnad mellan NKG2016LU_abs och NKG2005LU_abs

NKG2016LU_abs minus NKG2005LU_abs



- Olika referenssystem (frame)
ITRF2008 vs ITRF2000

- Statistik (mm/år):

#	313 x 301
Min	-3.89
Max	3.10
Mean	-0.25
StdDev	1.35

- Ekvidistans: 0.05 mm/år (stor bild),
0.1 mm/år (in-zoomning)
- Den konstiga "ryggen" utanför till
exempel Norges västkust beror på
att NKG2005LU avsiktligt
trunkerades till den apparenta
landhöjningen -2 mm/år (mindre
värden sattes till det)



Slutord

- Den semiempiriska landhöjningsmodellen **NKG2016LU** släpptes 30 juni 2016.
- Modellen ger den vertikala landhöjningen på två olika sätt (**i mm/år**),
 - **NKG2016LU_abs**: Absolut landhöjning i ITRF2008 (relativt Jordens masscentrum)
 - **NKG2016LU_lev**: Avvägd landhöjning, dvs. landhöjning relativt geoiden.
- Både **NKG2016LU_abs** och **NKG2016LU_lev** tagits fram genom att kombinera,
 - En **empirisk landhöjningsmodell** beräknad av Olav Vestøl (2016) baserad på geodetiska observationer (GNSS-tidsserier från BIFROST och NKG avvägning, **OBS att inga mareografer har använts**)
 - Den preliminära geofysiska GIA-modellen **NKG2016GIA_prel0306** av Steffen m.fl. (2016), beräknad i NKGs arbetsgrupp för Geodynamik.
 - Geoidhöjningen ur GIA-modellen har använts för att få relationen mellan dessa modeller.
- **Ingen apparent landhöjningsmodell** kommer i nuläget att publiceras (tvärtemot för förra modellen **NKG2005LU**).
 - På grund av nutida klimatrelaterade havsnivåhöjningar (orsakade av temperaturhöjningar, nutida glaciärvsmältning, etc.) är den apparenta landhöjningen **inte** lika med den avvägda landhöjningen.
 - Om den **apparenta landhöjningen** behövs, så rekommenderas att skatta och addera en konstant för den extra höjningen av MSL (för ett visst tidsintervall och geografiskt område), som sedan subtraheras från **NKG2016LU_lev**. **Detta är en kvalificerad uppgift som bör utföras med stor noggrannhet!**
- Standardosäkerheten ligger runt ca 0.15-0.3 mm/år i områden med observationer. Blir succesivt sämre längre bort från observationerna för att nå ca 0.5 mm/år... **Arbete pågår här.**

Det internationella höjdsystemet IHRS och dess (kommande) realisering



Den nuvarande internationella situationen rörande traditionella geodetiska avvägningsbaserade höjdsystem

- Trots att de nationella och Europeiska höjdsystemen numer överensstämmer väl med varandra runt Östersjön och i Norden, så är detta generellt sett inte fallet för höjdsystem runt om i Världen.
- Olika höjdsystem i olika delar av Världen,
 - använder **olika referensnivåer** som har bestämts ur olika mareografer med medelvärdesbildning över olika tidsperioder utan korrigering för MDT (Mean Dynamic Topography).
 - använder **olika typer av höjder** och permanenta tidjordssystem.
 - har vanligen **inte korrigerats för vertikala geodynamiska rörelser**
 - **mm...**
- Det finns fler än 100 höjdsystem i Världen. Nollnivåerna skiljer sig typiskt några decimeter men kan i extremfall vara så stora som 2 meter.

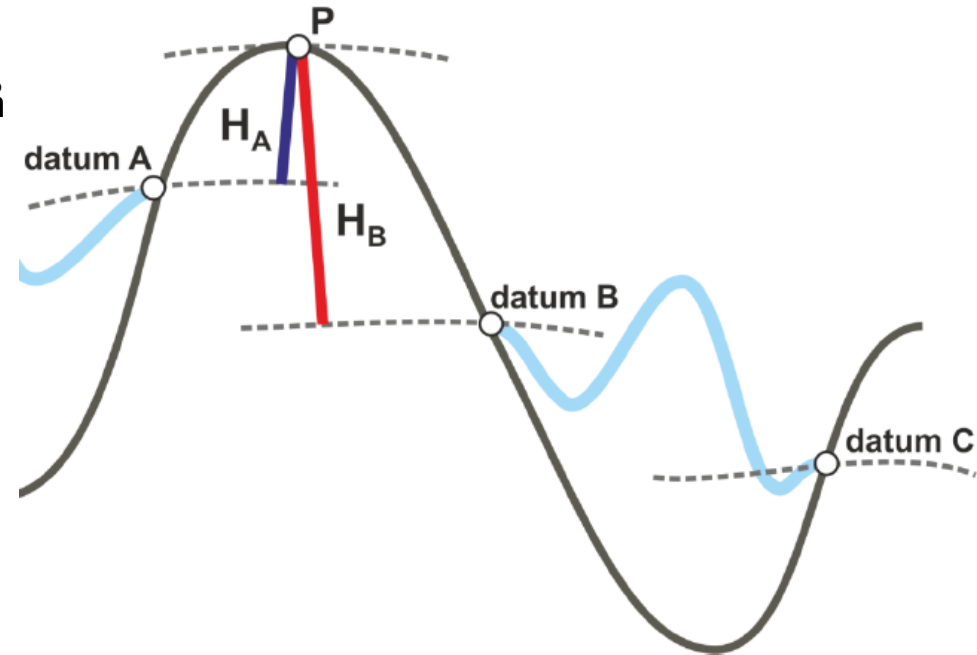


Figure from Sanchez et al. (2012)

Om behovet av ett enhetligt globalt höjdsystem

- Ett enhetligt globalt höjdsystem behövs för att lösa diskrepanser mellan olika nationella höjdsystem.
- Det finns många **globala tillämpningar** där man behöver kunna ange höjden (eller geopotentialtalet) i ett enhetligt höjdsystem, till exempel vid
 - observation av globala fenomen som havsytans förändring av klimatförändringar och cirkulationen i världshaven,
 - global geoidbestämning,
 - bestämning av satellitbanor,
 - mm.
- En **nackdel** med ett globalt höjdsystem är att nollnivån ofta stämmer sämre med medelhavsytan (MSL) än regionalt anpassade nationella höjdsystem.
- De flesta länder kommer därför till vardags att fortsätta jobba i de nationella höjdsystemen (och nollnivåerna), men behöver ändå ta fram bra samband till det globala höjdsystemet.

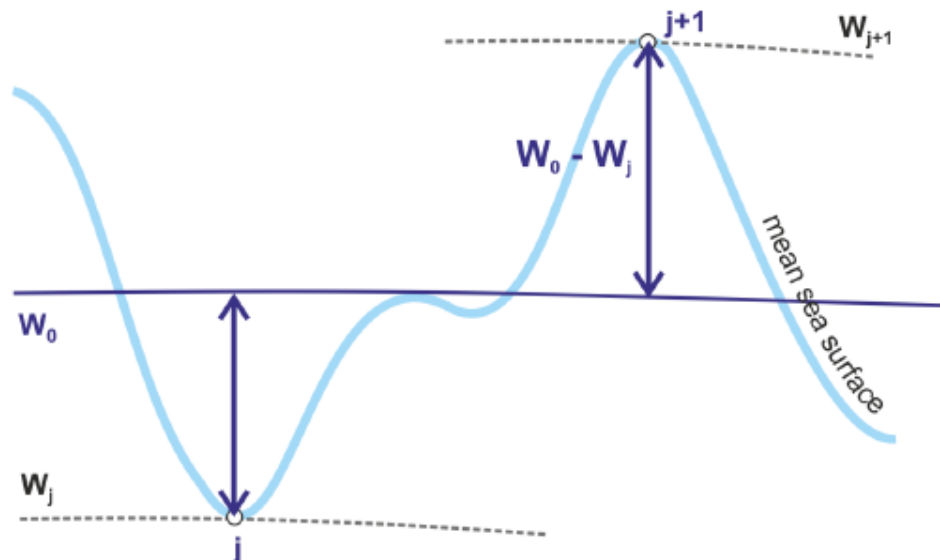


Skattning av potentialen för den globala referensytan (geoiden) W_0

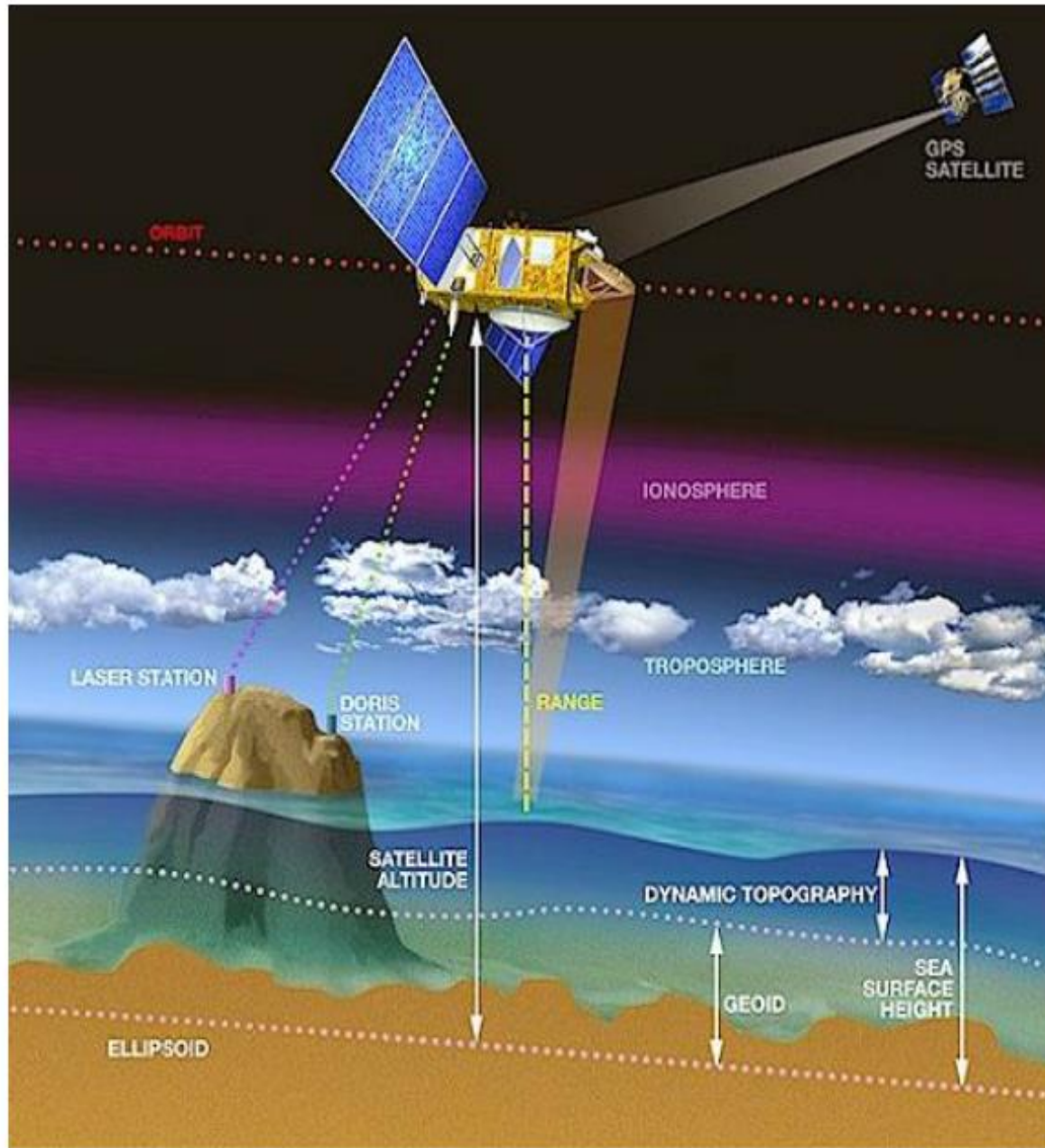
- Det finns flera olika sätt att skatta W_0 ; se Sanchez (2012).
- En modern teknik är att skatta W_0 så det medel-kvadrataavståndet mellan MSL och geoiden blir så litet som möjligt över Världshaven,

$$\iint_{\text{Oceans}} \left(\frac{W_0 - W_j}{\gamma_j} \right)^2 dS = \min$$

- MSL bestäms här med satellitaltimetri relativt ellipsoiden (=Mean Sea Surface, MSS). (fungerar inte överallt i haven, till exempel inte på höga latituder)
- Potential W_j kan sedan bestämmas med en Global Geopotentialmodell (GGM), till exempel med en högupplöst GGM (t ex EGM2008 med maxgradtalet 2190). För högsta noggrannhet behövs regional geoidbestämning och lokala tyngdkraftsdata.



Satellitaltimetri



IAG resolution Nr. 1 om International Height Reference System (IHRIS)

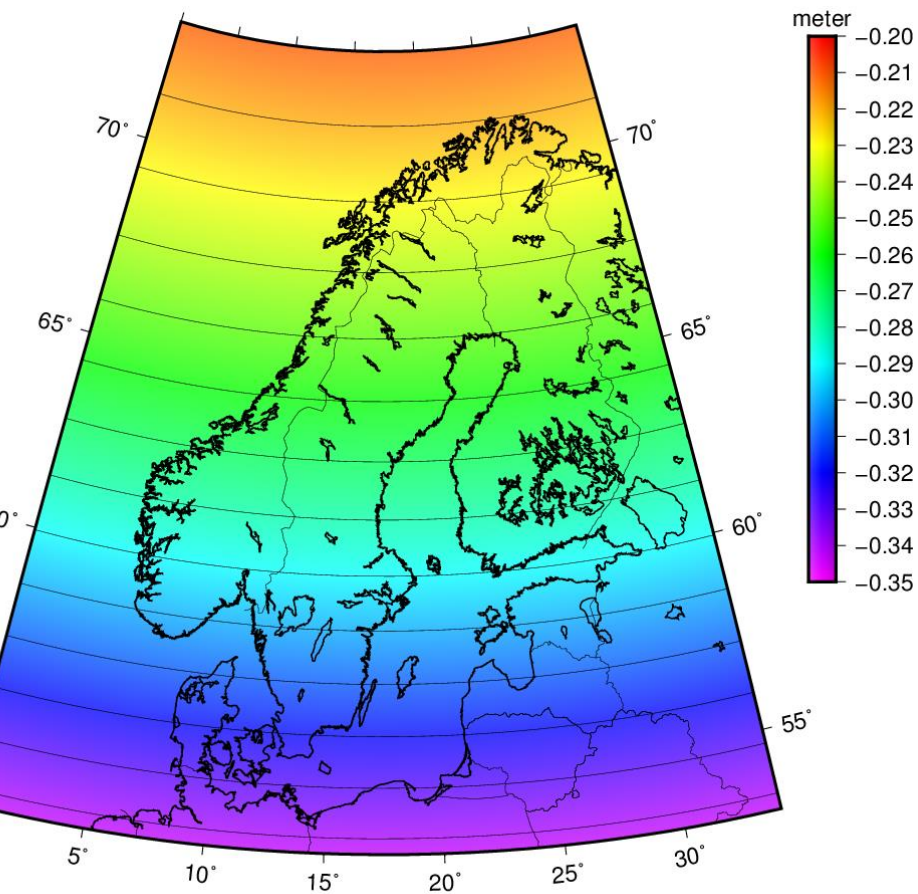
- Denna IAG-resolution antogs på IUGG-motet i Prag efter många års diskussion och bråk.
- IHRIS definieras som följer,
 1. Vertical reference level is an equipotential surface with the potential W_0 (at geoid)
 2. The **mean** (!) permanent tide system should be used
 3. Unit of length is meter, time is second (SI)
 4. The vertical coordinate is the geopotential number...
 5. The spatial reference of the position P for the potential $W_p = W(X)$ is related as coordinates X of the International Terrestrial Reference System
- $W_0 = 62\,636\,853.4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ is chosen as realization of the potential value of the vertical reference level for the IHRIS.

Approximativ skillnad mellan referensytorna för EVRS och IHRS i Norden

$$N_{IHRS} = \frac{(GM - GM_{GRS\ 80})}{r \cdot \gamma} - \frac{(W_0 - U_{GRS\ 80})}{\gamma} + \Delta N_{zero \rightarrow mean} + N_{gravimetric, zero, 2-\infty}$$

$$N_{EVRS} = \frac{(GM - GM_{GRS\ 80})}{r \cdot \gamma} - \frac{(W_{EVRS} - U_{GRS\ 80})}{\gamma} + N_{gravimetric, zero, 2-\infty}$$

$$N_{EVRS} - N_{IHRS} = \frac{(W_0 - W_{EVRS})}{\gamma} - \Delta N_{zero \rightarrow mean}$$



- Figuren visar den approximativa skillnaden mellan geoidhöjder för EVRS och för IHRS.
- Detta bara för att få ett hum om storleken på skillnaden i vår region.
- För att realisera IHRS behövs också en realisering av ellipsoidhöjderna, genom ITRF XXXX, etc.

Pågående arbete med realisering of IHRS

- Arbete pågår med realiseringen av IHRS (kallad IHRF XXXX) i en arbetsgrupp inom IAG (Joint Working Group "Strategy for the Realization of the International Height Reference System (IHRS)")
- Laura Sanchez är ordförande. Från Norden deltar Jaakko Mäkinen, Jonas Ågren och Markku Poutanen.
- Ett mål är att skriva ett specifikationsdokument.
- Ett annat är att beräkna en första realisering för ett urval av permanenta referensstationer (geopotentialtal samt hastigheter).
- Målet är att se IHRS som ett enhetligt höjdsystem för vetenskapliga och globala tillämpningar (de flesta håller med om det).
- I vår region kan vi fortsätta att arbeta med EVRS med epok 2000 (=Baltic Sea Chart Datum 2000). Men vi måste ha en bra relation till IHRF. Vissa projekt kan komma att använda IHRF XXXX, etc.



Utblick: Mot geoidbaserade höjdsystem?

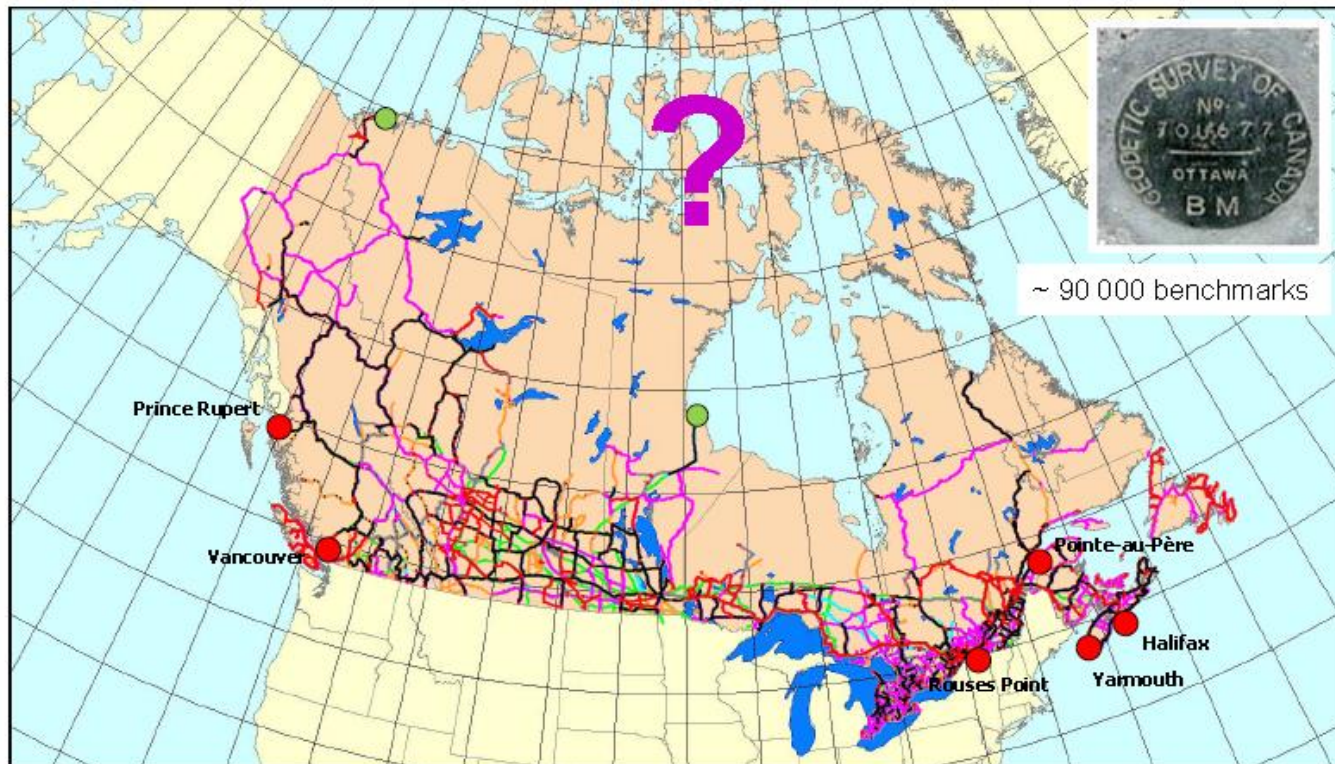
- Ovan har vi nästan uteslutande talat om **avvägningsbaserade höjdsystem**. I detta fall realiseras höjdsystemet av höjder för ett antal avvägda höjdfixar.
- Det finns flera problem med detta (dyrt, ogynnsam felfortplaning över mycket långa avstånd, mareografer inte korrigerade för MDT, etc.).
- Utvecklingen idag rör sig mot att etablera höjdsystem ned **GNSS och en geoidmodell**. Detta innebär att höjdsystemet realiseras med en gravimetrisk geoidmodell och koordinater/hastigheter för ett antal permanenta referensstationer för GNSS (till exempel IGS-nätet).
- Detta har flera fördelar,
 - Med GNSS kan noggranna höjder över ellipsoiden (på cm-nivå) enkelt bestämmas över mycket långa avstånd (globalt!).
 - Satellitsystemen GRACE och GOCE har inneburit att de långa och medellånga våglängderna är mycket väl bestämda för geoidmodellen. För de finare detaljerna behövs noggranna lokala/regionala tyngdkraftsdata.
 - Avvägning kan fortfarande användas för lokala tillämpningar. Avvägning är fortfarande den noggrannaste höjdbestämningsmetoden över korta avstånd.
- I **områden med bra avvägningsbaserade höjdsystem**, som i norra Europa, Norden och runt Östersjön, finns ingen anledning att göra något nu. Våra avvägningsbaserade höjdsystem uppfyller alla krav man kan ställa på ett modernt höjdsystem.
- På andra håll i Världen där det existerande höjdsystemet är gammalt och bristfälligt är ett geoidbaserat höjdsystem en bra idé (mycket billigare och noggrannare över långa avstånd), särskilt för stora länder som USA...

Exempel på geoidbaserade höjdsystem

- Kanada har redan introducerat sitt nya geoidbaserade höjdsystem **CGVD2013**.
- USA planerar att introducera ett nytt geoidbaserat system 2022. För att förbättra kvaliteten på geoidmodellen kommer de att mäta tyngdkraft med flyggravimetri över hela USA (i det så kallade **GRAV D-projektet**).
- Storbritanien (Colin Fane 2014)

Canadian Geodetic Vertical Datum 1928 (GGVD28)

Name:	Canadian Geodetic Vertical Datum of 1928
Abbreviation:	CGVD28
Type of datum:	Tidal (Mean sea level)
Vertical datum:	Mean sea level at tide gauges in Yarmouth, Halifax, Pointe-au-Père, Vancouver and Prince-Rupert, and a height in Rouses Point, NY.
Realisation:	Levelling (benchmarks). Multiple local adjustments over the years since the general least-squares adjustment in 1928.
Type of height:	Normal-orthometric



Véronneau and Huang (2014)



1906-1928 1929-1939 1940-1965 1966-1971 1972-1981 1982-1989 1990-2007

Canadian Geodetic Vertical Datum 2013 (GGVD2013)

Canadian Gravimetric Geoid of 2013 (CGG2013)

Boundaries

North: 90°

South: 10°

West: -170°

East: -10°

Resolution

2' x 2'

Satellite model

EIGEN-6C3stat (GFZ)

Förste et al., IAG 2013

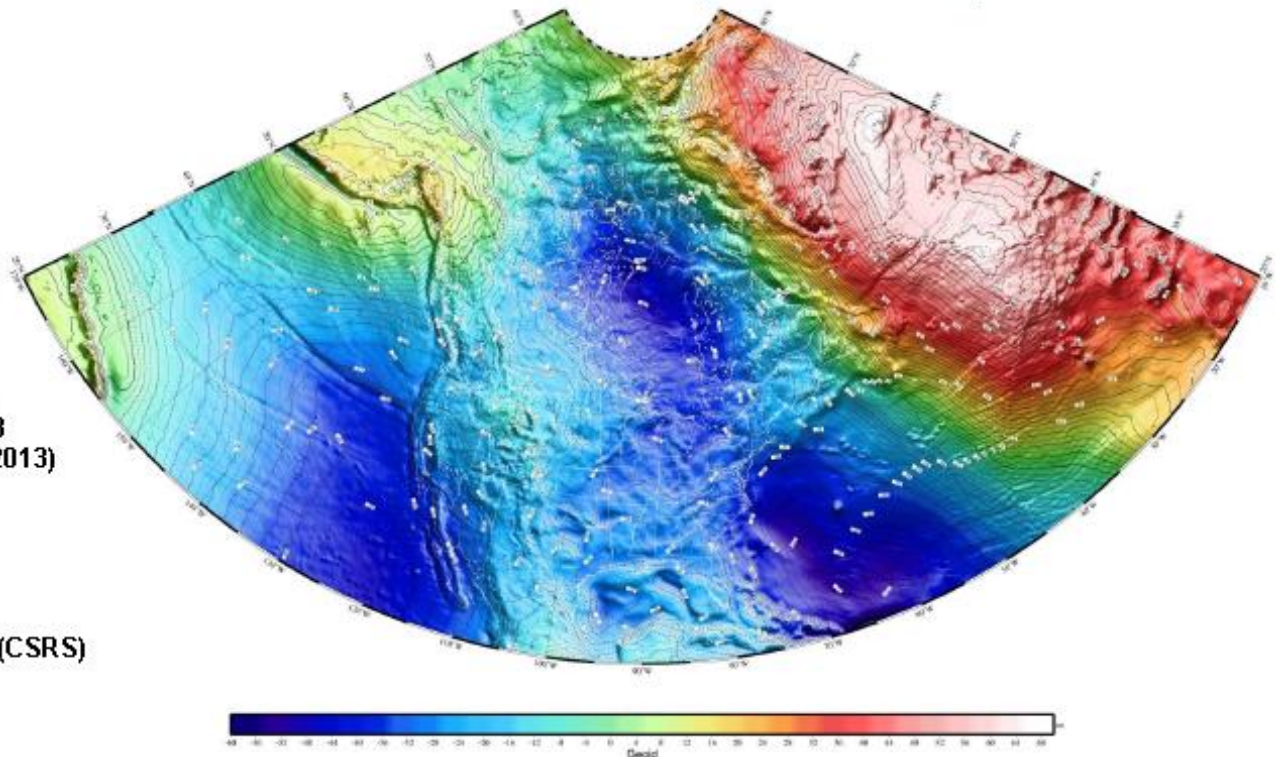
GOCE (until May 24, 2013)

Transition zone

Degrees: 120-180

Reference frames

ITRF2008 and NAD83(CSRS)

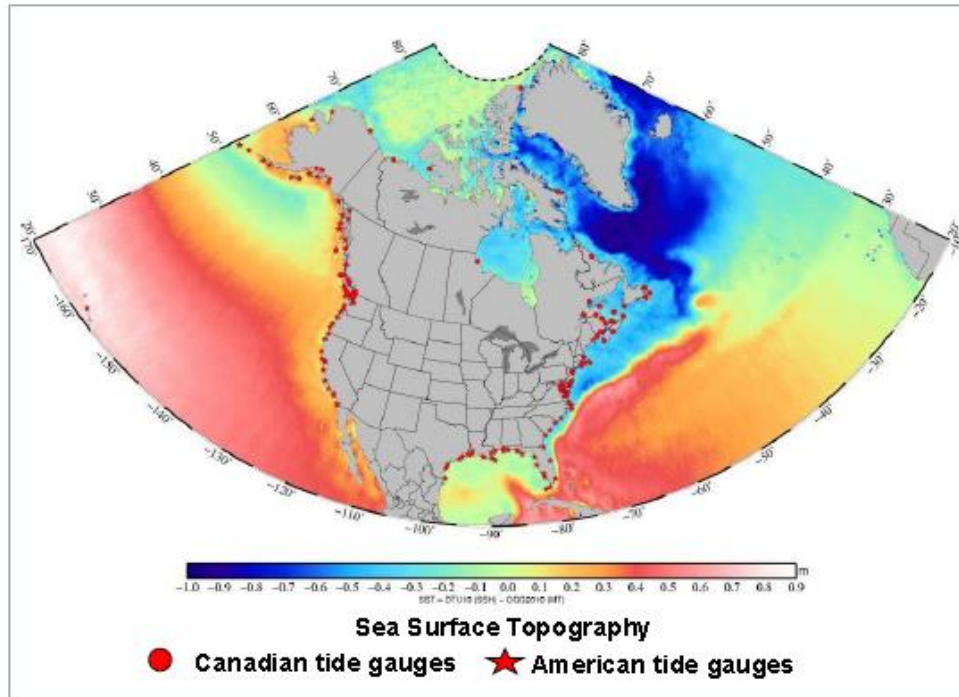


Véronneau and Huang (2014)

Choice of a common W_0 value for North America

WHAT is the definition of CGVD2013?

- CGVD2013: Conventional equipotential surface ($W_0 = 62,636,856.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$) averaging the coastal mean sea level for North America measured at Canadian and American tide gauges.



- U.S. NGS and NRCan's GSD signed an agreement (16 April 2012) to realize and maintain a common vertical datum for USA and Canada defined by $W_0 = 62,636,856.0 \text{ m}^2/\text{s}^2$

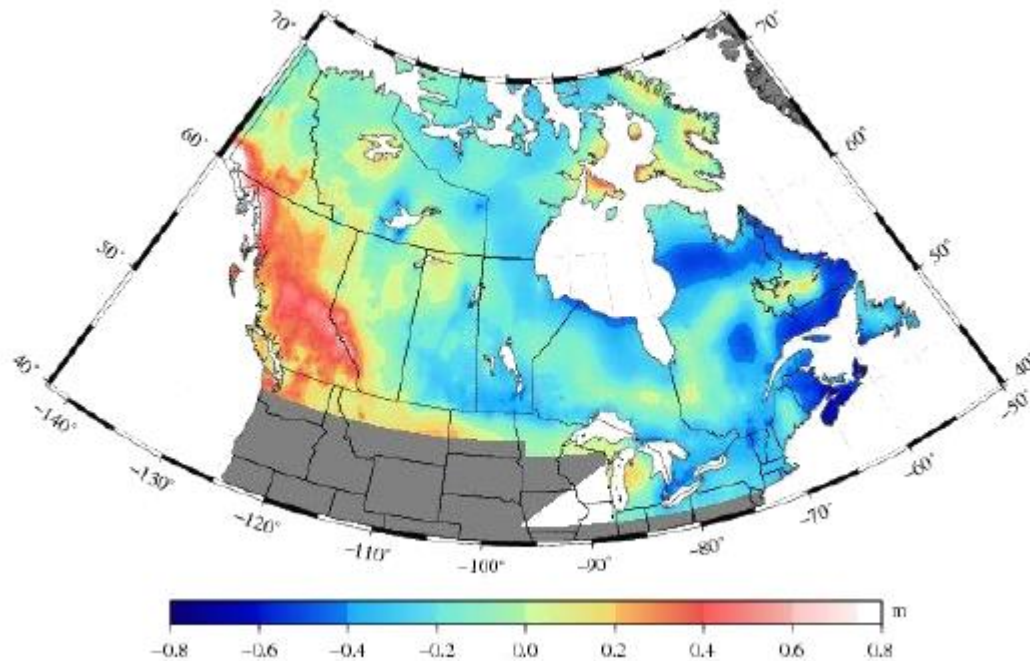


- It also corresponds to the current convention adopted by the International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) and International Astronomical Union (IAU).

- Canada's recommended definition for a World Height System Véronneau and Huang (2014)

Difference between GGVD2013 and GGVD28

CGVD28(HTv2.0) – CGVD2013(CG2010)



Véronneau and Huang (2014)

