

Bodengestützte GNSS-Methoden

Florian Zus & GFZ ATMO Team

Helmholtz Centre Potsdam

GFZ German Research Centre for Geosciences

18 September, 2014

Übersicht

- GNSS Meteorologie: Was ist das?
- Methode
- Produkte
- Anwendungen
- Was macht das GFZ?
- Entwicklung

Bevis et al. 1992, JGR:

Radiosignale die von GNSS Satelliten ausgesendet und von Stationen empfangen werden erfahren durch die neutrale Atmosphäre eine Laufzeitverzögerung ('Tropospheric Delay' TD)

Der TD ist eine funktion von Druck (p), Temperatur (T) & Feuchte (q).

In der präzisen positionierung wird neben der position der Station XYZ auch der TD bestimmt, d.h. man erhält indirekte Beobachtung von p , T & q .

Aus dem TD im zenith kann mit p & T messungen an der station **'Integrated Water Vapor'** IWV über der Station bestimmt werden.

Ausgangspunkt ist L1 & L2 Phasenmessung an der Station:

$$L_i = \rho + c (t_r - t_s) - ID_i + TD$$

- i ... L1/L2 Frequenz
- ρ ... Abstand zwischen Satellit und Station
- c ... Vakuumlichtgeschwindigkeit
- t_s/t_r ... Satellit/Station Uhrenfehler
- ID ... Laufzeitverzögerung Ionosphäre
- TD ... Laufzeitverzögerung Troposphäre

Achtung: Die Beobachtungsgleichung ist vereinfacht dargestellt
(z.B. fehlt Mehrdeutigkeit, etc.)

Durch geeignete Linearkombination von L1 & L2 wird die Laufzeitverzögerung durch die Ionosphäre ID (in erster Ordnung) eliminiert:

$$L = \rho + c(t_r - t_s) - TD$$

oder

$$L = \sqrt{(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2 + (z_r - z_s)^2} + c(t_r - t_s) - TD$$

x_r, y_r, z_r ... koordinaten Station

x_s, y_s, z_s ... koordinaten Satellit

Die Laufzeitverzögerung durch die Troposphäre (Fermat's Prinzip)

$$TD = \int n ds - \rho$$

n ... Refraktionsindex

ds ... Linienelement der Trajektorie

wird approximiert

$$TD = m_h Z_h + m_w Z_w + m_g \int G_n \cos a + G_e \sin a$$

e/a ... elevation/azimuth

m_h/m_w ... hydrostatische/nicht-hydrostatische Mapping Funktion (MF)

Z_h/Z_w ... zenith hydrostatische/nicht-hydrostatische Verzögerung

m_g ... Gradient MF

G_n/G_e ... Nord-Süd/Ost-West Gradient

Einsetzen ergibt

$$L = \sqrt{(x_r - x_s)^2 + (y_r - y_s)^2 + (z_r - z_s)^2} - c \cdot t_r - s$$

$$- y m_h \cos \theta_h + m_w \cos \theta_w + m_g \cos \theta_n \cos \theta_e$$

$$e \sin \theta_e$$

- Satellitenbahn & Uhr kann sehr genau bestimmt werden (siehe z.b. 'International GNSS Service' IGS).
- MF basiert auf Klimatologie oder Wettermodell (siehe z.b. 'Vienna Mapping Function 1' VMF1)
- Die zenith hydrostatische Verzögerung kann mit dem Druck an der Station bestimmt werden.

Damit reduziert sich das Problem auf die Bestimmung von

$$X = [x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e]$$

Durch simultane Beobachtung von Satelliten erhält man

$$\begin{aligned}
 L^1 &= L^1(x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e) \\
 L^2 &= L^2(x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e) \\
 L^3 &= L^3(x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e) \\
 L^4 &= L^4(x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e) \\
 L^5 &= L^5(x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e) \\
 &\dots
 \end{aligned}$$

sodass

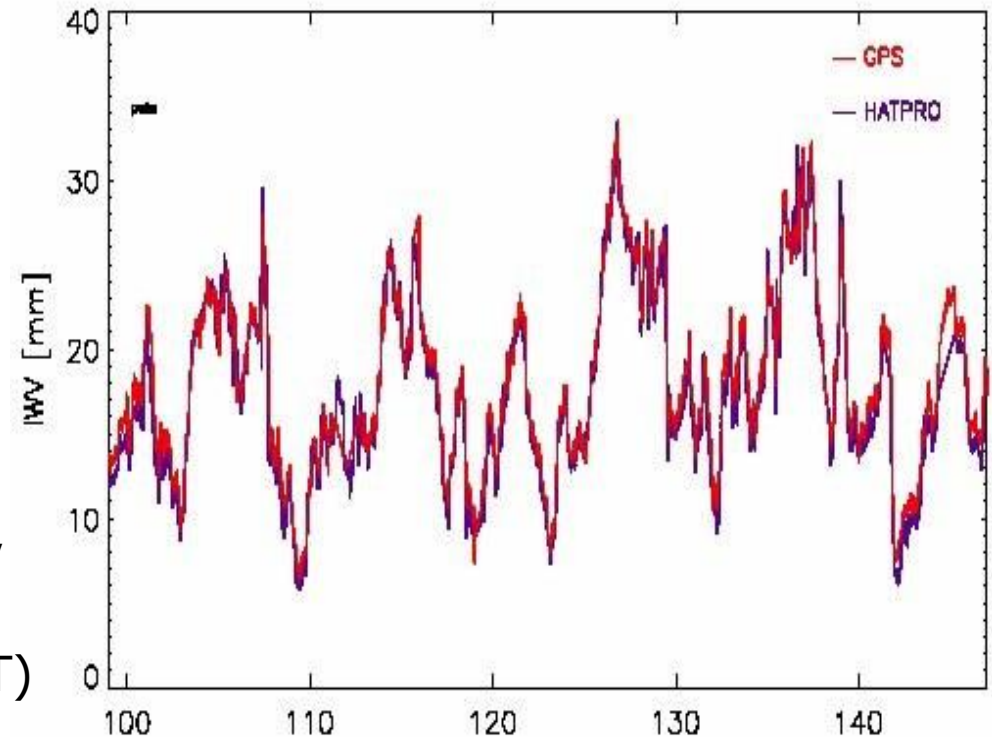
$$X = [x_r, y_r, z_r, t_r, Z_w, G_n, G_e]$$

mit einem Least-Square LSQ Verfahren bestimmt werden kann.

- Zenith nicht-hydrostatische Verzögerung **ZWD**
- Nord-Süd G_N und Ost-West G_E Gradienten (Asymmetrie)
- Zenith totale Verzögerung **ZTD** = ZHD + ZWD
- Troposphärenverzögerung **STD** = TD + P,
wobei P das Residuum des LSQ ist.
- mit p und T an der Station **IWV** = $\Pi(T,p) \cdot ZWD$,
wobei der Faktor Π etwa 1/6 ist.

Eigenschaften:

- Wetterunabhängig
- Kontinuierlich
- Hohe Zeitauflösung
- Genauigkeit: ± 10 mm ZTD
 ± 1 -2 kg/m IWV
- Zeitnah ('Near Real Time' NRT)
- Kostengünstig



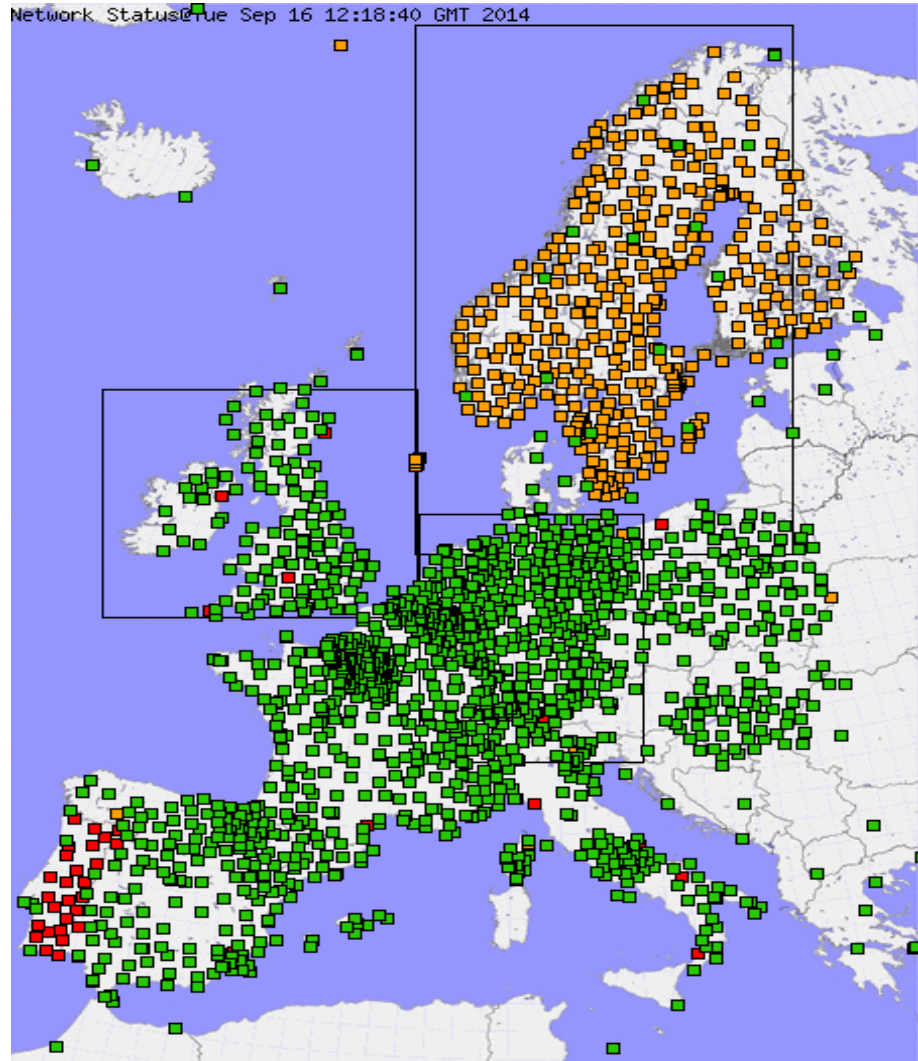
Anwendung

- ZTD daten werden von Wetterzentren in Europa (z.b. MetOffice, Meteo France, KNMI) assimiliert:

*'...usage of groundbased GNSS delay data in NWP has proven to improve forecast skill...'
E-GVAP (egvap.dmi.dk)*

- Feldmesskampagnen, z.b. COPS, HYMEX, LUAMI

- IWV Trends



Aktivitäten am GFZ

- NRT Prozessierung für E-GVAP
- GNSS Tomographie
- Verdichtung von Netzwerken mit Einfrequenzempfängern
- Multi-GNSS Lösung
- ZTD/IWV in Echtzeit
- Analyse der troposphären produkte

NRT Prozessierung

NRT Prozessierung von
300 Stationen mit EPOS
'Earth Parameter & Orbit
determination Software':

GPS IWV:

- 15 min zeitauflösung
- Fehler: $\pm 1-2$ kg/m

2

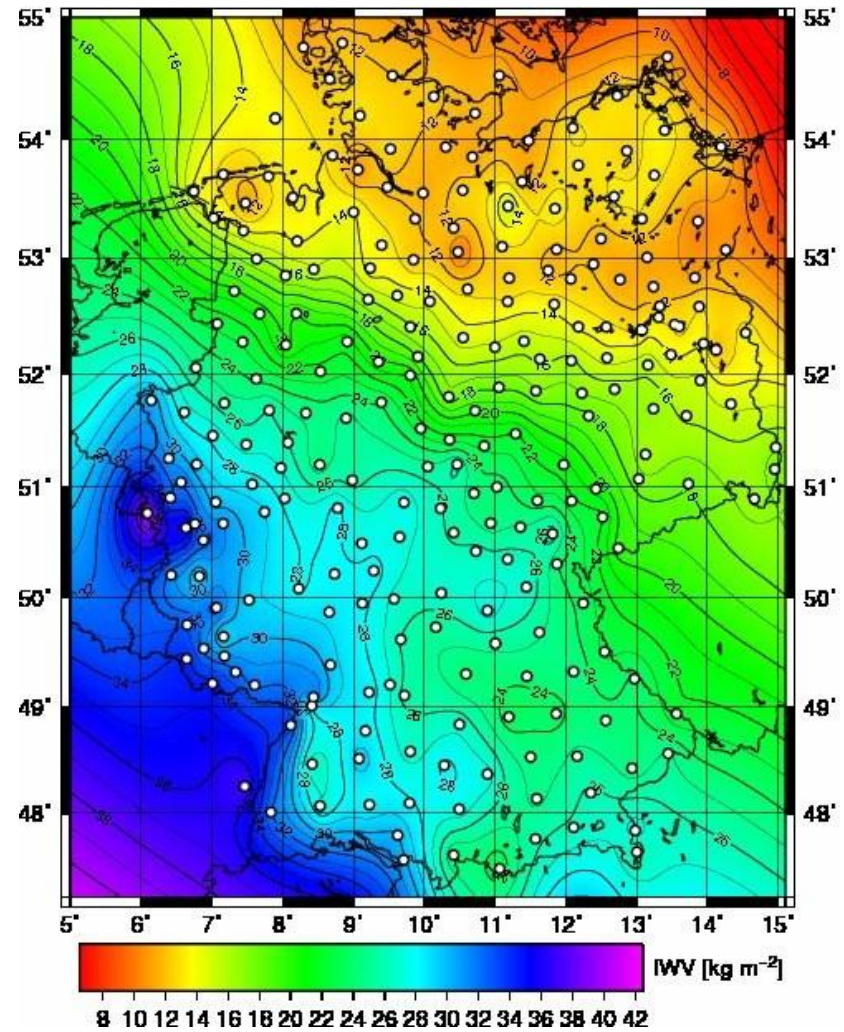
GPS ZTD:

- 15 min zeitauflösung
- Fehler: ± 10 mm

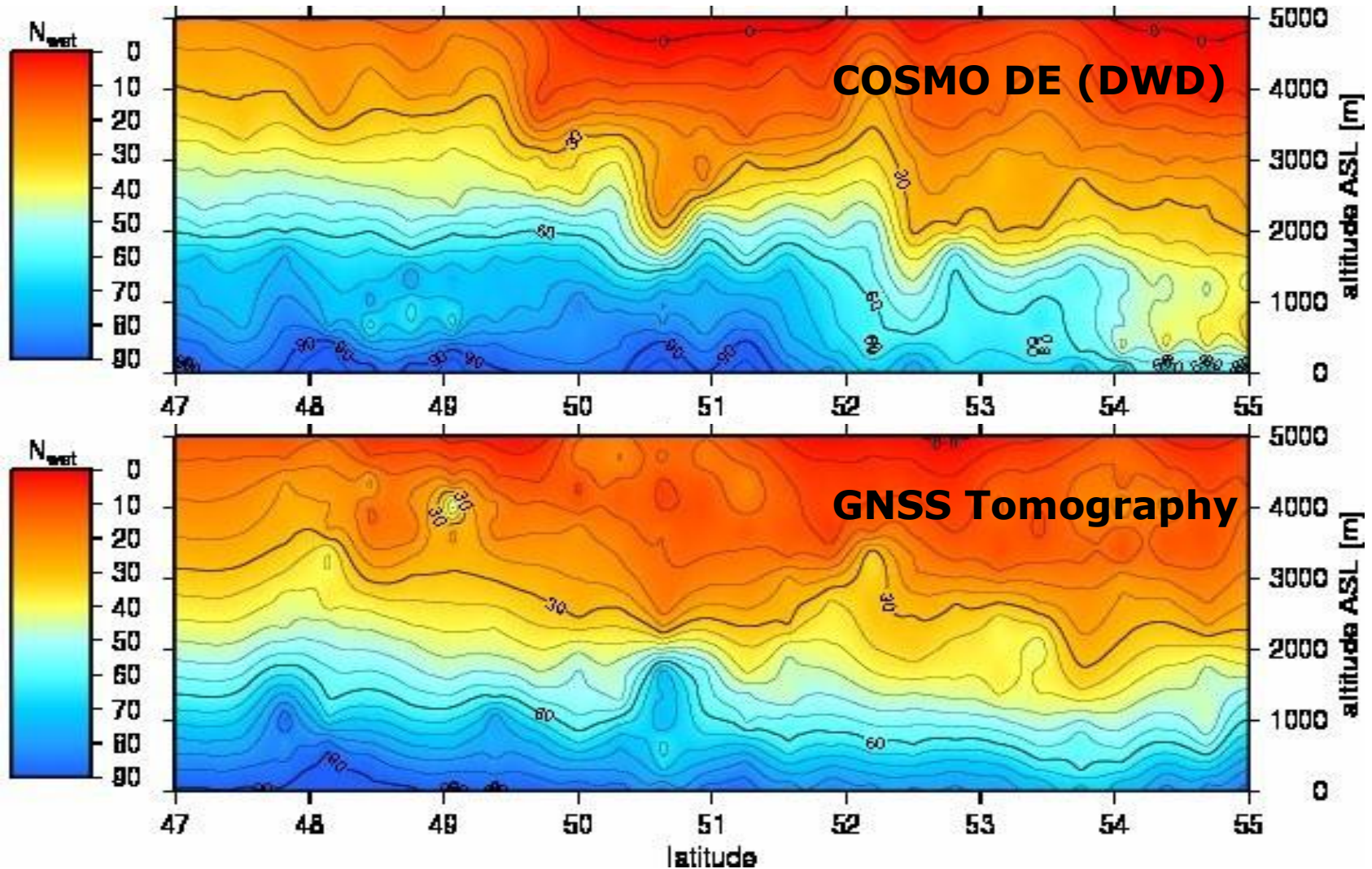
GPS STD:

- 2.5 min zeitauflösung
- Fehler: ± 0.5 %

(Zus et al. 2012, Radio Science)

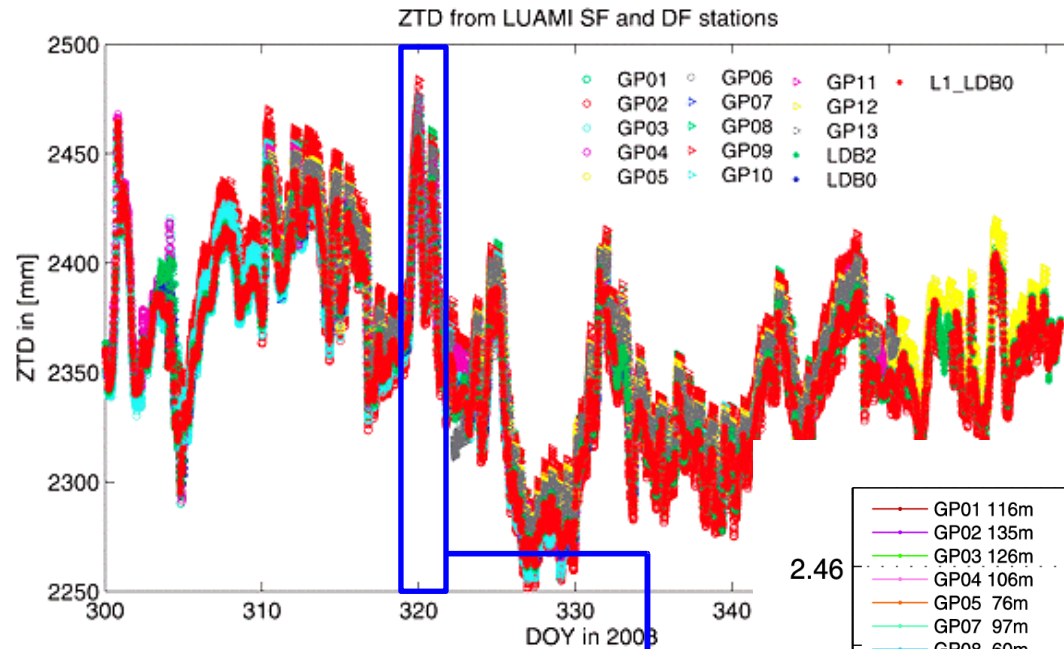


GNSS Tomography



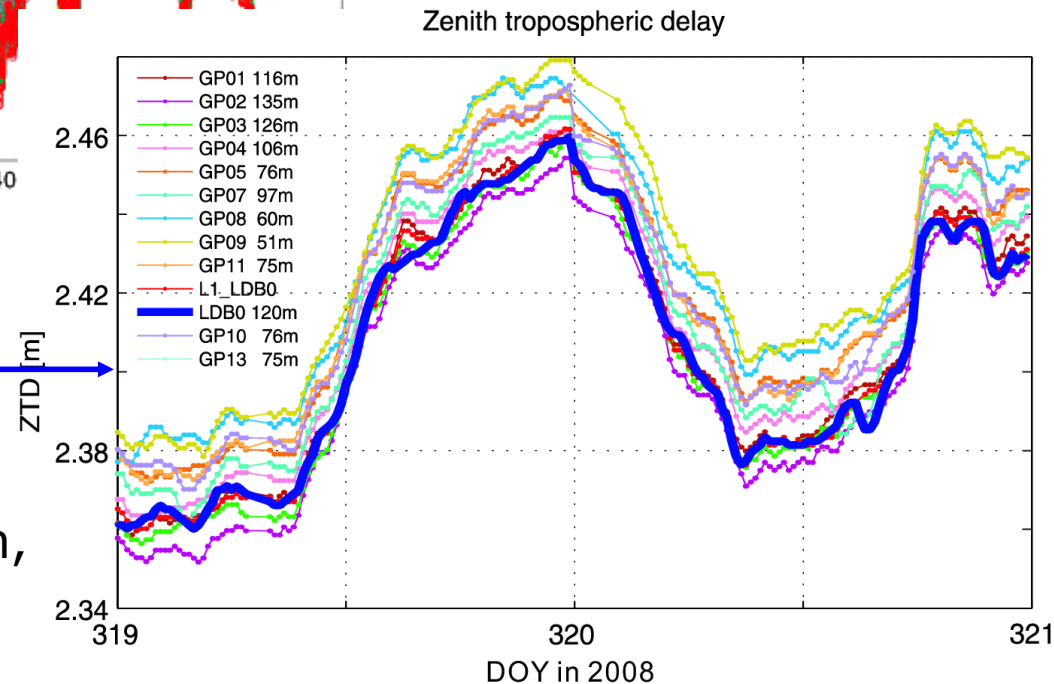
Dichtes Netzwerk & (Multi-) GNSS erlaubt WV Rekonstruktion,
Bender et al. 2011, ASR

ZTDs mit Einfrequenzempfängern

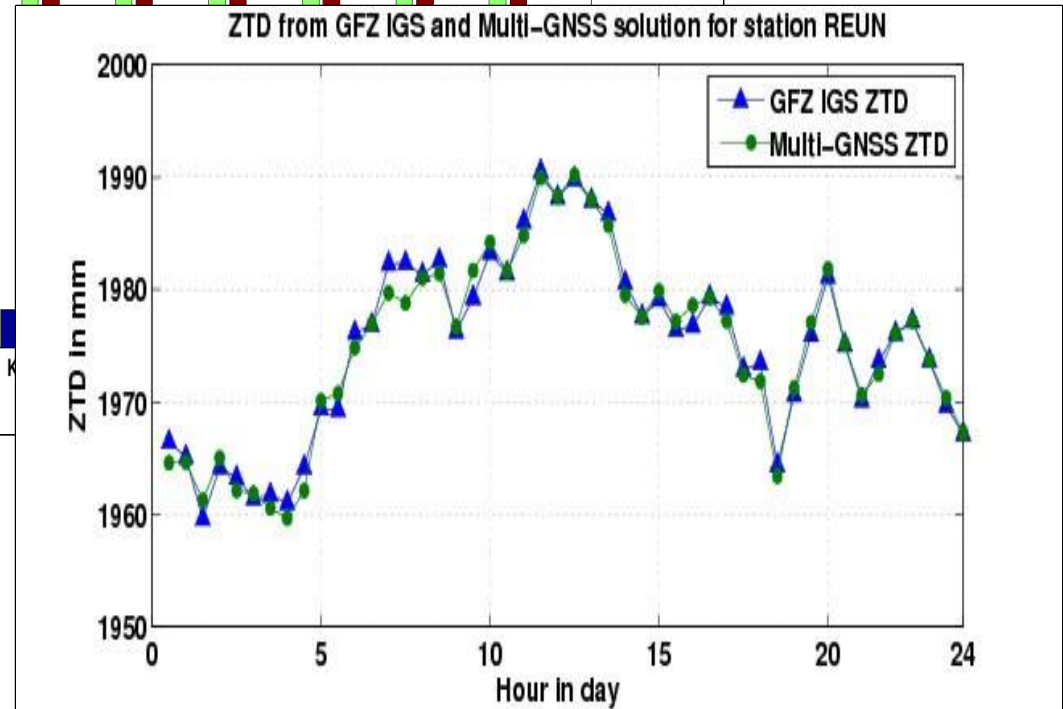
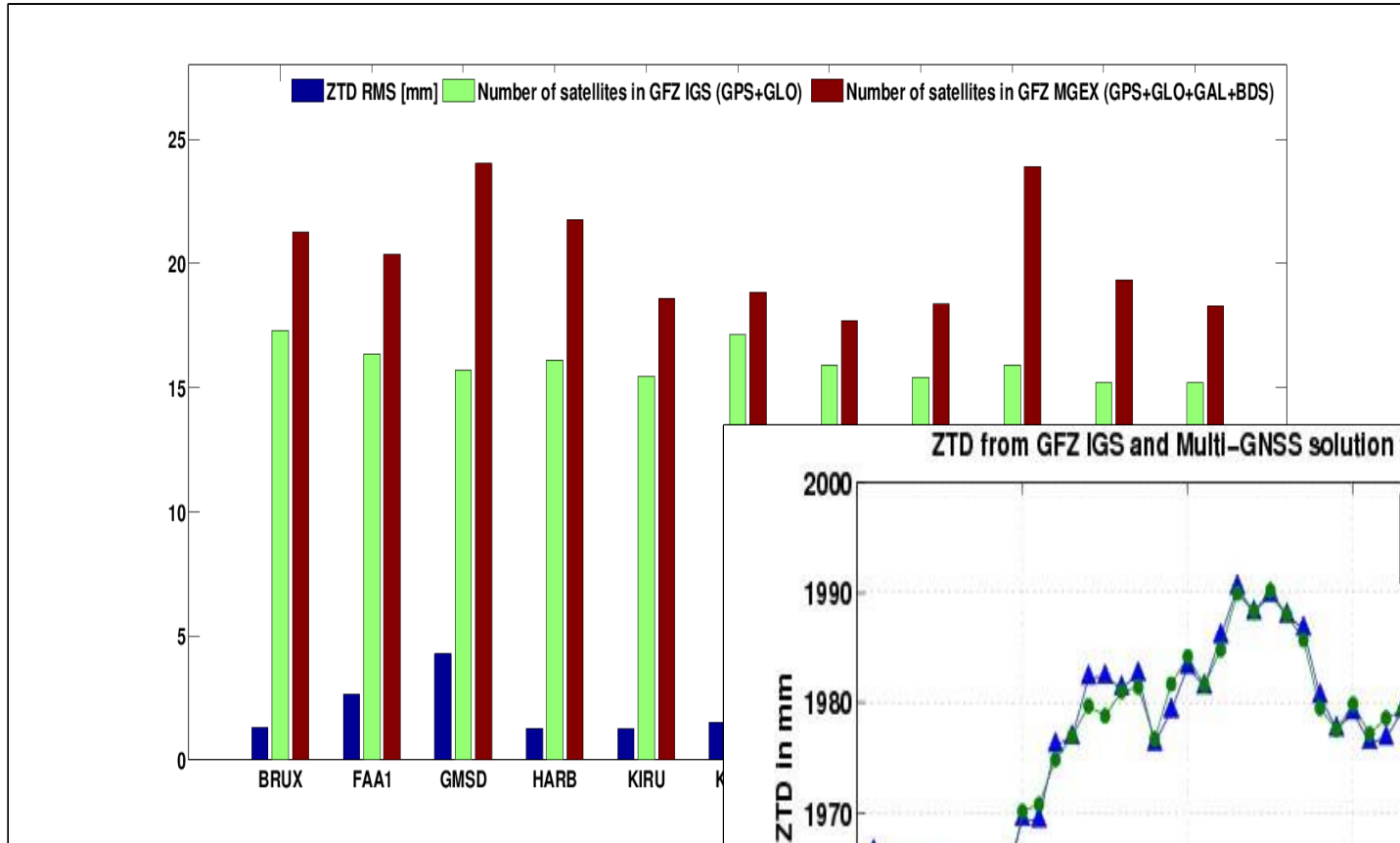


SF ZTDs und DF ZTDs zeigen gute Übereinstimmung.

DF Netzwerk kann mit SF stationen verdichtet werden,
Deng et al. 2011, GRL

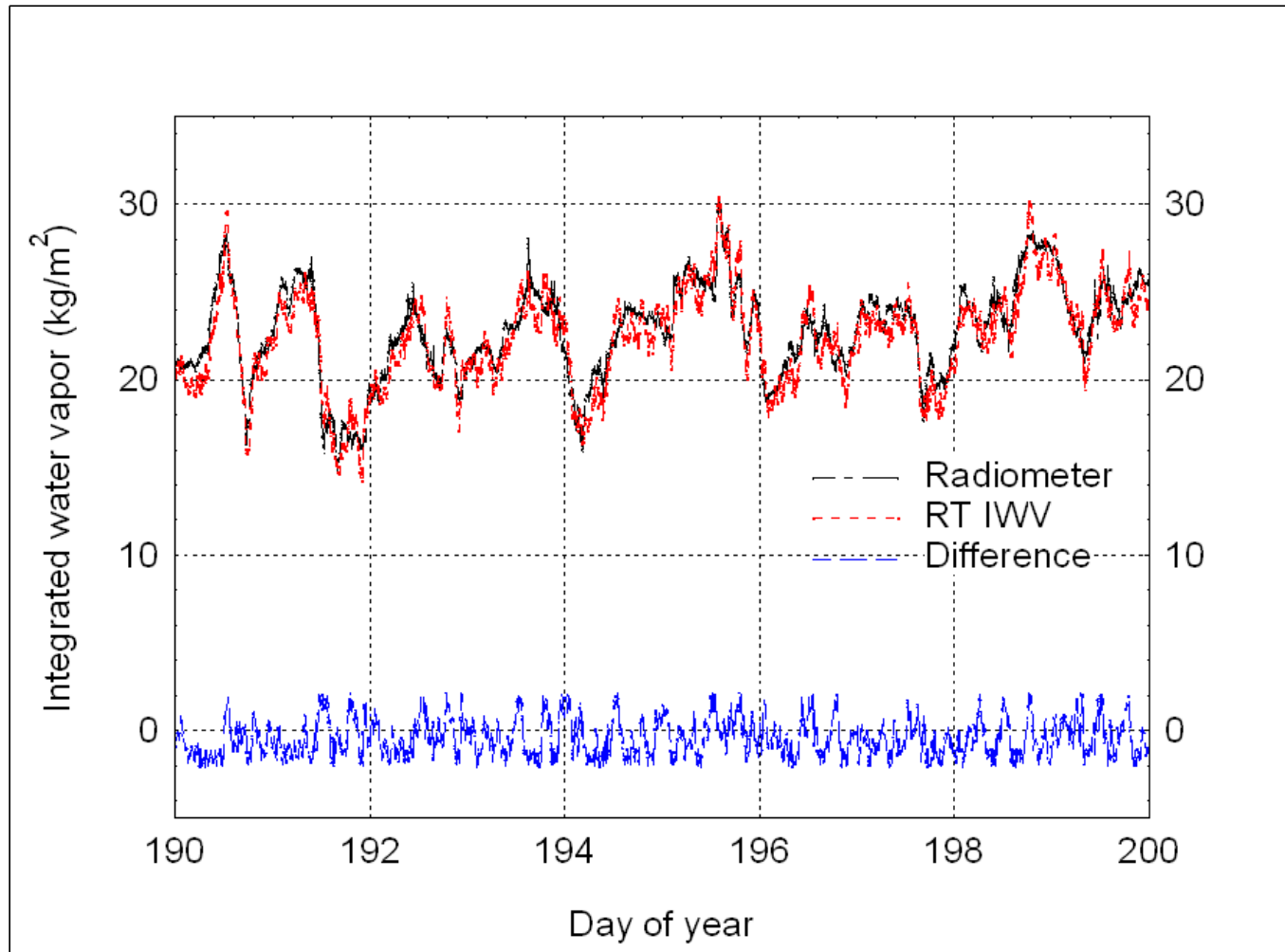


Multi-GNSS



Durch Kombination von **GPS, GLONASS, Galileo & Beidou** wird Parameterschätzung robuster.

ZTD/IWV in Echtzeit

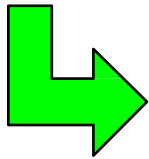


RT IWV und IWV von Wasserdampfradiometer (HATPRO, GFZ) zeigen gute übereinstimmung, [Li et al. 2014, GRL](#)

Horizontale & vertikale N-Gradienten

Gegeben ein Bündel von **STDs** für **eine Station**, schätze das N-Profil und die Nord-Süd NS & Ost-West EW Gradienten (Chen & Herring 1997):

Input: **STD**



$$STD_1 = S_1 [N_0, \dots, N_1] + c_1 \cdot NS + a_1 \cdot EW$$

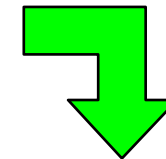
$$STD_2 = S_2 [N_0, \dots, N_1] + c_2 \cdot NS + a_2 \cdot EW$$

$$STD_3 = S_3 [N_0, \dots, N_1] + c_3 \cdot NS + a_3 \cdot EW$$

$$STD_4 = S_4 [N_0, \dots, N_1] + c_4 \cdot NS + a_4 \cdot EW$$

...

S ... Punkt zu Punkt Raytrace Operator
c & a ... Faktoren (nicht geschätzt)



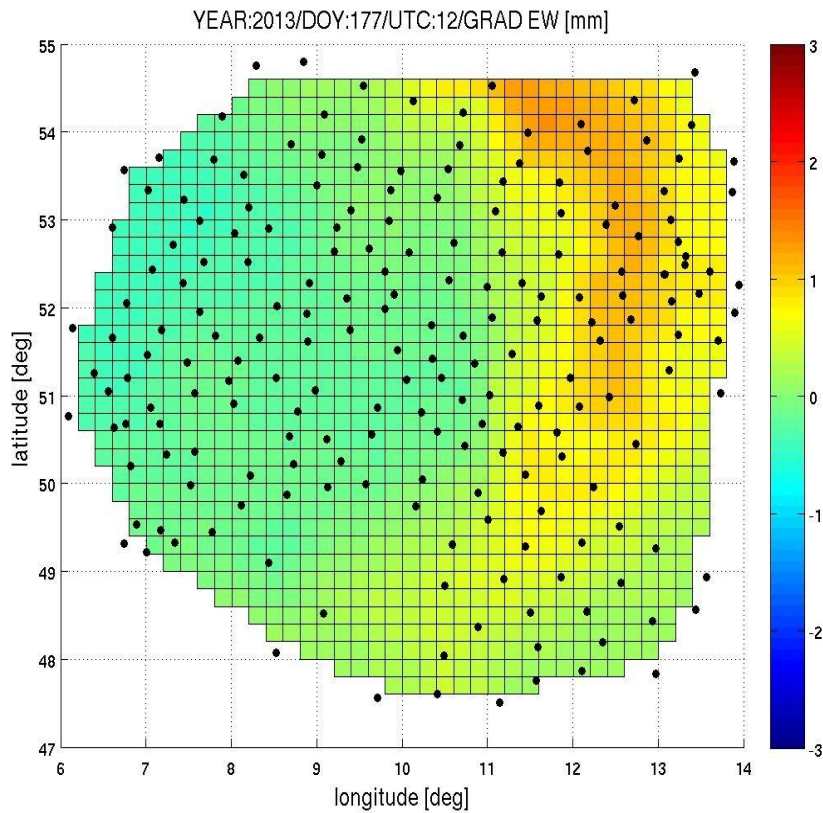
Output: **N, NS & EW**

Algorithmus: nicht-linearer Least Square Fit

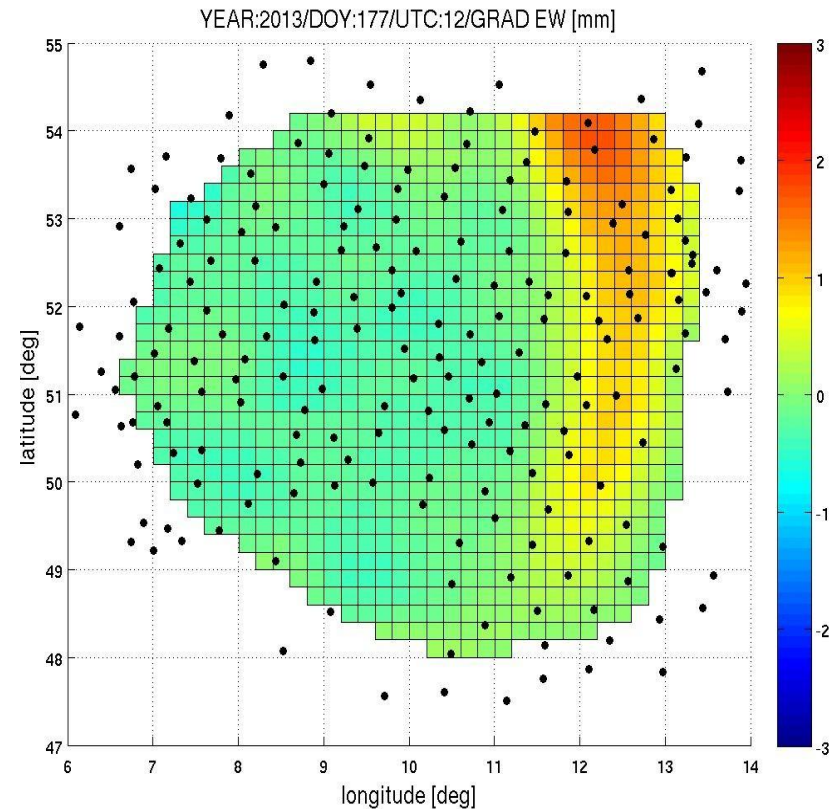
Echte Stationen & 20 min. Station-Satelliten links:

Für **eine einzelne Station** sammel STDs und schätze Gradienten.
Die NS (EW) Gradienten [mm] werden auf Karte zusammengesetzt.

NWM



GPS



GPS STDs enthalten Gradienten Information.

- GNSS produkte in Echtzeit ('Nowcasting')
- Multi-GNSS produkte
- ZTD hatt limitierten Impakt in Wettervorhersage; er enthält keine Information über horizontale & vertikale Gradienten. Die assimilation von STDs ist daher naheliegend.
- IWV Trends: Reprozessierung für komplette GPS Historie

COST Aktion ES1206: 'Advanced GNSS tropospheric products for monitoring severe weather event and climate (GNSS4SWEC)'