

Precise Point Positioning (PPP): Spezielle Aspekte: Mehrdeutigkeitslösungen und Real-Time

**Markus Rothacher
Kan Wang, Michael Schmid**

Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich

**Informationsnachmittag „PPP“
Hochschule für Technik Rapperswil (HSR)
Rapperswil, 13. September, 2013**

Übersicht

- **Motivation**
- **Mehrdeutigkeitslösung: Einführung**
- **Mehrdeutigkeitslösung: Melbourne Wübbena → Narrow-Lane**
- **Mehrdeutigkeitslösung: Tests mit echten Daten**
- **Real-Time PPP Software des IGP/ETH Zurich**

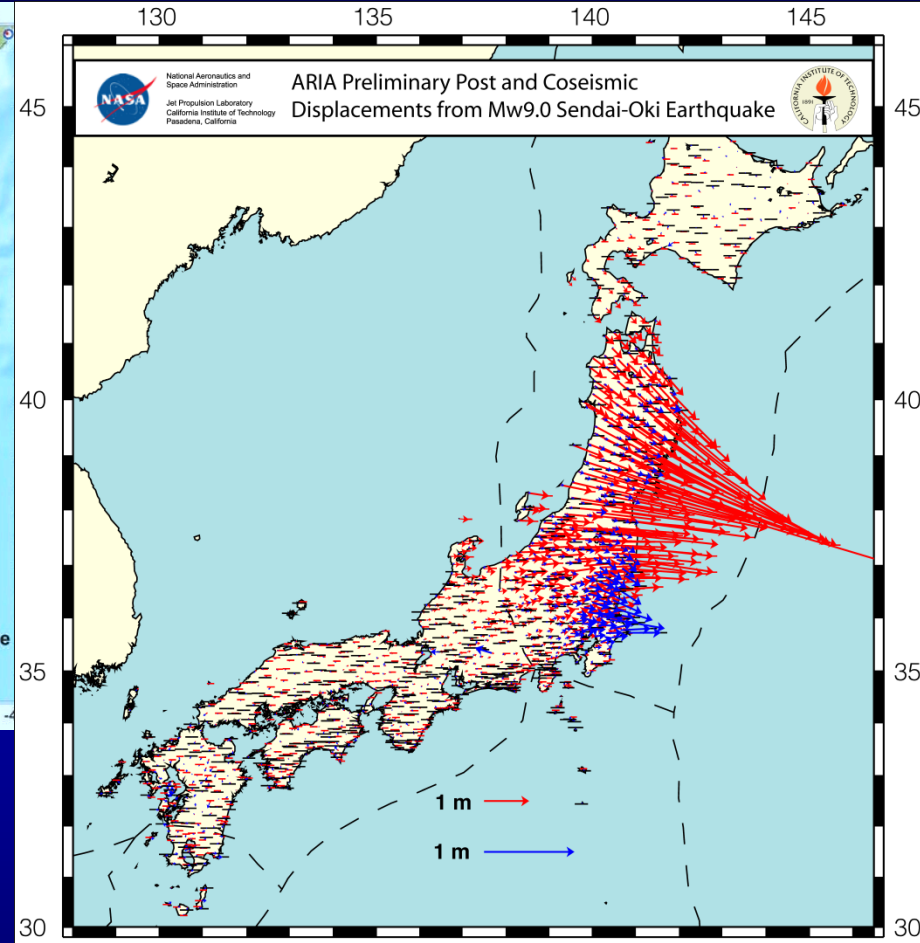
Motivation: (Nahezu) Echtzeit-Anwendungen von PPP

Schnelle Detektion und Quantifizierung von Ereignissen



Erdbeben in Chile, Feb. 27, 2010 (**DGFI**)

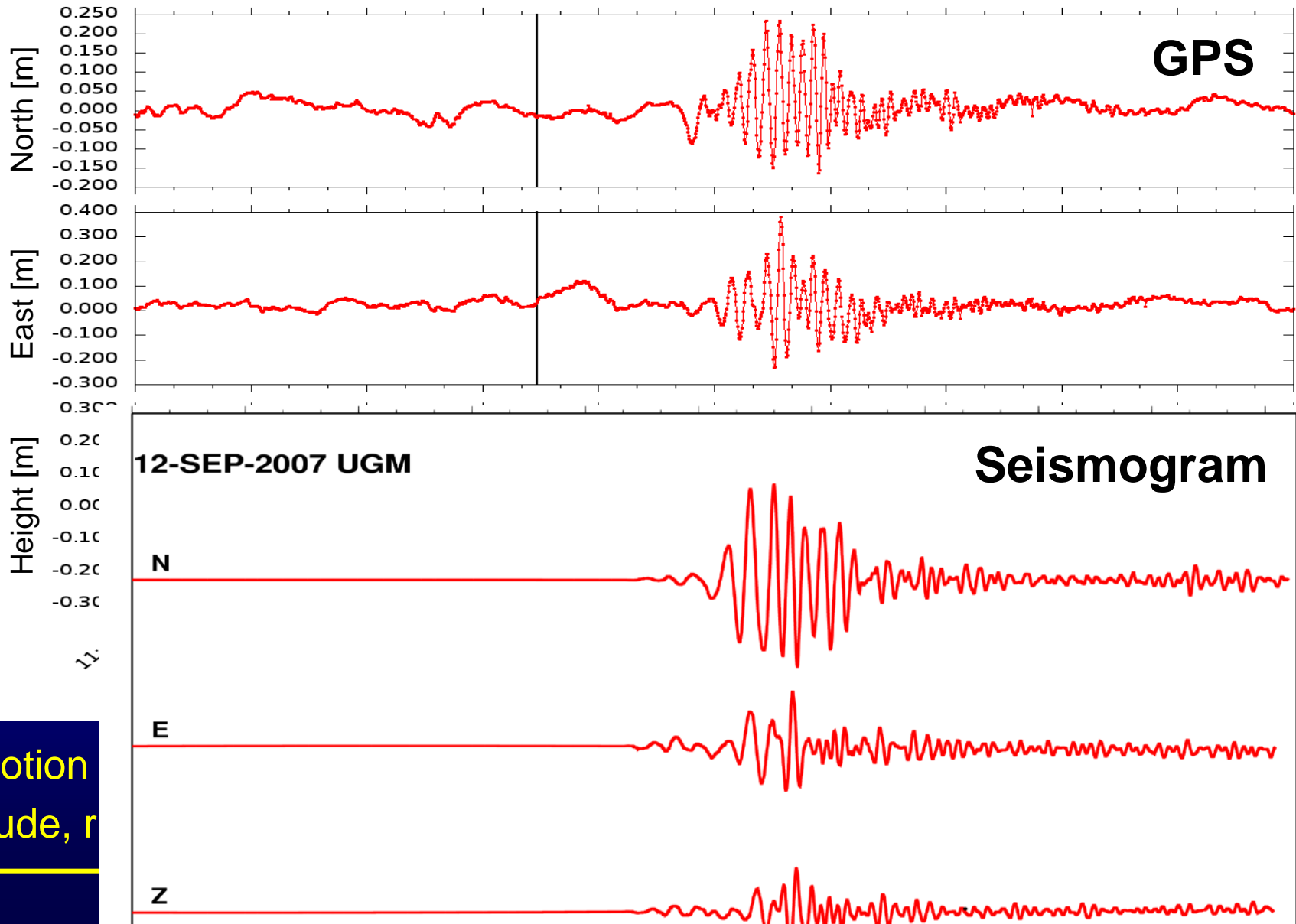
- Schnelle Reaktion auf Naturkatastrophen: Erdbeben, Tsunami
- Service für Verschiebungsvektoren in (nahezu) Echtzeit, zusammen mit Seismologen



in Sendai, März 11, 2011 (**NASA**)

Schnelle Erfassung von Erdbeben: GPS-Seismologie

Sumatra Erdbeben, September 12, 2007

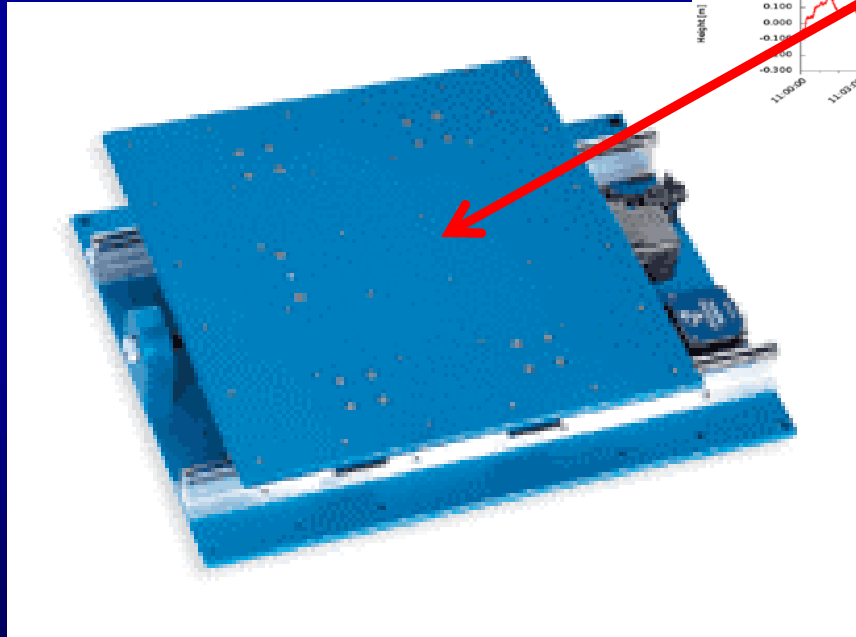
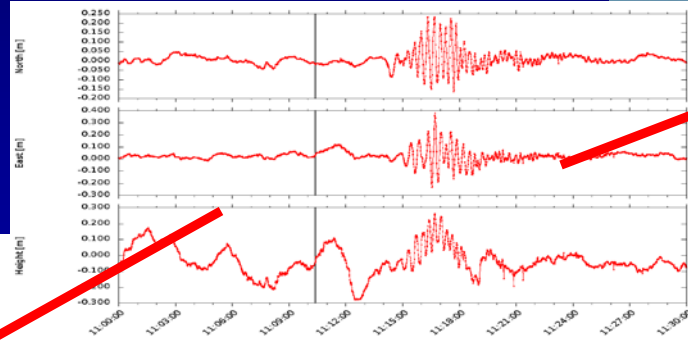


- Ground motion
→ magnitude, r

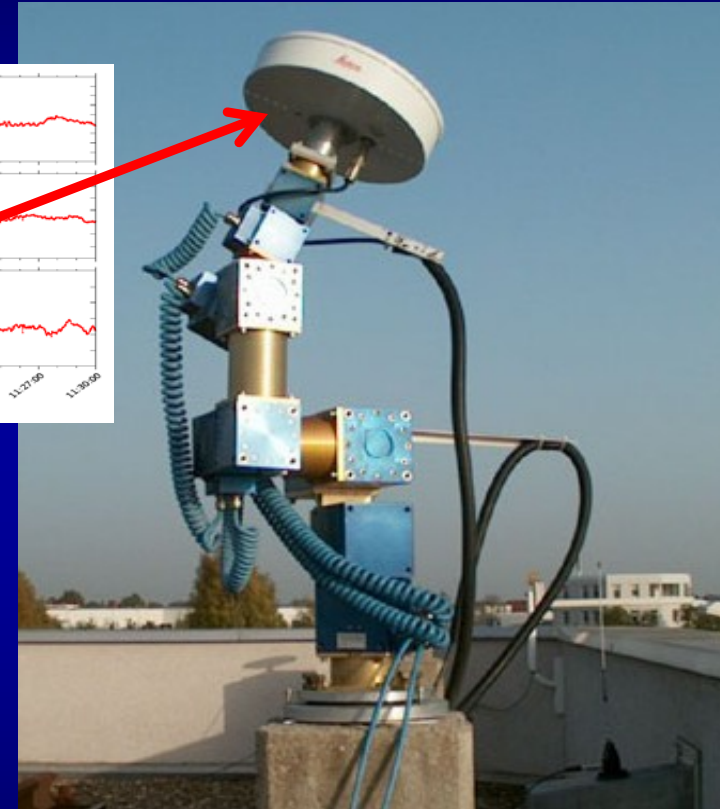
Validierung der GPS-Seismologie: Erdbeben-Simulation



Javad-Empfänger und-Antennen:
GPS, GLONASS, GALILEO; 100Hz

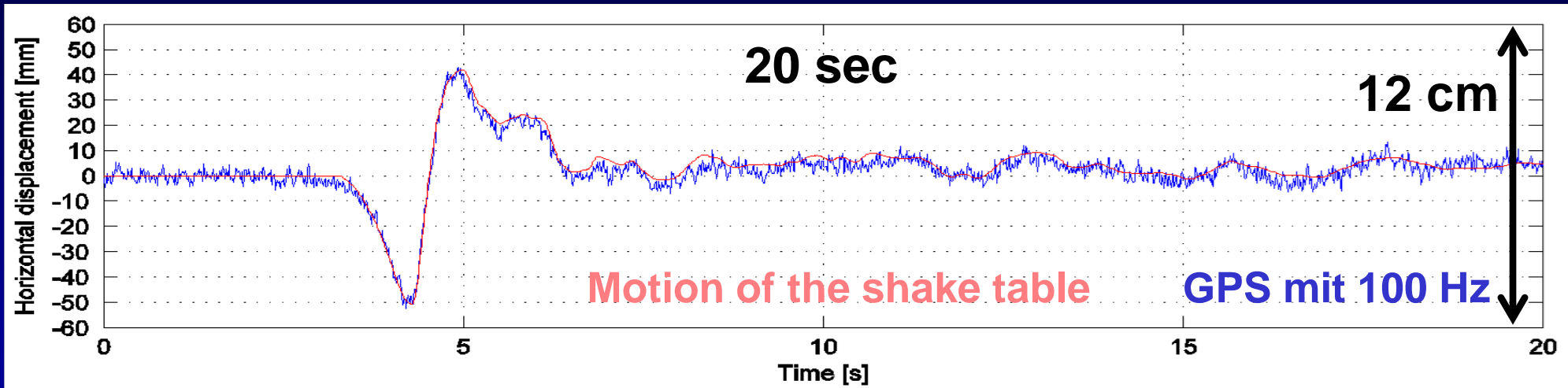


Rütteltisch für 1-D Erdbeben-Simulation

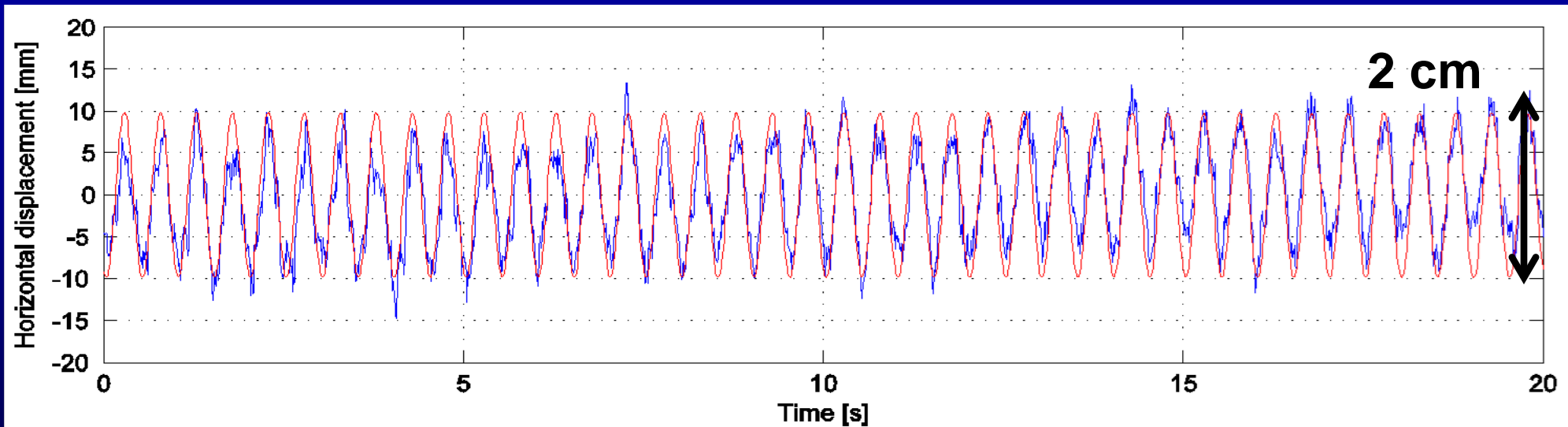


Roboter für 3-D
Erdbebenbewegungen

Rütteltisch-Resultate



Realistic earthquake, $M = 6.0$, Switzerland



Schwingung mit 2 Hz, 1 cm Amplitude

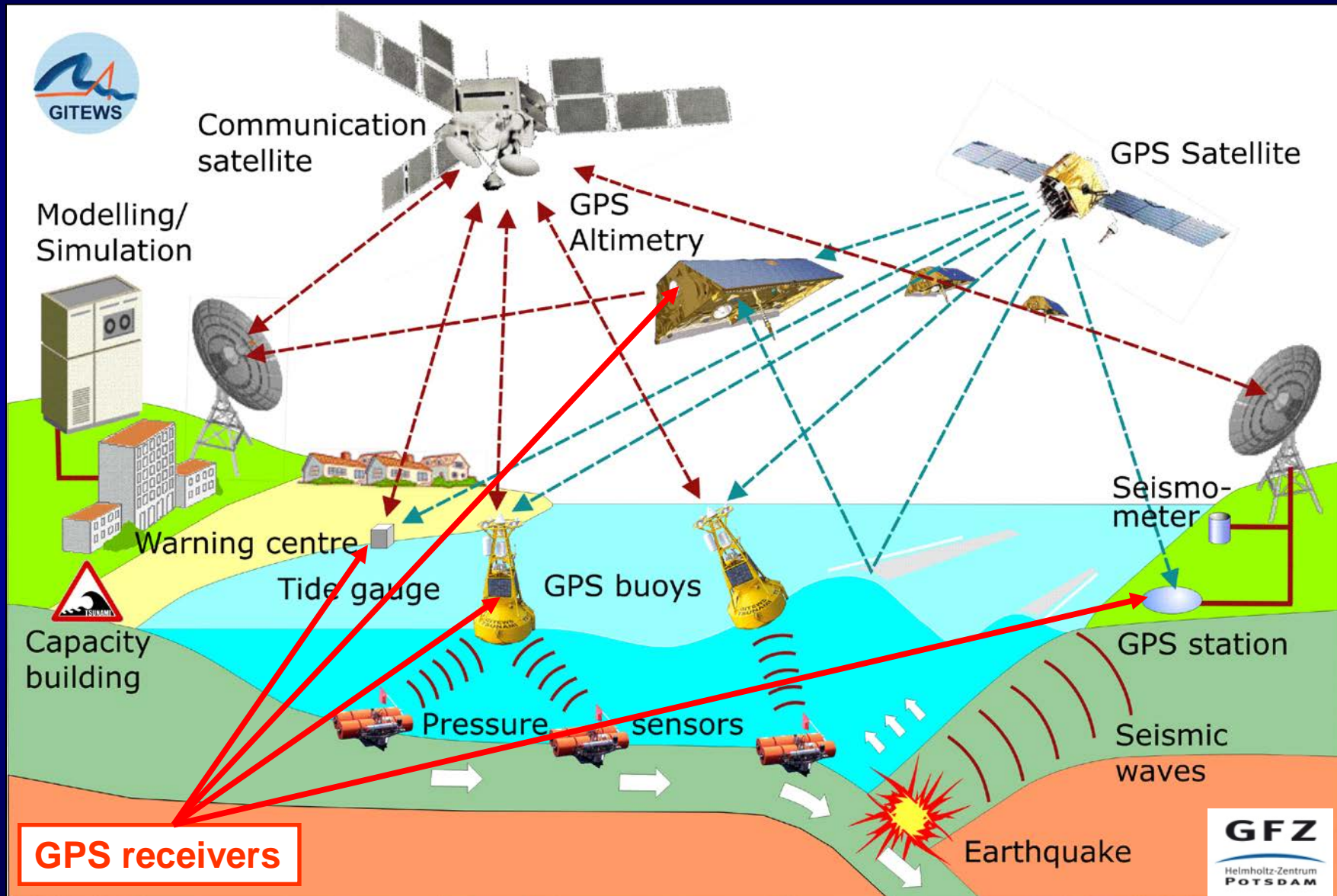
→ Seismologen

Zukunft: Monitoring the Pulsating Earth in Real-Time



Source: rgrapenthin's channel, youtube

Schnelles Erfassen von Katastrophen: German Indonesian Tsunami Early Warning System



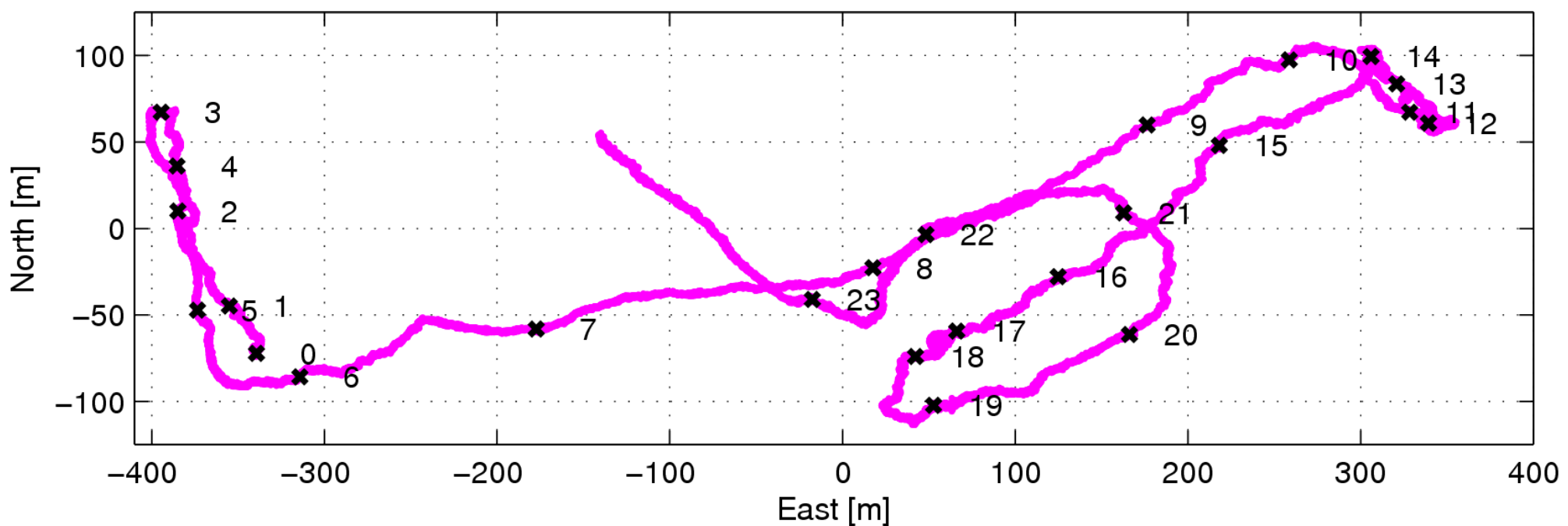
Tsunami-Boje (GPS/OBPU/Seismometer)



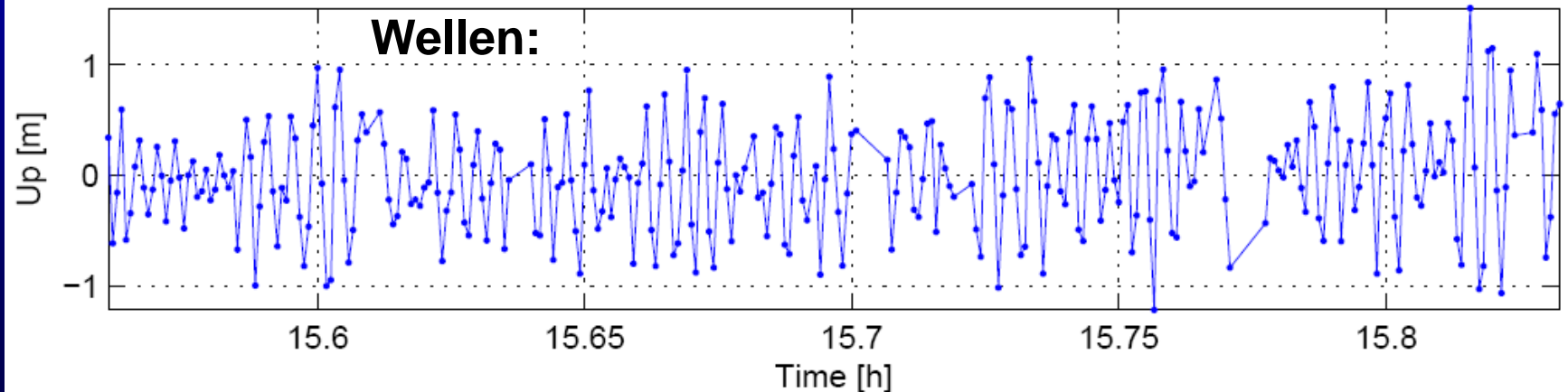
GFZ, Potsdam

GPS Tsunami-Boje: Bewegungen

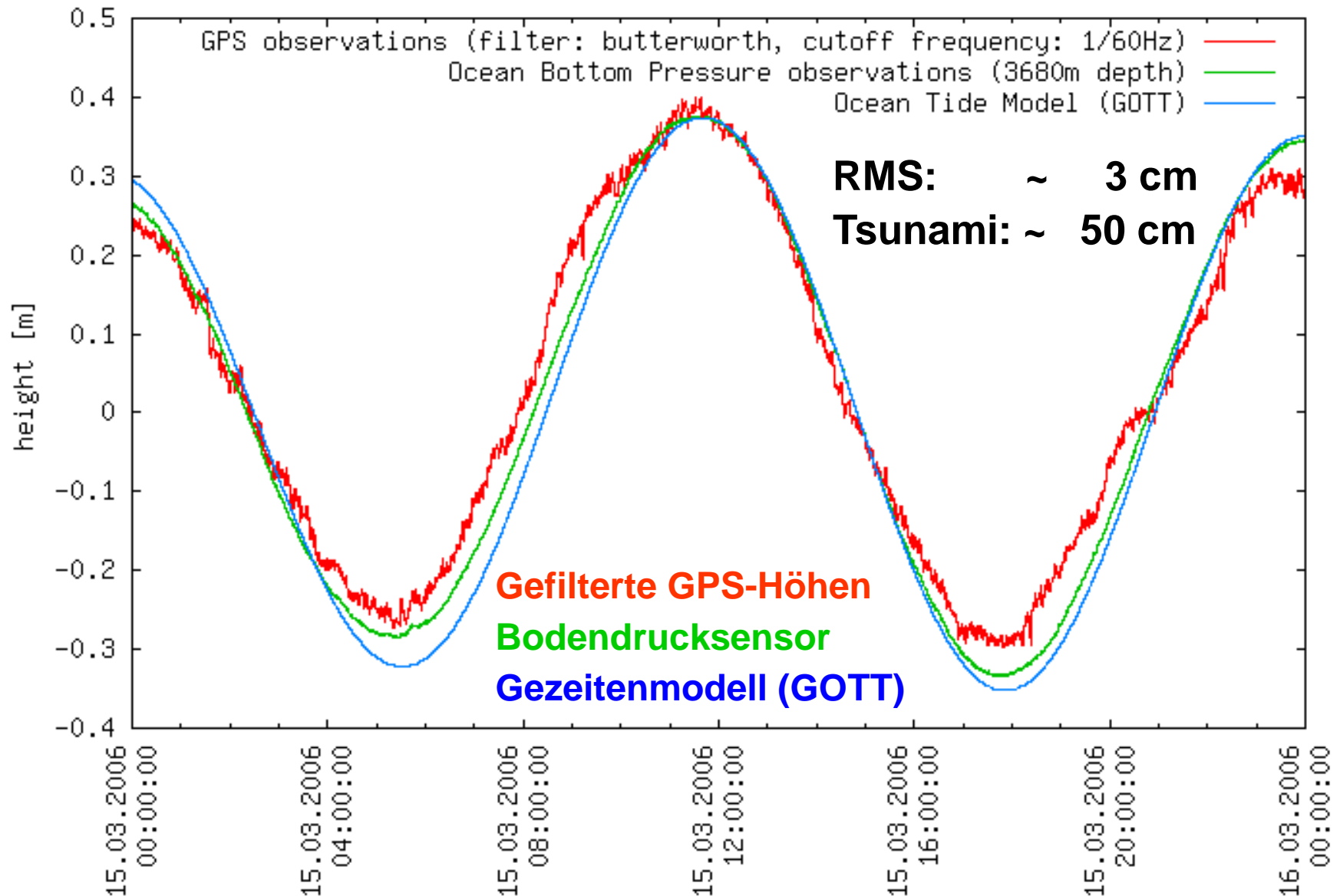
Horizontale Position (Tage):



Höhe:

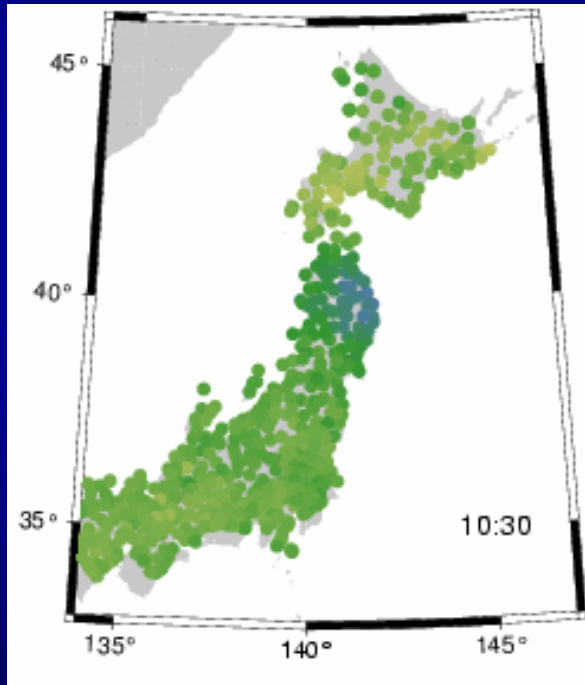


GPS Tsunami-Boje: Meereshöhe

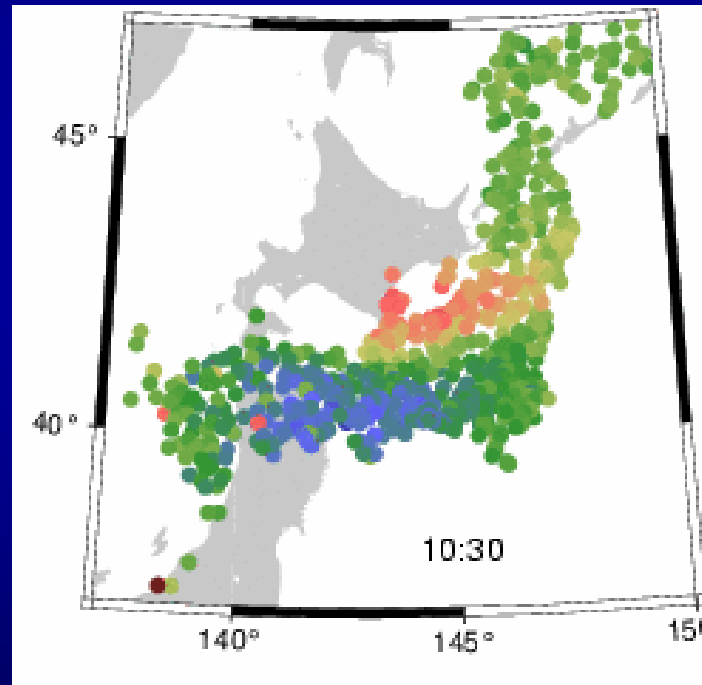


Erdbeben sichtbar in der Ionosphäre

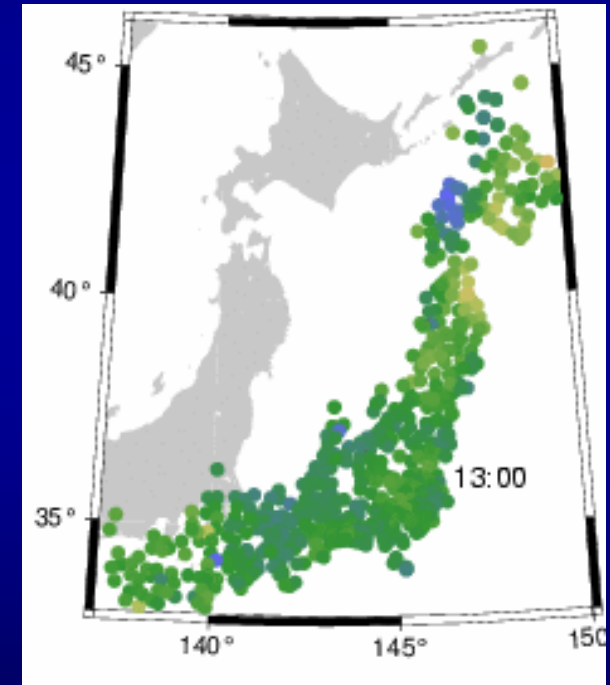
- Seismische Wellen breiten sich in der Ionosphäre aus
- 2003 Tokachi-Oki-Erdbeben, Hokkaido ($M_w=8.0$)
- Ionosphärische Verzögerung für verschiedene Satelliten, Stationen des japanischen GEONET



SVN 24



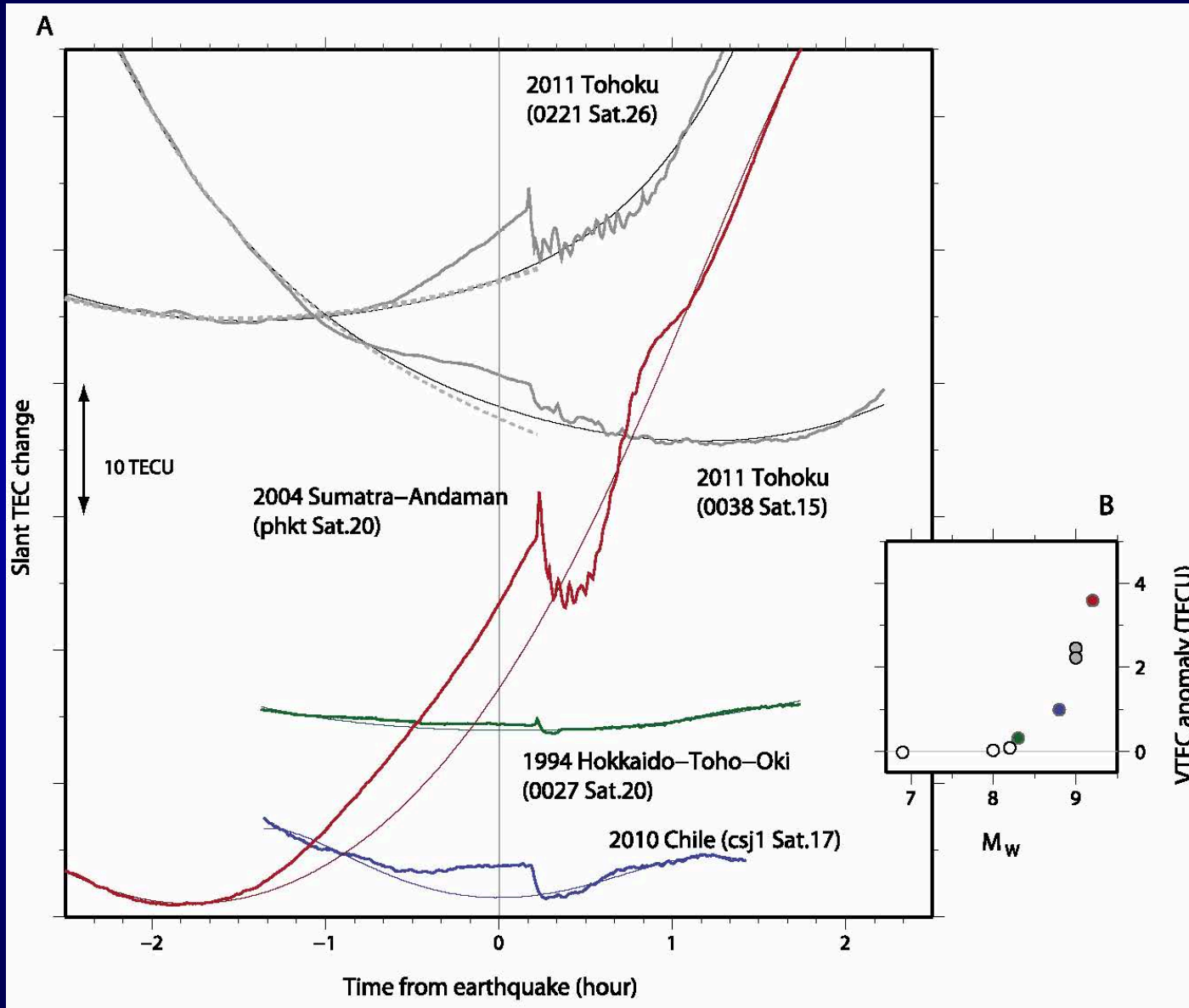
SVN 13



SVN 27

Source: Kosuke Heki, 2009

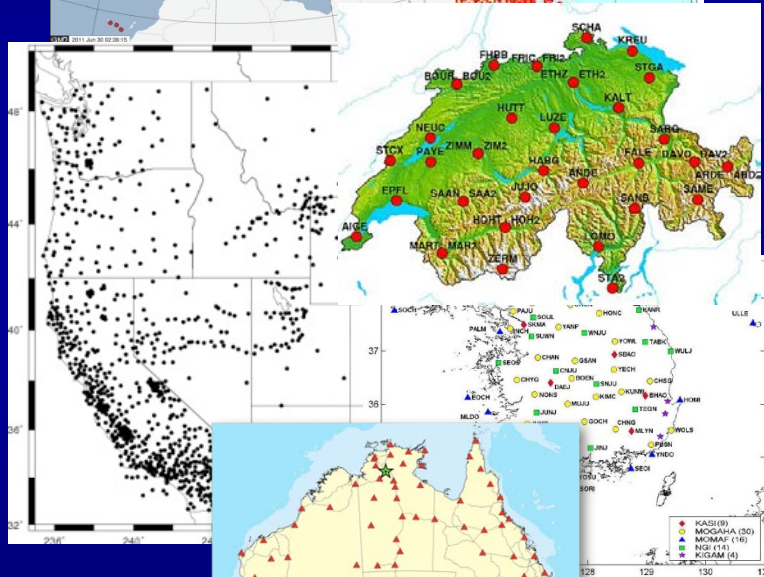
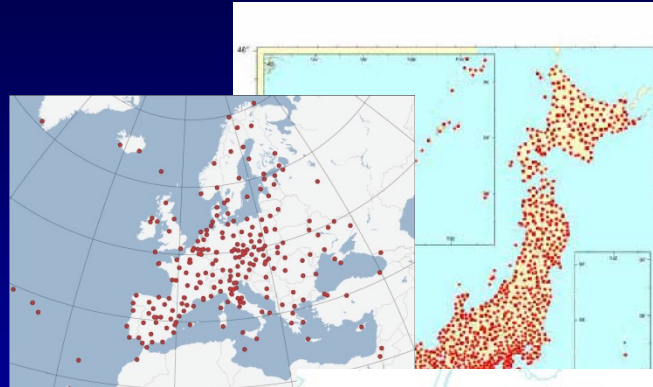
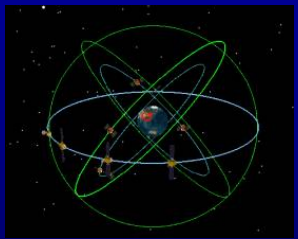
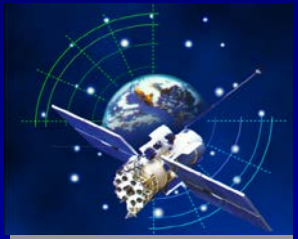
„Precursors“ (Vorläufer) für grosse Erdbeben ?



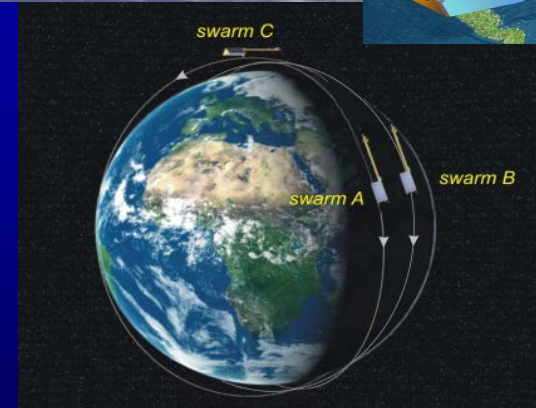
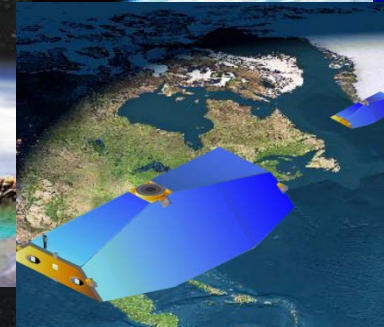
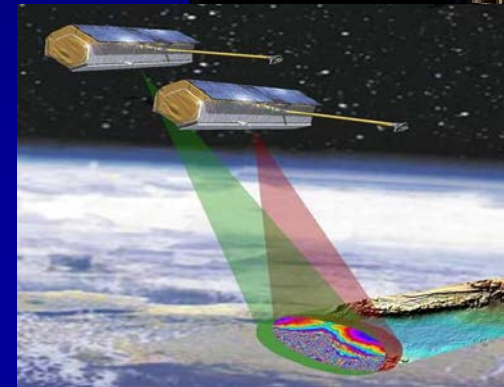
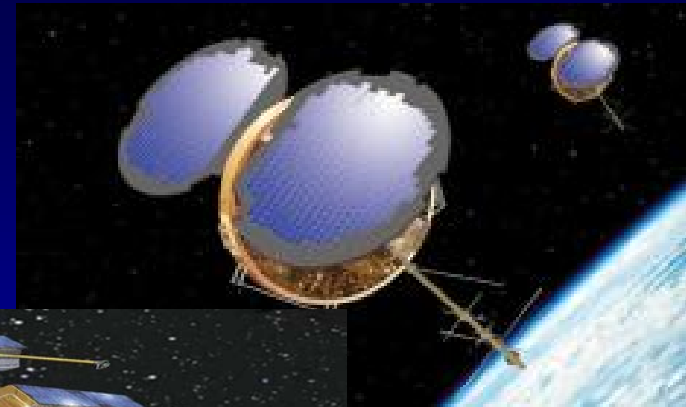
Änderungen im
Elektronen-
inhalt in
Satelliten-
richtung

Kosuke Heki, 2011

Blick in die Zukunft (2020)



GNSS-Netze
→ > 10'000 Stationen



**Satellitenkonstellationen,
Formationsflüge**

**GPS, GLONASS,
GALILEO, COMPASS**
→ > 120 Satelliten

Real-Time PPP Vorteile /Nachteile

Vorteile für Real-Time:

- Einfachere Logik: ein Empfänger – eine Welt, keine Basislinien nötig wie bei Doppeldifferenzen
- Weniger Informationsübertragung zum Empfänger nötig (Satellitenbahnen und -uhren, Biases)
- LEO-Satelliten (oder abgelegene Stationen): Doppeldifferenzen mit Bodennetz sehr kompliziert

Nachteile für Real-Time:

- Lange Konvergenzzeit nötig ($> \frac{1}{2}$ Stunde)
- Mehrdeutigkeitslösung noch nicht «instantan» ...
- Modellierungsaufwand wesentlich grösser

Ambiguity Resolution: Einführung

Gain in Accuracy when Fixing Ambiguities

1. Short observation sessions (few seconds to 1 hour):

- Huge gain in accuracy (factor 100) compared to a solution with real-valued Ambiguities (ambiguity-free).
- Precision of relative position is about 1 cm for short baselines. Precision of a solution with free ambiguities: ca. 1-2 m for very short observation intervals (< 10 minutes), ca. a few centimeters after one hour

2. Long observation sessions (> 12 hours):

- Gain in accuracy rather small compared to short sessions.
- Most significant improvement in the east component (ca. factor of 2). No significant improvement can be observed for the north and height components.

Ambiguity Resolution: Strategy 1

1. Short baseline (< 30 km) and short sessions (a few minutes, < 1 hour):

- Formal errors of the ambiguities (ambiguity-free solution) much larger than one wavelength
- Real-valued ambiguity may be off by a few cycles from the true integer value.
- The right integer cannot be determined directly (e.g. by rounding to the next integer).
- Strategy: **search algorithms**, which are searching and testing all possible combinations of ambiguity values in the vicinity of the real-valued ambiguities (e.g. FARA, Lambda method, ambiguity-function-method).

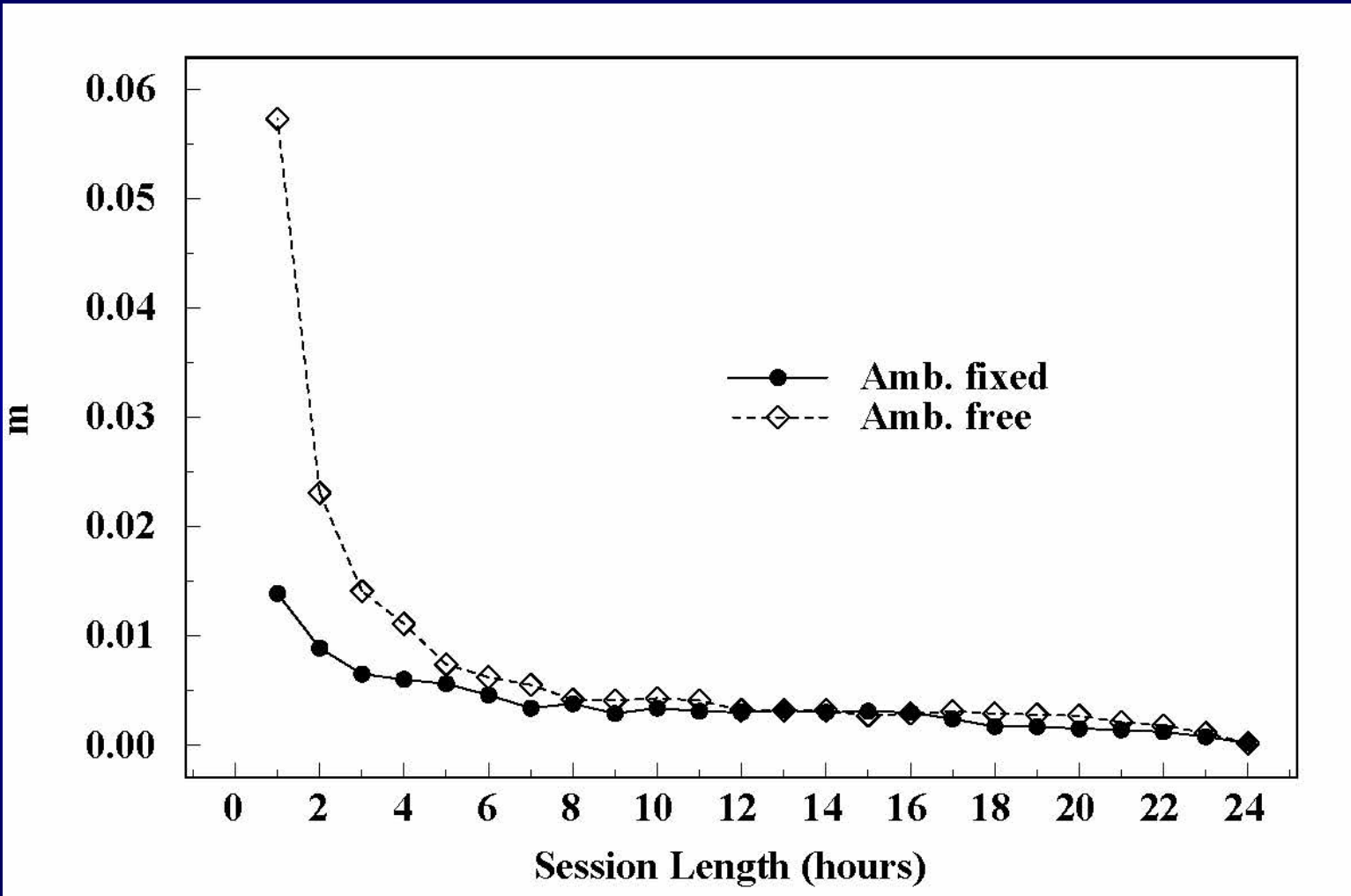
Ambiguity Resolution: Strategy 2

2. Long sessions (> 1 hour):

- Good geometry allows the decorrelation of station coordinates and ambiguities (and other parameters).
- Formal errors of the ambiguities are much smaller than 1 wavelength.
- Real-valued ambiguities can be rounded to the next integer (if certain statistical criteria are fulfilled).
- It has to be avoided that ambiguity are fixed to the wrong integer by chance → **iterative ambiguity fixing**.
- First, only the n best-determined ambiguities are fixed. Then the solution is iterated and the n best-determined of the remaining ambiguities are fixed, etc.

Ambiguity Resolution: kurze und lange Sessionen

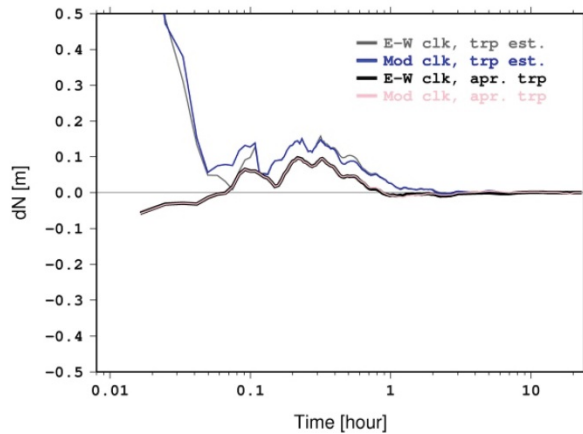
Europäisches Netz: Vergleich mit 24-Stunden-Lösung



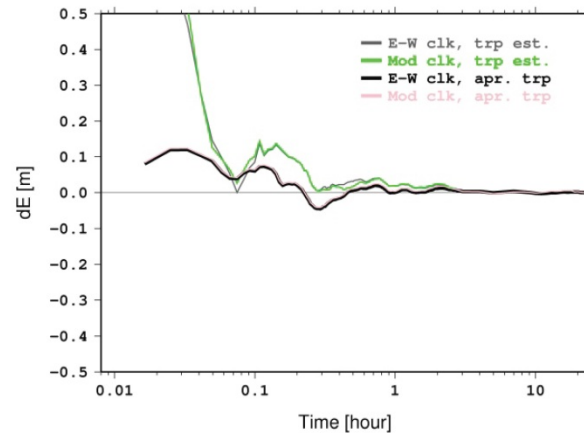
Source: Leos Mervart

PPP-Konvergenz-Zeit

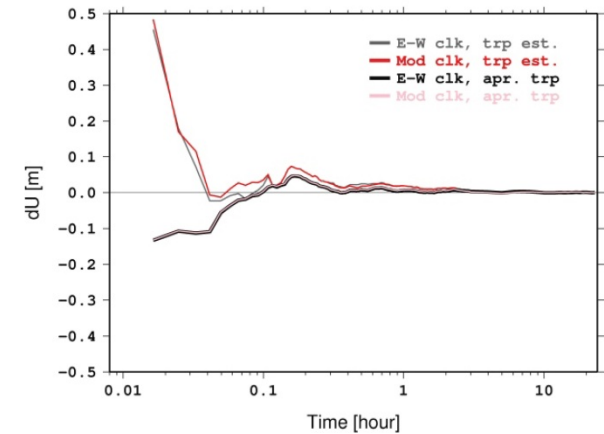
AMC2 on DOY 034



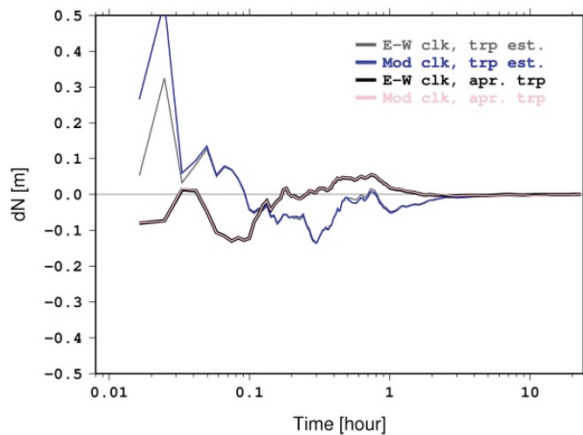
AMC2 on DOY 034



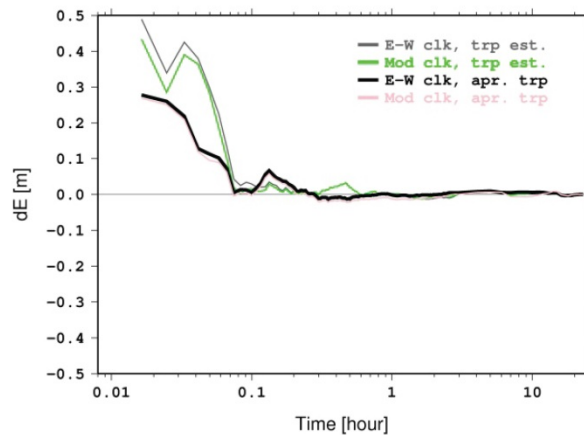
AMC2 on DOY 034



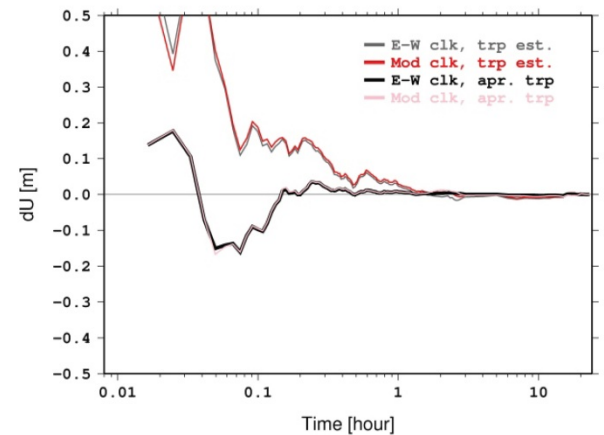
USNO on DOY 033



USNO on DOY 034



USNO on DOY 034



Konvergenz auf ein paar cm ~ 1 Stunde

Source: Orliac et al., 2012

Beobachtungsgleichung und Mehrdeutigkeiten

Phasen- und Code-Beobachtungsgleichung:

$$L_i^j = |\vec{r}_i(t_i) - \vec{r}^j(t_i - \tau_i^j)| + \delta\rho_{i,trp}^j + \delta\rho_{i,ion}^j + \delta\rho_{i,rel}^j + \delta\rho_{i,mul}^j + c\delta t_i - c\delta t^j + \lambda(N_i^j - \alpha^j + \alpha_i) + \epsilon_i^j$$

$$P_i^j = |\vec{r}_i(t_i) - \vec{r}^j(t_i - \tau_i^j)| + \delta\rho_{i,trp}^j - \delta\rho_{i,ion}^j + \delta\rho_{i,rel}^j + \delta\rho_{i,mul,C}^j + c\delta t_i - c\delta t^j - c\beta^j + c\beta_i + \epsilon_{i,C}^j$$

Phasen-Mehrdeutigkeit ist nicht ganzzahlig:

$$b_i^j = \lambda(N_i^j - \alpha^j + \alpha_i)$$

N_i^j : ganzzahlige Mehrdeutigkeit

α^j : Satelliten-Bias

α_i : Empfänger-Bias

λ : Wellenlänge

Ambiguities auf Doppeldifferenz-Ebene

Doppeldifferenz-Mehrdeutigkeit ist ganzzahlig:

$$\nabla \Delta b_{AB}^{jk} = (b_A^j - b_B^j) - (b_A^k - b_B^k) + \lambda (N_A^j - \alpha^j + \alpha_A)$$

GLONASS

$$\begin{aligned} \nabla \Delta b_{AB}^{jk} &= +\lambda^j (N_A^j - \alpha^j + \alpha_A) \\ &\quad - \lambda^j (N_B^j - \alpha^j + \alpha_B) \\ &\quad - \lambda^k (N_A^k - \alpha^k + \alpha_A) \\ &\quad + \lambda^k (N_B^k - \alpha^k + \alpha_B) \\ &= \lambda^j (N_A^j - N_B^j) - \lambda^k (N_A^k - N_B^k) + \Delta \lambda^{jk} (\alpha_A - \alpha_B) \\ &= \lambda^j (N_A^j - N_B^j) - \lambda^j (N_A^k - N_B^k) \\ &\quad + (\lambda^j - \lambda^k) (N_A^k - N_B^k) + \Delta \lambda^{jk} (\alpha_A - \alpha_B) \\ &= \boxed{\lambda^j \nabla \Delta N_{AB}^{jk}} + \boxed{\Delta \lambda^{jk} \Delta N_{AB}^k} + \Delta \lambda^{jk} (\alpha_A - \alpha_B) \end{aligned}$$

GPS

Undifferenzierte Mehrdeutigkeitslösung: Melbourne-Wübbena → Narrow-Lane

Vereinfachte Beobachtungsgleichung für Phase und Code

$$L_{i,1}^j = \rho_i^{\prime j} + I_{i,1}^j + \lambda_1(N_{i,1}^j - \alpha_1^j + \alpha_{i,1})$$

$$L_{i,2}^j = \rho_i^{\prime j} + \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{i,1}^j + \lambda_2(N_{i,2}^j - \alpha_2^j + \alpha_{i,2})$$

$$P_{i,1}^j = \rho_i^{\prime j} - I_{i,1}^j - c\beta_1^j + c\beta_{i,1}$$

$$P_{i,2}^j = \rho_i^{\prime j} - \frac{f_1^2}{f_2^2} I_{i,1}^j - c\beta_2^j + c\beta_{i,2}$$

Phase (L_1, L_2)

Code (P_1, P_2)

$\rho_i^{\prime j}$: Summe aller Geometrie-Terme (inkl. Uhren, Relativität)

$I_{i,1}^j$: Ionosphärische Verzögerung in L_1

$\alpha_{i,1}, \alpha_{i,2}, \beta_{i,1}, \beta_{i,2}$: Empfänger-Biases für Phase und Code

$\alpha_1^j, \alpha_2^j, \beta_1^j, \beta_2^j$: Satelliten-Biases für Phase und Code

Wide-Lane und Melbourne-Wübbena Linearkombination

$$\begin{aligned}
 L_{i,5}^j &= \frac{f_1}{f_1 - f_2} L_{i,1}^j - \frac{f_2}{f_1 - f_2} L_{i,2}^j \\
 &= \boxed{\rho_i^j - \frac{f_1}{f_2} I_{i,1}^j} + \boxed{\frac{c}{f_1 - f_2}} (N_{i,1}^j - N_{i,2}^j - \alpha_1^j + \alpha_{i,1} + \alpha_2^j - \alpha_{i,2})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_{i,5}^j &= \frac{f_1}{f_1 + f_2} P_{i,1}^j + \frac{f_2}{f_1 - f_2} P_{i,2}^j \\
 &= \boxed{\rho_i^j - \frac{f_1}{f_2} I_{i,1}^j} - c \beta_5^j + c \beta_{i,5}
 \end{aligned}$$

$$\lambda_5 = c/f_5 = \boxed{c/(f_1 - f_2)} = 86 \text{ cm} \quad ; \quad f_5 = f_1 - f_2$$

$$\begin{aligned}
 MW_i^j &= L_{i,5}^j - P_{i,5}^j = \lambda_5 (N_{i,1}^j - N_{i,2}^j - \alpha_1^j + \alpha_{i,1} + \alpha_2^j - \alpha_{i,2}) + c \beta_5^j - c \beta_{i,5} \\
 &= \lambda_5 (N_{i,5}^j - \alpha_5^j + \alpha_{i,5})
 \end{aligned}$$

Narrow-Lane in der ionosphären-freien Linearkombination

Ionosphären-freie Linearkombination (Phase):

$$\begin{aligned} L_{i,3}^j &= \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{i,1}^j - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_{i,2}^j \\ &= \rho_i^j + \frac{c}{f_1^2 - f_2^2} [f_1(N_{i,1}^j - \alpha_1^j + \alpha_{i,1}) - f_2(N_{i,2}^j - \alpha_2^j + \alpha_{i,2})] \end{aligned}$$

Einführung von $N_2 = N_1 - N_5$ in L_3 ergibt:

$$L_{i,3}^j = \rho_i^j + \frac{c}{f_1 + f_2} (N_{i,1}^j - \alpha_3^j + \alpha_{i,3}) - \frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{i,5}^j$$

$$\lambda_3 = \frac{c}{f_1 + f_2} = 10.7 \text{ cm}$$

Ambiguity Resolution in PPP

1. Global or regional processing (network of stations):

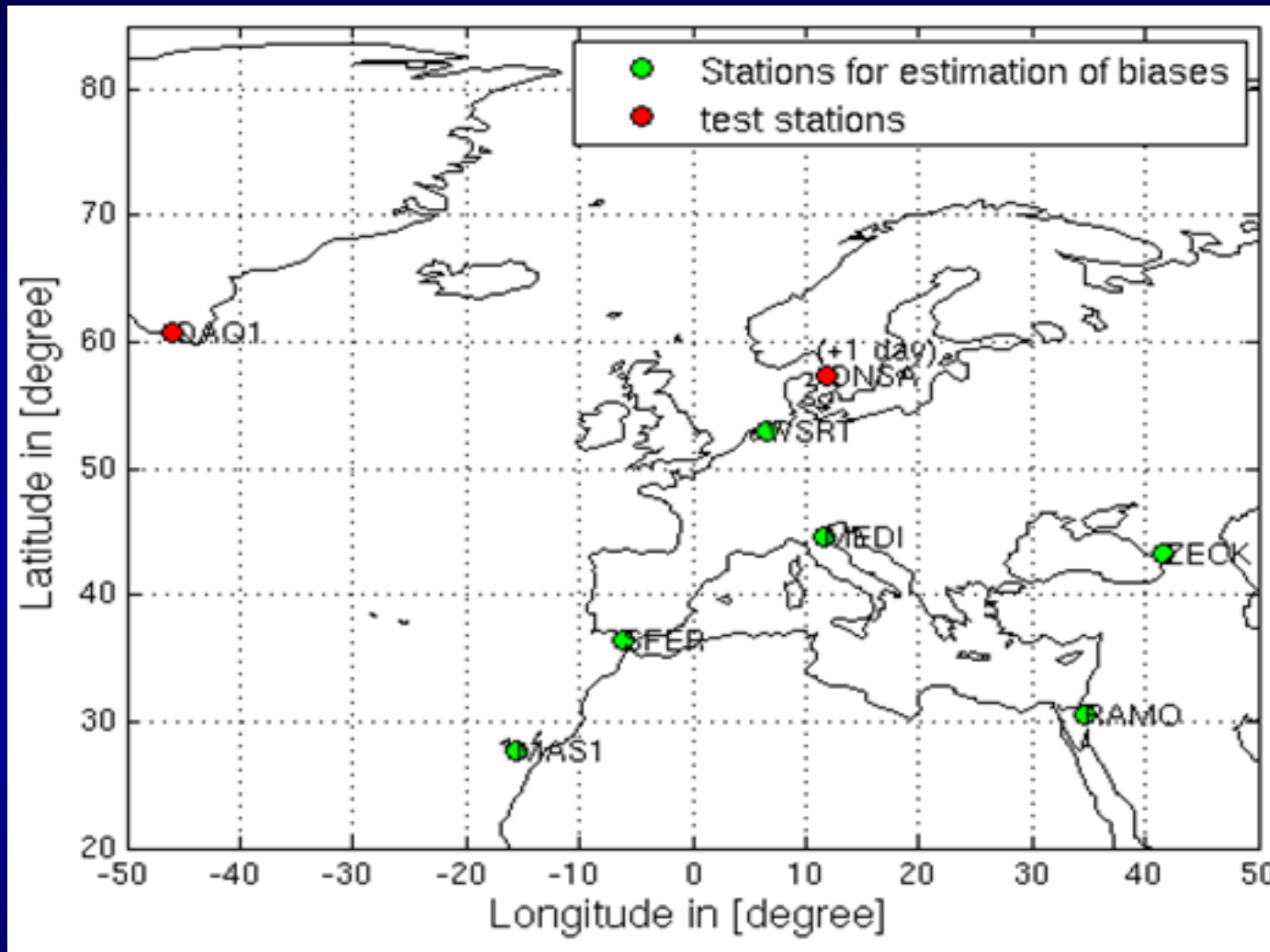
- Estimation of the wide-lane ambiguities N_5 and all the satellite and receiver N_5 -biases using MW
- Introduction of the wide-lane ambiguities into L_3 .
- Estimation of narrow-lane N_1 ambiguities and all the satellite and receiver N_1 -biases using L_3

2. PPP processing (one receiver):

- Introduction of satellite N_5 -biases. Estimation of receiver N_5 -bias and N_5 ambiguities with MW. Fixing of N_5
- Introduce N_5 and the satellite N_1 -biases into L_3 . Estimate receiver N_1 -bias and the N_1 ambiguities. Fixing of N_1

Ambiguity Resolution: Tests mit echten Daten

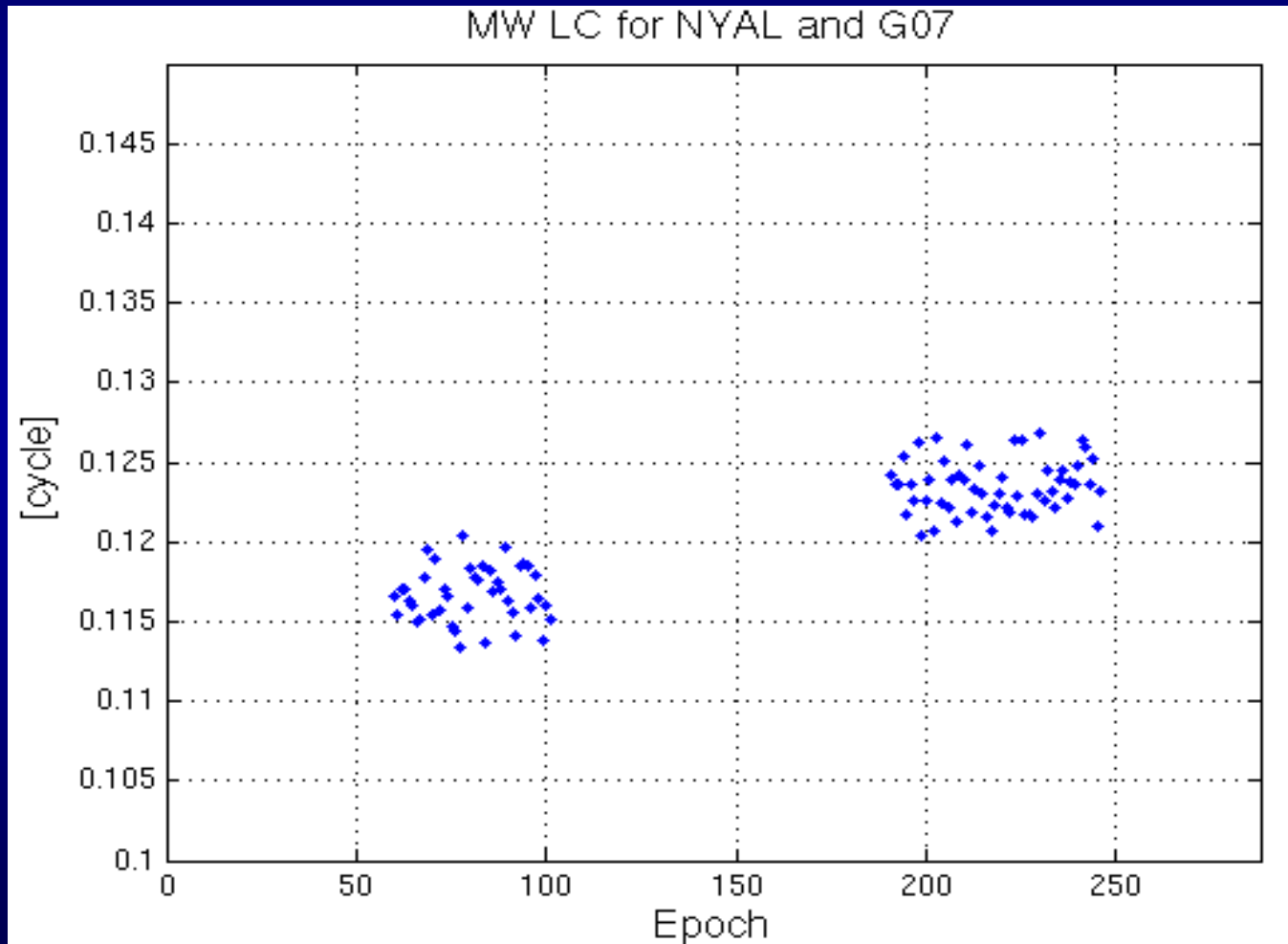
PPP-Stationsnetz: Ambiguity Resolution



1. Schätzung des Biases: 8 Stationen in Europa am Feb. 1, 2011
2. PPP-Test für Biases: QAQ1 am Feb. 1, ONSA am Feb. 2, 2011

Melbourne-Wübbena Linearkombination (MW)

$$MW_i^j = \lambda_5 (N_{i,5}^j + \alpha_i + \alpha^j)$$



- 24-h Daten
- Phase-geglättete Code-Beob.
- P_1 - C_1 Biases angebracht
- Geometrie-frei
- Ionosphären-frei

Initialisation

Annahmen:

1. $\alpha_1 = 0$
2. $\alpha^j \in [-0.5, 0.5]$ cycles
3. $\gamma_1^j = 0$

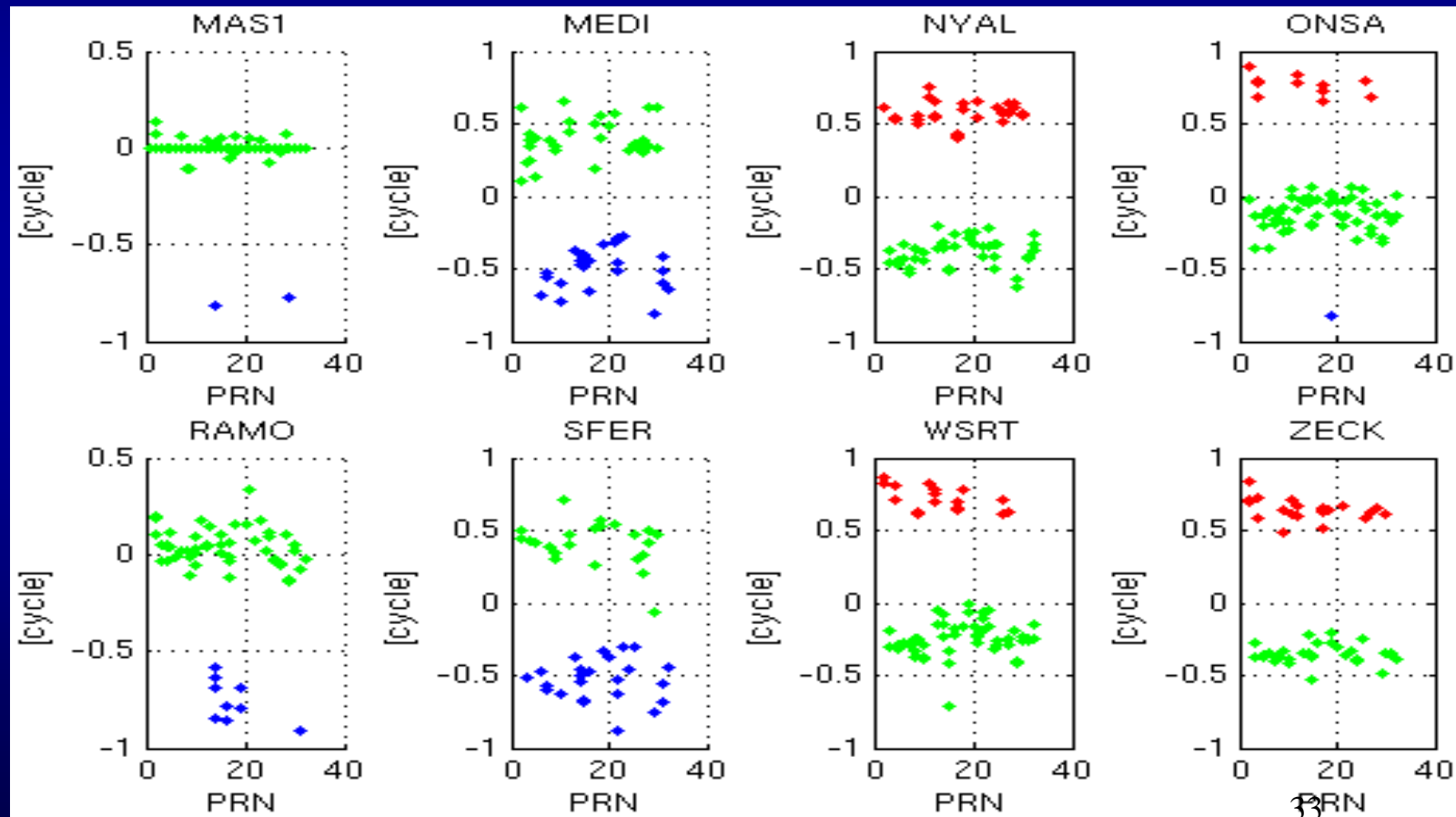
$$\Rightarrow \text{frac}(MW_i^j / \lambda_5) = \alpha_i + \alpha^j + \gamma_i^j$$

$$\text{with } \gamma_i^j \in [-1, 0, 1]$$

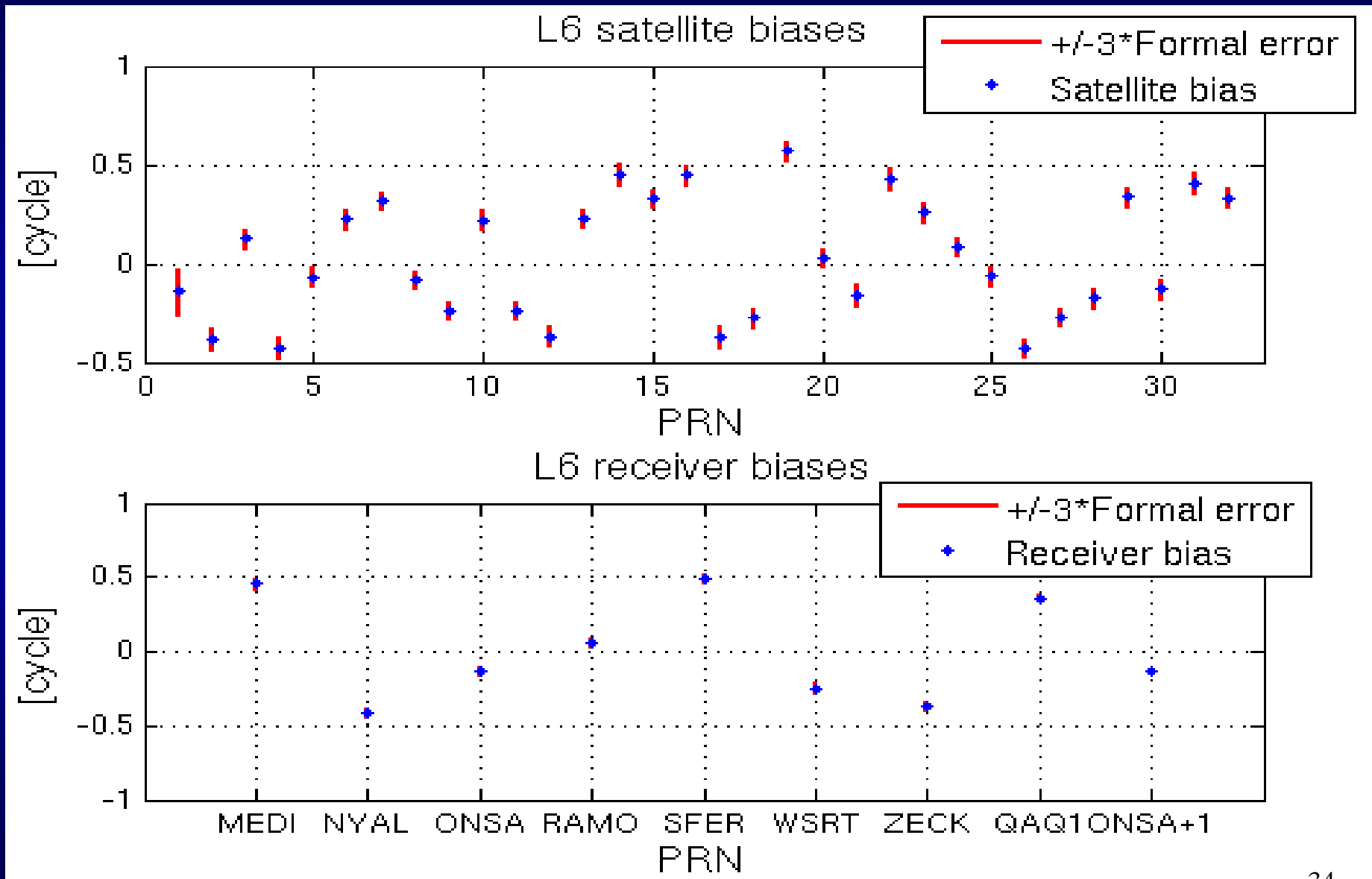
$$\Rightarrow \text{frac}(MW_i^j / \lambda_5) - \text{frac}(MW_1^j / \lambda_5) = \alpha_i + \gamma_i^j$$

Total:
 $n_{\text{sta}} + n_{\text{sat}}$ **Biases**
 $n_{\text{sta}} \cdot n_{\text{sat}}$ **Amb.**

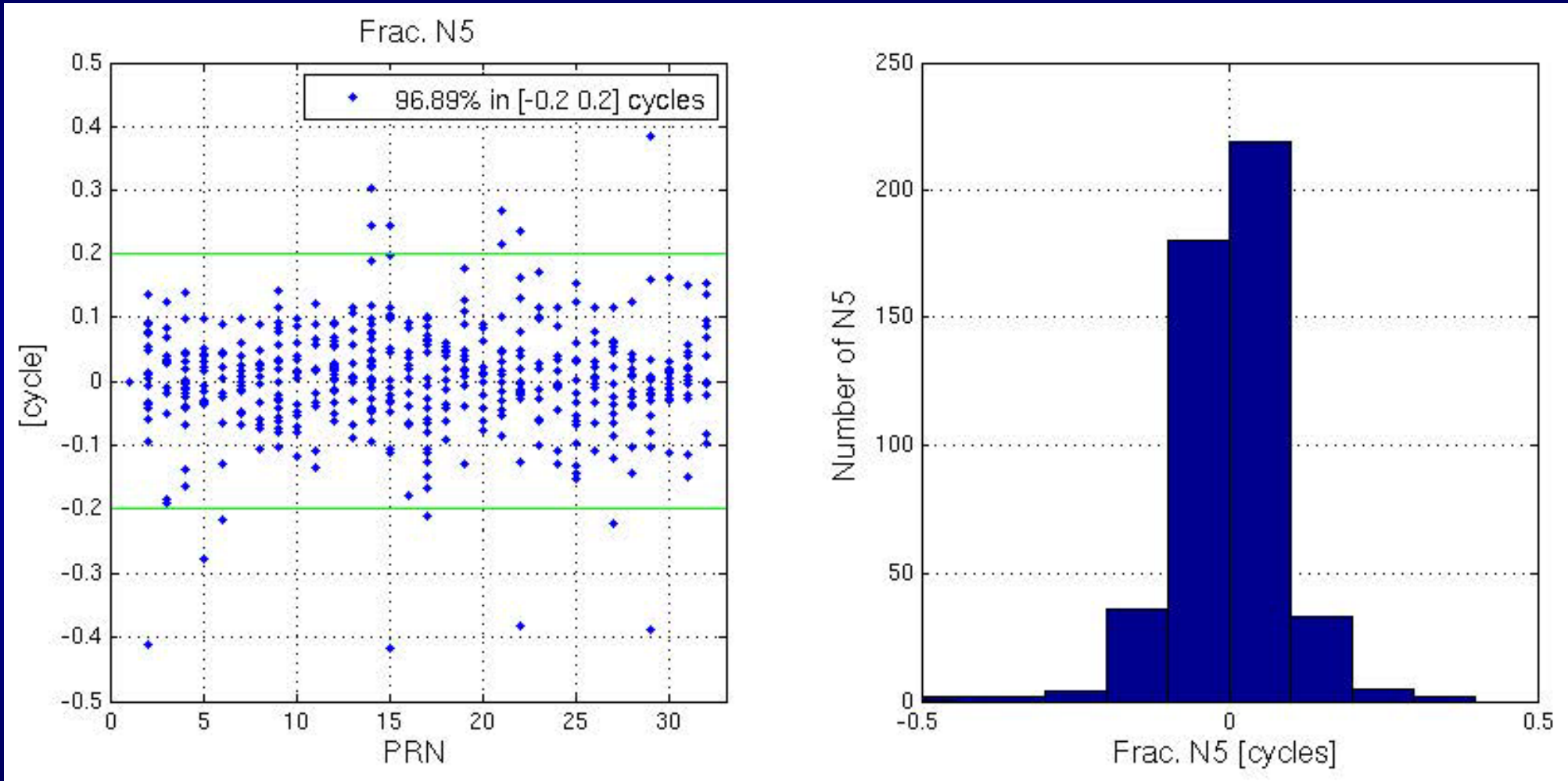
Hier: $n_{\text{sta}} = 8$
 $n_{\text{sat}} = 31$



Melbourne-Wübbena (L6): Satelliten-/ Empfänger-Biases

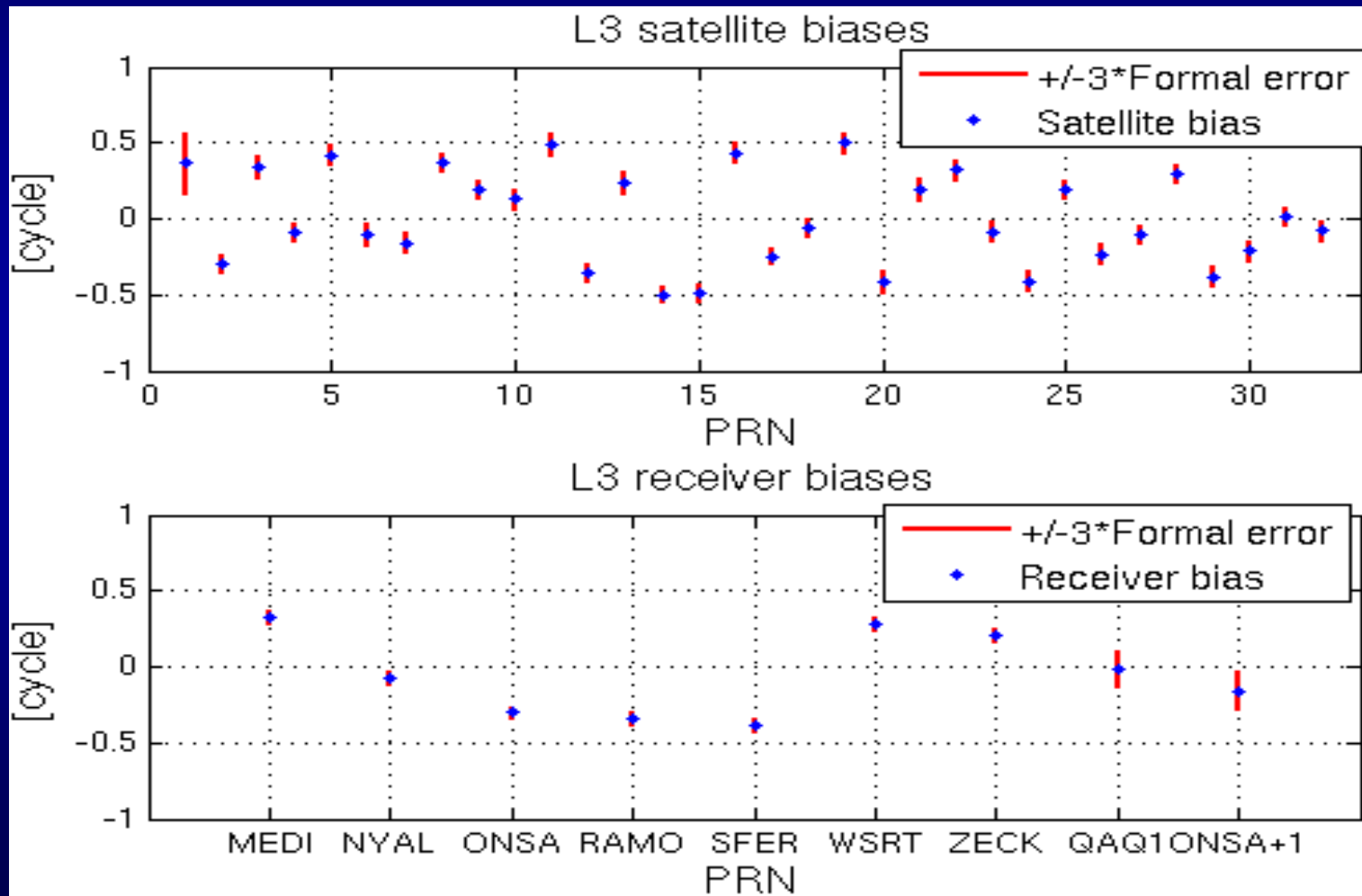


Bruchteile der Wide-Lane Ambiguities $N_5 = N_1 - N_2$



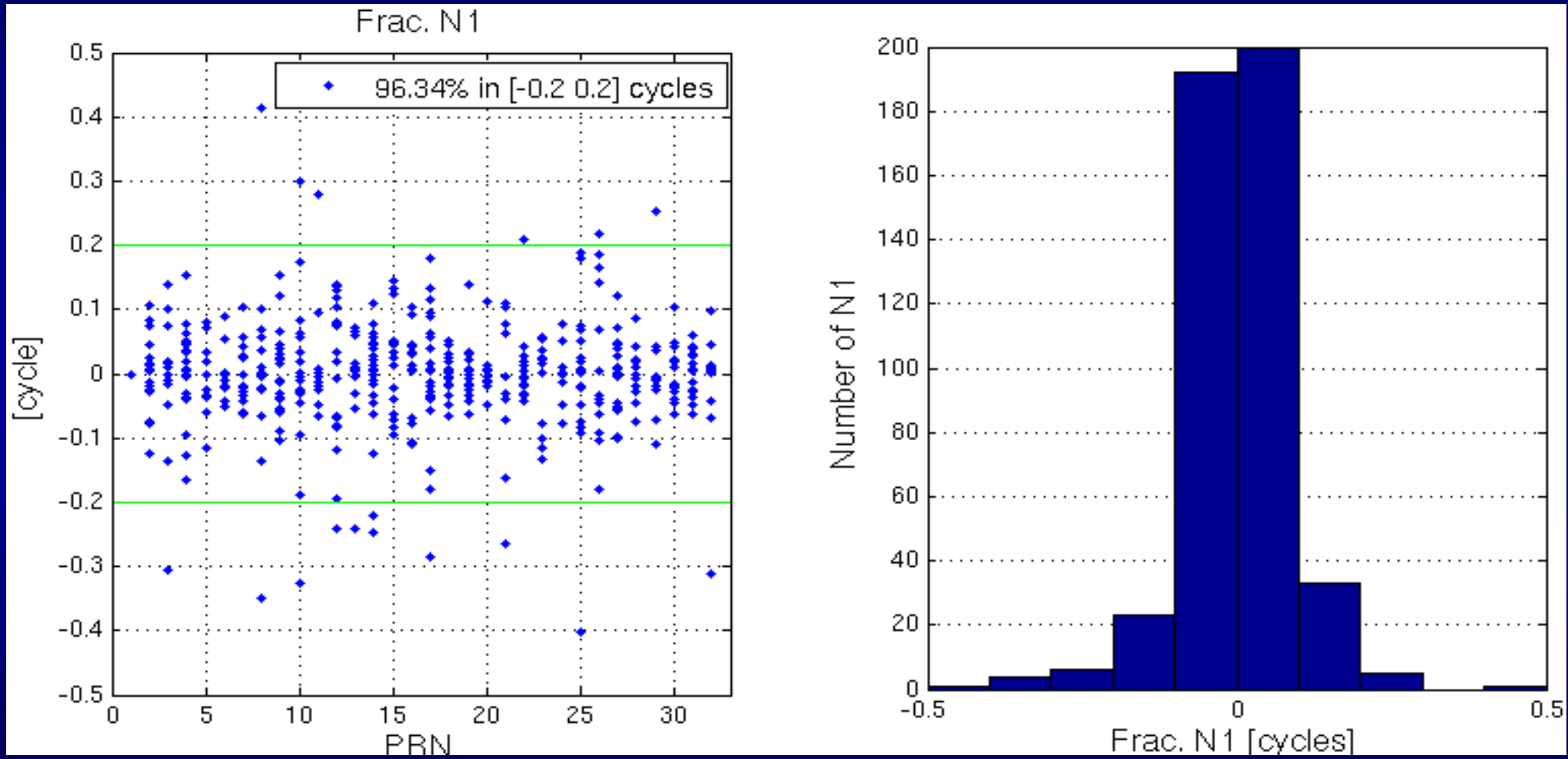
Ionosphären-freie Linearkombination (L₃)

$$L_{3i}^j = \rho_i^j + c \frac{f_2}{f_1^2 - f_2^2} N_{5i}^j + \frac{c}{f_1 + f_2} N_{1i}^j + \alpha_i + \alpha^j$$



- Einführen von $\text{Int}(N_{5i}^j)$
- Schätzen von α_i und α^j für L₃

Bruchteile der Narrow-Lane Ambiguities N_1



Testen der berechneten Biases

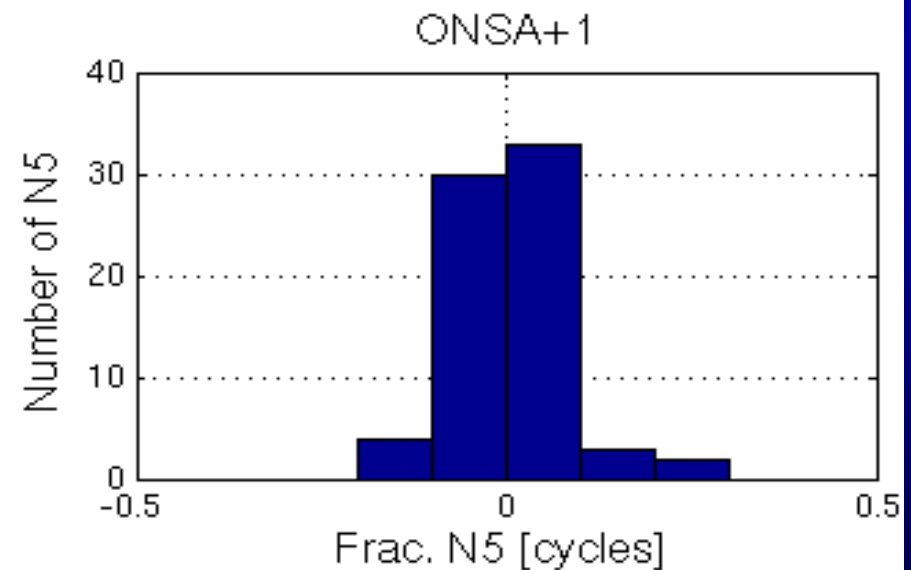
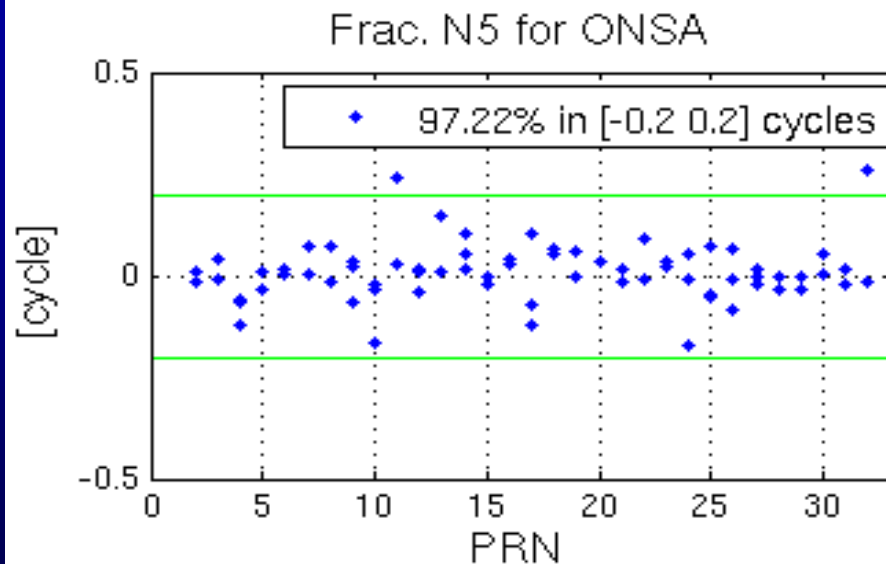
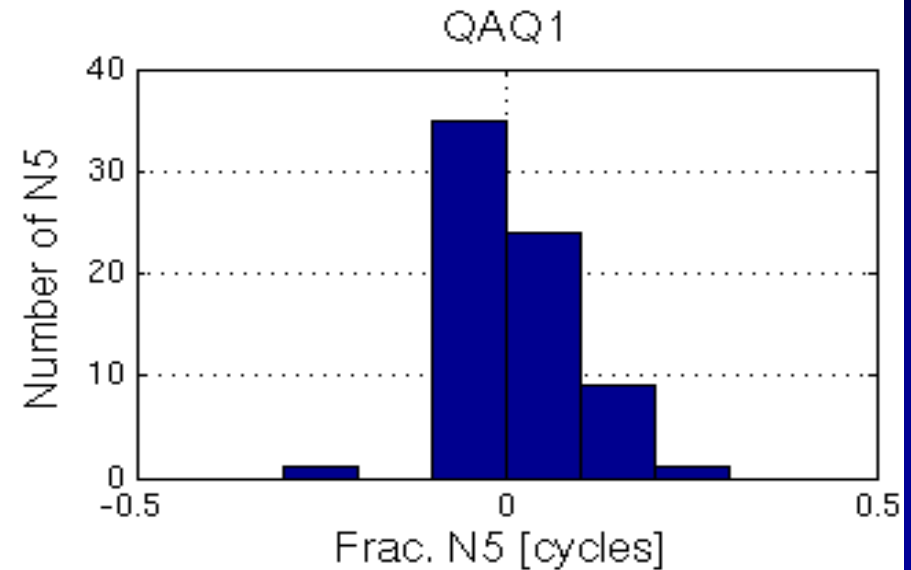
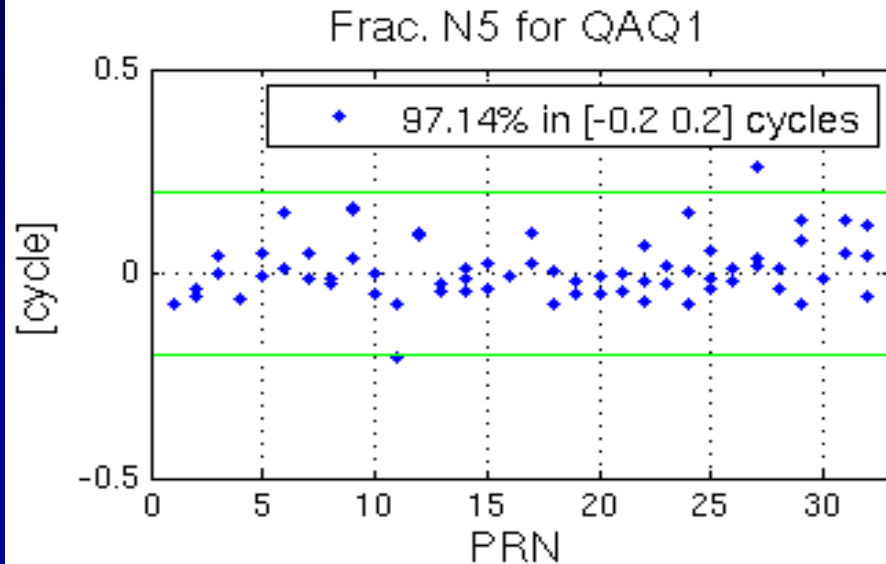
Vorgehen:

- **Geschätzte Satelliten-Biases direkt eingeführt**
- **Nur ein Empfänger-Bias wird bestimmt für jede Test-Station**

Test-Stationen:

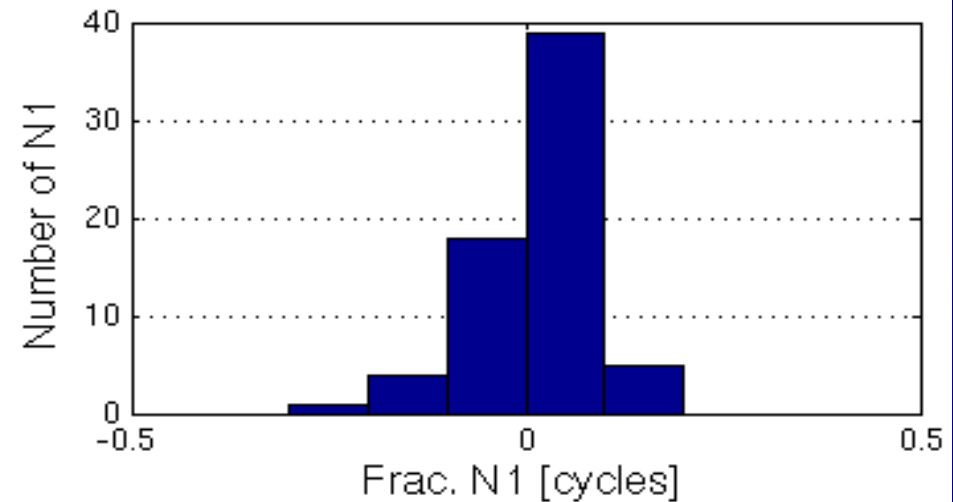
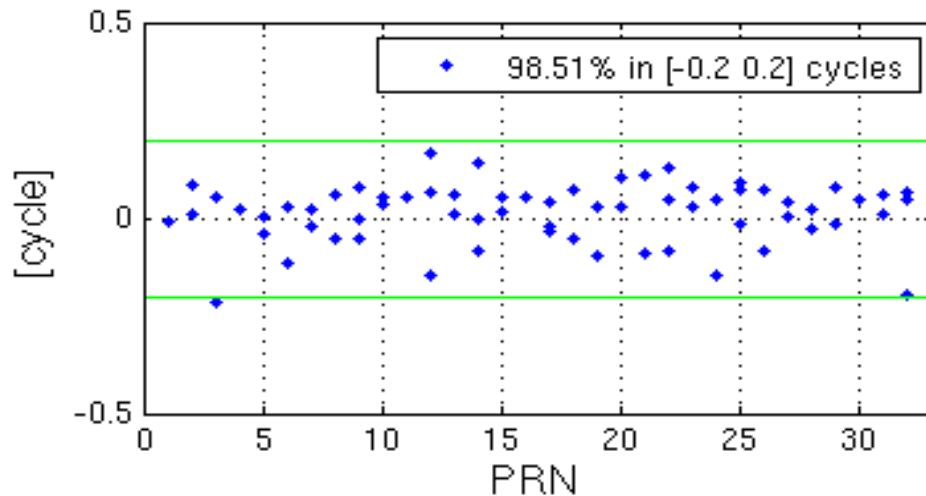
- **Eine Station ausserhalb des Netzes (QAQ1) am gleichen Tag**
- **Eine Station innerhalb des Netzes (ONSA) am darauffolgenden Tag**

Bruchteile $N_5 = N_1 - N_2$ für die Test-Stationen

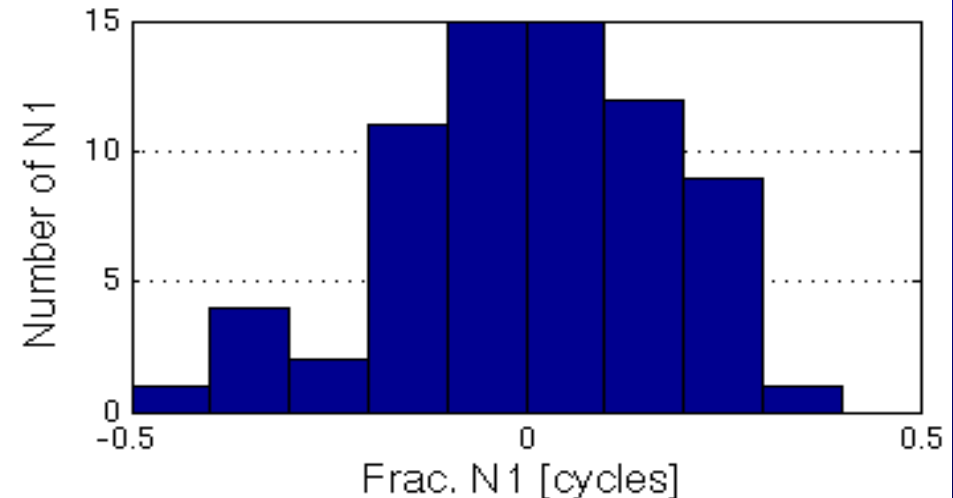
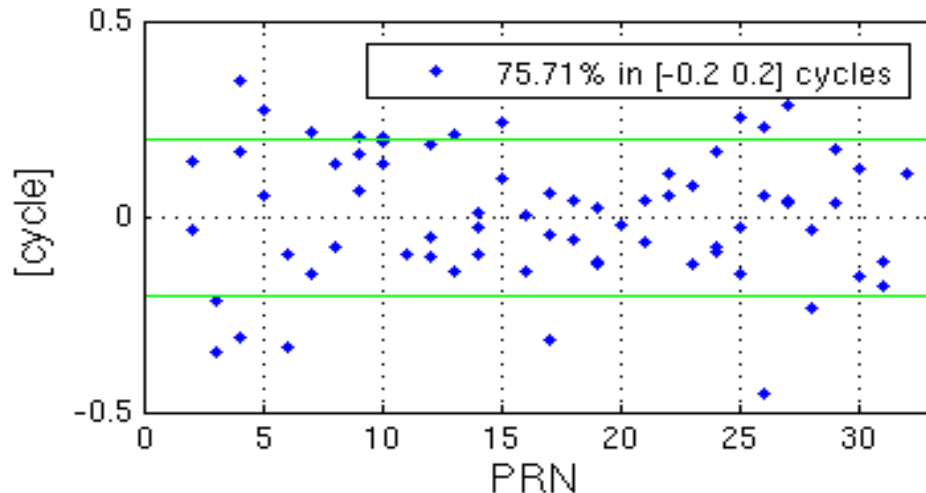


Bruchteile N_1 für die Test-Stationen

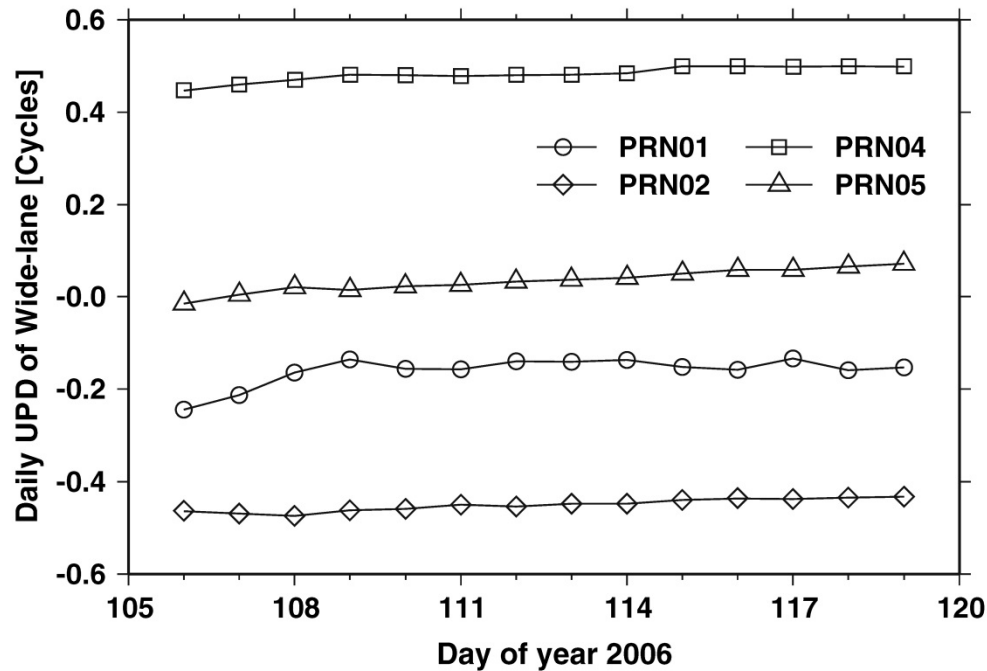
Frac. N_1 for QAQ1



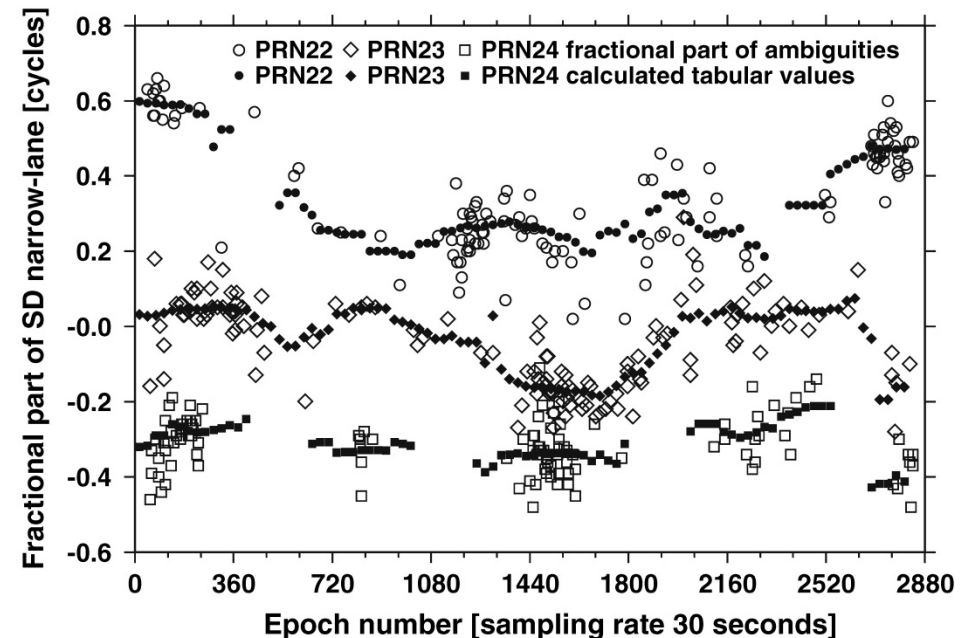
Frac. N_1 for ONSA+1



Stabilität der Wide-Lane und Narrow-Lane Biases



Narrow-lane Satelliten-Biases



Wide-lane Satelliten-Biases

Source: Ge et al., 2008

Undifferenzierte Ambiguity Resolution Methoden

Fractional Cycle Biases (FCB): (hier vorgestellt)

- Gabor and Nerem, 1999 (ION Proceedings)
- Ge et al., 2008 (JoG)
- Geng et al., 2009 (GPS Solutions)

Integer Recovery Clocks (IRC):

- Laurichesse and Mercier, 2007 (ION Proceedings)
- Delporte et al., 2007 (IEEE Frequency Control)
- Laurichesse et al., 2009 (Navigation)

Decoupled Clock Approach:

- Collins, 2008 (ION Proceeding)
- Collins et al., 2010 (Navigation)

Undifferenzierte Ambiguity Resolution Probleme

- Stabilität der Satelliten-Biases, insbes. für L_3 (schnelles Aufdatieren nötig)
- Alle Methoden verwenden Melbourne-Wübbena (\rightarrow Code Rauschen)
- Viele Epochen nötig, um die formalen Fehler der N_5 -Ambiguities zu verkleinern:

$$\sigma(MW) \approx \sqrt{\frac{f_1^2}{(f_1 + f_2)^2} + \frac{f_2^2}{(f_1 + f_2)^2}} \sigma(P_1) \approx 0.51 \sigma(P_1)$$

$$\sigma(N_5) \approx 0.51 \frac{1}{\sqrt{n_{epo}}} \frac{\sigma(P_1)}{\lambda_5}$$

$$n_{epo} \approx 100 \text{ für } \sigma(N_5) = 0.05$$

- Schnellste PPP-Algorithmen fixieren Ambiguities in etwa 15-20 Minuten (relative Positionierung: 1-10 sec)

Real-Time PPP Software at IGP

Real-Time PPP Software at IGP/ETH Zurich

Generelle Charakteristika:

- Programmiersprache: Java
- Algorithmus: Kalman filter
- Parameter: konstant, stochastische Prozesse
- Beobachtungen: alle verfügbaren Messungen (Phase und Code auf zwei oder mehr Frequenzen)
- Keine Linearkombinationen
- Real-Time (data streams) und Post-Processing (RINEX-Dateien)
- IGS Real-Time Datenströme noch nicht eingeführt (insbesondere Real-Time Satellitenuhren)

RT-PPP Software: geschätzte Parameter

Geschätzte Parameter:

- Empfängerkoordinaten: **statisch** → **konstant**
→ **jede Epoche unabhängige Schätzung**
- Empfängeruhr: **jede Epoche unabhängige Schätzung**
- Phase ambiguities: **konstant**
- Troposphärenverzögerung: **Random Walk mit**
 $\sigma = 5 \text{ cm}/\sqrt{h}$
- Ionosphärenkorrekturen: **pro Station, Satellit und Epoche**

RT-PPP Software: Observation Modelling

Modelling (checked with Bernese GPS Software simulations):

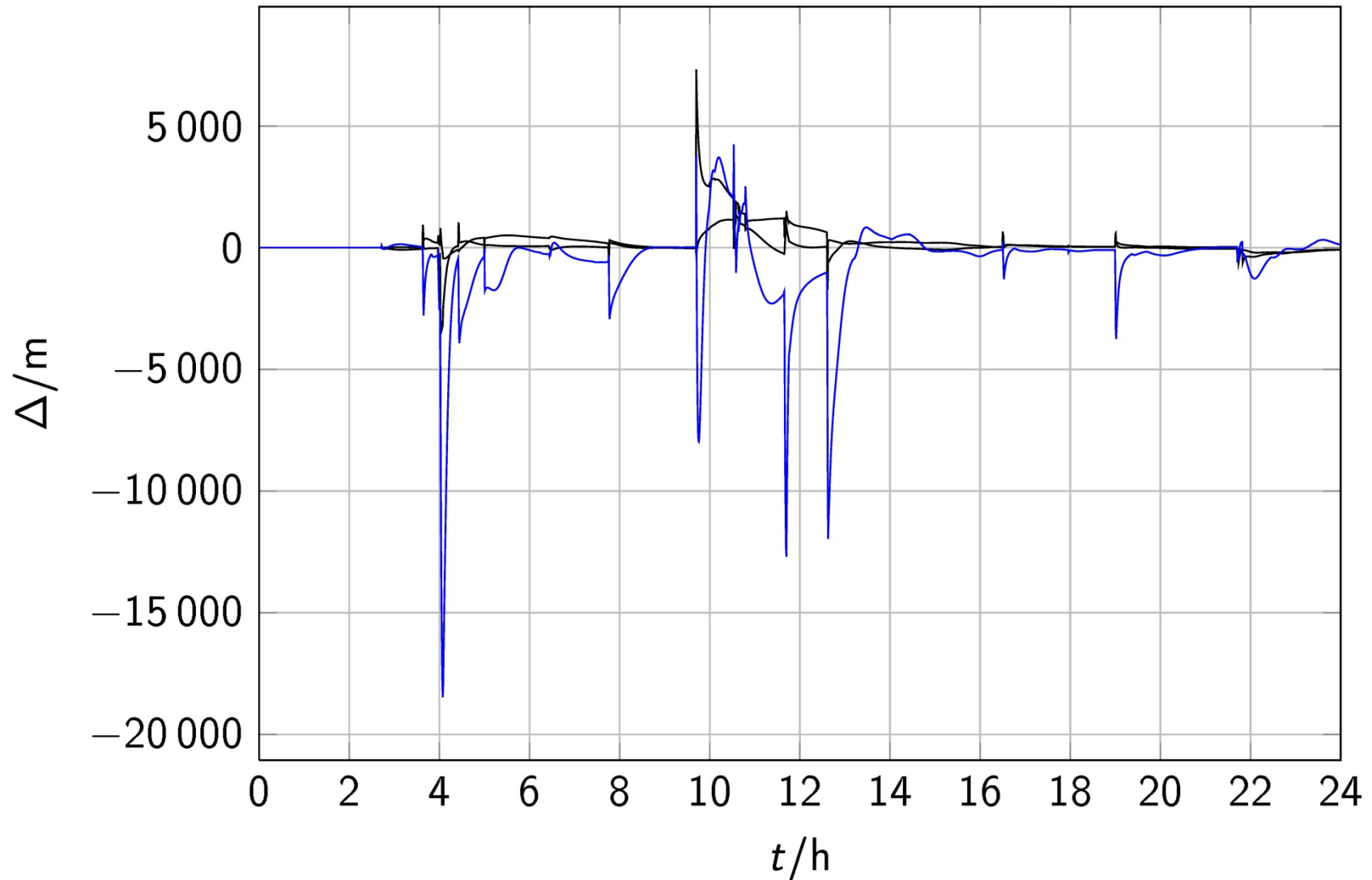
- Solid Earth Tides (IERS Conventions 2010)
- Satellite antenna phase center offsets / variations (IGS antex)
- Receiver antenna phase center offsets / variations (IGS antex)
- General and special relativistic correction for satellite clocks
- Relativistic propagation correction
- A priori dry troposphere delay computed from pressure and temperature model (Vienna GPT function)
- Mapping functions (Vienna mapping functions for dry and wet delay)
- Phase wind-up (implementation these days), ocean loading

Demonstration: RT-PPP Software

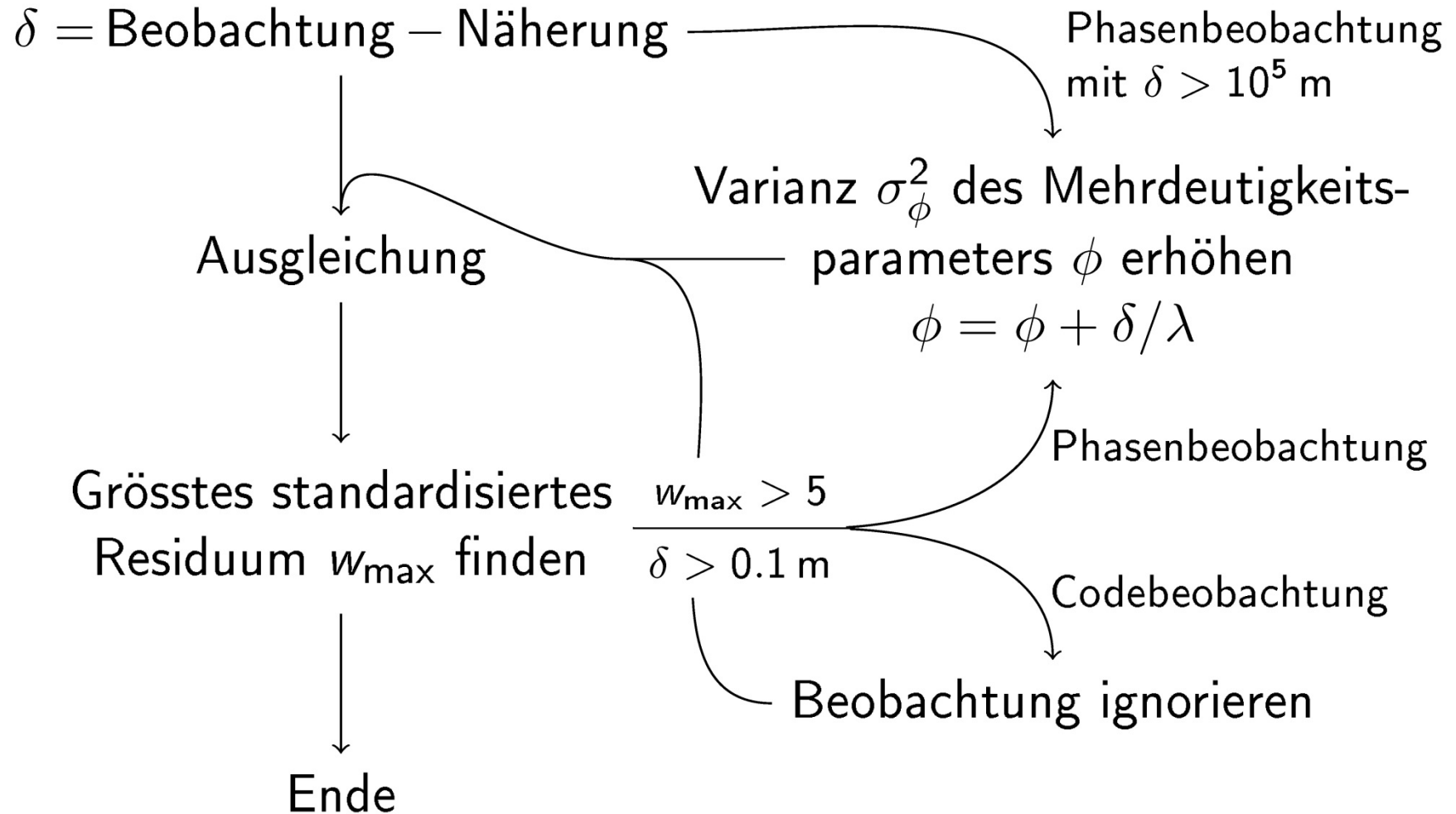
Characteristics:

- Real-time data stream of Zimmerwald (ZIM2) GPS data
- Ultra-rapid orbits and clocks of the IGS (predicted part)
- Quality of the predicted satellite clocks is the limiting factor
- All parameters are estimated (incl. wet tropospheric delay)
- Phase wind-up not yet implemented (~10 cm)
- Ocean loading not yet implemented (~1 cm for ZIM2)

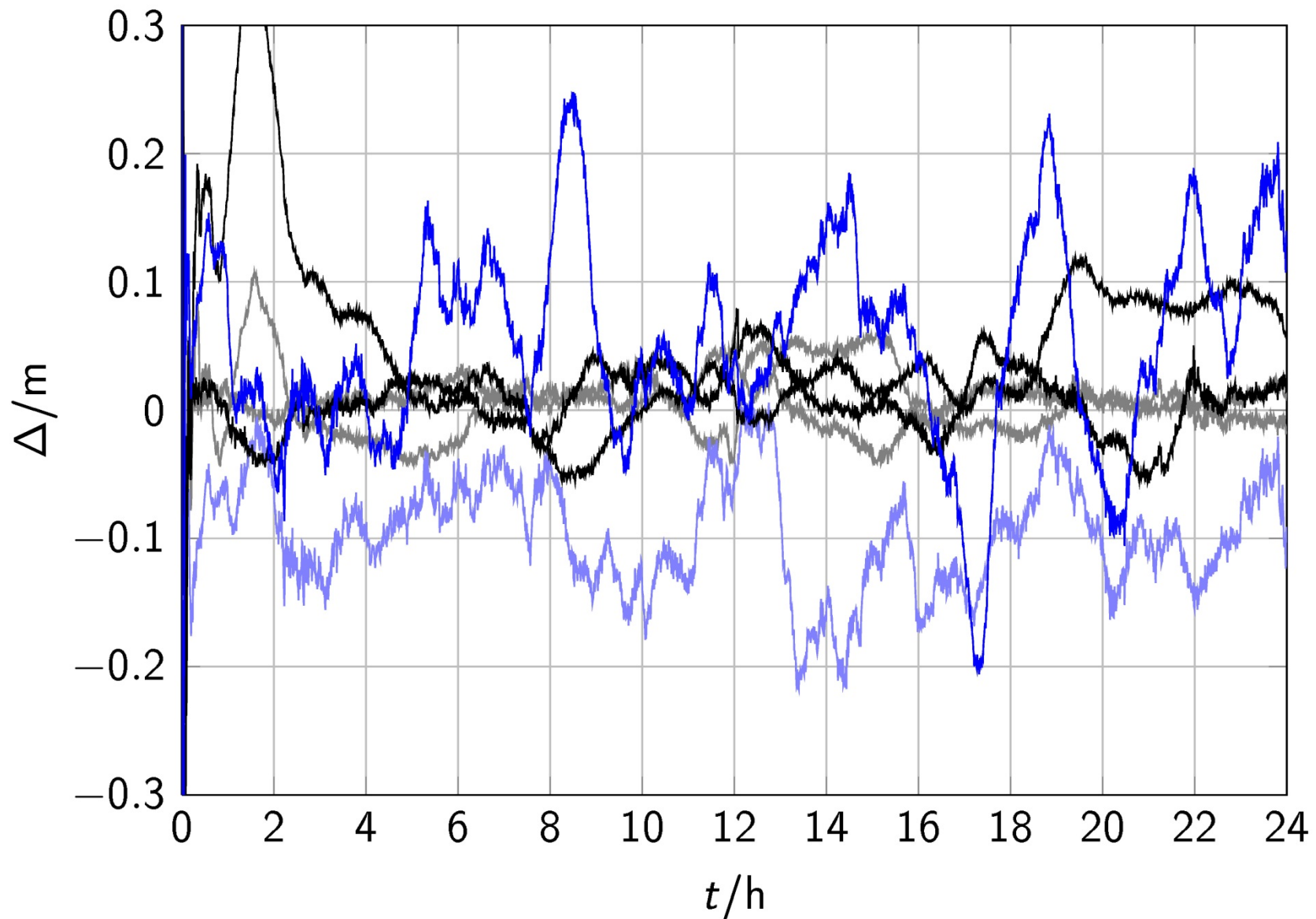
Resultate ohne Vorverarbeitung



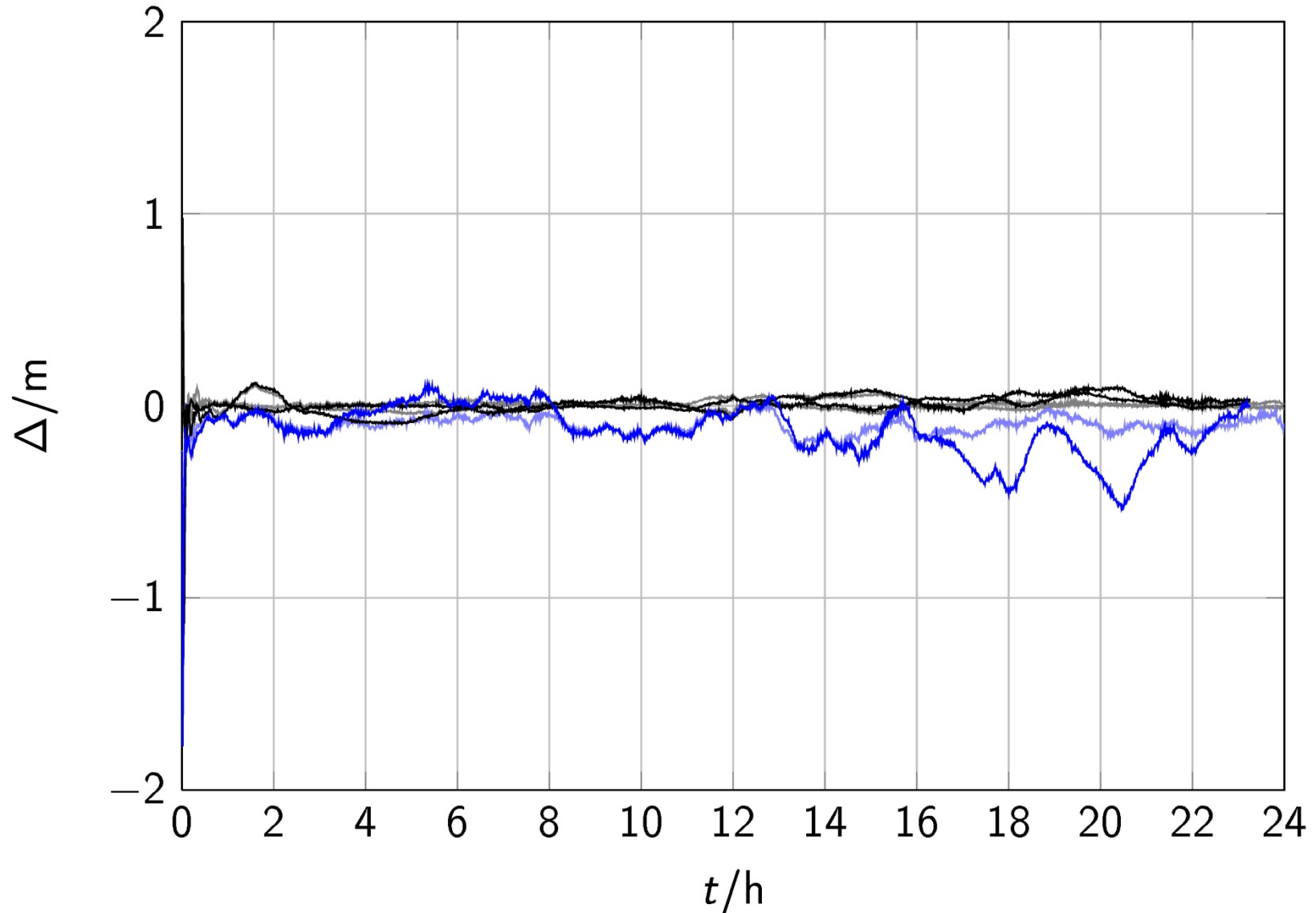
RT-PPP Software: Data Pre-Processing



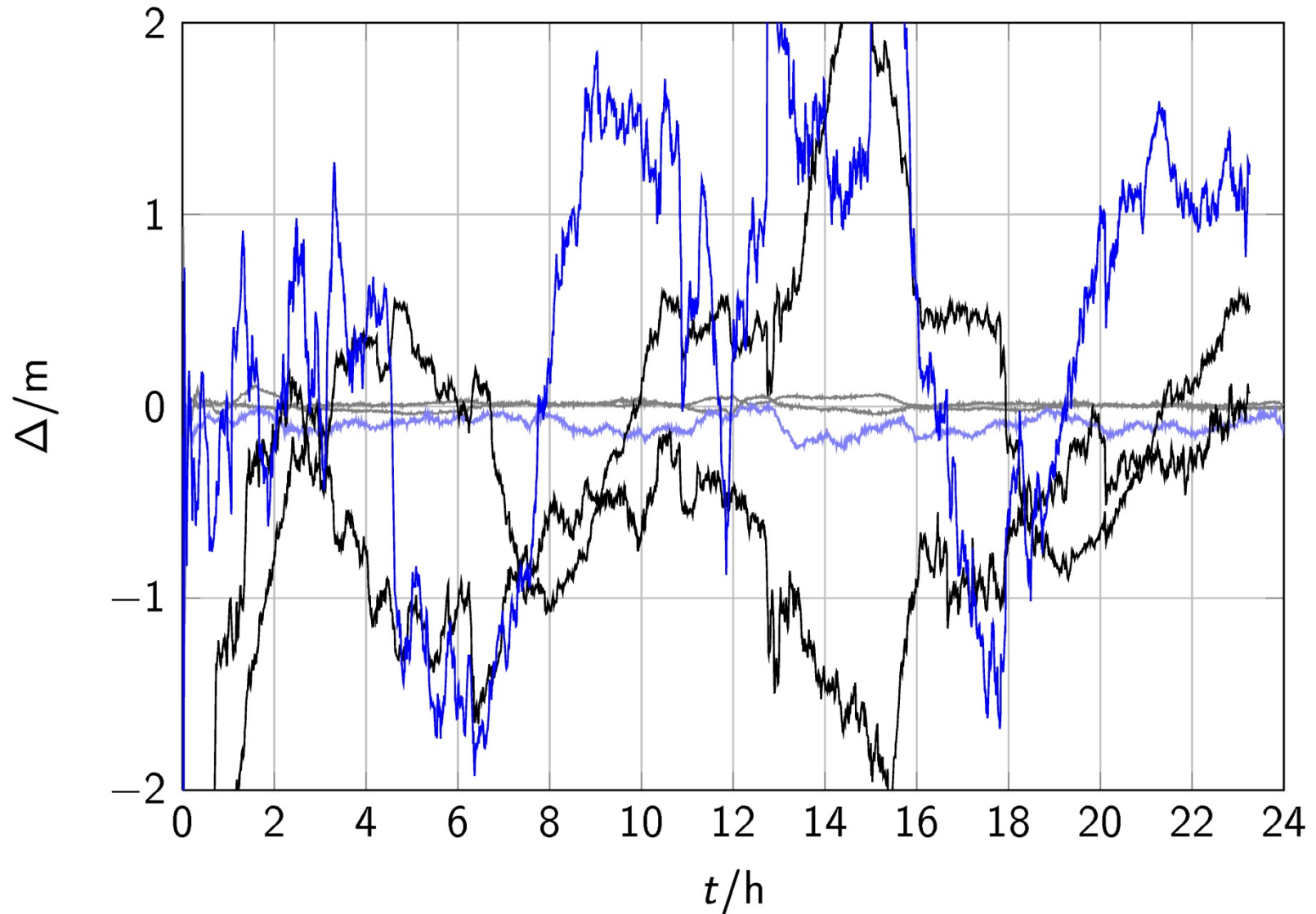
Positionen ohne Antennenphasenkorrekturen



Positionen mit prädizierten Bahnen



Positionen mit prädizierten Bahnen und Uhren



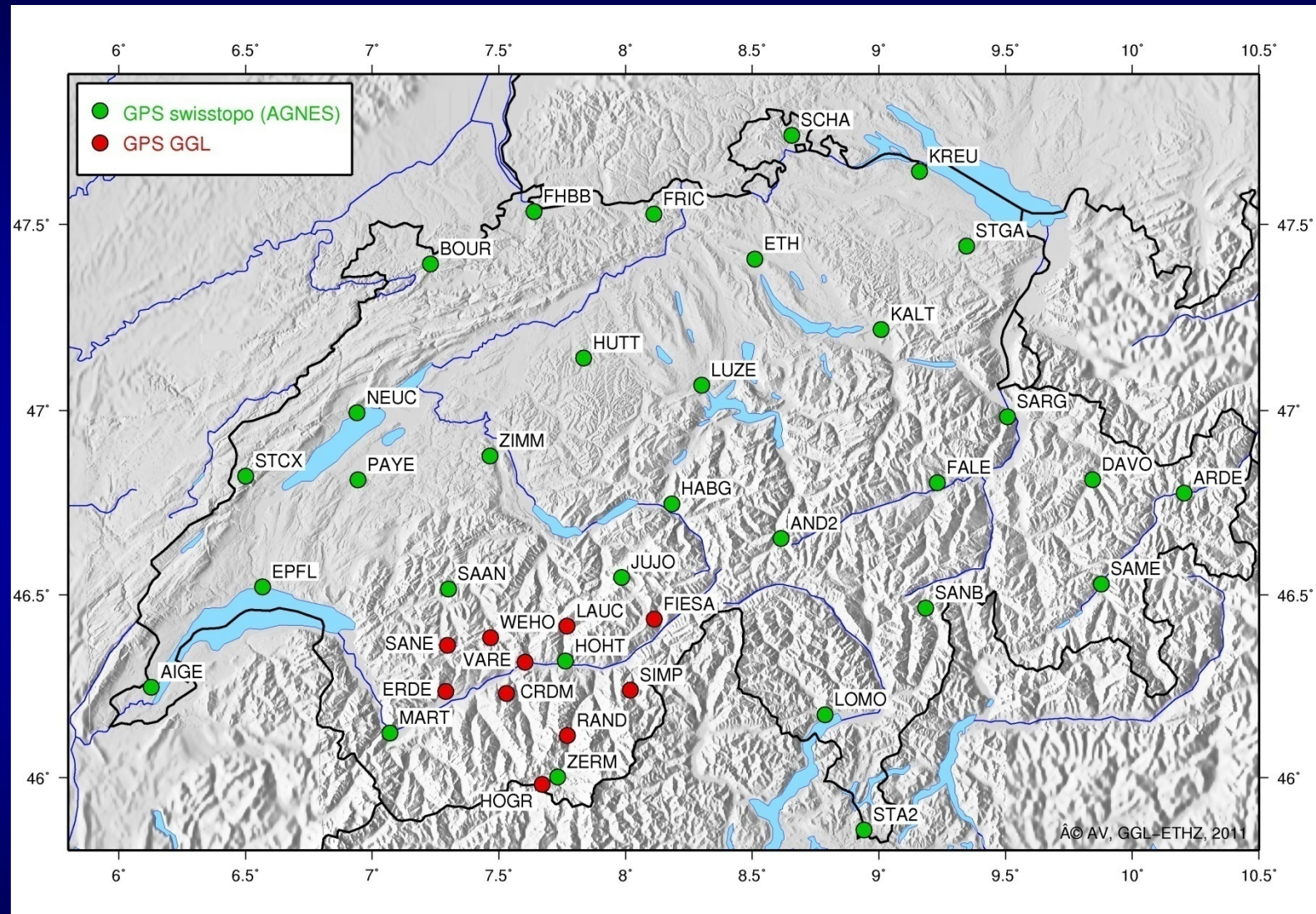
GPS-Satellitenuhren und -Bahnen in Real-Time

Analysis Centre	Orbit RMS (mm)	Sat. Clock RMS (ns)	Sat Clock Sigma (ns)
Combination		0.17	0.11
RT - Combination	40.95	0.17	0.11
BKG	46.5	0.22	0.11
DLR	49.9	0.22	0.14
ESOC	47.9	0.21	0.11
NRCan	37.9	0.22	0.11
GMV	78.7	0.43	0.16
GFZ	53.0	0.60	0.35
TUW	264.2	0.77	0.54

Average of 7 days (June 17-23, 2010)
Real-Time Project of the IGS

Source: Mark Caissy

Test-Netz: COGEAR GPS-Netz im Wallis



GPS 1-20Hz data flow in real-time

Zusammenfassung und Ausblick

Ambiguity Resolution und Real-Time PPP:

- Ambiguity resolution ist zentral für schnelle und genaue Positionen
- Algorithmus für undifferenzierte Ambiguity-Lösung funktionieren für lange Sessionen
- Alle Methoden verwenden Melbourne-Wübbena (i.e., Code Obs.),
→ relativ lange Times-to-first-fix (15-30 min)

Outlook:

- In 2020 etwa 120 Satelliten, die meisten mit drei oder mehr Frequenzen
- Triple-Frequency Mehrdeutigkeitslösung erfolgversprechend
- Aber auch komplexer mit vielen Beobachtungstypen und Biases

Thank you for your attention !

