

Bewegungsdetektion mit GNSS durch Schätzung der Empfängergeschwindigkeit basierend auf Dopplerbeobachtungen

Roland Hohensinn, Alain Geiger

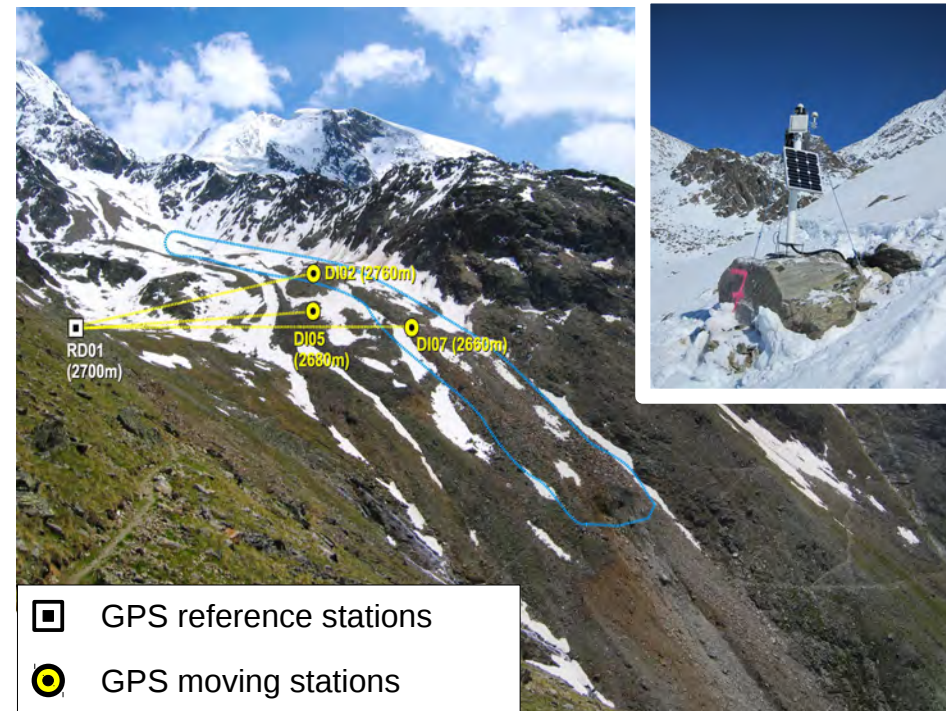
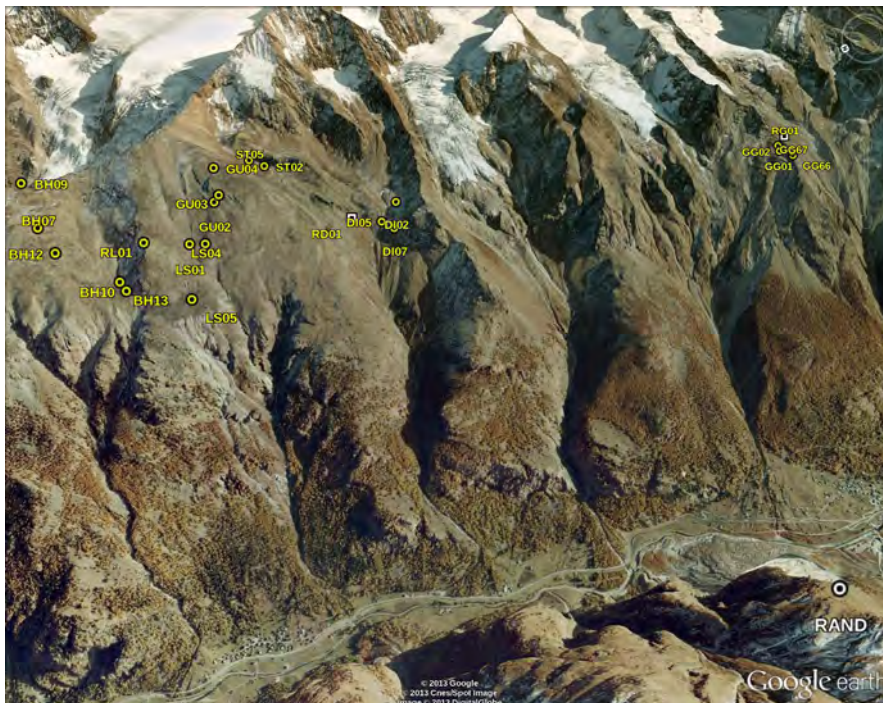
Institute for Geodesy and Photogrammetry, ETH Zürich

Geodätische Woche Stuttgart, 16.09.2015

Projekt X-Sense (2009 - 2013)

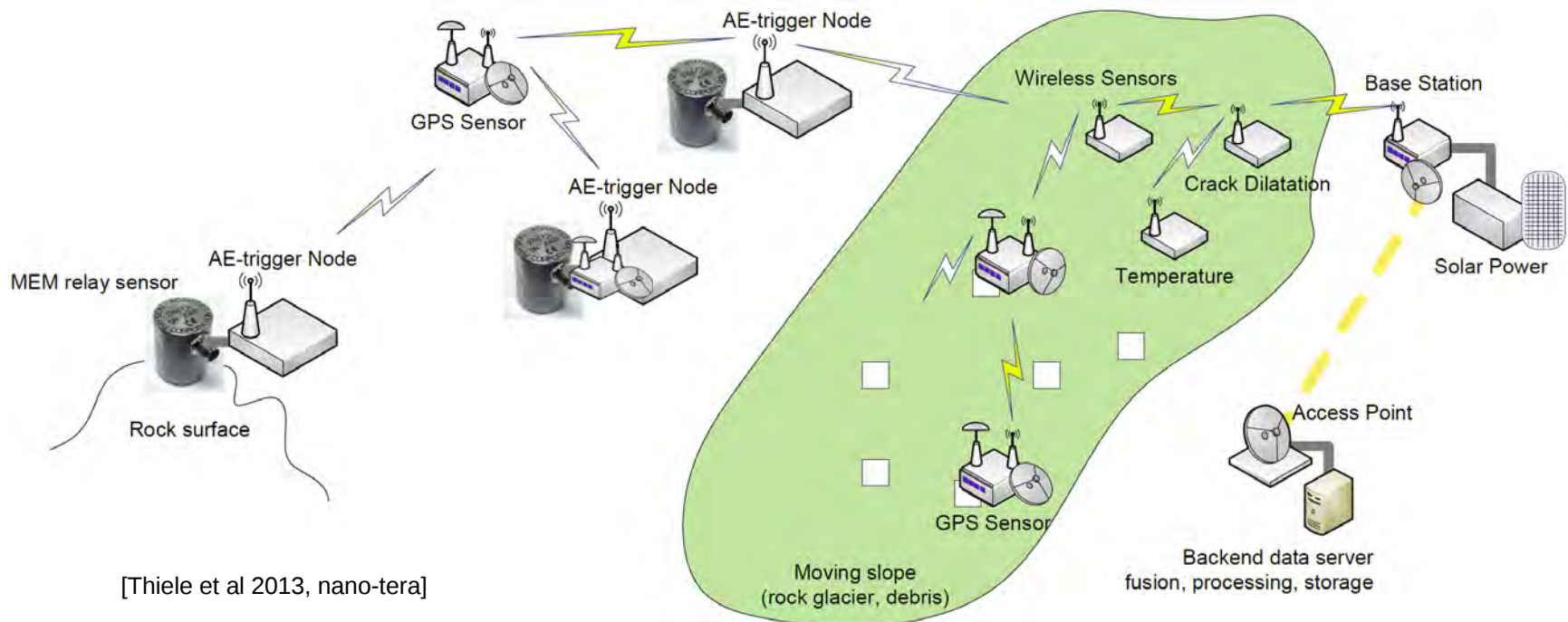
- **Ziel:** Monitoring von Massenbewegungen und Rückschluss auf deren Ursachen mit unterschiedlichen Sensoren, verbunden per Drahtlosnetzwerk
→ Verständnis und Vorhersage von Naturkatastrophen (z.B Gerölllawinen)
- **Beitrag IGP:** Auswertung der Daten von permanent betriebenen GPS Stationen zum Monitoring von Bewegungen und deren Geschwindigkeit

[Limpach et al 2012, EGU]

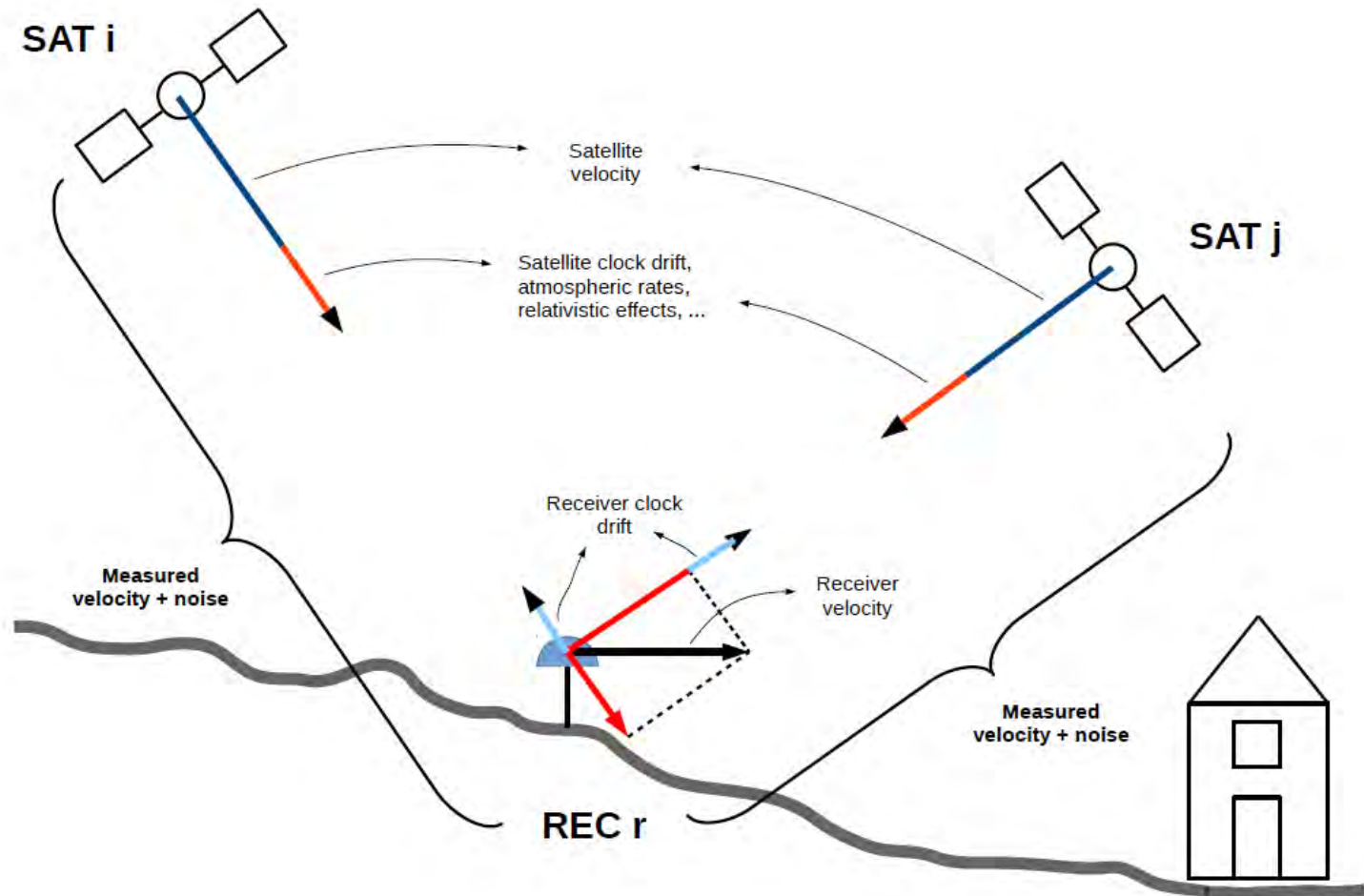


Nachfolgeprojekt: X-Sense 2

- **Ziel:** Entwicklung eines Frühwarnsystems: Sensor 'schläft' und wird durch akustische Emmission des Ereignisses aufgeweckt.
- **Kollaboration** (Computer Engineering Lab, ETHZ (Lead); Institut für Mikro- und Nanosysteme, ETHZ; Institut für Geographie, UZH; Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETHZ)



Geschwindigkeitsbestimmung mit GNSS



Ziel: Bewegungsdetektion durch Schätzung der Empfängergeschwindigkeit von reduzierten Geschwindigkeitsbeobachtungen zu > 4 Satelliten

Beobachtungsgleichung

$$\lambda \dot{D}^i + \epsilon^i = -\vec{v}_r \vec{e}_i + \underbrace{\vec{v}_s \vec{e}_i}_{\text{Satellite LOS Velocity}} + \underbrace{c \dot{T}}_{\text{Receiver Clock Drift}} - \underbrace{c \dot{t}^i}_{\text{Satellite Clock Drift}} - \underbrace{\dot{I}on^i}_{\text{Ionospheric Rate}} + \underbrace{\dot{T}rop^i}_{\text{Tropospheric Rate}} + \underbrace{\dot{M}ult^i}_{\text{Multipath Rate}} + \underbrace{\dot{R}el^i}_{\text{Relativistic Effects}}$$

Measured LOS Velocity + noise Receiver LOS Velocity Receiver Clock Drift Satellite Clock Drift Ionospheric Rate Tropospheric Rate Multipath Rate Relativistic Effects

	Error Terms	Modelling in Doppler Measurements	Magnitude Estimated	
<u>Satellite Orbit</u>	Broadcast Ephemeris	Yes	±1 mm/s per axis	} High Predictability
<u>Satellite Clock</u>	Satellite Clock Correction	Yes	Negligible	
	L ₁ -L ₂ Correction	No	Negligible	
<u>Relativity</u>	Orbit Eccentricity	Yes	Several cm/s	
	Sagnac	Yes/No**	Several mm/s	
	Second-order Doppler Effect	Yes	Over 2.0 cm/s	
	Secondary Relativistic Effects	No	Negligible	
Atmosphere	<u>Ionospheric Correction</u>	Yes	mm/s to cm/s	} Limited Predictability
	<u>Tropospheric Correction</u>	Yes	mm/s to cm/s	
Receiver	Receiver Site Displacement	No	Negligible	
	<u>Receiver Clock</u>	As an unknown to be estimated		

Tabelle: Fehlerquellen und deren abgeschätzte Grösse für die gemessene LOS Geschwindigkeit [Zhang, 2008]

Workflow

(0) Konversion Dopplermessungen zu LOS Geschwindigkeit

$$v_{MEAS} = \lambda D = \frac{c}{f_{SAT}} \Delta f \quad \text{Optional: Num. Diffquotient der Phasenmessungen}$$

(1) Modellierung der Beiträge zur Beobachtungsgleichung

Analytische und empirische Modelle für Satellitengeschwindigkeit, relativistische und atmosphärische Effekte → 'Prädiktion'

(2) Reduzierung der Beobachtungen

→ 'Gemessen - Prädiziert'

(3) Schätzung der Unbekannten (Kalman Filter)

→ Unbekannte: Empfängergeschwindigkeitskomponenten v_{rx} , v_{ry} , v_{rz}
optional Empfängerbeschleunigung, Uhrdrift, ...)

(4) Statistische Tests zur Bewegungsdetektion und zur System/Beobachtungsdiagnostik

→ Nachweis einer Bewegung

Filterung und Bewegungsdetektion

- **Kinematisches Modell ... Bewegungscharakteristik?**

- ... 1. Ordnung: Gleichmässige Geschwindigkeit → Weisses Rauschen Beschleunigung
- ... 2. Ordnung: Gleichmässige Beschleunigung → Weisses Rauschen Ruck
- ...

- **Uhrdrift-Modell: Weisses Rauschen Uhrdrift-Rate**

... Zustandsvektor: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} v_{rx} & v_{ry} & v_{rz} & a_{rx} & a_{ry} & a_{rz} & dcl_r \end{bmatrix}$

Velocity			Acceleration			Clock drift

- **Statistischer Test für Bewegungsdetektion**

Testgrösse: $R_k = (\underline{\mathbf{B}}^T \mathbf{x}_k - \underline{\mathbf{w}})^T \left\{ \mathbf{B}^T \underline{\mathbf{P}}_k \mathbf{B} \right\}^{-1} (\underline{\mathbf{B}}^T \mathbf{x}_k - \underline{\mathbf{w}})$

Matrix mit 1 für Geschw./Beschl.
Komponenten resp. 0 für sonstige States

VC-Matrix der
Filterlösung

Widerspruchsvektor
(\emptyset -Vektor)

$$\frac{R_k}{\sigma_0^2} \sim \chi(f, \lambda)$$

Resultate

Geführte Bewegung eines Schlittens auf einer Rutschbahn; Equipment: U-BLOX EVK-M8T Evaluation Kit mit JAVAD Gr-Ant-G3T Antenne (5Hz Sampling, GPS und GLONASS), Tracking mit Leica MS50 + Rundprisma (~13Hz Sampling)

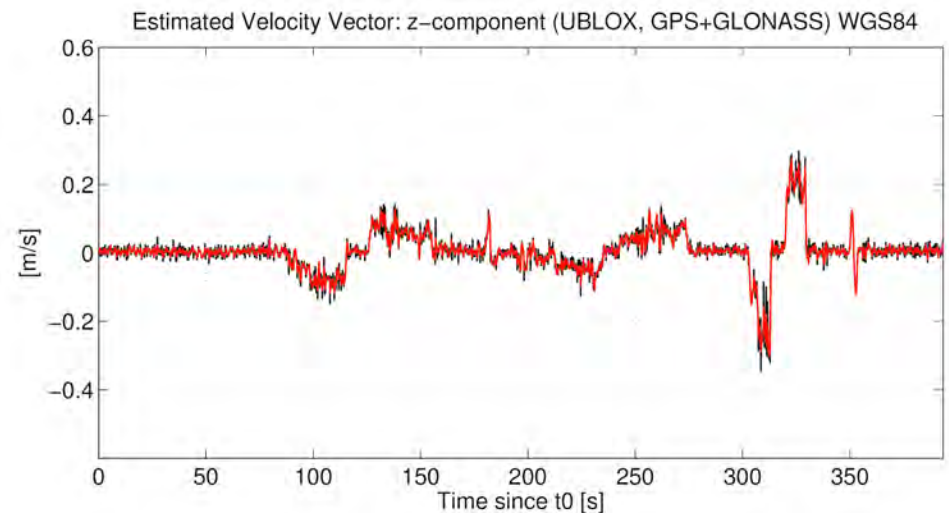
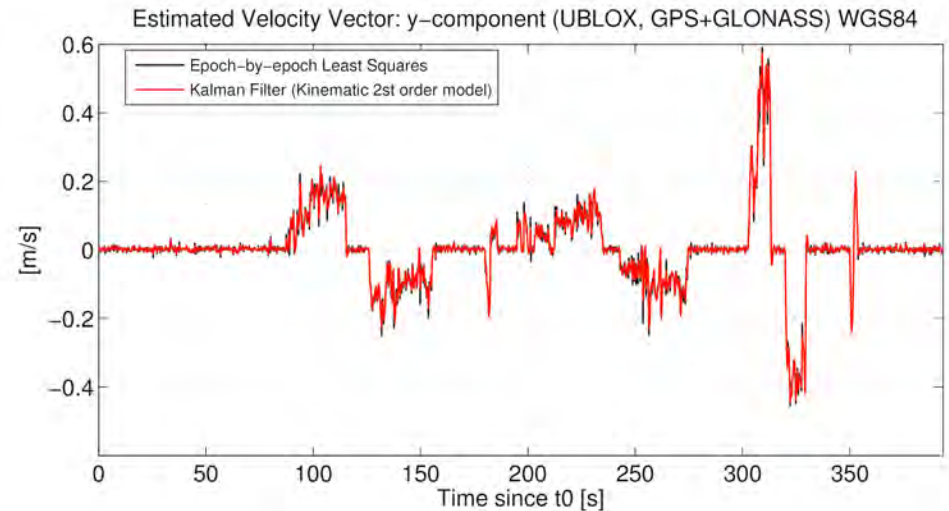


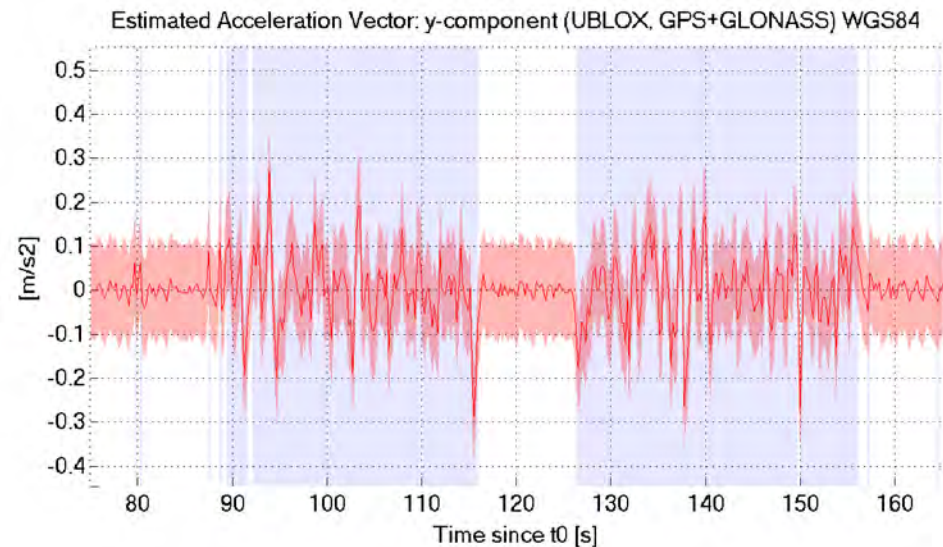
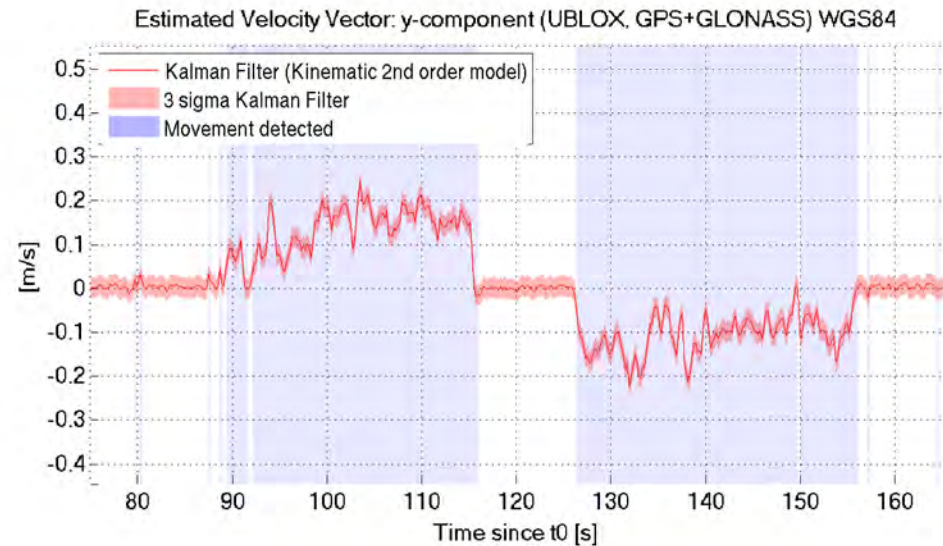
Abbildung: Geschätzte GNSS Empfängergeschwindigkeit (y und z Komp.)

Resultate

Abbildung rechts: Ausgewählter Bereich der geschätzten y-Komponenten der Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Tabelle unten: Magnituden der Geschwindigkeit und Beschleunigung der y-Komponente der ersten 6 detektierten Bewegungen

Bewegung Nr.	Y-Geschw. [m/s]	Y-Beschl. [m/s ²]
1	0.0321	0.0601
2	0.0183	0.0631
3	0.0328	0.0627
4	0.0321	0.0878
5	0.0441	0.1073
6	0.0424	0.0868

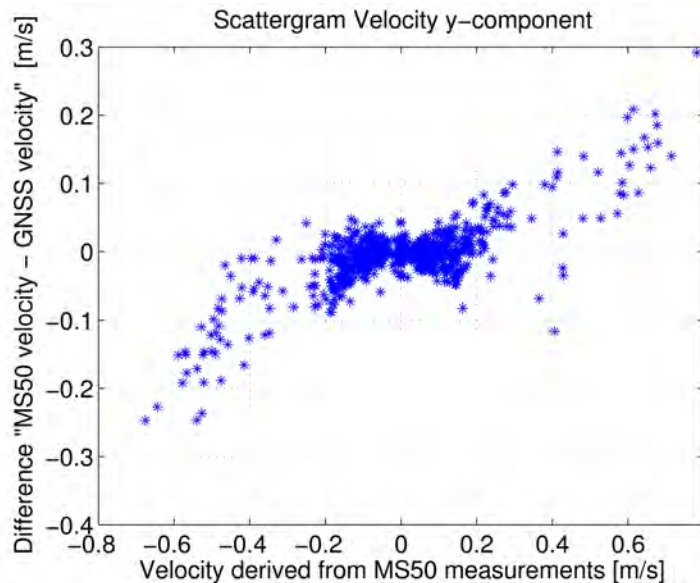
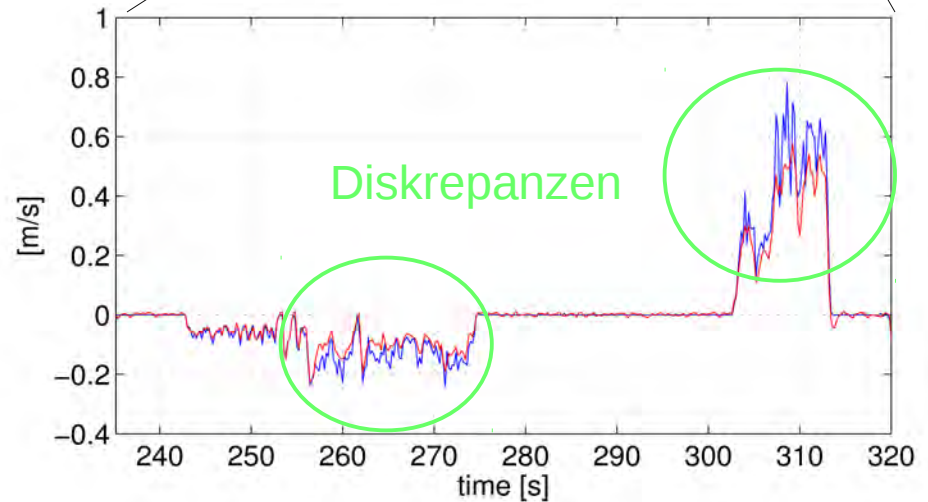
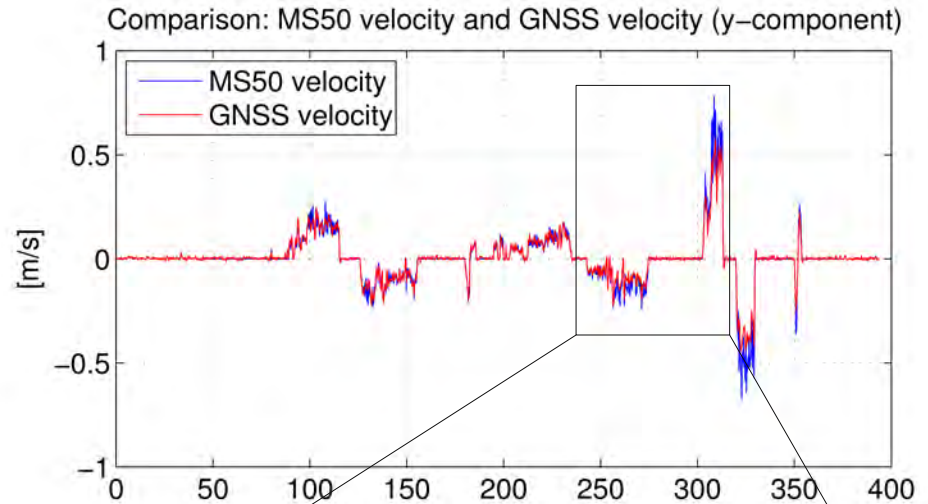


Resultate

Tracking mit MS50: Abweichungen bei höheren Geschwindigkeiten bzw. grösserer Dynamik ... Ursache?

Abbildung rechts: Geschwindigkeiten aus GNSS und MS50 Tracking (Zentraler DiffQuot der Position)

Abbildung unten: y-Komponente MS50 aufgetragen gegen Differenz "GNSS - MS50"



Zusammenfassung und Ausblick

- **Bewegungen im Bereich von cm/s können detektiert werden**
- **Schnelle Bereitstellung von Bewegungsinformationen zur Unterstützung eines Frühwarnsystems**
- **Niedriger Infrastrukturaufwand (low-cost Equipment) bzw. niedrigere Rechenzeiten (keine Ambiguitylösung notwendig)**

- **Hohe Bewegungsdynamik: Adaptive Kalman Filter oder Filterbank?**
- **Tracking für “Ground truth”: Ursache für mangelnde Übereinstimmung MS50 vs. GNSS → Datenprozessierung oder Sensorseitig?**
- **Alternative “Ground Truth”: Tracking mit “Q-Daedalus” Videotachymetersystem des IGP**