

# Istraživanja točnosti i pouzdanosti INS/GNSS sustava iTraceRT-F200- E za navigaciju u tunelima

A. Bilajbegović  
University of Applied Sciences Dresden  
Faculty of Spatial Information

Znanstveni kolokvij povodom 80. rođendana mojih  
dragih profesora Miljenka i Nikole Solarića

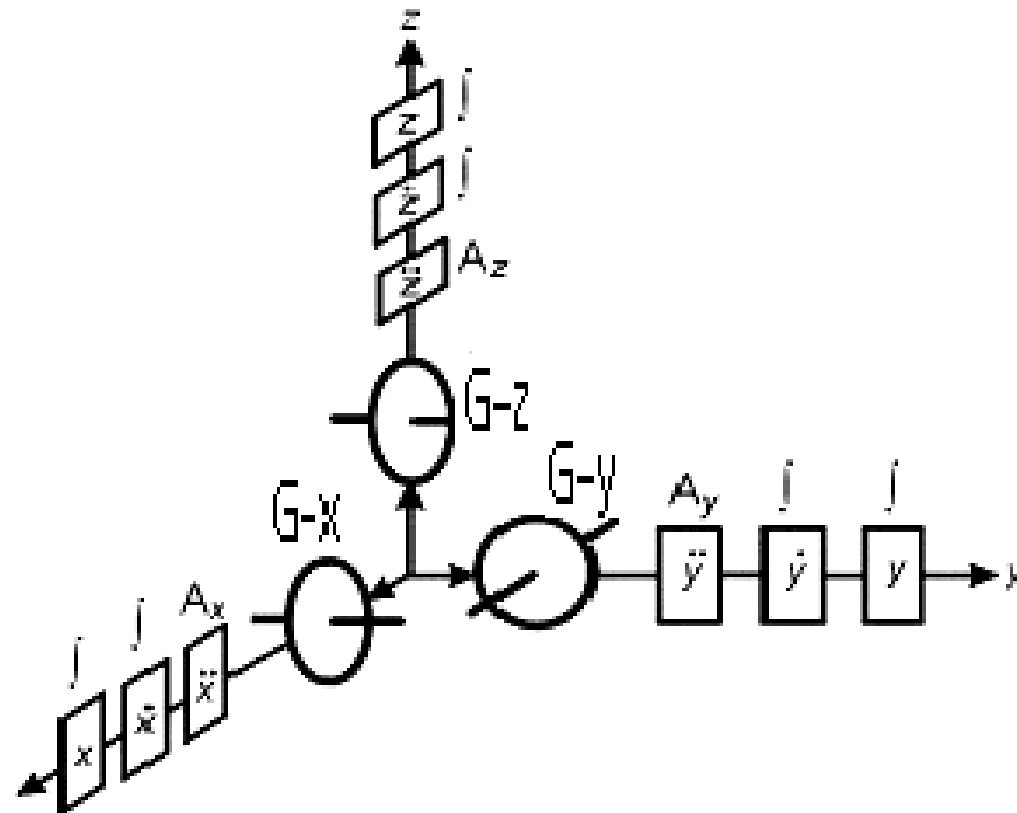
Geodetski fakultet Sveucilista u Zagrebu, 17.09.2014.

# Sadržaj

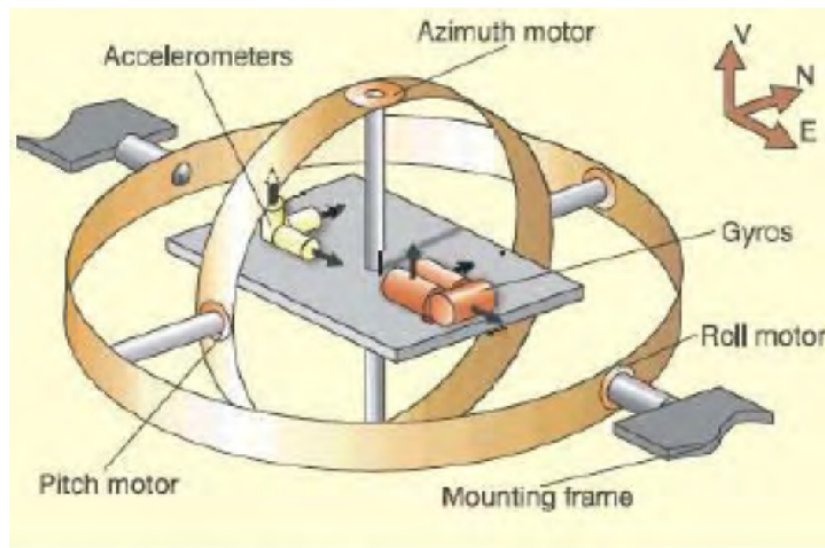
1. Uvod (sadržaj rada odabran prema znanstvenom i obrazovnom radu profesora Solarića)
2. Osnove
3. Prezentacija sustava INS/GNSS iTraceRT-F200-E
4. Točnost i pouzdanost iTrace sensora
- 5.1 Istarživanje položajne točnosti kao funkcije vremena bez potpore GPS
- 5.2. istraživanja bidirekcionalog povezivanja (Kopplung) GPS i INS odnosno vremena reinicijalizacije
6. Zaključci

# 1. Uvod

## Princip inercijalne izmjere

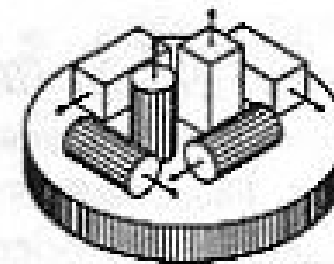


# Konstruktivski modeli INS sustava



Kardanski INS-Sensor

**SENSOR CLUSTER OF  
3 ACCELEROMETERS  
3 GYROSCOPES**



**MOUNTED ON COMMON  
RIGID BASE ATTACHED  
TO HOST VEHICLE**

(a) Strapdown

# 1. Uvod

## Usporedba GNSS-INS

	GNSS	INS	INS/DGNSS
Autonomnost	ne	da	da
Integritet	mali	visok	visok
Interval registracije (Data rate)	1-20, 50 Hz, novi GNSS prijamnici 100 Hz	1-200 Hz, novi 1000 Hz	jako visok
Orijentacija -nagibi	Pomoću više antena	da	da
Inicijalizacija	RTK za fazna mjerjenja	da	da
Dugovremenska stabilizacija (Long-time stability)	jako dobra	loša	Jako dobra s GNSS signalima
Kratkovremenska stabilizacija (Short time stability)	Code mjerjenja: osrednja Fazna mjerjenja: jako dobra	dobra	Dobra do jako dobra
Podložnost utjecaju ubrzanja	ne	da	Mogućnost određivanja ubrzanja
bidirektionalna povezanost	ne	ne	bidirektionalna povezanost →skraćivanje vremena <sub>5</sub> reinicijalizacije GNSS prijamnika da

## 2. Osnova

- Koordinatni sustavi:
  - body sustav - navigacijski sustav
  - inertijalni sustav - earth fixed, earth centered
- Sensori
  - trick rate sensors (žiroskopi)
  - Akcelerometri
- Integracija INS i GPS
- Kalman filter
  - Loosely coupled
  - Tightly coupled



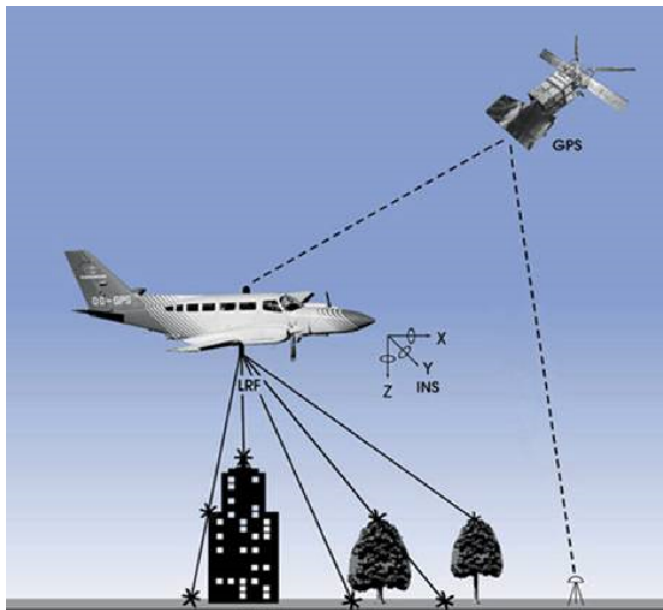
(a) Strapdown

# Pregled točnosti INS sustava

Vremenski interval	Točnost sustava		
	visoke	srednje	niske
Položaj poslije			
1 h	300-500 m	1-3 km	200-300 km
1 min	0,3-0,5 m	0,5-3 m	30-50 m
1 s	0,01-0,02 m	0,03-0,1 m	0,3-0,5 m
Kutevi orijentacije u [°] poslije			
1 h	$3 - 8 \cdot 10^{-3}$	0,01-0,05	1-3
1 min	$0.3 - 0.5 \cdot 10^{-3}$	$4 - 5 \cdot 10^{-3}$	0,2-0,3
1 s	$< 0.3 \cdot 10^{-3}$	$3 - 5 \cdot 10^{-3}$	0,01-0,03
Cijena (US\$)	≈ 1000 000	≈ 100 000	≈ 100 - 10 000

### 3. Primjene u Geodeziji:

- **Određivanje koordinata geodetskih točaka, izmjera tunela, primjena pri seizmološkim mjerenjima**
- **Primjena u fotogrametriji i za daljinska istraživanja u kombinaciji s digitalnim kamerama**



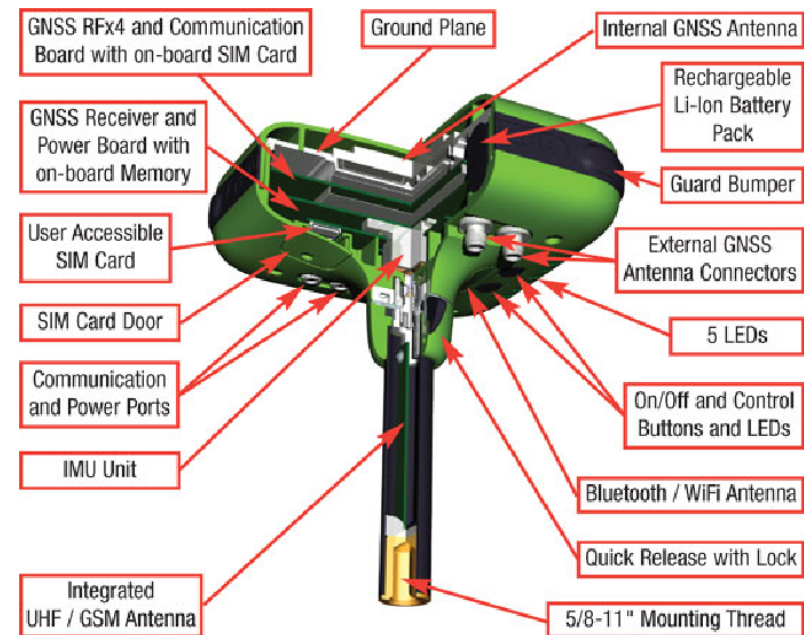
[www.eurosence.com](http://www.eurosence.com)

Laserscanning s GNSS i INS



# Nastavak primjene u geodeziji 1:

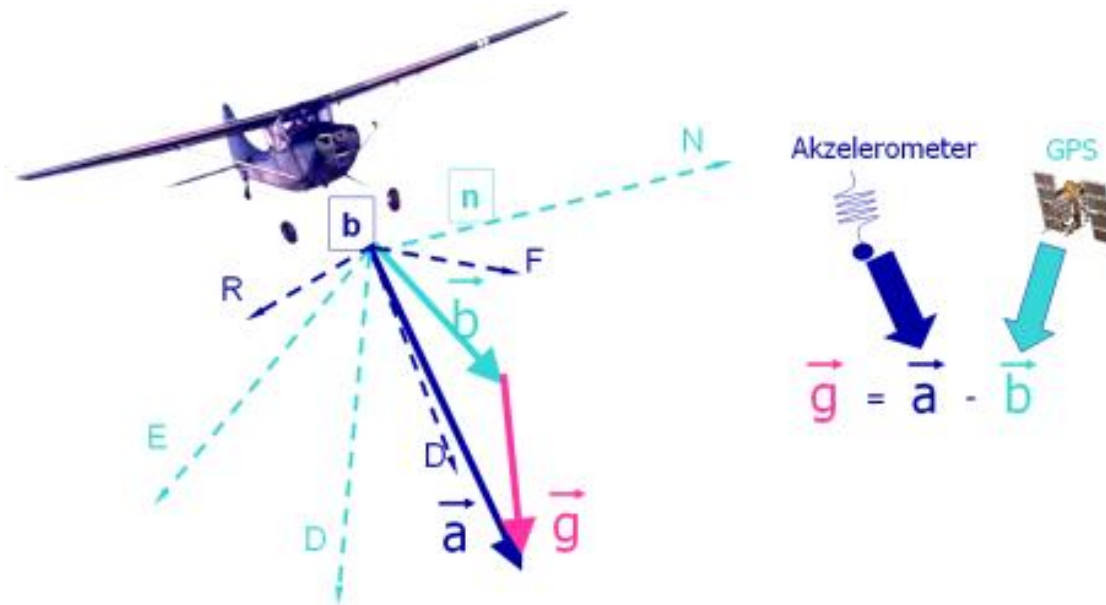
- Sustavi za inventuru prometnica
- Katasterski premjer (Švedska)



an example Javad triumph 4 GNSS receiver ([www.javad.com](http://www.javad.com))

## Nastavak primjene u geodeziji 2:

- Zrakoplovna gravimetrija (princip)

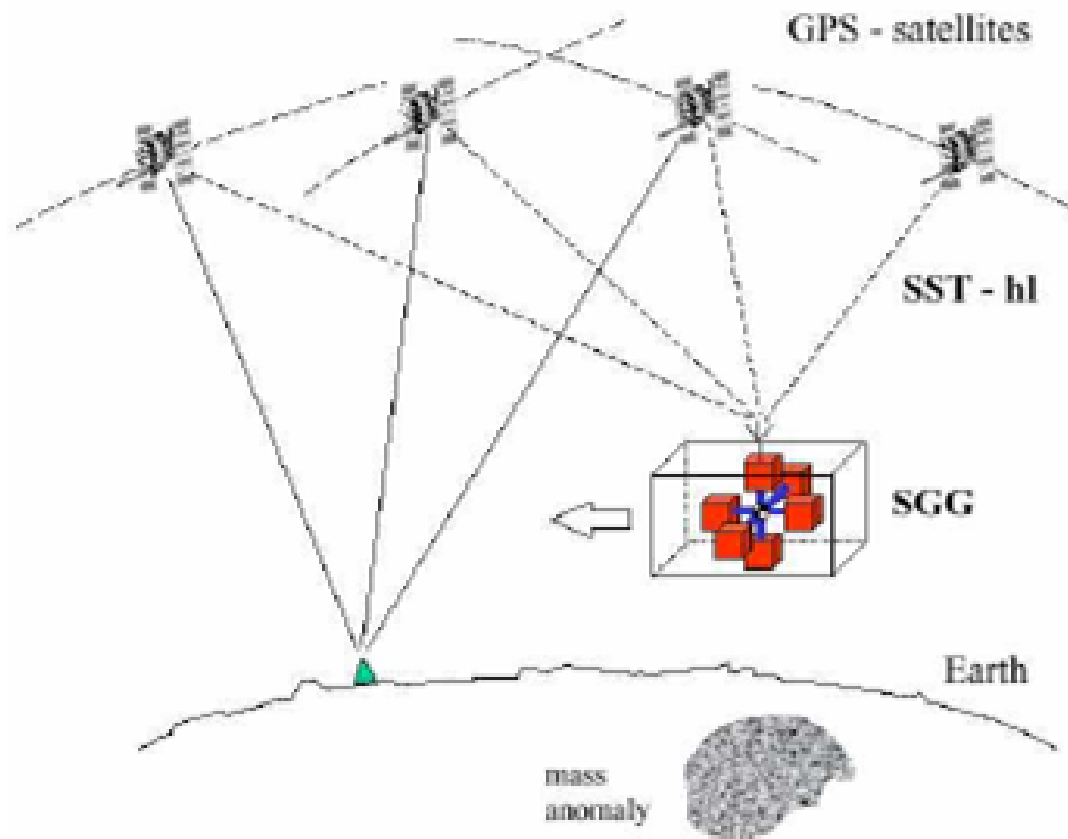


Današnja točnost 1 mgal/km ( $1\text{mgal}=10^{-5}\text{m/s}^2$ )

# Nastavak primjene u geodeziji 3:

- **GOCE Misija**

Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer



# Nastavak primjene u geodeziji 4:

- **Određivanje azimuta**



**Samo žiroskop**  
**GYROMAT 2000**  
razvijen od DMT-  
Institut für  
Lagerstätte,  
Vermessung und  
Angewandte  
Geophysik,  
Bochum

# Nastavak primjene u geodeziji 5?:

- **Sve vrste navigacije**



Quelle:  
[www.imar-  
navigation.de](http://www.imar-navigation.de)

- **Određivanje otklona vertikale**

# Nastavak primjene u geodeziji 6:

- mobilno skupljanje podataka



“Stop and Go”

Prema J. Kremer 2010

Airborne Lidar



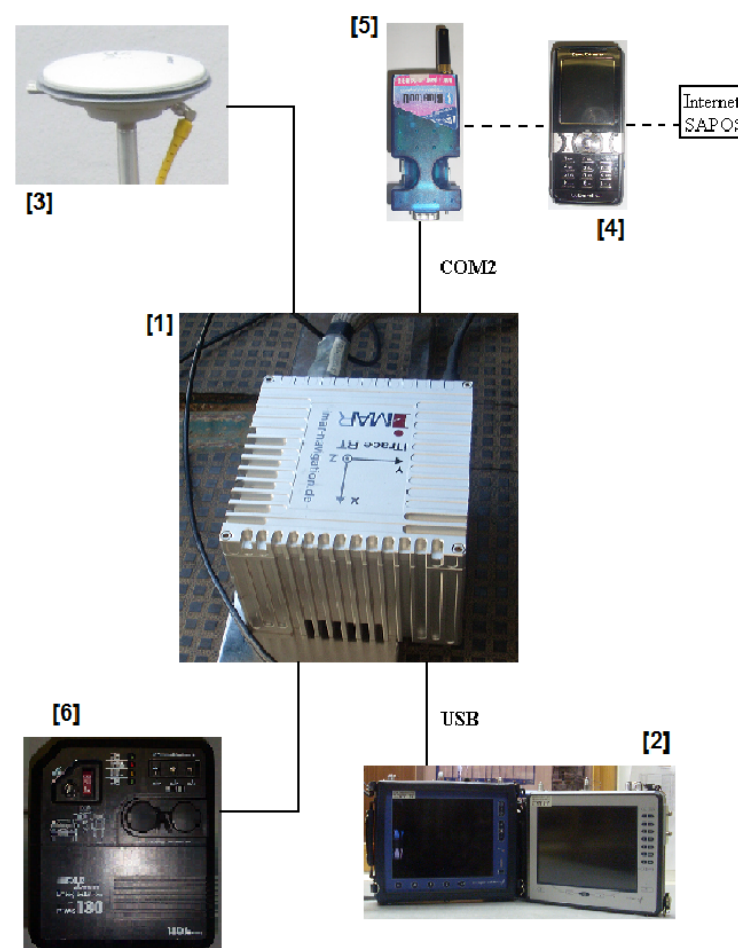
Mobile Mapping

## 4. Prezentacija sustava

- **Komponente INS sustava Geoinformacijskog fakulteta u Dresdenu**

### *Hardver:*

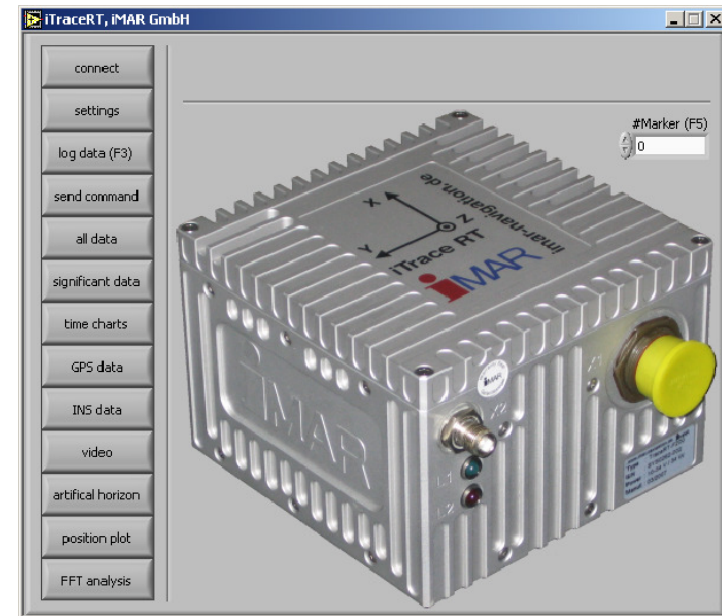
- iTraceRT-F200-E
- GPS-antena
- Bluetoothadapter
- Handy
- Poljski kompjuter:  
Colibri
- Akumulator



- **Prezentacija softvera**

*Softveri:*

- Onlineprocessing:  
„iTraceRT Version 6.2 ”
- Konfiguriranje mjerenja
- Pohrana podataka
- Koordinate i parametri orijentacije of (online)
- Postprocessing:  
"Inertial Explorer" version 8.10
- Filtriranje i glačanje rezultata mjerenja
- Dodatni razvoj za RTK primjenu i korištenje umreženih SAPOS referentnih stanica





Za naš sustav bez GLONASS prijamnika i odometra tvornica daje slijedeće standardne devijacije kuteva orijentacije vozila (RPY):

- za kombinaciju INS/GPS  $0,01^\circ = 0,6'$ ,
- INS bez podrške GPS od 30 s:  $0,02^\circ = 1,2'$ .

Položajna točnost po podacima proizvođača iznosi:

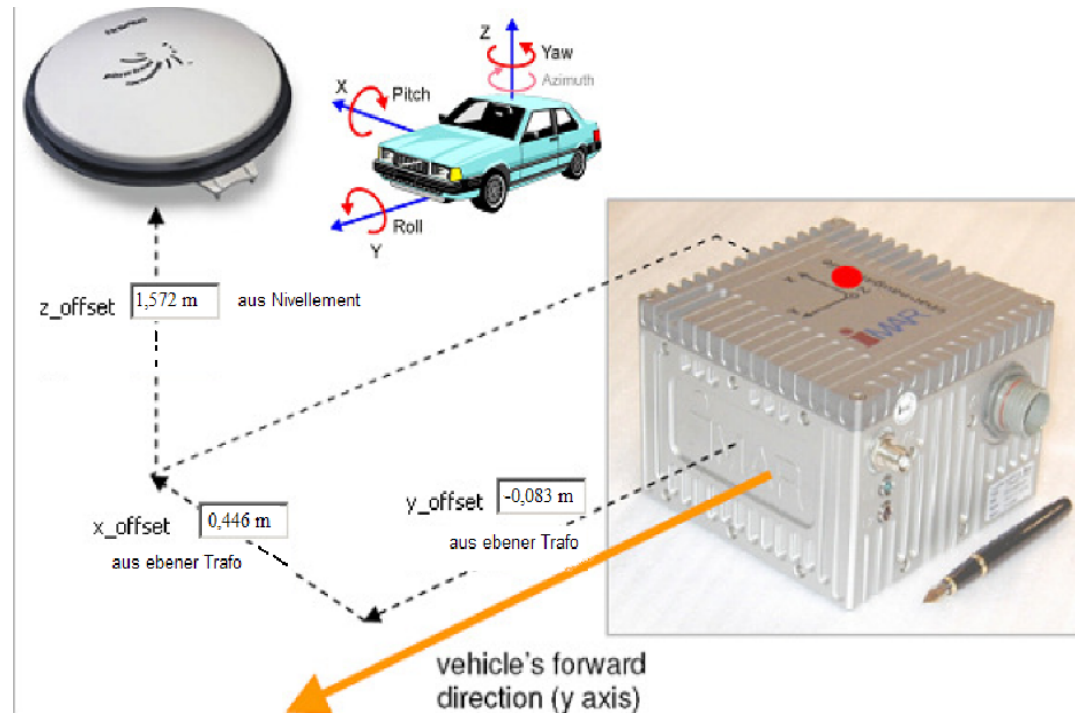
- za kombinaciju INS/GPS:  $0,02 \text{ m} + 1 \text{ ppm}$ ,
- samo INS bez podrške GPS poslije 10 s:  $0,10 \text{ m}$  (iMAR Navigation GmbH 2010).

Pri prosječnoj brzini od 80 km/h za proći kroz tunel duljine 4 km treba cca 3 minute. Postavlja se pitanje kolika je položajna točnost bez podrške GPS nakon 10 s i kolika je točnost orijentacijskih kuteva vozila bez podrške GPS nakon 30 s?

- **Prezentacija GPS i INS sustava**

- Procedura mjerenja
  1. Faza mirovanja  
(dobar prijam GPS signala)
  2. Inicijalizacija  
(brzo gibanje)
  3. Obavljanje mjerenja
  4. Na kraju faza mirovanja  
(dobar prijam GPS signala)





$$r = \arcsin \frac{a_y}{|g|}$$

$$p = \arcsin \frac{a_x}{|g|}$$

„coarse alignment“; quiet phase

$$y = \arctan \frac{\omega_x}{\omega_y}$$

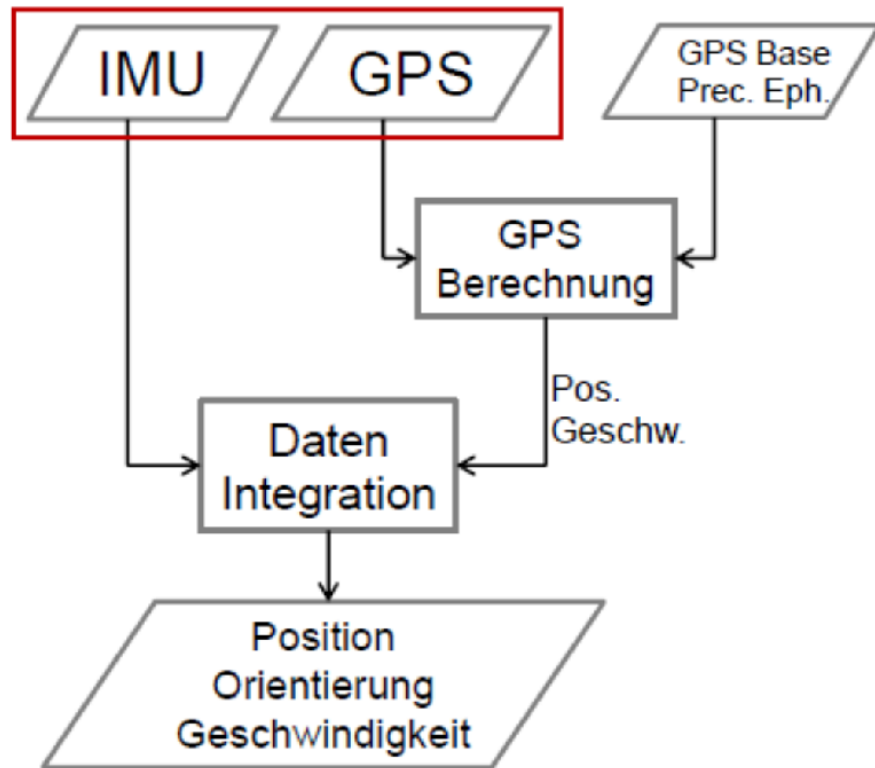
„fine alignment“; moving fast

## **Postoje četiri mogućnosti integriranja GPS i INS sustava**

- **Uncoupled Integration,**
- **Loose Integration,**
- **Tight Integration and**
- **Deep Integration.**

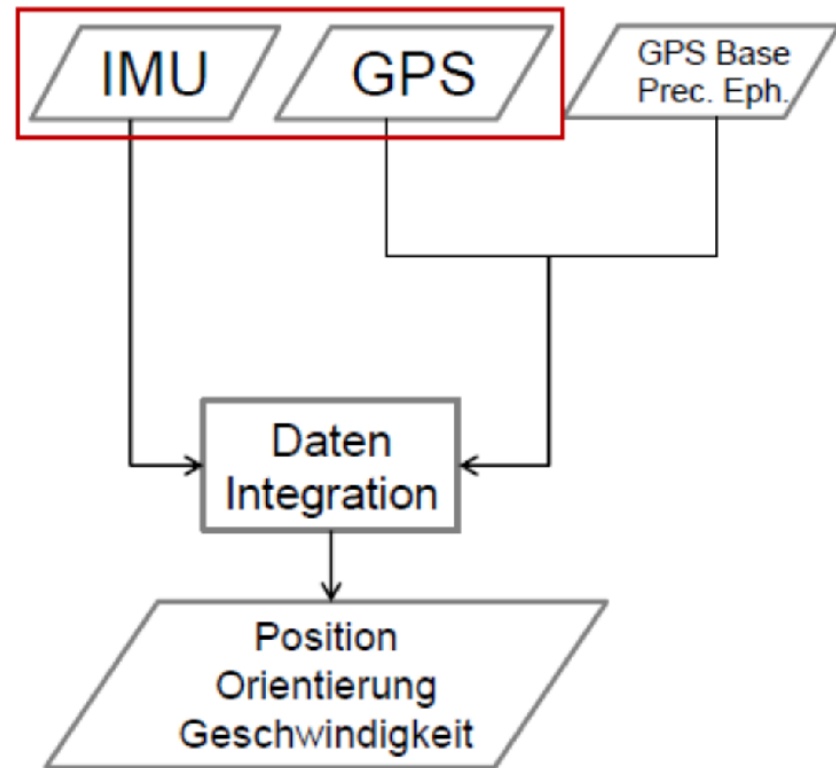
### **Mi smo istraživali:**

- **Loose Integration,**
- **Tight Integration**



„loosely coupled“

- + Nutzereingriff möglich, robust
- Nicht optimal bei wenigen SV



„tightly coupled“

- + (theoretisch) Optimale Lösung
- „Black Box“

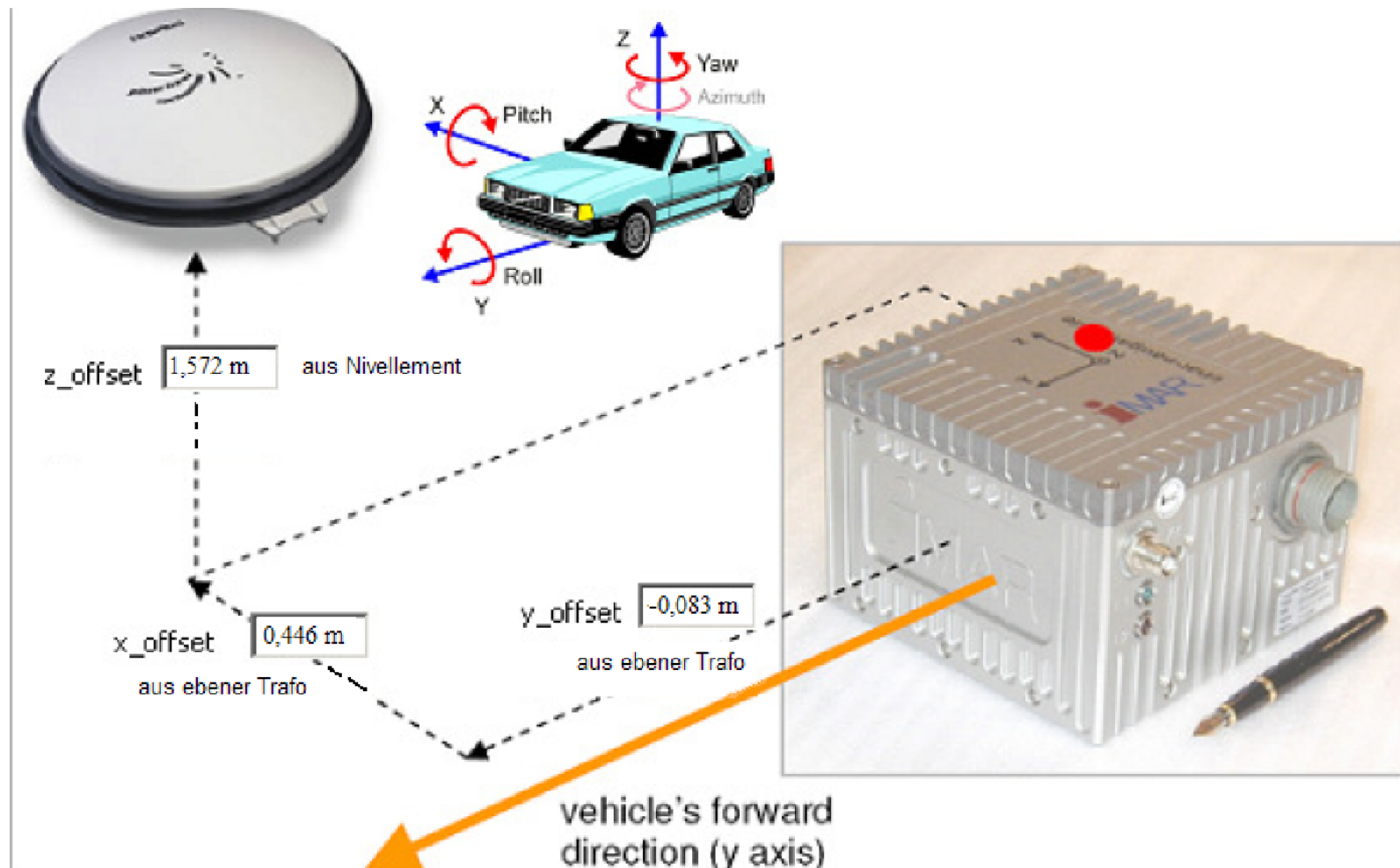
prema J. Kremer 2010.

## 4.2. Instaliranje i priprema sustava za mjerenja s kombijem u tunelu

- Instalacija u i na VW kombiju



# Rezultat: parametri ekcentriciteta antene (INS-GPS-Offset)



# Komparacija “lever arm calibration GPS offset” sa ekcentricitetom određenim geodetskim metodama (konvencionalno)

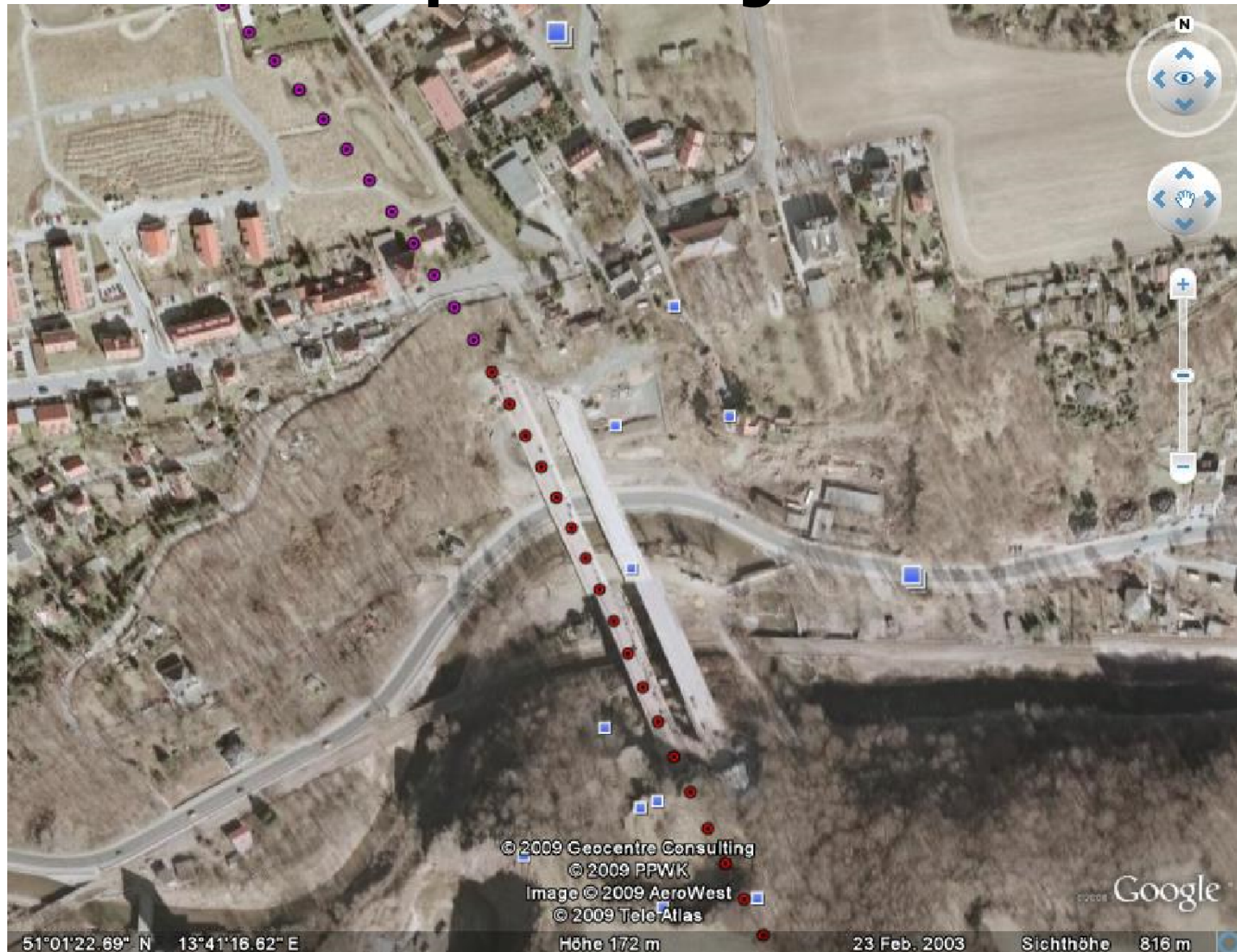
Art der Bestimmung	x[m]	y[m]	z[m]	$\sigma$ x[cm]	$\sigma$ y[cm]	$\sigma$ z[cm]
Leverarmcalibration1	0,461	-0,104	1,603	0,4	0,7	5,0
Leverarmcalibration2	0,461	-0,122	1,578	2,2	2,9	18,7
konventionell	0,446	-0,083	1,572	-	-	-



# Ucrtana trasa tunela autoputa A17 prema Pragu duljine 3,7 km na snimku iz 2003. god.



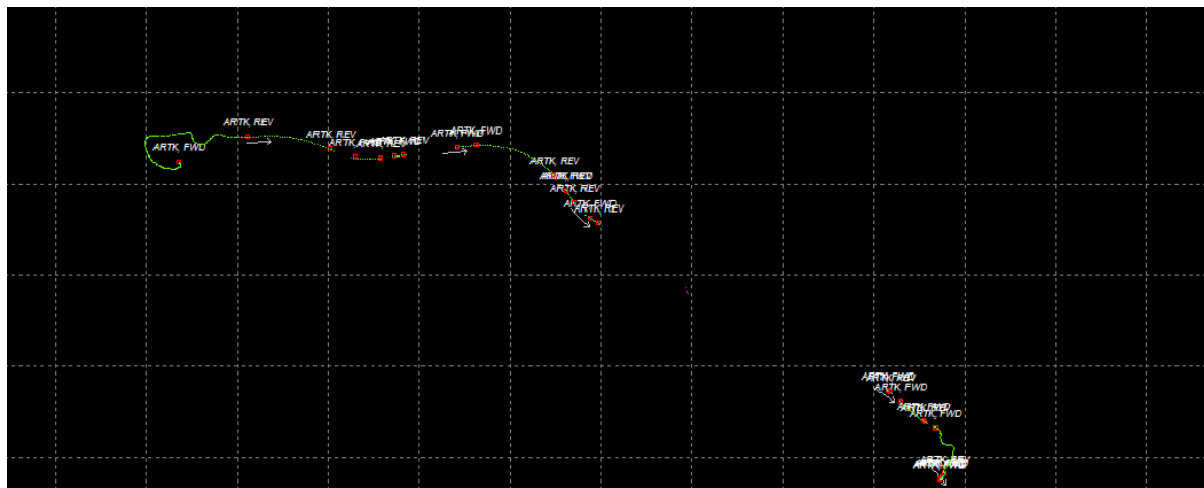
# Snimak iz veljače 2003. god. tunela u izgradnji prema Pragu



# 4.3 Sažetak rješenja u tunelu 1

## Samo GPS mjerenja unutarnja točnost

Only GPS Solution		
Forward	Reverse	Combined
<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>
0.00 - 0.10 m: 95.4 %	0.00 - 0.10 m: 75.7 %	0.00 - 0.10 m: 97.7 %
0.10 - 0.30 m: 1.3 %	0.10 - 0.30 m: 1.1 %	0.10 - 0.30 m: 1.8 %
0.30 - 1.00 m: 0.6 %	0.30 - 1.00 m: 15.7 %	0.30 - 1.00 m: 0.0 %
1.00 - 5.00 m: 1.6 %	1.00 - 5.00 m: 6.7 %	1.00 - 5.00 m: 0.1 %
5.00 m + over: 1.1 %	5.00 m + over: 0.8 %	5.00 m + over: 0.3 %



### Measurement RMS Values:

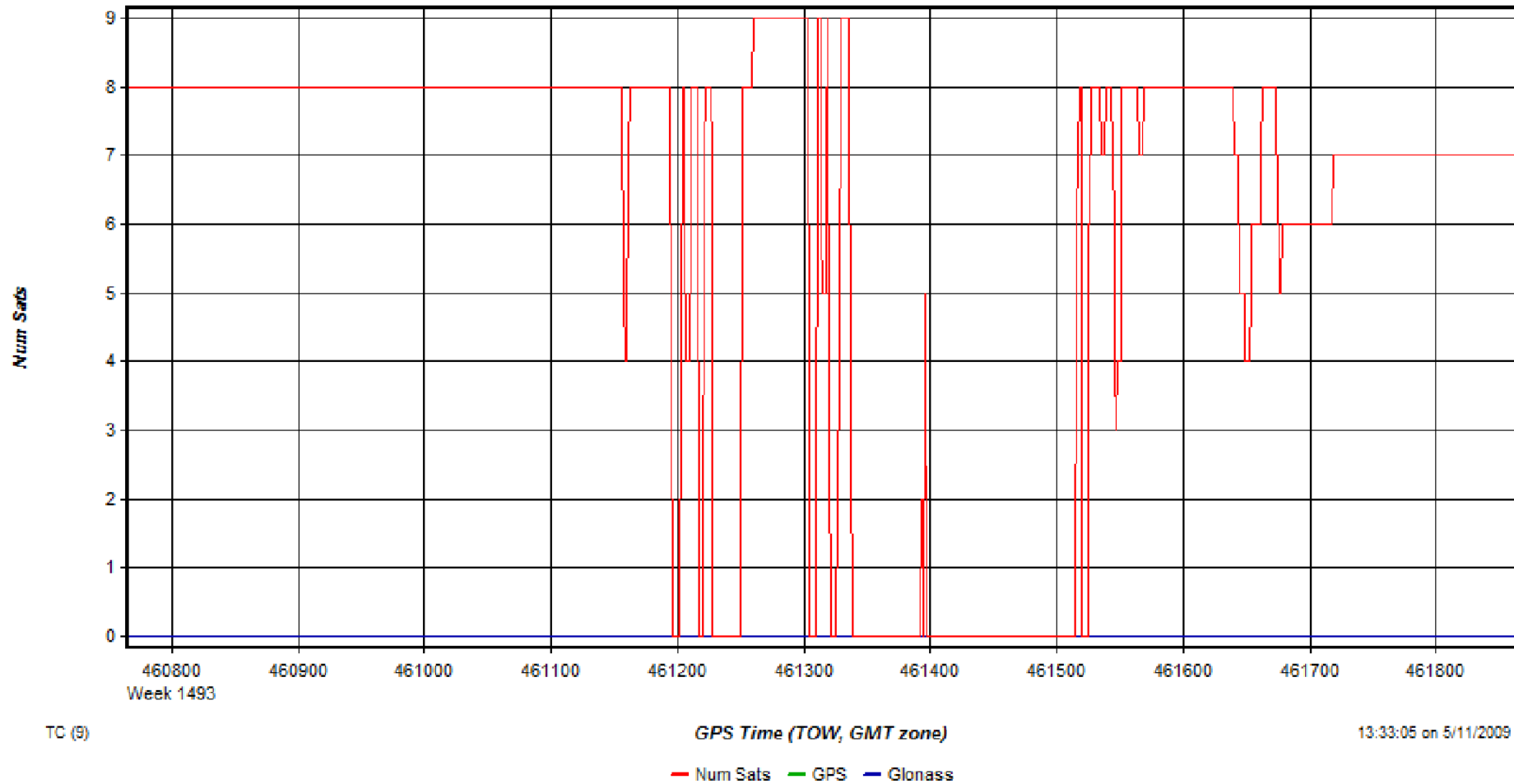
L1 Phase: 0.0110 (m)  
C/A Code: 0.98 (m)  
L1 Doppler: 0.049 (m/s)

### Fwd/Rev Separation RMS Values:

East: 0.164 (m)  
North: 0.658 (m)  
Height: 0.241 (m)

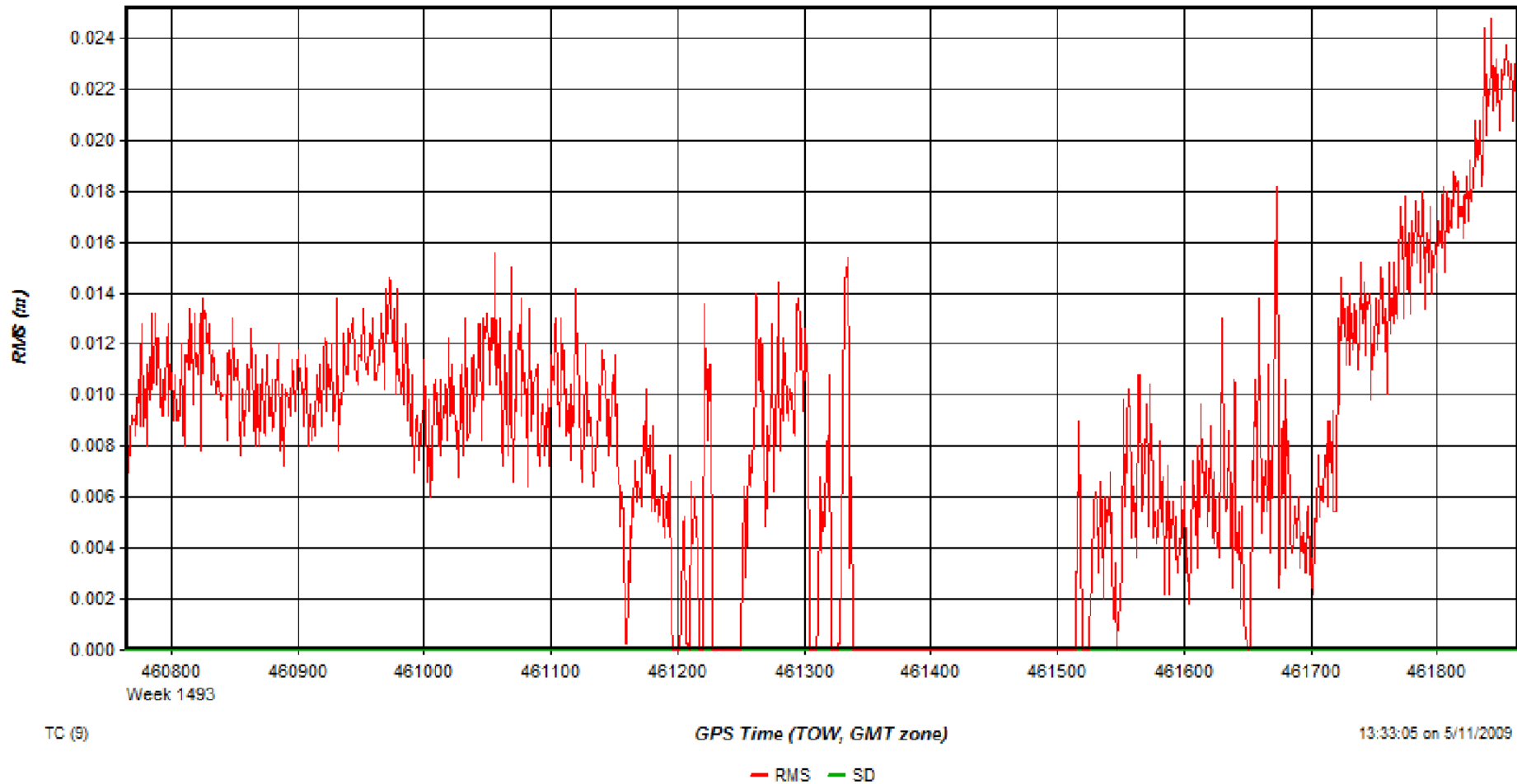
# Broj satelita tijekom mjerenja

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Number of Satellites Line Plot



# Graf točnosti faznih mjerenja GPS

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Carrier Residual RMS Plot

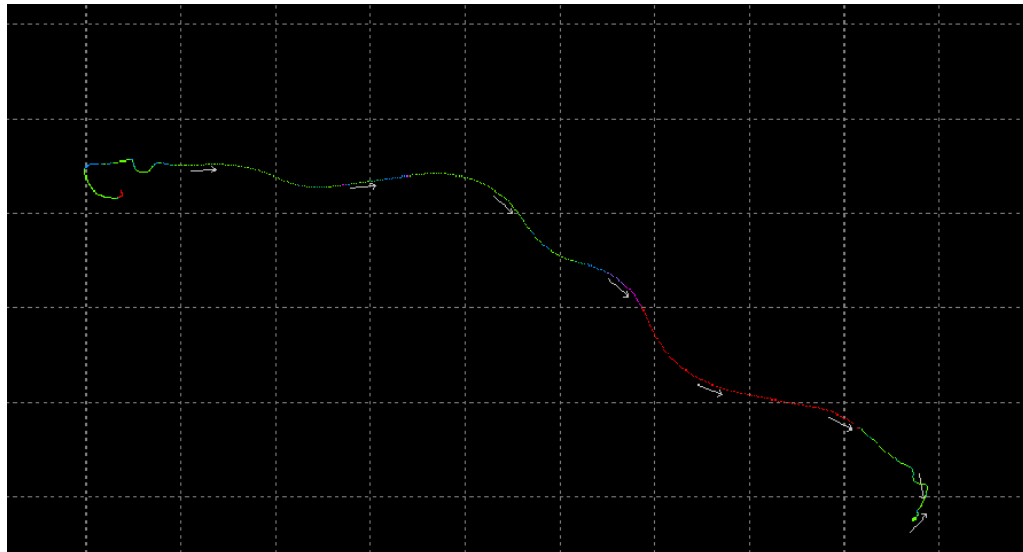


# Sažetak rješenja u tunelu 2

unutarnja točnost

## Loosely coupled Filtered

Forward	Reverse	Combined
<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>
0.00 - 0.10 m: 82.1 %	0.00 - 0.10 m: 81.3 %	0.00 - 0.10 m: 84.7 %
0.10 - 0.30 m: 2.5 %	0.10 - 0.30 m: 2.9 %	0.10 - 0.30 m: 2.4 %
0.30 - 1.00 m: 2.1 %	0.30 - 1.00 m: 2.0 %	0.30 - 1.00 m: 3.3 %
1.00 - 5.00 m: 4.9 %	1.00 - 5.00 m: 5.0 %	1.00 - 5.00 m: 9.6 %
5.00 m + over: 8.4 %	5.00 m + over: 8.7 %	5.00 m + over: 0.0 %



### Fwd/Rev Separation RMS Values:

East: 15.140 (m)

North: 11.740 (m)

Height: 0.349 (m)

### Fwd/Rev Sep. RMS for 25%-75% weighting (663 occurrences):

East: 2.516 (m)

North: 1.920 (m)

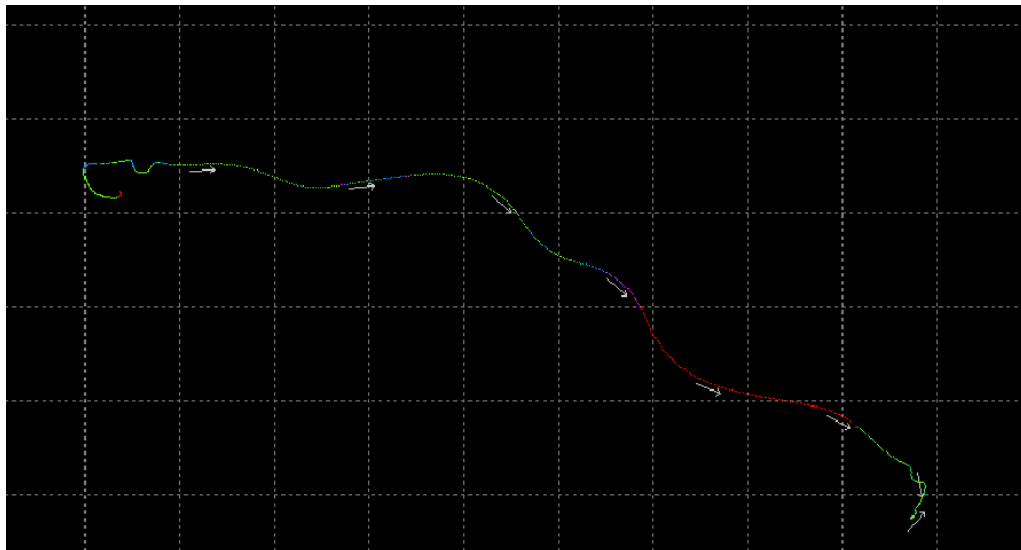
Height: 0.115 (m)

# Sažetak rješenja u tunelu 3

unutarnja točnost

**Tightly coupled filtered**

Forward	Reverse	Combined
<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b>
0.00 - 0.10 m: 80.9 %	0.00 - 0.10 m: 81.3 %	0.00 - 0.10 m: 85.0 %
0.10 - 0.30 m: 2.4 %	0.10 - 0.30 m: 2.9 %	0.10 - 0.30 m: 2.2 %
0.30 - 1.00 m: 2.3 %	0.30 - 1.00 m: 2.0 %	0.30 - 1.00 m: 3.4 %
1.00 - 5.00 m: 7.7 %	1.00 - 5.00 m: 5.0 %	1.00 - 5.00 m: 9.5 %
5.00 m + over: 6.8 %	5.00 m + over: 8.7 %	5.00 m + over: 0.0 %



**Fwd/Rev Separation RMS Values:**

East: 12.791 (m)

North: 4.780 (m)

Height: 0.218 (m)

**Fwd/Rev Sep. RMS for 25%-75% weighting (563 occurrences):**

East: 1.798 (m)

North: 0.256 (m)

Height: 0.019 (m)

# Sažetak rješenja u tunelu 4

unutarnja točnost

## Tightly coupled smoothed

Forward	Reverse	Combined
<b>Position Standard Deviation Percentages:</b> 0.00 - 0.10 m: 83.5 % 0.10 - 0.30 m: 3.9 % 0.30 - 1.00 m: 12.6 % 1.00 - 5.00 m: 0.0 % 5.00 m + over: 0.0 %	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b> 0.00 - 0.10 m: 84.6 % 0.10 - 0.30 m: 3.8 % 0.30 - 1.00 m: 11.6 % 1.00 - 5.00 m: 0.0 % 5.00 m + over: 0.0 %	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b> 0.00 - 0.10 m: 86.0 % 0.10 - 0.30 m: 3.3 % 0.30 - 1.00 m: 10.7 % 1.00 - 5.00 m: 0.0 % 5.00 m + over: 0.0 %

## Tightly coupled filtered

Forward	Reverse	Combined
<b>Position Standard Deviation Percentages:</b> 0.00 - 0.10 m: 80.9 % 0.10 - 0.30 m: 2.4 % 0.30 - 1.00 m: 2.3 % 1.00 - 5.00 m: 7.7 % 5.00 m + over: 6.8 %	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b> 0.00 - 0.10 m: 81.3 % 0.10 - 0.30 m: 2.9 % 0.30 - 1.00 m: 2.0 % 1.00 - 5.00 m: 5.0 % 5.00 m + over: 8.7 %	<b>Position Standard Deviation Percentages:</b> 0.00 - 0.10 m: 85.0 % 0.10 - 0.30 m: 2.2 % 0.30 - 1.00 m: 3.4 % 1.00 - 5.00 m: 9.5 % 5.00 m + over: 0.0 %

Fwd/Rev Separation RMS Values:

East: 0.218 (m)  
 North: 0.099 (m)  
 Height: 0.090 (m)

Fwd/Rev Sep. RMS for 25%-75% weighting (733 occurrences):

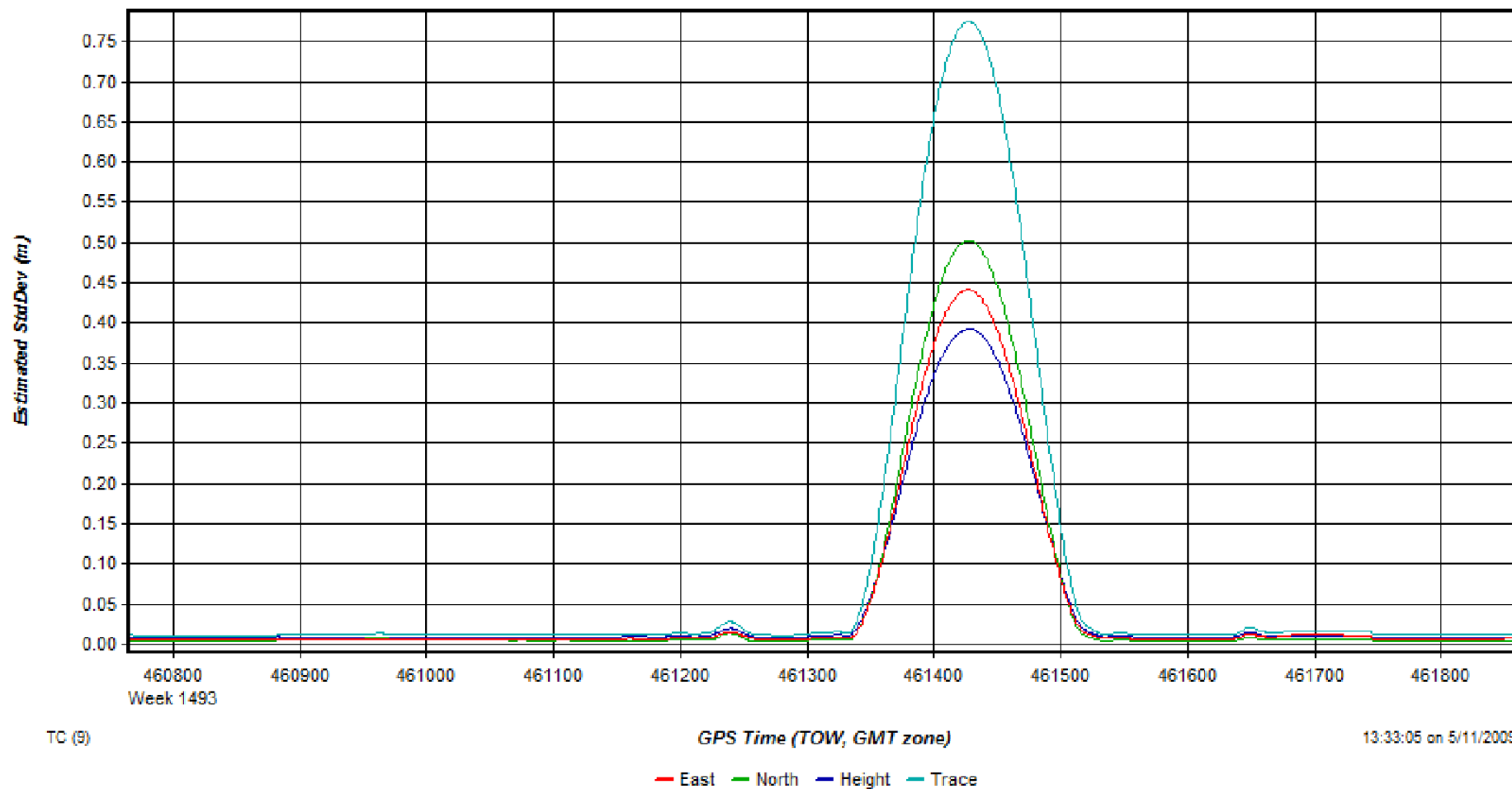
East: 0.138 (m)  
 North: 0.041 (m)  
 Height: 0.023 (m)

Rauch- Tung- Striebel (RTS) Smoother



# Procjenjena položajna točnost i točnost njenih komponenata

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Estimated Position Accuracy Plot



TC (9)

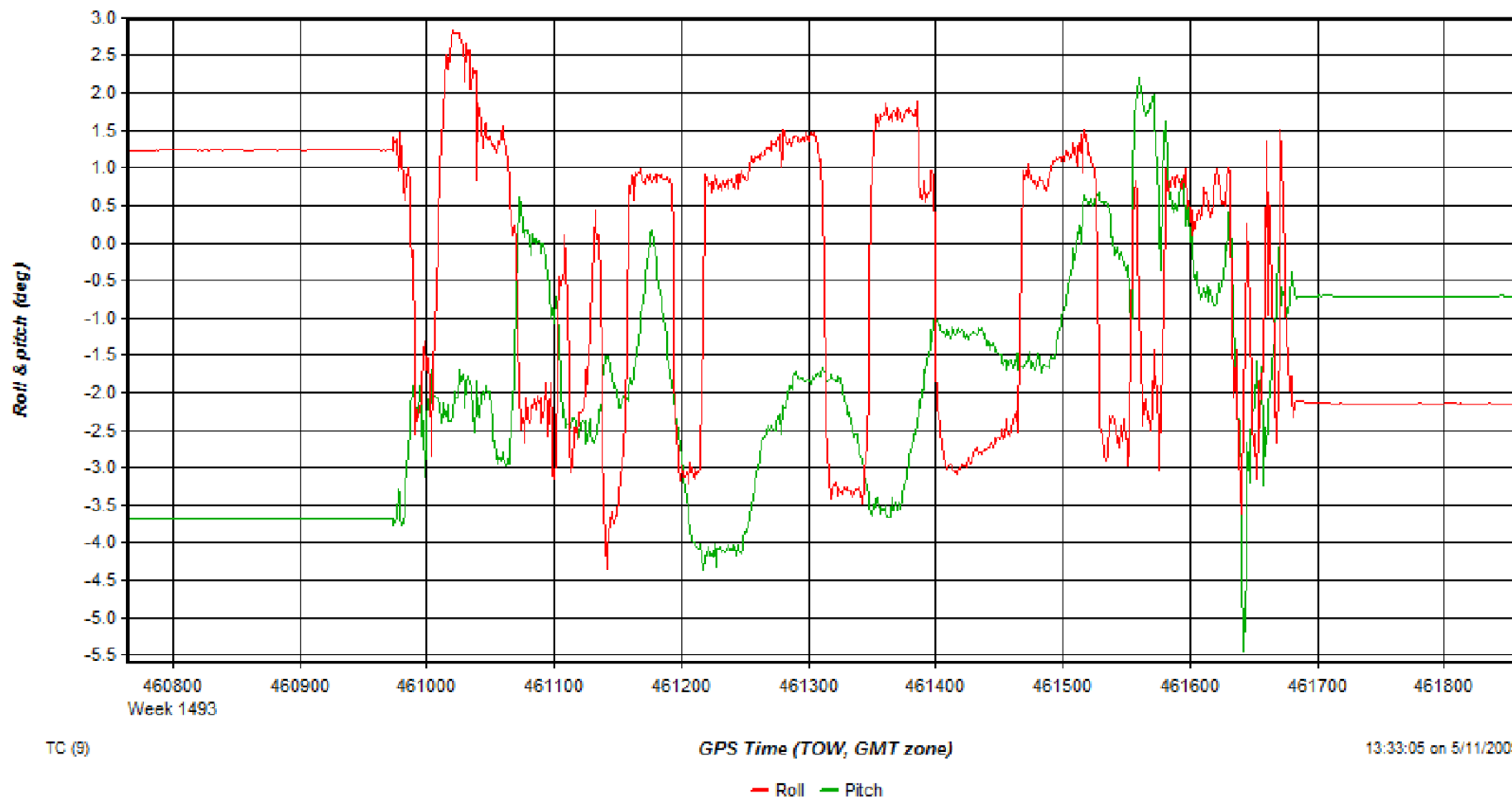
GPS Time (TOW, GMT zone)

13:33:05 on 5/11/2009

— East — North — Height — Trace

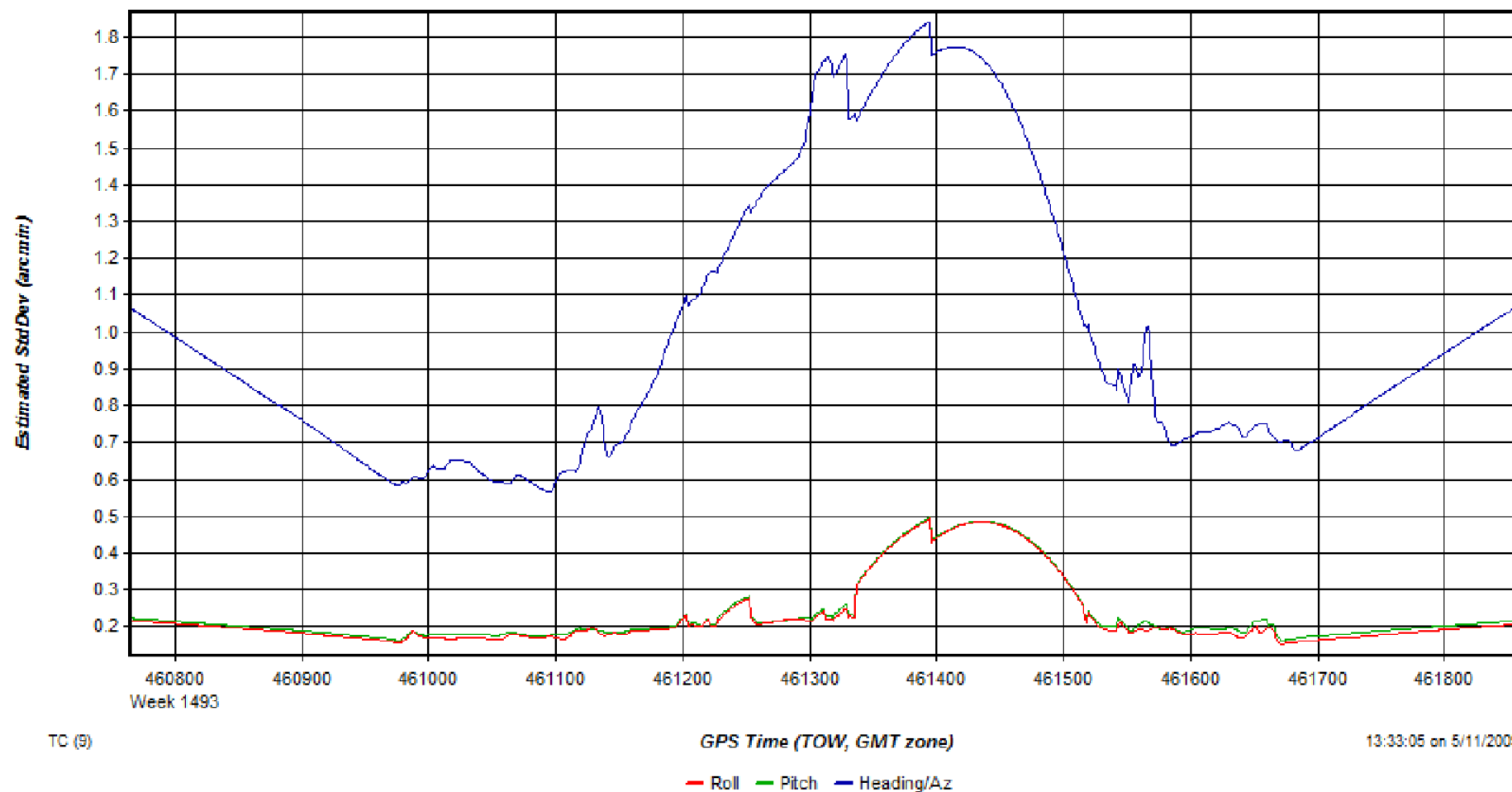
# Graf kuteva nagiba roll i pitch

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Roll & pitch Plot



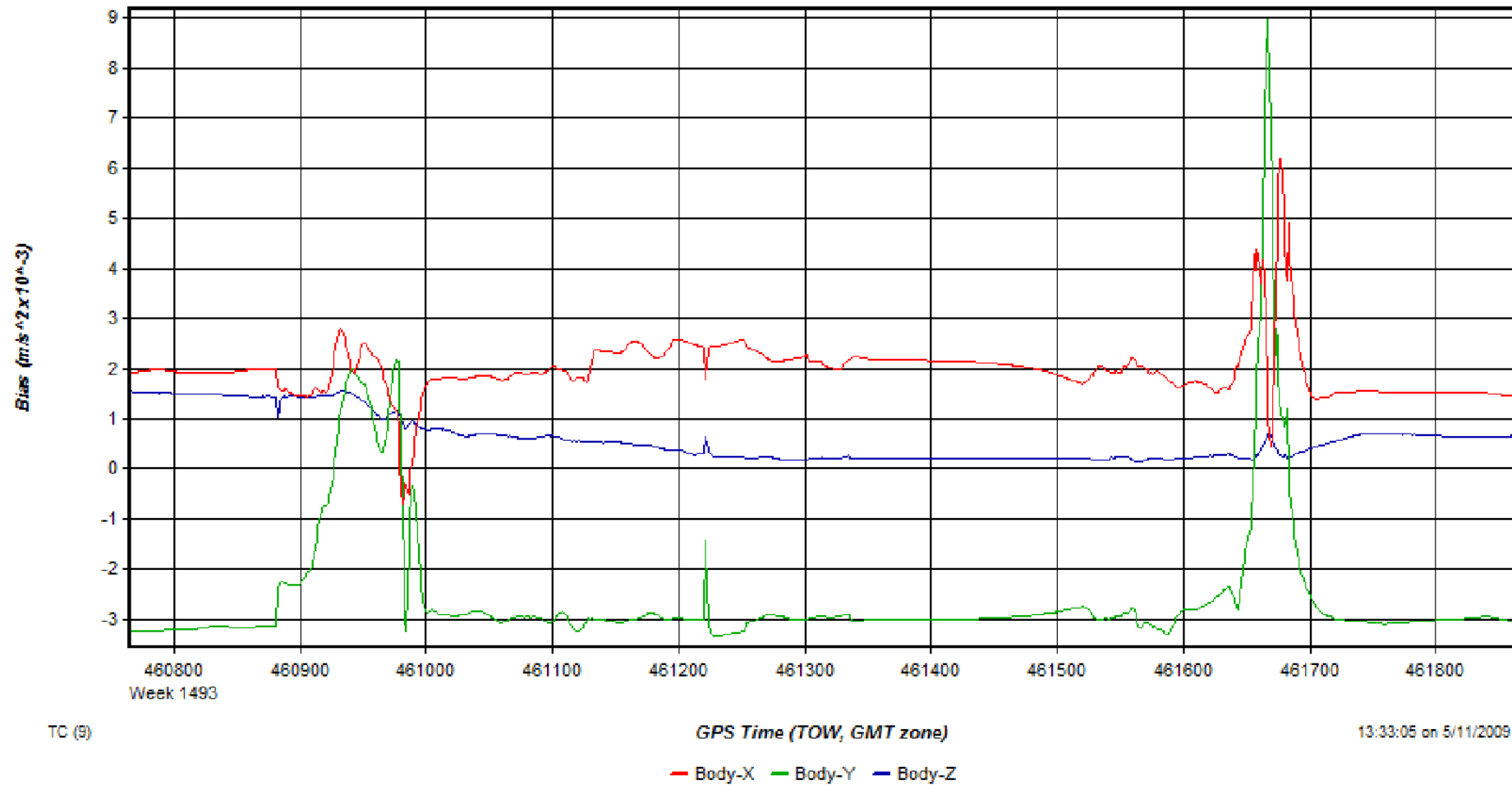
# Točnost određivanja kuteva nagiba

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Estimated Attitude Accuracy Plot



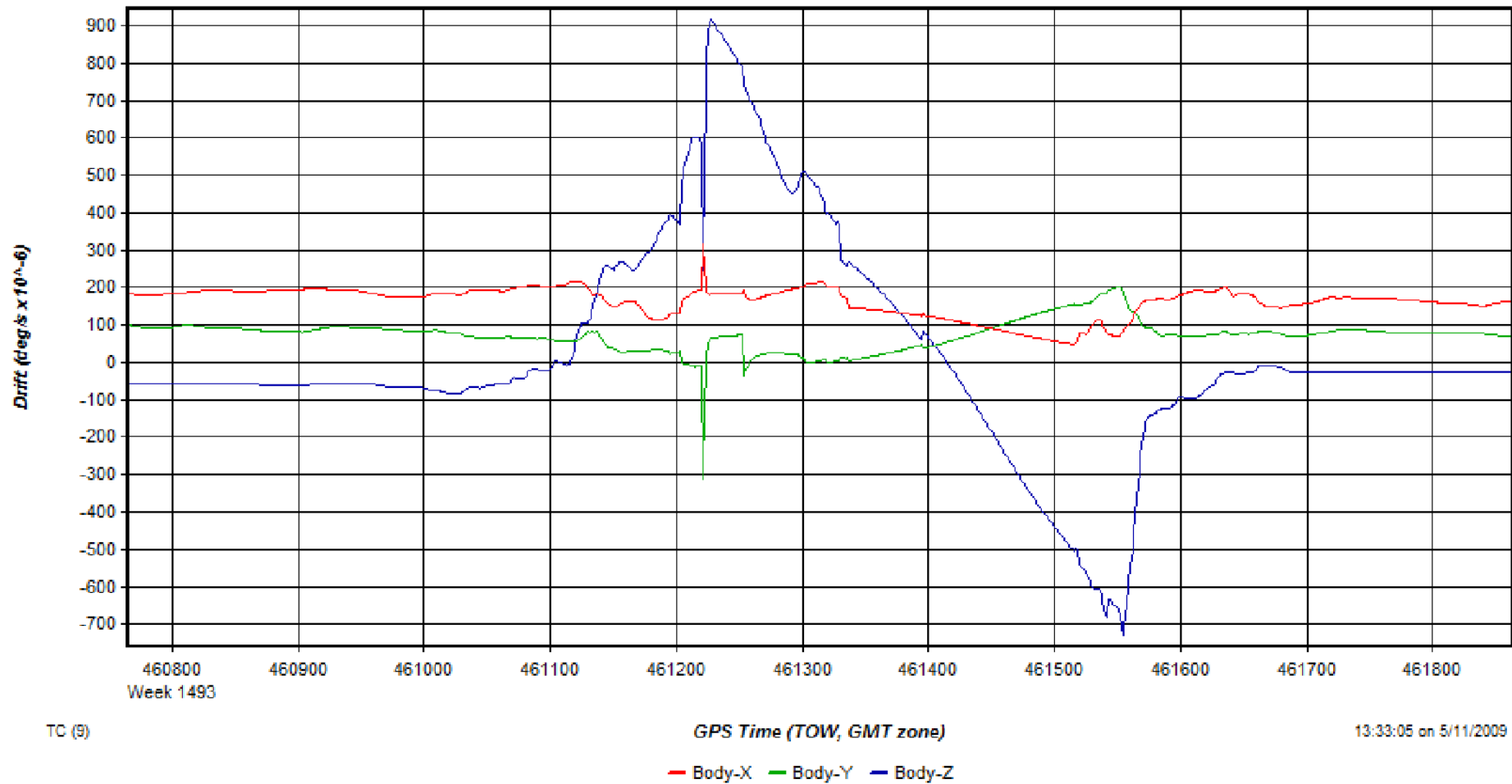
# Graf "bias-a" akcelerometra

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Accelerometer Bias Plot



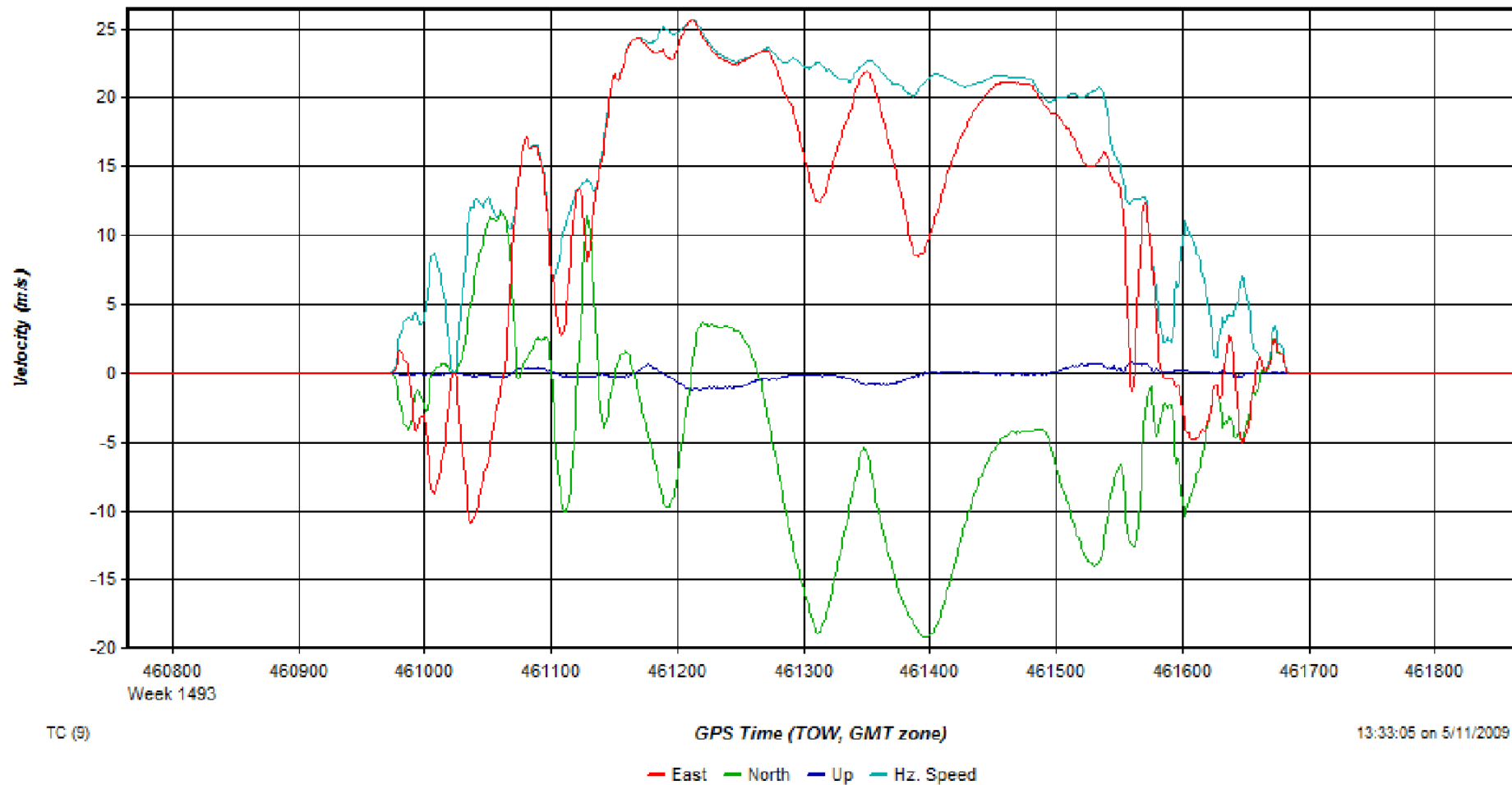
# Graf hoda žiroskopa

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Gyro Drift Plot



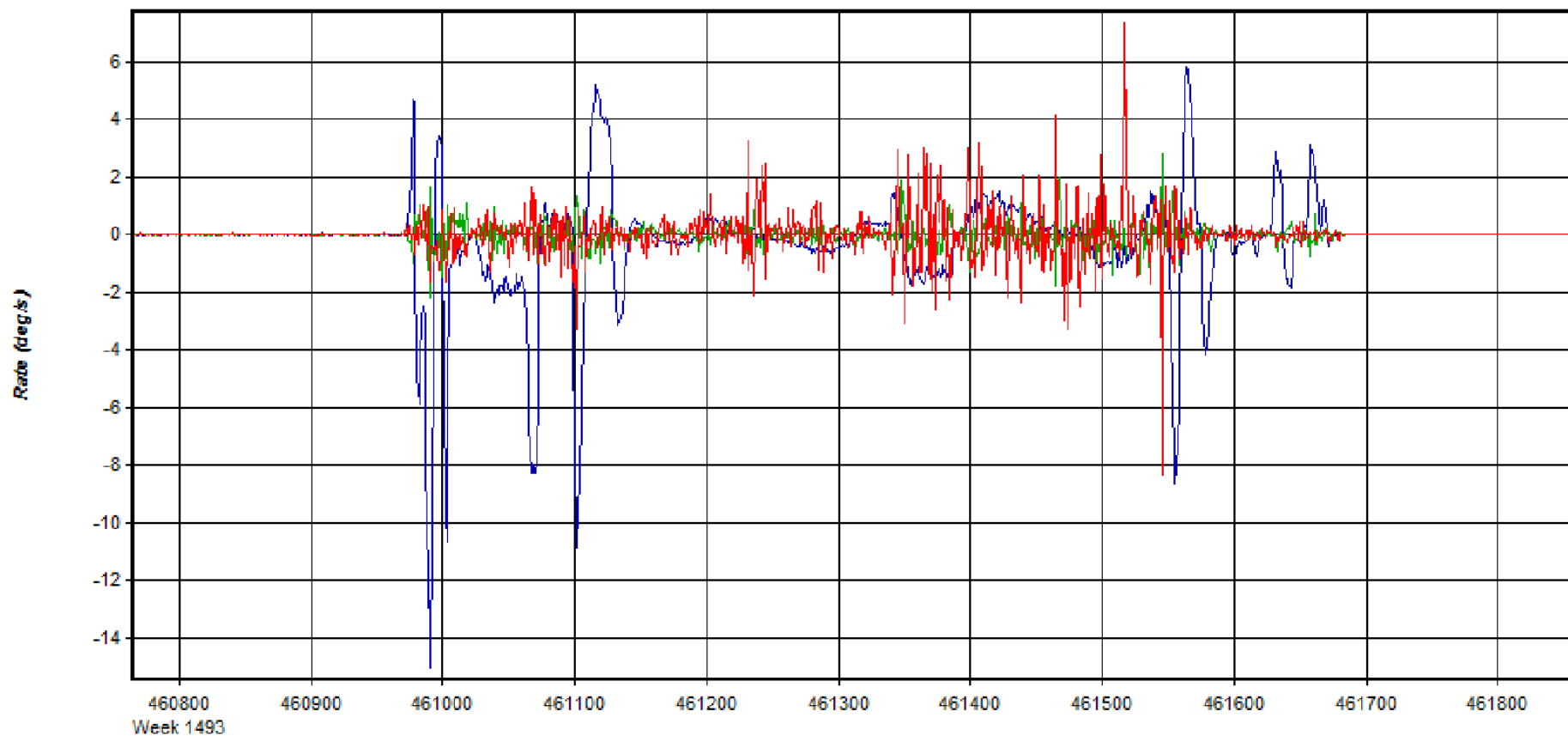
# Graf komponenti brzine gibanja

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Velocity Profile Plot



# Graf određivanja kutnih brzina

Tunel\_Prag [Smoothed Combined] - Angular Rates Plot



TC (9)

GPS Time (TOW, GMT zone)

13:33:05 on 5/11/2009

— Body-X — Body-Y — Body-Z

## **4.4. "Vanjska točnost" i pouzdanost iTrace u tunelu**



# Predpostavke za mjerenja i obradu

- Test ways (highway section of the A17 Dresden-Prag with tunnel of 3.7 km)



# Pretpostavke za mjerenja i obradu

- Točne koordinate trase tunela:
  - Koordinate dobivene od highway office Saxony u državnom sustavu
  - Obaviti mjerenja za transformaciju koordinata
- Izračunati transformacijske parametre preko koordinata identičnih točaka
  - INS – podaci iTrace principijelno su u WGS84
  - Koordinate autoputa u DE\_RD/83\_5GK

# **Izvođenje samih mjerenja u tunelu**

- 18 mjerenja na autoputu odnosno u tunelu
- Mjerenja s različitim INS- frekvencijama (GPS 1Hz)
- → Obrada rezultata samo u smjeru Praga

# Procjena točnosti obavljenih mjerenja "vanjska točnost"

- Usporedba "treba – ima" (HZ-horizontalnih koordinata, V- visina) za "tunel Prag" (3700 m dug)

<b>10 Hz</b>			<b>20 Hz</b>		
rješenje	$\sigma$ HZ [m]	$\sigma$ V [m]	rješenje	$\sigma$ HZ [m]	$\sigma$ V [m]
Fwd	19,686	2,357	Fwd	9,193	1,206
Cmbsm	0,994	0,339	Cmbsm	0,472	0,177
Online	13,796	4,267	Online	10,392	2,132

Tablica standardnih odstupanja računata iz 18 pojedinačnih mjerenja

# Procjena točnosti obavljenih mjerenja

- Metodom usporedbe: iz razlike rješenja (bolje-lošije)

<b>10 Hz</b> Kombinacija	$\sigma$ East [m]	$\sigma$ North [m]	$\sigma$ Height [m]
Cmbsm-Online	13,263	14,026	4,376
Cmbsm-Fwdsm	0,309	0,377	0,343
Cmbsm-Revsm	0,423	0,516	0,560

<b>20 Hz</b> Kombinacija	$\sigma$ East [m]	$\sigma$ North [m]	$\sigma$ Height [m]
Cmbsm-Online	12,720	15,206	1,969
Cmbsm-Fwdsm	0,241	0,152	0,066
Cmbsm-Revsm	0,192	0,126	0,053

Tablica standardnih odstupanja računata iz 18 pojedinačnih mjerenja

# 5.1 Istarživanje položajne točnosti kao funkcije vremena bez GPS mjerenja

Primrema za istraživanje točnosti bez potpore GPS

Test točke, odnosno linija





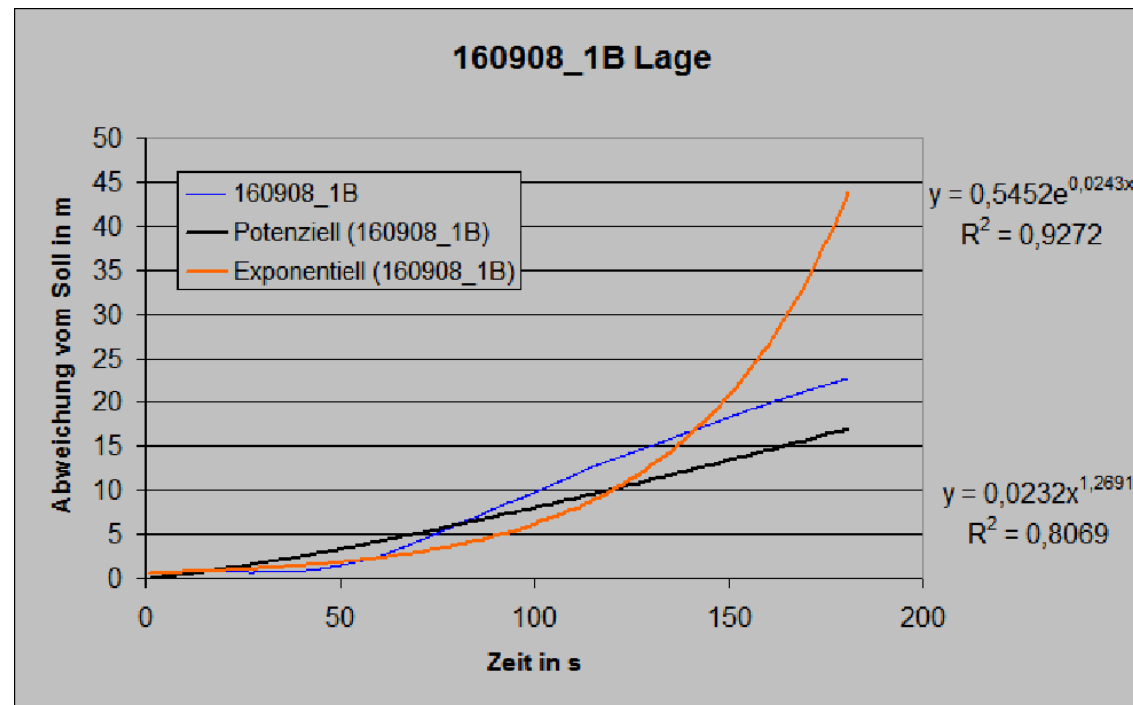
Zaklonjena antena



Prikolica bicikla iznad točke

# Konstrukcija vremensko prostornih funkcija

Odstupanja od linije su aproksimirana izjenujućim eksponencijalnim i potencijalnim funkcijama iz jedne od serija od 30 mjerenja





# Obrada s razvijenim programom „INSZeitfunktion“

Sličan program kao i za obradu podataka u tunelu "INSTunnel", samo puno jednostavniji kako se radi o "treba krivulji" u pravcu

## Konstrukcija funkcija

- Za ispitivanja uzete dvije funkcije eksponencijalna i potencijalna funkcija
- $R^2 \rightarrow$  Kriterij za odabir funkcije - kvadrat koeficijenta korelacije

# Rezultati provedenih ispitivanja iz 30 serija mjerenja

Vrsta određivanja	eksponencijalna potencionalna funkcija	Odstupanje poslije 180 s u m
Online odstupanja u hor. ravnini	$y = 0,2946 * e^{0,0311x}$ $y = 0,0436 * x^{1,5872}$	79,508 165,598
Forward odstupanja u hor. ravnini	$y = 0,4554 * e^{0,0268x}$ $y = 0,0554 * x^{1,4796}$	56,680 120,34
Online visine	$y = 0,3248 * e^{0,0225x}$ $y = 0,0862 * x^{1,1796}$	18,643 39,43
Forward visine	$y = 0,2102 * e^{0,0240x}$ $y = 0,0432 * x^{1,2015}$	15,805 20,141

## 5.2. Istarživanja vremena inicijaliziranja

### Vrsta istraživanja

- Reinicijalizacija: Vrijeme od kraja zaklona pa do fiksnih rješenja cijelog broja valnih duljina (ambiguities)
- Bidirectional coupling (obostrana povezanost) → skraćuje vrijeme inicijaliziranja GPS ?
- Istrazivanja u različitim kombinacijama
- Bez podataka o pouzdanosti interesira nas samo vrijeme inicijaliziranja a ne kvalitet rješenja
- Postprocesiranje nije neophodno

# Izvođenje mjerenja

- Mnogo satelitskih signala:  
na mostu kratko i dugo trajanje zaklona GPS antene, te izvođenje svaki put 85 GPS mjerenja
- Malo satelitskih signala ispred zgrade Fakulteta:  
isto tako svaki put 85 mjerenja

## Obrada s Excel-om

- Odstranjivanje grubih pogrešaka sa (3-sigma pravilom)
- Ispitivanje na normalnu raspodjelu histogramima i medianima

# Kutija za zaklon GPS-antene



# Procjena obrađenih mjerenja

Vrsta vrijeme zakl./br. satelita	Vrijeme zaklona [s]	Vrijeme reinicijaliziranja [s]	Prosječan br. satelita
kratko više	6,6	9,0	6,75
dugo više	67,5	15,0	7,12
kratko malo	6,8	66,2	5,45
dugo malo	66,8	41,1	5,87
Samo GPS	3,9	13,7	7,83

# 6. Zaključci

- **U početku puno problema oko priključka svih komponenata sustava, osposobljavanju za RTK mjerenja, te korištenju umreženih referentnih stanica.**
- **Za mnoge geodetske radove potrebna cm-točnost se gubi već nakon nekoliko sekundi bez podrške GPS. U tunelu A17 autoputa (cca 3,7 km) standardne devijacije koordinata se kreću oko 0,5 m za najbolja postprocessing rješenja.**
- **To je dovoljna točnost za utvrditi položaj vozila u prometnoj traci, ali nije dovoljna za inspekciju dugih tunela.**

# 6. Zaključci- nastavak

- **Bidirekcijska povezanost INS i GPS skraćuju vrijeme inicijalizacije GPS-prijamnika za 50% i pri brzini od 80 km/h na izlazu tunela, znači cca 100 m prije dobivanje cm-točnosti.**
- **U budućnosti se očekuje široka primjena INS/GNSS navigacije s boljim performansijama sustava, s istovremeno prihvatljivijim cijenama.**



**Hvala lijepa na pažnji!**