

RTKMon-Einsatz zur Überwachung und Untersuchung von RTK-Infrastrukturen

Martin Freitag
Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern
Alexandrastraße 4
80538 München
martin.freitag@lvg.bayern.de

Andreas Knöpfler, Michael Mayer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Geodätisches Institut
Englerstraße 7
76131 Karlsruhe
{andreas.knoepfler, michael.mayer}@kit.edu

1 Einleitung

Der **SA**telliten**POS**itionierungsdienst **SAPOS**[®] der deutschen Landesvermessung ist ein Produkt der **Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV)**¹. Wesentliche Aufgabe von **SAPOS**[®] ist die flächendeckende und nachhaltige Bereitstellung des amtlichen geodätischen Raumbezugs im ETRS89² der Bundesrepublik Deutschland als Bestandteil der infrastrukturellen Grundversorgung. Der **Hochpräzise Echtzeit Positionierungs-Service SAPOS**[®]-HEPS erfüllt diese Funktion als Netz-RTK-Dienst (Wanninger 2006).

Im Gegensatz zum klassischen RTK (Real-Time Kinematic), bei dem die Echtzeitpositionierung des Rovers unter Verwendung der Trägerphasenbeobachtungen mit Mehrdeutigkeitsfestsetzung in Bezug auf eine einzelne Referenzstation erfolgt, werden bei Netz-RTK-Anwendungen Informationen aus der Referenzstationsvernetzung genutzt, um für die Position des Rovers entfernungsabhängig-

¹ AdV-Online: Homepage der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV), www.adv-online.de

² European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) in der Realisierung DREF91 (**SAPOS**[®] Diagnoseausgleichung 2002)

ge atmosphärische und orbitbedingte Fehler weitgehend zu korrigieren. Netz-RTK ist bereits seit vielen Jahren Standard im Bereich der präzisen GNSS-Echtzeitpositionierung (Landau et al. 2002). Der SAPOS[®]-HEPS-Dienst ermöglicht die cm-genaue GNSS³-Echtzeitpositionierung im amtlichen Raumbezug ETRS89 mit einer Genauigkeit⁴ von 1-2 cm in der Lage und 2-3 cm in der ellipsoidischen Höhe.

Der SAPOS[®]-Betrieb für das Bundesland Bayern liegt in der Verantwortung des Landesamtes für Vermessung und Geoinformation Bayern (LVG Bayern⁵). Neben dem Aufbau und Betrieb der SAPOS[®]-Referenzstationen, der Prozessierung der SAPOS[®]-Daten und der Bereitstellung der SAPOS[®]-Dienste ist die Qualitätssicherung im Hinblick auf die in der Produktdefinition SAPOS[®] spezifizierten Eigenschaften eine wichtige Aufgabe des SAPOS[®]-Betreibers.

Am LVG Bayern wurde insbesondere zur Qualitätssicherung des HEPS-Dienstes eine Infrastruktur bestehend aus derzeit drei RTK-Monitorstationen und der am LVG entwickelten zentralen Software RTKMon etabliert. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit anderen staatlichen Vermessungsverwaltungen kommt die Software RTKMon derzeit bei verschiedenen Netz-RTK-Dienstbetreibern im Inland und europäischen Ausland zum Einsatz. Das Geodätische Institut des Karlsruher Instituts für Technologie setzt die Software RTKMon im Zusammenhang mit Untersuchungen von RTK-Infrastrukturen und Netz-RTK-Diensten ein.

2 HEPS-Monitoring am LVG Bayern

Der automatisierte Betrieb von RTK-Monitorstationen stellt eine wichtige Komponente der Qualitätssicherung eines Netz-RTK-Dienstes dar. Ziel ist insbesondere die unabhängige Überwachung von Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität des Dienstes. Entsprechende Alarmmeldungen in Echtzeit informieren den Dienstbetreiber, der geeignete Sofortmaßnahmen ergreifen bzw. unverzüglich eine Nutzerinformation versenden kann. Die Performance des Netz-RTK-Dienstes an den RTK-Monitorstationen ist außerdem für den Kunden in Echtzeit im Internet einsehbar. Diese Veröffentlichung der Performance der RTK-Monitorstationen schafft Transparenz durch Information und bildet Vertrauen.

³ aktuell basierend auf GPS+GLONASS, zukünftige Integration von Galileo vorgesehen

⁴ Messunsicherheit nach DIN 1319 mit einem Vertrauensbereich von 68.3%

⁵ LVG Bayern: Landesamt für Vermessung und Geoinformation Bayern, Bayerische Vermessungsverwaltung, www.vermessung.bayern.de

2.1 RTK-Monitorstationen

Derzeit basiert das HEPS-Monitoring in Bayern auf drei RTK-Monitorstationen, deren Daten nicht in der Vernetzung verarbeitet werden, so dass ein realitätsnahes Monitoring realisiert ist. Diese Redundanz ermöglicht es, Störungen, die ursächlich an der Monitorstation selbst liegen, von Beeinträchtigungen durch den Netz-RTK-Dienst zu trennen. Eine weitgehend flächenhafte Verteilung der Monitorstationen dient dazu, regionale Unterschiede der Netz-RTK-Performance aufzudecken. Im Sinne eines Worst-Case-Szenarios wurde die Platzierung der RTK-Monitorstationen mit maximalem Abstand zu den umliegenden Referenzstationen gewählt (Abbildung 1), da so die Herausforderungen für Netz-RTK i.d.R. am größten sind.



Abbildung 1: HEPS-Monitorstationen des LVG Bayern (<http://sapos.bayern.de>)

Neben den allgemeinen Kriterien für die optimale GNSS-Eignung eines Standortes (z. B. Abschattungsfreiheit) muss an der Monitorstation auch eine geeignete

te Echtzeit-Kommunikationsinfrastruktur (Internet-Festnetzanschluss oder Zugang zum bayerischen Behördennetz BayKom; Bayerische Kommunikationsnetze) vorhanden sein. Abbildung 2 zeigt die GNSS-Roverantenne an der RTK-Monitoringstation Freising. Die Hardware-Ausstattung (Abbildung 3) der RTK-Monitorstationen umfasst:

- GNSS-RTK-Empfänger und -Antenne (i.d.R. Standard-Hardware, wie sie Nutzer im Feld einsetzen),
- Remote Power Switch (ermöglicht Kaltstart einzelner Hardware-Komponenten über Fernzugriff),
- Kommunikationshardware:
 - Netzwerk-Router oder Switch, evtl. DSL-Modem,
 - COM-Server (Wandler TCP/IP-RS232), da viele RTK-Empfänger nicht über einen direkten Ethernet-Port verfügen.

2.2 Datenkommunikation

Die Echtzeit-Datenkommunikation zwischen den RTK-Monitorstationen und der Rechenzentrale von SAPOS[®]-Bayern am LVG in München erfolgt mittels des TCP/IP-Protokolls unter Nutzung des bayerischen Behördennetzes BayKom, da alle drei Monitorstationen derzeit an örtlichen Vermessungsämtern liegen, die über einen entsprechenden Zugang in das BayKom-Netz verfügen. Um den herstellerunabhängigen Einsatz verschiedener RTK-Systeme z. B. im Rahmen von Benchmark-Tests zu ermöglichen, erfolgt die Kommunikation mit den RTK-Empfängern über standardisierte Formate wie RTCM SC-104⁶ für die Referenzdaten (Standard-Datenformat beim SAPOS[®]-HEPS-Dienst) und NMEA 0183-GGA⁷ zur Übermittlung der Positionsinformationen vom RTK-Empfänger.

2.3 Software

Am LVG Bayern wurden Softwarekomponenten für das HEPS-Monitoring mit folgenden Aufgaben entwickelt:

- Echtzeit-Auswertung der NMEA 0183-GGA-Daten der RTK-Empfänger der Monitorstationen,
- Streaming der HEPS-Daten zu den RTK-Monitorstationen,
- Steuerung der RTK-Empfänger bzw. der RTK-Messprozesse,

⁶ RTCM SC-104: Radio Technical Commission for Maritime Services, Special Committee 104, www.rtcn.org

⁷ NMEA 0183: National Marine Electronics Association, Standard 0183, Global Positioning System Fix Data (GGA), http://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_standards.asp

- Analyse und Aufbereitung der Messergebnisse in Echtzeit, Erstellung von Grafiken, Erzeugung von Warnmeldungen via E-Mail,
- Visualisierung im Internet.



Abbildung 2: GNSS-Roverantenne Leica AS10 an der RTK-Monitorstation Freising. Eine zweite Antennenhalterung dient der Durchführung von Benchmark-Tests.



Abbildung 3: Hardware-Rack der RTK-Monitorstation Freising (RTK-Empfänger Leica GS10, Remote-Power-Switch, Kommunikationshardware)

2.3.1 RTKMonService

Die Komponente RTKMonService wurde als Windows Service unter C# und .NET-Framework entwickelt, um ohne Benutzerintervention im Dauerbetrieb auf einem Server im Rechenzentrum betrieben werden zu können. Die HEPS-Daten werden via Ntrip v2.0 (RTCM 2009) über das Internet vom bayerischen SAPOS[®]-Ntrip-Caster bezogen und an die RTK-Empfänger der Monitorstationen weitergeleitet. Es wird somit dieselbe Datenquelle verwendet, die auch dem SAPOS[®]-HEPS-Nutzer via Ntrip im Feld zur Verfügung steht. Die Steuerung der RTK-Empfänger bzw. des RTK-Messprozesses erfolgt über das Streaming der HEPS-Referenzdaten. Werden diese dem RTK-Empfänger zur Verfügung gestellt, versucht er unmittelbar eine RTK-Positionslösung zu berechnen. Wird das Streaming der Referenzdaten unterbrochen, fällt der RTK-Empfänger nach

einer gerätespezifischen Zeitspanne zurück in eine autonome GNSS-Positionslösung. Die Information über die Art der Positionslösung und das Alter der Referenzdaten zum Zeitpunkt der Positionsberechnung im RTK-Empfänger werden dem RTKMonService über die Echtzeit-Daten (NMEA 0183-GGA) zur Verfügung gestellt.

Ein GGA-Datensatz beinhaltet im Wesentlichen:

- 3D-Position zur Messepoche inkl. UTC-Zeitpunkt,
- GNSS Quality Indicator
 - 0: Keine Positionslösung
 - 1: Autonome GNSS-Positionslösung
 - 2: Differenzielle GNSS-Positionslösung (DGNSS)
 - 4: RTK-Positionslösung (fixierte Mehrdeutigkeiten),
- Alter der Referenzdaten zum Zeitpunkt der Positionsberechnung.

Die relevanten Daten einer RTK-Session bestehen insbesondere aus der Initialisierungszeit (Time To Fix Ambiguity; TTF), einer über eine bestimmte Anzahl von Messepochen bzw. NMEA 0183-GGA-Datensätze gemittelten RTK-Position und den dazugehörigen Differenzen zu den Sollkoordinaten der Monitorstation. Die RTK-Sessions werden von RTKMonService in einer Datenbank (wahlweise PostgreSQL oder Microsoft SQL Server) und/oder in ASCII-Dateien abgelegt. So werden an jeder RTK-Monitorstation des LVG Bayern stündlich ca. 40 RTK-Sessions automatisiert erzeugt.

Zur Datenanalyse werden programmintern geozentrische und ellipsoidische Koordinaten verwendet. Die Koordinatendifferenzen zur ETRS89-Sollposition der Monitorstation werden zur einfachen Interpretation der Ergebnisse in ein lokales topozentrisches Koordinatensystem (Hofmann-Wellenhof et al. 2001) transformiert. Dadurch lässt sich elegant der Zwischenschritt über die Berechnung von Abbildungskordinaten (z. B. UTM) umgehen.

Die wichtigsten analysierten Qualitätsindikatoren für die RTK-Performance sind:

- Initialisierungszeit,
- Innere Genauigkeit bzw. Messrauschen (Standardabweichung),
- Äußere Genauigkeit (Differenzen zu den Sollkoordinaten).

Die RTK-Performance wird vom Programm hinsichtlich definierter Grenzwerte permanent überwacht. Bei Grenzwertüberschreitungen erfolgt automatisch die

Versendung einer Warnmeldung via E-Mail an den diensthabenden SAPOS[®]-Administrator.

2.3.2 RTKMonUI

RTKMonUI ist die grafische Bedienoberfläche (User Interface) für RTKMon-Service und bietet neben der numerischen und grafischen Darstellung der Messergebnisse weitere Analysefunktionen. Beispielsweise werden statistische Kennzahlen (z. B. Standardabweichungen, Mittelwerte) berechnet. Darüber hinaus können Koordinatenzeitreihen mittels eines gleitenden gewichteten Mittelwerts hoch- bzw. tiefpassgefiltert werden. RTKMonUI kommuniziert über jeweils eine TCP/IP-Socket-Verbindung mit RTKMonService und kann simultan auf verschiedenen PC im Netzwerk betrieben werden.

2.3.3 SAPOS[®] Monitoring Service

Der unter Java am LVG Bayern entwickelte „SAPOS[®] Monitoring Service“ SaMoS (Müller & Sedlmair 2007) erzeugt dynamische Grafiken aus der RTK-Mon-Datenbank für die Visualisierung der Ergebnisse im Internet (<http://sapos.bayern.de> → Monitoring → HEPS-Performance).

2.4 Praxisbeispiele

Beinahe 5 Mio. RTK-Sessions wurden in den vergangenen Jahren an den Monitorstationen des LVG Bayern erfasst. Die Analyse der kontinuierlichen Zeitreihen belegt die hohe Qualität der SAPOS[®]-HEPS-Daten. Abbildung 4 zeigt exemplarisch den Verlauf der HEPS-RTK-Performance am 01.01.2013 an der Monitorstation Freising.

Thematisch ausgewählte Ereignisse zeigen aber auch die derzeitigen technischen Grenzen von Netz-RTK auf und verdeutlichen, dass es sich um ein komplexes Messverfahren handelt, dessen Anwendung geodätischen Sachverstand erfordert, wenn das Genauigkeitspotential voll ausgeschöpft und zuverlässige Ergebnisse erzielt werden sollen.

2.4.1 HEPS-RTK-Standardabweichungen

Werden die Lage- und Höhe-Standardabweichungen der bayerischen RTK-Monitorstationen aus allen RTK-Sessions des Jahres 2012 (Tabelle 1) analysiert, so ist ersichtlich, dass die Genauigkeitsspezifikation des SAPOS[®]-HEPS-Dienstes gewährleistet werden kann. Dies ist umso bedeutsamer, da die Moni-

torstationen in ihrer Lage einen maximalen Abstand zu den umliegenden Referenzstationen aufweisen. Für Bad Neustadt a. d. Saale beträgt der Abstand zur nächstgelegenen Referenzstation Schweinfurt ca. 31 km. Der Wechsel der Hardware in Bad Neustadt a. d. Saale am 27.08.2012 belegt außerdem das signifikant geringere Messrauschen von RTK-Empfängern der neuesten Generation.

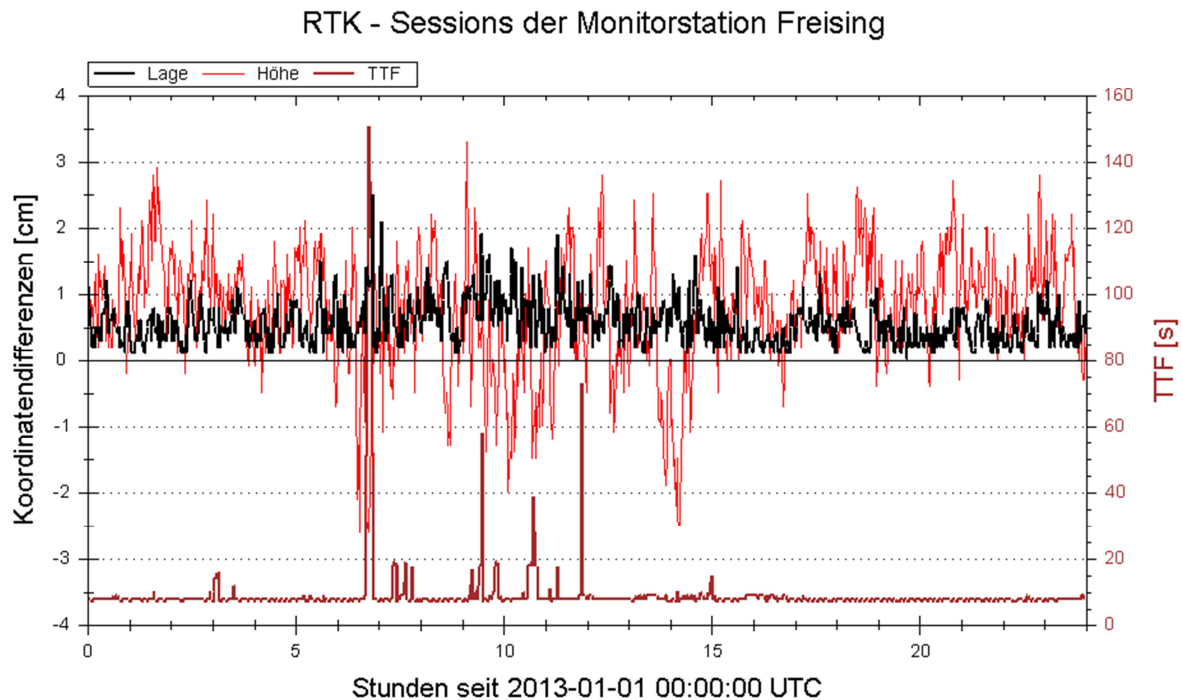


Abbildung 4: Zeitreihe der RTK-Sessions der Monitorstation Freising, 01.01.2013, 00:00-24:00 Uhr UTC

Tabelle 1: HEPS-RTK-Standardabweichungen an den Monitorstationen 2012

Monitorstation	Stichprobenumfang	Standardabweichung	
		Lage [cm]	Höhe [cm]
Landsberg	386056	0.9	1.6
Bad Neustadt / 01.01. bis 27.08.*	232493	1.5	2.2
Bad Neustadt / 28.08. bis 31.12.	142141	1.0	1.7
Freising	253597**	0.8	1.5

* 27.08.2012: Austausch eines RTK-Empfängers der 2. Generation gegen einen aktuellen Empfängertyp

** Inbetriebnahme der Monitorstation Freising am 03.05.2012

2.4.2 Ionosphärische Störungen

Ionosphärische Störungen, die insbesondere in Zeiten maximaler Sonnenaktivität auftreten, können nicht immer vollständig in der Referenzstationsvernetzung modelliert und für die Nutzerposition korrigiert werden. Es verbleiben mitunter

ionosphärische Restfehler in den Netz-RTK-Referenzdaten, die einerseits die Mehrdeutigkeitslösung des RTK-Rovers erschweren und andererseits selbst bei erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung zu erhöhten Positionsfehlern führen können (Wanninger 2002).

Das **I**onospheric **R**esidual **I**ntegrity **M**onitoring IRIM (Landau et al. 2003) der am LVG Bayern seit Jahren erfolgreich eingesetzten Vernetzungssoftware Trimble® VRS³Net™ zeigt für den 25.12.2012 erhöhte ionosphärische Restfehler in den Mittagstunden an (Abbildung 5). Die stündlichen IRIM-Werte sind Kenngrößen für die ionosphärischen Interpolationsrestfehler der Referenzstationsvernetzung und dürfen, da sie auf den Beobachtungsraum bezogen sind, nicht als prognostizierte Positionierungsfehler interpretiert werden.

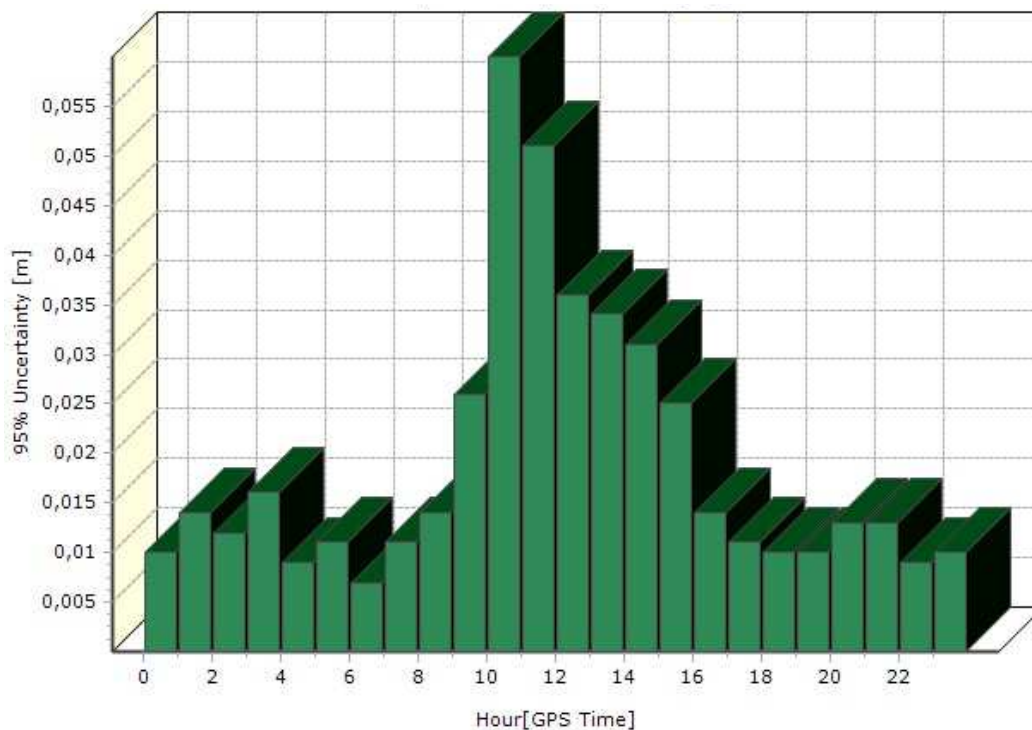


Abbildung 5: IRIM-Werte für SAPOS®-HEPS Bayern, 25.12.2012 (<http://sapos.bayern.de> → Monitoring → Network Reports)

Die tatsächliche Beeinträchtigung der RTK-Performance an der Monitorstation Landsberg ist in Abbildung 6 ersichtlich. Neben größeren Positionsvariationen und einzelnen Ausreißern (Abweichung zu den Sollkoordinaten größer 10 cm) fallen vor allem längere Initialisierungszeiten zwischen 10:30 und 13:30 UTC auf. Zwischen 11:30 und 12:20 UTC werden zudem sieben Gaps (Lücken) ausgewiesen. Dabei handelt es sich um Sessions, die ohne erfolgreiche Initialisierung nach einem in RTKMonService definierten Timeout (hier 5 Minuten) ab-

gebrochen wurden. Ein Gap in Abbildung 6 bedeutet also, dass zu diesem Zeitpunkt der RTK-Rover innerhalb von 5 Minuten nicht initialisieren konnte.

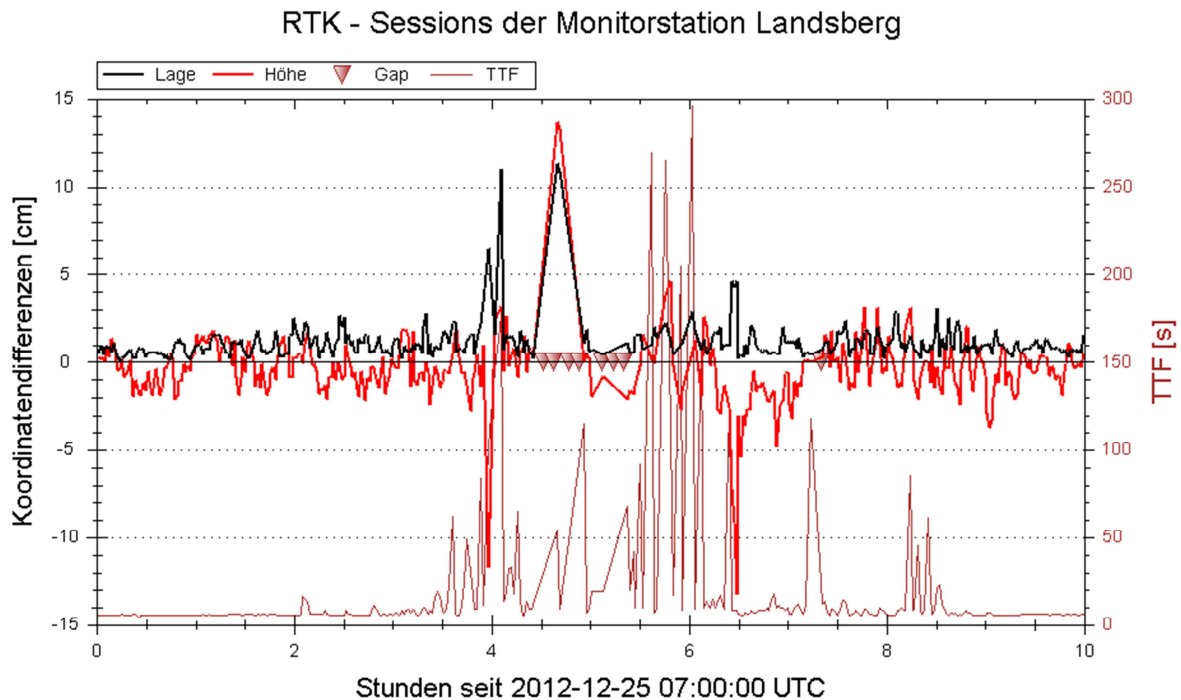


Abbildung 6: Zeitreihe der RTK-Sessions der Monitorstation Landsberg, 25.12.2012, 07:00-17:00 Uhr UTC

Interne Benchmark-Tests am LVG Bayern zwischen RTK-Rovern verschiedener Hersteller zeigen, dass unter dem Einfluss ionosphärischer Restfehler mitunter qualitativ deutlich unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. Es existieren offensichtlich und erwartungsgemäß unterschiedliche funktionale und stochastische Ausgleichsmodelle sowie verschiedene Algorithmen (z. B. Mehrdeutigkeitslösung, Beobachtungstyp der Koordinatenschätzung (L1, L1+L2, L0)).

2.4.3 Extreme Wetterlagen

Am 22.08.2012 ereignete sich in der Region Freising ein Unwetter mit Starkregen und Hagel. Wie dem Wetterradar der Meteogroup (Abbildung 7) zu entnehmen ist, können die troposphärischen Bedingungen für die Region Freising durch die umliegenden Referenzstationen nicht erfasst und damit auch nicht in den HEPS-Daten korrigiert werden.

Die Beeinträchtigung der RTK-Performance für diesen Zeitraum an der Monitorstation Freising ist aus Abbildung 8 ersichtlich und erstreckt sich von 10:45 bis 16:15 UTC über einen Zeitraum von 5½ Stunden. Es zeigen sich sowohl

größere Variationen der Koordinaten als auch längere Initialisierungszeiten. Relevante ionosphärische Restfehler werden in diesem Zeitfenster vom IRIM (siehe Kapitel 2.4.2) nicht angezeigt und können als Störungsursache deshalb ausgeschlossen werden.

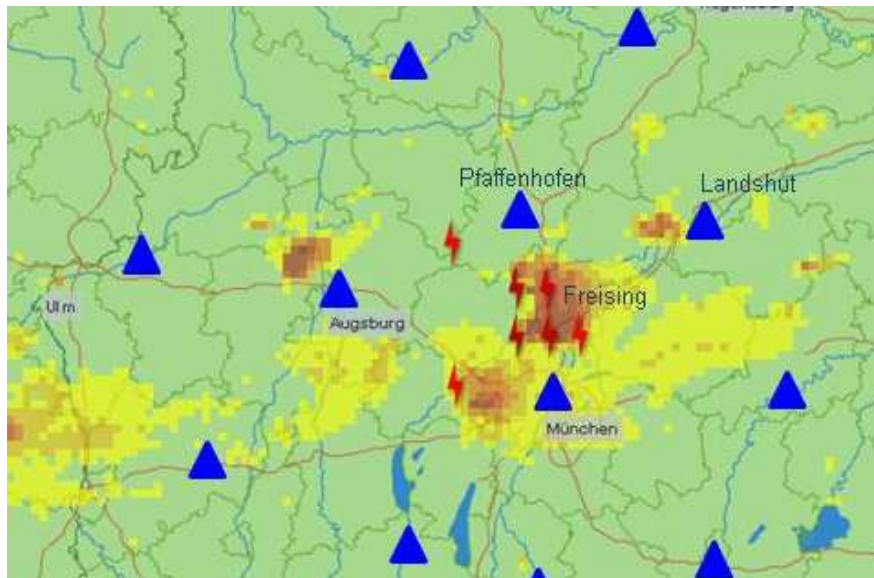


Abbildung 7: Wetterradar der MeteoGroup (www.wetter24.de), 22.08.2012, 15:15 Uhr MESZ (13:15 UTC)

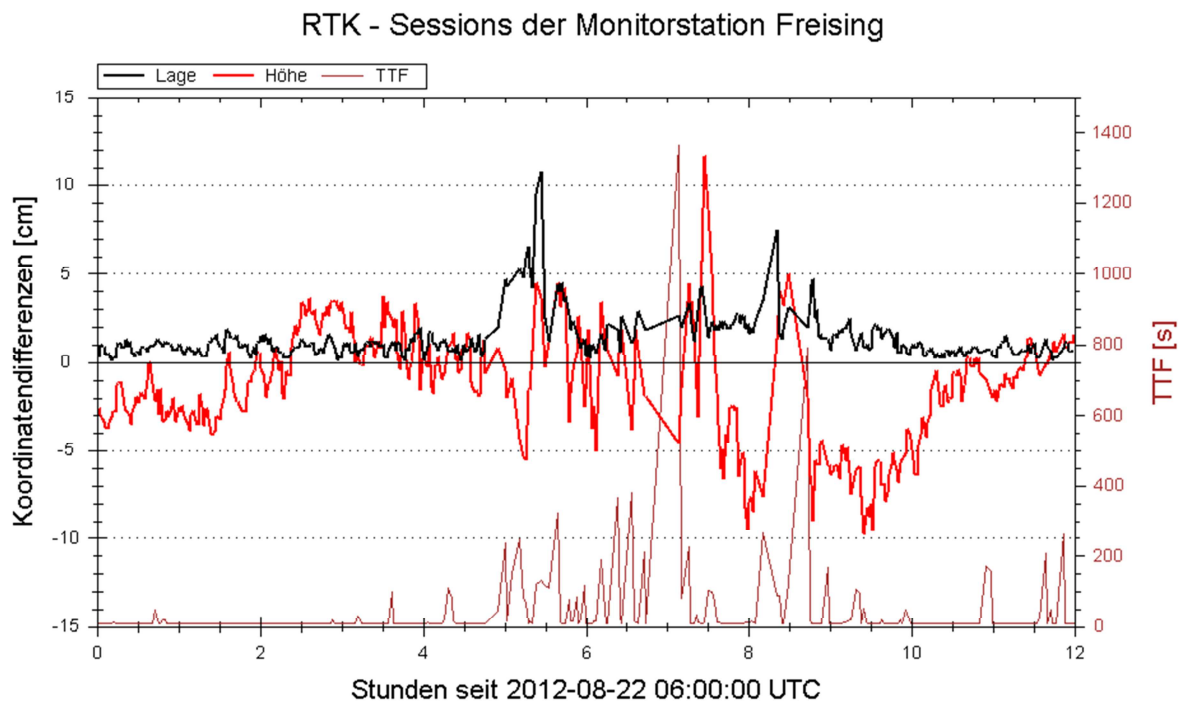


Abbildung 8: Zeitreihe der RTK-Sessions der Monitorstation Freising, 22.08.2012, 06:00-18:00 Uhr UTC

2.4.4 Große Höhenunterschiede

Die bayerische Referenzstation Freilassing liegt auf ca. 440 m ü. NN. In ca. 11 km Entfernung befindet sich auf österreichischer Seite die EPN⁸-Station (EUREF Permanent Network) Salzburg/Gaisberg. Der Höhenunterschied zwischen beiden GNSS-Stationen beträgt ca. 842 m. In einer Testumgebung (17.-24.09.2012) wurde die Station Freilassing aus der Referenzstationsvernetzung herausgenommen und als RTK-Monitorstation betrieben. Die nächstgelegene Referenzstation (Master-Referenzstation) in diesem Testszenario war Salzburg/Gaisberg. Abbildung 9 zeigt deutlich die systematischen Variationen in der RTK-Höhenkomponente von Freilassing. Als Ursache können – aufgrund des großen Höhenunterschiedes – troposphärische Restfehler vermutet werden.

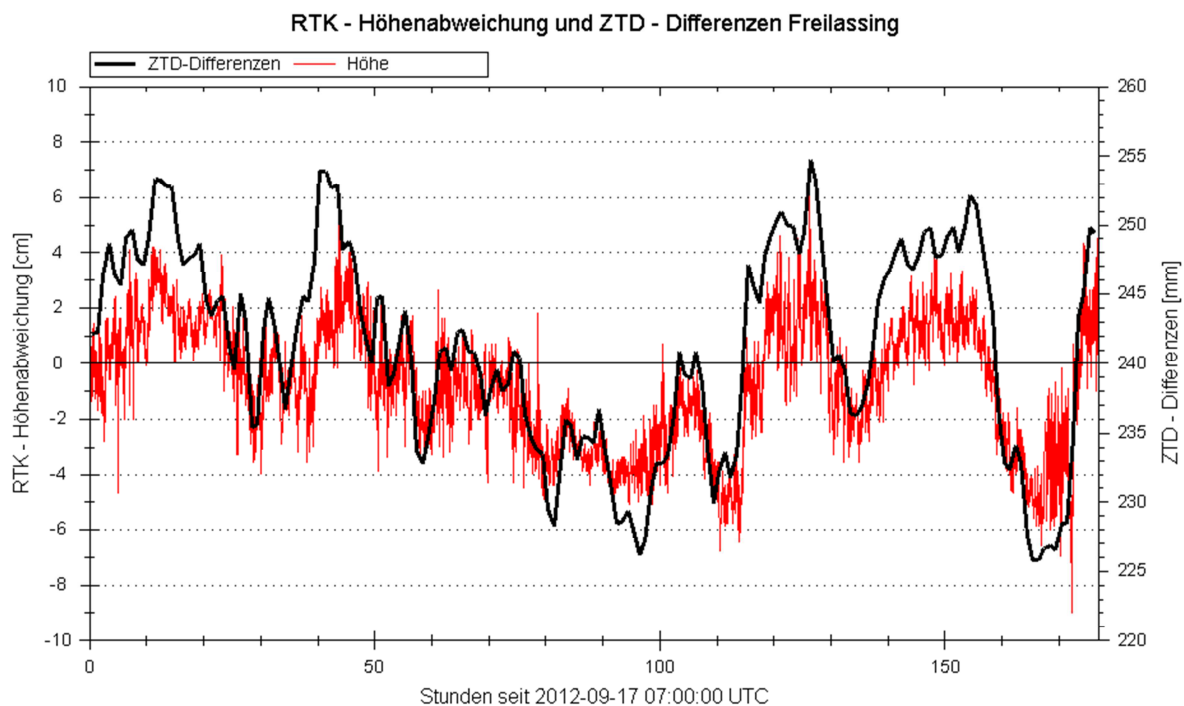


Abbildung 9: RTK-Höhenabweichung und ZTD-Differenzen in Freilassing. Die Ergebnisse beziehen sich auf eine Testumgebung und zeigen nicht die Qualität der SAPOS[®]-HEPS-Daten in Freilassing.

Das österreichische Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV⁹) in Wien stellte zur Verifizierung dieser Vermutung Schätzungen der zenitalen troposphärischen Laufzeitverzögerungen ZTD (Zenith Total Delay) beider Stationen zur Verfügung. Diese stündlich bestimmten ZTD-Werte stammen aus Post-

⁸ EUREF Permanent Network, <http://www.epncb.oma.be/>

⁹ Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV), Wien, Österreich, www.bev.gv.at

Processing-Tageslösungen des BEV unter Verwendung der Bernese GPS Software (Dach et al. 2007). Abbildung 9 zeigt neben dem Verlauf der RTK-Höhenkomponente die Differenzen der ZTDs der Stationen Freilassing und Salzburg/Gaisberg. Zwischen beiden Werten ist eine deutliche Korrelation sichtbar. Die Elevationsmaske für die RTK-Positionierung betrug 10° . Entspricht der Höhenaufbau der Troposphäre zwischen Referenzstations- und RTK-Rover-Niveau nicht dem im Rahmen der Parameterschätzung verwendeten Troposphärenmodell, so können troposphärische Restfehler insbesondere die RTK-Höhenkomponente systematisch beeinflussen.

3 Anwendung von RTKMon im Hochschulbereich

Wie oben ausgeführt, wird RTKMon einerseits in unterschiedlichen Anwendungsbereichen des Qualitätsmonitorings eingesetzt, andererseits ermöglichen die einfache Adaption und der hohe Automatisierungsgrad den Einsatz von RTKMon in weiterführenden Untersuchungsszenarien. Im Kontext der universitären Forschung und Lehre wird RTKMon am Geodätischen Institut (GIK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genutzt, um theoretische Fachinhalte basierend auf statistisch aussagekräftigen GNSS-Messungen realitätsnah zu verifizieren. RTKMon ermöglicht zudem in Kombination mit gewählten GNSS-Messparametern die einfache Variation von Messcharakteristika (z. B. minimaler Elevationswinkel, Messdauer von Einzelbeobachtungen, Einfluss der übermittelten VRS¹⁰-Näherungsposition), wodurch ähnliche Messszenarien automatisiert bearbeitet werden können.

Darüber hinaus verzahnt die Nutzung von RTKMon die beiden Teilbereiche der KIT-Studiengänge „Geodäsie und Geoinformatik“¹¹ optimal, da geodätische Kernkompetenzen (z. B. Durchführung und Analyse von GNSS-Messungen) mit dem in der Geoinformatik angesiedelten (automatisierten) Aufbereiten und Verarbeiten umfangreicher Datenmengen erlebbar kombiniert werden können. Ergänzend können sowohl für Lehrende als auch für Lernende wichtige Einblicke in aktuelle Datenkommunikationsaspekte gewonnen werden, da RTKMon die GNSS-typische Black-Box-artige Kommunikationsstruktur aufbricht und für den Anwender transparent macht.

¹⁰ VRS: Virtuelle Referenzstation

¹¹ Informationen zu den Studiengängen: <http://gug.bgu.kit.edu/>

Im Folgenden werden die hardwaretechnische Adaption von RTKMon am GIK erläutert (siehe 3.1) und zwei RTKMon-Anwendungsbeispiele aufgegriffen, die Einblicke in hochschulbezogene, praxisrelevante Fragestellungen geben. Im Rahmen einer mehrmonatigen Studie wurde insbesondere der Einfluss von Standortwahl und Abschattungssituation auf GNSS-Netz-RTK-Messungen untersucht (siehe 3.2). Unterkapitel 3.3 thematisiert Erkenntnisse, die basierend auf einem begleitenden RTKMon-Einsatz während Stromübergangsmessungen gewonnen werden konnten. In beiden Anwendungsbeispielen wird sowohl auf den Versuchsaufbau als auch auf die erzielten Ergebnisse exemplarisch eingegangen.

3.1 Hardwaretechnische Umsetzung

Bei den vom LVG Bayern betriebenen Monitorstationen (siehe Kapitel 2.) kommunizieren die zu überwachende Station und der Dienst RTKMonService über eine Netzwerkverbindung miteinander. Dabei sendet der GNSS-Empfänger der Monitorstation permanent den NMEA-String mit der aktuellen Positionslösung an RTKMon, wo dieser protokolliert wird. RTKMon leitet basierend darauf die von den Empfängereinstellungen abhängigen Korrekturdaten an den GNSS-Empfänger weiter, wo die Phasenmehrdeutigkeiten gelöst und für eine festgelegte Epochenanzahl Messungen durchgeführt werden. Danach trennt RTKMon wieder den Datenstrom vom Ntrip-Caster.

Bei den Szenarien, wie sie bisher am GIK realisiert wurden, befinden sich der GNSS-Empfänger der zu überwachenden Station und der PC, auf dem RTKMon betrieben wird, an derselben Örtlichkeit. Da RTKMon über das Netzwerkprotokoll TCP/IP kommuniziert, wurde eine spezielle hardwaretechnische Umsetzung notwendig, um im Feld ohne zusätzliche Netzwerk-Hardware RTKMon nutzen zu können. Mittels der frei verfügbaren Software „Comm Tunnel“ (<http://www.serialporttool.com/CommTunnel.htm>) kann ein Gerät über eine serielle RS232-Schnittstelle – bzw. über einen Adapter über eine USB-Schnittstelle – am PC angeschlossen und der RS232-Datenstrom intern auf einen TCP/IP-Port umgelenkt werden.

Als Host für RTKMon wurden am GIK Feldrechner des Typs Colibri X5 (Betriebssystem: Microsoft Windows XP Professional) bzw. Colibri X7 (Betriebssystem: Microsoft Windows 7 Professional) eingesetzt. Die Verbindung ins Internet und somit zum Ntrip-Caster wurde bei verfügbarer Netzwerkanbindung über ein LAN-Kabel, andernfalls durch eine UMTS-Karte realisiert.

Für die am GIK mit RTKMon durchgeführten Szenarien wurden GNSS-Ausrüstungen des Typs Leica GX1230+GNSS mit Antennen des Typs LEIAX1203+GNSS verwendet. Diese Ausrüstung ermöglicht die kombinierte Nutzung von GPS und GLONASS. Der Anschluss der Empfänger an den Feldrechner erfolgte über ein am LVG Bayern entwickeltes Y-Kabel, welches die Kabel von zwei seriellen Schnittstellen des Empfängers in ein serielles Kabel überführt. Dies ist notwendig, da auf Empfängern des Typs Leica GX1230+GNSS ein Port standardmäßig nur für eine Aufgabe (z. B. Ausgabe von NMEA-Daten in gewünschter zeitlicher Auflösung oder Eingabe der RTCM-Korrekturdaten) konfiguriert werden kann. Im Anwendungsfall von RTKMon werden zwei Empfängerschnittstellen benötigt, die entsprechend zu konfigurieren sind. Prinzipiell besteht jedoch auch die Möglichkeit einen Port für beide Aufgaben zu konfigurieren, wofür jedoch eine OWI-Lizenz (Outside World Interface) erforderlich ist.

Alle bisher am GIK durchgeführten Messungen unter Zuhilfenahme von RTKMon wurden im Netz von SAPOS[®]-Baden-Württemberg im Servicebereich HEPS mit der Vernetzungsvariante VRS durchgeführt.

3.2 Abschattungsabhängige Variabilität von GNSS-Netz-RTK-Ergebnissen

In geodätischer Fachliteratur werden einerseits optimale Bedingungen (z. B. Horizontfreiheit) für GNSS-Messungen beschrieben und andererseits limitierende Einflussfaktoren (z. B. Abschattungen durch Gebäude und Vegetation, Mehrwegeeffekte) angeführt. Welchen Einfluss eine nicht optimale individuelle Örtlichkeit auf GNSS-Messungen und -Koordinatenschätzungen hat, ist schwer quantifizierbar. Deshalb wurden unter Verwendung von RTKMon in Kooperation mit der SAPOS[®]-Abteilung des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg im Rahmen eines fünfmonatigen Praktikums (Feb.-Juni 2012) von Blandine Thomas (Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg, Frankreich) wiederholt GNSS-Netz-RTK-Messungen unter unterschiedlichen Bedingungen (z. B. Messdach, Stadt, Wald; siehe Abbildung 10 - Abbildung 12) unter anderem mit dem Ziel durchgeführt, die Variabilität der Koordinatenschätzung in Abhängigkeit von der Abschattungssituation zu bestimmen. Der Abstand zur nächstgelegenen SAPOS[®]-Station betrug bei allen Experimenten wenige Kilometer.



Abbildung 10: Örtlichkeiten der GNSS-RTK-Messungen; v.l.n.r.: optimale Bedingungen auf dem GIK-Messdach, typisches innerstädtisches Messszenario, abgeschattete Waldsituation



Abbildung 11: Panorama, innerstädtisches Messszenario



Abbildung 12: Panorama, Messszenario im Wald

Einer RTK-Vermessung entsprechend wurde für den Innenstadt- bzw. Wald-Aufbau bewusst kein Stativ verwendet, sondern ein alternativer Aufbau mit einem Lotstock fester Länge und zwei Schnellstativen gewählt. Um den Lotstock stabil auf dem vermarkten Punkt zu fixieren, wurde im unteren Bereich des Lotstocks ein Gewicht angeschraubt. Am Empfänger wurde bei diesen Versuchen eine Elevationsmaske von 10° eingestellt und die Verwendung von GPS und GLONASS aktiviert. Es wurde die in Kapitel 3.1 beschriebene Ausrüstung eingesetzt. Neben der Durchführung von RTK-Messungen wurden auch GNSS-Rohdaten kontinuierlich gespeichert, um Sollkoordinaten basierend auf einer

langzeitstatischen Auswertung berechnen zu können. Die für RTKMon gewählten Parameter sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Parameter für RTKMon bei Abschattungsszenarien

Parameter	Wert
Anzahl Messungen pro Session	4
Maximale Zeit des Lösungsversuchs zur Fixierung der Ambiguities	180 s
Länge des autonomen Code-basierten Messmodus (Zeit zwischen zwei Sessions)	30 s

Werden die Ergebnisse der SAPOS[®]-HEPS-Vernetzung der GNSS-VRS-Lösungen verglichen, so erweisen sich insbesondere die Messungen im Wald – trotz mäßig starker Abschattung – als stark problembehaftet (z. B. lange TTF-Zeiten, wenige Messungen). Die innerstädtischen Messungen weisen zwar vergleichend zu den optimalen Messdach-Bedingungen deutlich längere TTF-Zeiten auf, woraus sich eine geringere absolute Anzahl an Messungen ergibt (siehe Tabelle 3); die Variabilität der Messungen ist jedoch gering. Beispielsweise liegen alle Höhenschätzungen nach Elimination von drei Ausreißern (Abweichungen im m-Bereich) in einem 19 cm breiten Intervall. Mehr als 75% der Messungen genügen hierbei den SAPOS[®]-Spezifikationen. Abbildung 13 belegt dies mittels Histogrammen. Werden alle signifikant (3σ) identifizierbaren Ausreißer eliminiert und mehrmals 20 zufällig gewählte Messwerte der Grundgesamtheit statistisch analysiert, so ergeben sich die in Tabelle 4 zusammengestellten Genauigkeitsmaße. Beispielsweise erscheint auf Koordinatenniveau der Unterschied zwischen den Örtlichkeiten Innenstadt und Wald gering. Der im Wald-Messszenario zu investierende Aufwand ist jedoch enorm. Siehe hierzu Tabelle 3, worin in Abhängigkeit von der Örtlichkeit die Anzahl der Initialisierungen gegenübergestellt ist; hiermit wird beispielweise die dramatisch reduzierte Anzahl von Initialisierungen in der Örtlichkeit Wald belegt. Da die Messungen im Winter begannen und sich bis ins Spätfrühjahr erstreckten, konnten zudem Datensätze generiert werden, die den Einfluss von zunehmender Vegetation auf Netz-RTK-Messungen quantifizierbar machen.

Tabelle 3: Anzahl der Initialisierungen in Abhängigkeit von der Örtlichkeit

	Anzahl an Initialisierungen			
	Absolut	Normiert auf 1 h Beobachtungszeit		
		Durchschnittlich	minimal	maximal
Messdach	7997	46	42	47
Wald	157	7	3	12
Innenstadt	928	28	22	30

Tabelle 4: Standardabweichungen [cm] in Abhängigkeit von der Örtlichkeit; Stichprobenumfang: 20.

	3d	Lage	Höhe
Messdach	0,88	0,48	0,73
Wald	3,45	1,75	2,95
Innenstadt	2,92	1,77	2,28

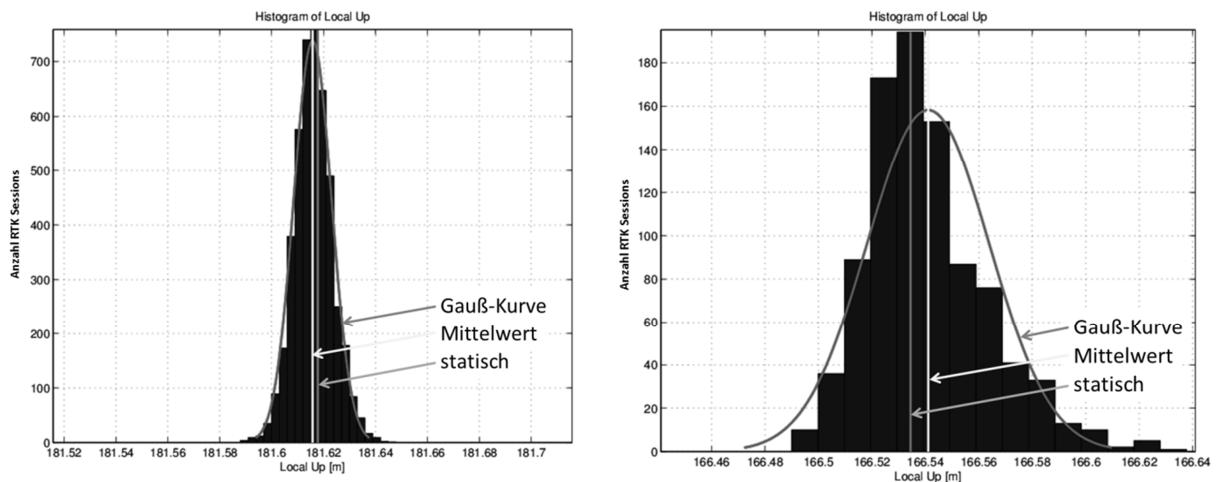


Abbildung 13: Histogramme; Abweichungen der Höhenkomponente vom statistischen Sollwert; links: Messdach; rechts: Innenstadt

Neben den o.g. Untersuchungen wurden die erfassten Daten hinsichtlich der resultierenden Unterschiede zwischen GPS-only und GPS+GLONASS, TTF-Zeiten, Degeneration der Lösung nach Trennung der Kommunikationsverbindung analysiert, hierauf wird in diesem Beitrag nicht weiter eingegangen.

3.3 Stromübergangsmessungen mittels GNSS-Netz-RTK

Die mit differenziellen GNSS-Messungen erzielbaren Genauigkeiten hängen insbesondere von der Länge der auszuwertenden Basislinie und der Beobachtungszeit ab. Bei kurzen Basislinien können z. B. atmosphärische Einflussfaktoren durch das Hilfsmittel Differenzbildung sehr gut eliminiert werden. Gleichzeitig kann die Genauigkeit mit zunehmender Beobachtungsdauer gesteigert werden. Im Rahmen eines in Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Koblenz) durchgeführten Feldversuchs wurde untersucht, mit welcher Qualität GNSS-basiert Stromübergangsmessungen durchgeführt werden können. Zu diesem Zweck wurden am 27.11.2012 (überlappende Zeitfenster: ca. 5 h)

südlich der Rheinbrücke bei Karlsruhe-Maxau auf der rheinland-pfälzischen (RP) und der baden-württembergischen (BW) Rheinseite

- absolut kalibrierte Choke-Ring-Antennen statisch,
- absolut kalibrierte Choke-Ring-Antennen im Base-Rover-Verfahren und
- kinematische RTK-Ausrüstungen in der SAPOS[®]-HEPS-VRS-Vernetzung auf Stativen betrieben. Neben GNSS wurden die beiden terrestrischen Standardverfahren Stromübergangsnivellement und Gegenseitig Gleichzeitige Zenitdistanzmessung (Kuntz & Schmitt 1985) eingesetzt. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die Messörtlichkeit und Abbildung 15 einen Einblick in den Versuchsaufbau.

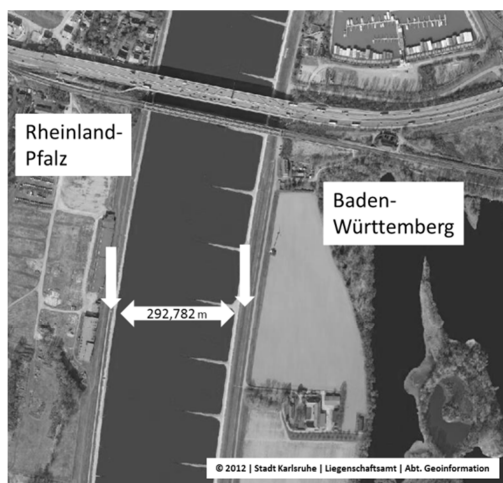


Abbildung 14: Stromübergangsmessungen, Überblick



Abbildung 15: Stromübergangsmessungen, Ufer: Baden-Württemberg, Blickrichtung: Süden

Der Höhenunterschied zwischen Antennenreferenzpunkt und lokalem Höhenbezugspunkt wurde mittels Feinnivellement bestimmt. Die eingesetzte Ausrüstung entspricht weitestgehend den im zuvor beschriebenen Versuch (Kapitel 3.2) genannten Geräten. Der eingestellte minimale Elevationswinkel wurde zu 5° gewählt, da nahezu vollständige Horizontfreiheit herrschte, und es wurde ebenfalls unter Verwendung von GPS und GLONASS gemessen. Nach Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten in SAPOS[®]-HEPS-VRS wurden für 5 s Messungen durchgeführt und anschließend der Korrekturdatenstrom durch RTKMon unterbrochen, um die Phasenmehrdeutigkeiten erneut festsetzen zu lassen.

Im Folgenden wird ein kurzer Einblick in die Analyse der RTKMon-basiert erfassten Daten gegeben. Dabei wird die Variabilität der Höhenkomponente zwischen Base-Rover-Lösungen (Abbildung 16; links) und SAPOS[®]-HEPS-Messungen (Abbildung 16; rechts) gegenübergestellt.

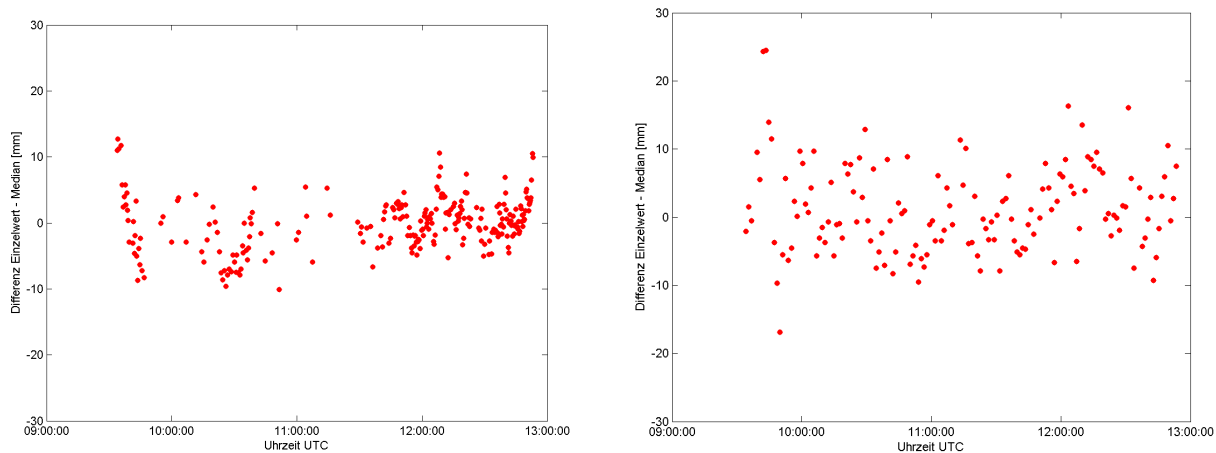


Abbildung 16: GNSS-basierte Median-bezogene Höhenvariationen; links: lokale Basis; rechts: SAPOS[®]-HEPS; Ufer: Baden-Württemberg, gleiches Zeitfenster

Die Variabilität der mit lokaler Basis von BW nach RP übertragenen Höhe ist deutlich geringer ($\sigma = \pm 4,0$ mm) als die Variabilität der an beiden Ufern durchgeführten SAPOS[®]-HEPS-Besetzung (RP-Ufer: $\sigma = \pm 7,6$ mm; BW-Ufer: $\sigma = \pm 6,5$ mm;) trotzdem zeigen die SAPOS[®]-HEPS-Ergebnisse eine ausgesprochen gute Qualität. Werden die gesammelten Stichproben hinsichtlich der resultierenden Höhenunterschiede verglichen, so ergibt sich eine Differenz von 1,5 cm.

4 Ausblick

SAPOS[®]-Bayern plant im Jahr 2013 die Speicherung der RINEX-Beobachtungen der RTK-Monitorstationen sowie der für die RTK-Sessions maßgeblichen HEPS-Daten durchgängig zu realisieren, um nachträgliche wissenschaftliche Untersuchungen interessanter Ereignisse zu ermöglichen. In diesem Kontext wird auch das Engagement von Hochschulen ausdrücklich begrüßt. Neue technische Entwicklungen wie PPP-RTK (**P**recise **P**oint **P**ositioning-RTK) oder die zukünftige Integration von Beobachtungen des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo in SAPOS[®] werden vielfältige Anlässe für Untersuchungen und Benchmark-Tests geben. Programmtechnisch wird eine Weiterentwicklung der Echtzeit-Alarmfunktion in RTKMonService basierend auf mathematischen Werkzeugen der Zeitreihenanalyse angestrebt. Hinsichtlich der in Kapitel 2.4.4 aufgegriffenen Problematik der Netz-RTK-Höhengenauigkeit bei großen Höhenunterschieden zwischen Referenzstations- und Rover-Niveau wird die zukünftige technische Entwicklung mit Spannung weiter verfolgt.

Das GIK plant den Einfluss von Vegetation auf Netz-RTK-Messungen intensiv zu bearbeiten. Ebenso werden kinematische Experimente angestrebt.

Dank

Die Autoren haben bei der Erstellung dieses Vortrags Graphiken verwendet, die von Frau B. Thomas im Rahmen ihres Praktikums am GIK erstellt wurden. Für die sehr gute Zusammenarbeit sei Frau B. Thomas nochmals ausdrücklich gedankt.

Das GIK bedankt sich bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Koblenz) und bei den Mitarbeitern der SAPOS[®]-Abteilung des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg für die hervorragende Unterstützung im Rahmen der praktischen Messungen.

Literatur und Quellennachweise

- Dach R., Hugentobler U., Fridez P., Meindl M. (2007): Bernese GPS Software Version 5.0. User Manual of the Bernese GPS Software Version 5.0.
- DIN 1319: Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag Berlin; www.beuth.de.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001): GPS – Theory and Practice, S. 282-284, Springer-Verlag, Wien New York.
- Kuntz E., Schmitt G. (1985): Präzisionshöhenmessung durch Beobachtung gleichzeitig-gegenseitiger Zenitdistanzen. AVN 11-12/1985, S. 427-434.
- Landau H., Vollath U., Chen X. (2002): Network RTK-Concept and Performance, Trimble Terrasat GmbH, Höhenkirchen; <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-183155/Network%20RTK%20Paper%20Wuhan%20Nov2002.pdf>.
- Landau H., Vollath U., Chen X. (2003): New Tools for Network RTK Integrity Monitoring, Trimble Terrasat GmbH, Höhenkirchen; <http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-183156/ION%202003-New%20Tools%20for%20Networked%20RTK%20Integrity.pdf>.
- Müller S., Sedlmair S. (2007): SAPOS[®] Monitoring Service, Java-Servlet zur Visualisierung von RTK- und Koordinaten-Monitoring-Ergebnissen, Programmentwicklung im LVG Bayern.
- RTCM (2009): RTCM STANDARD 10410.1, Networked Transport of RTCM via Internet Protocol Version 2.0, RTCM-Veröffentlichung 111-2009-SC104-STD; <https://ssl29.pair.com/dmarkle/puborder.php?show=3>.
- Wanninger L. (2002): Die Bedeutung der Ionosphäre für Referenzstationsnetze, 4. SAPOS[®]-Symposium, Hannover; www.wasoft.de/lit/sapossym.pdf.

Wanninger L. (2006): Netz-RTK, DVW-Schriftenreihe 49/2006, S. 59-69, Wißner-Verlag, Augsburg, www.wasoft.de/virt/pub/index.html.