

Bachelorarbeit

**Untersuchung von Korrelationen zwischen
Netz-RKT-Höhenanomalien im SAPOS[®] HEPS
und Wetterereignissen**

**Analysis of Correlations between Network RTK Height Anomalies
in SAPOS[®] HEPS and Weather Phenomena**

angefertigt von

Andreas Willibald

Studiengang: Geoinformatik und Satellitenpositionierung

Betreuer: Prof. Dr. Wolfgang Hübner

Die Arbeit wurde angefertigt in Kooperation mit:

Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung

**LANDESAMT FÜR
DIGITALISIERUNG,
BREITBAND UND
VERMESSUNG**



Wintersemester: 2016/2017

Abgabetermin: 13.02.2017

Vorwort

Während meines Praxissemesters am Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV) war ich unter anderem im Referat 83, Geodätischer Raumbezug, beschäftigt. Erfreulicherweise wurde mir dort die Möglichkeit geboten eine Bachelorarbeit zum Thema SAPOS® auszuarbeiten. Da das Modul Satellitenpositionierung im Studium mein besonderes Interesse weckte, bin ich froh, dass ich mit dieser Arbeit meine Kenntnisse vertiefen kann. Darüber hinaus stellt diese wissenschaftliche Untersuchung bedeutende Ergebnisse über die Zusammenhänge zwischen Höhenanomalien im SAPOS® HEPS und Wetterereignissen zur Verfügung.

An dieser Stelle möchte ich an alle Personen meinen Dank aussprechen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben.

Besonderer Dank gebührt meinem Betreuer an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München, Herrn Prof. Dr. Wolfgang Hübner, der mir jederzeit bei Fragen Hilfestellung leistete und mich mit wichtigen Ideen unterstützte.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Andreas Brünner bedanken, der mir die Bachelorarbeit in dem von ihm verantwortenden Sachgebiet des LDBV ermöglichte.

Herzlicher Dank gilt auch meinem fachlichen Betreuer Herrn Martin Freitag vom LDBV. Herr Freitag gab mir viele Informationen und Anregungen, die meine Bachelorarbeit gewinnbringend unterstützten.

Weiterhin bedanke ich mich für die umfangreiche Mithilfe von Frau Dr. Galina Dick vom Helmholtz-Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum (GFZ). Erst durch die Bereitstellung und Prozessierung von zentralen Daten wurde meine Abschlussarbeit in dieser Form realisierbar.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielsetzung	1
1.3	Aufbau der Arbeit.....	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Single-Base-RTK	3
2.2	Netz-RTK	3
2.3	Umsetzung in SAPOS-Bayern	4
2.4	RTK-Monitorstationen	6
2.5	Troposphärische Signalausbreitung.....	8
2.6	Troposphärenmodellierung	10
2.6.1	Modellierung ohne GNSS-Beobachtungen	10
2.6.2	Modellierung mit GNSS-Beobachtungen.....	10
2.7	Berechnete Zenitverzögerungen vom GFZ.....	11
3	Konzept der Untersuchung	12
3.1	Verwendete Software.....	12
3.2	Auswahl von geeigneten Messdaten	12
3.3	Analyse der Ausgangdaten.....	13
3.3.1	Daten der RTK-Monitorstationen.....	13
3.3.2	Daten der SAPOS-Stationen vom GFZ	15
3.4	Auswertung der ZTD-Werte	15
3.4.1	Höhenkorrektur.....	16
3.4.2	Flächeninterpolation	18
3.4.3	Mittlere Klaffung	19
3.4.4	Korrelation	20
3.4.5	Vergleich mit prozessierten ZTD-Werten	21

4	Ergebnisse der Untersuchung	22
4.1	Höhen- und Flächenkorrektur	22
4.2	Korrelation	27
4.3	Vergleich mit prozessierten ZTD-Werten	30
5	Bewertung der Ergebnisse	33
6	Zusammenfassung und Fazit	34
I.	Quellenverzeichnis	V
II.	Abbildungsverzeichnis	VII
III.	Tabellenverzeichnis	VIII
IV.	Abkürzungsverzeichnis	IX
V.	Anhang	X

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung SAPOS^{®1} wird im gesamten Gebiet der Bundesrepublik Deutschland als Satellitenreferenzdienst eingesetzt. Dabei bietet SAPOS mehrere unterschiedliche Dienste. Der Hochpräzise Echtzeit Positionierungs-Service SAPOS-HEPS stellt für den Anwender Korrekturdaten mithilfe von Netz-RTK (Real Time Kinematic) zur Verfügung. Dieser Dienst ermöglicht in Echtzeit eine Positionsbestimmung im amtlichen Bezugssystem ETRS89 mit einer Genauigkeit von 1 – 2 cm in der Lage und 2 – 3 cm in der Höhe². Damit die hohe Qualität dieses Dienstes in Bayern gewährleistet wird, werden vom LDBV drei RTK-Monitorstationen betrieben, die mit der Software RTKMon gesteuert werden.³ Mithilfe dieser Software kann festgestellt werden, dass an diesen Monitorstationen wiederkehrend große Höhendifferenzen (Höhenanomalien) auftreten. Derartige Phänomene sind Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit.

Lokale Wettereinflüsse wie Regen und Gewitter verursachen erhebliche Unregelmäßigkeiten in der Troposphäre. Die Vermutung liegt nahe, dass Restfehler in der Korrektur der troposphärischen Refraktion auftreten, die mithilfe der eingesetzten Vernetzungssoftware des Netz-RTK nicht vollkommen eliminiert werden. Insbesondere relative Troposphärenfehler haben nahezu ausschließlich Abweichungen in der Stationshöhe zur Folge.⁴

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Abhängigkeit der an den RTK-Monitorstationen auftretenden Höhenanomalien von nicht korrigierten troposphärischen Restfehlern im SAPOS-Dienst HEPS festzustellen. Dazu werden Daten der Höhendifferenzen der RTK-Monitorstationen sowie Daten der troposphärischen Korrekturwerten der umliegenden SAPOS-Referenzstationen ausgewählt, verarbeitet, einander gegenübergestellt und analysiert. Im Falle der unterstellten Abhängigkeit ist eine hohe lineare Korrelation zwischen diesen Daten zu erwarten. Auf diese Weise ließe sich die Frage beantworten, inwiefern die troposphärischen Einflüsse auf die Satellitensignale

¹ Aufgrund der Lesbarkeit wird im weiteren Verlauf der Arbeit auf die Wortmarke SAPOS[®] verzichtet und der Name SAPOS verwendet.

² Vertrauensbereich von 68,3 % (1σ)

³ Vgl. Freitag u.a. (2013), S. 2

⁴ Vgl. Rothacher (2007), S. 107

einen direkten Zusammenhang mit den Höhenanomalien besitzen. Zudem wird mit dieser Arbeit überprüft, ob aus den Daten der troposphärischen Korrekturwerten vom GFZ die troposphärischen Einflüsse im Netz-RTK von HEPS modellierbar sind.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn dieser Arbeit werden deren Beweggründe und Motivation dargelegt und deren Zielsetzung festgelegt.

In Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen Grundlagen für die Untersuchungen dieser Arbeit eingeführt und näher beleuchtet. Diese vermitteln das für den weiteren Verlauf dieser Untersuchung erforderliche Hintergrundwissen und bereiten den Rahmen für die weiterführenden Analysen.

Im dritten Kapitel wird das Konzept der Untersuchung detailliert vorgestellt, sodass dieses Kapitel einen elementaren Bestandteil dieser Arbeit bildet. In diesem Teil wird erklärt, nach welchen Kriterien die analysierten Daten ausgewählt wurden, welche Schritte für die Aufbereitung und Verarbeitung notwendig waren und wie schließlich daraus die Ergebnisse der Untersuchung abzuleiten sind.

Das vierte Kapitel befasst sich mit den gewonnenen Ergebnissen der Analyse. In diesem Abschnitt werden die Resultate in Form von Diagrammen visualisiert und auf die Zusammenhänge überprüft.

Das fünfte Kapitel folgt mit einer Bewertung der Ergebnisse. Die daraus erhaltenen Erkenntnisse werden hierbei aufgeführt.

In Kapitel 6 wird die vorliegende Arbeit mit einer Zusammenfassung und einem Fazit abgeschlossen.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Single-Base-RTK

Real Time Kinematic (RTK) beschreibt eine Variante des Differentialmessverfahrens zur Positionsbestimmung mittels GNSS, das auf dem Prinzip der Trägerphasenmessung beruht. Es unterscheidet sich daher von dem codebasierten Messverfahren DGNSS bzw. DGPS. Im Gegensatz zur Code-Messung, die eine Genauigkeit im Meter-Bereich aufweist, wird mithilfe der Trägerphasenmessung eine Positionsgenauigkeit im cm-Bereich erzielt.⁵ In der Praxis wird hierbei eine stationäre Referenzstation (Basis) verwendet, deren absolute Position entweder genau bekannt ist oder erst bestimmt werden muss. Mithilfe eines zweiten beweglichen Empfängers (Rover) wird die eigentliche Messung der zu bestimmenden Positionen durchgeführt. Dieser Rover bekommt per Funk die genaue Position der Basisstation übermittelt. Zusätzlich werden die GNSS-Beobachtungen der Basisstation in Echtzeit übertragen. Der Rover vergleicht die simultanen Beobachtungen und kann mittels des sogenannten Double-Differences-Verfahrens die Relativkoordinaten zur Basisstation bestimmen. Mithilfe von Double-Differences werden empfänger- und satellitenabhängige Fehler eliminiert und weitere Fehler wie die atmosphärische Signalverzögerungen weitgehend eliminiert. Bedeutend für die Genauigkeit ist zudem die Mehrdeutigkeitslösung der Trägerphasen. Schließlich werden die Absolutkoordinaten des Rovers mithilfe der Absolutkoordinaten der Basisstation und den Relativkoordinaten zwischen Rover und Basisstation ermittelt.⁶ Der große Nachteil von Single-Base-RTK liegt in der Tatsache begründet, dass der Anwender zwei Empfänger benötigt. Außerdem sinkt die Genauigkeit der Positionsbestimmung mit zunehmender Entfernung zur Referenzstation stark ab. Daher sollten Basislängen über 10 km vermieden werden.⁷

2.2 Netz-RTK

Eine Erweiterung des Single-Base-RTK stellt das Netz-RTK dar. Erst mit diesem Dienst ist es möglich flächendeckend die Verfügbarkeit von Korrekturdaten zu gewährleisten. Außerdem steigert es die Wirtschaftlichkeit für den Anwender, da dieser nur einen Receiver benötigt. Die präzise Positionsbestimmung wird hierbei nicht nur durch eine Basisstation, sondern mithilfe eines Netzes der umgebenen Referenzstationen erzielt. Ein Referenzstationsabstand von etwa 50 km ist in diesem Zusammenhang für eine präzise Positionsbestimmung ausreichend. Der Einsatz von Single-Base-RTK ist auf den

⁵ Vgl. Mansfeld (2010), S. 284

⁶ Vgl. Bhatta (2011), S. 168

⁷ Vgl. Rothacher (2007), S. 174

Nahbereich beschränkt, da die atmosphärischen Einflüsse und Orbitfehler bei der relativen Positionsbestimmung entfernungsabhängig sind. Beim Netz-RTK müssen daher Korrekturmodelle eingesetzt werden, die auch über größere Distanzen hinweg die erforderliche Genauigkeit gewährleisten. Die entfernungsabhängigen Einflüsse werden bei dieser Vorgehensweise interpoliert. Für eine sogenannte Flächeninterpolation sind mindestens drei Referenzstationen erforderlich. Beim Netz-RTK werden die Beobachtungen der Referenzstationen an einem zentralen Ort gesammelt. Die Mehrdeutigkeitsfestsetzung wird dort berechnet, sodass erreicht wird, dass sich alle Beobachtungen der Referenzstationen auf einem Mehrdeutigkeitsniveau befinden. Anschließend können die sogenannten Flächenkorrekturparameter (FKP) berechnet werden.

Für die Realisierung von Netz-RTK gibt es eine Reihe von verschiedenen Ansätzen, die sich darin unterscheiden, welche Berechnungen zur Positionsbestimmung zentral erfolgen und welche dieser Berechnungen erst vom Empfänger des Anwenders durchgeführt werden. Diese Varianten nennen sich Master-Auxiliary-Concept (MAC), Flächenkorrekturparameter (FKP) sowie Virtuelle Referenzstation (VRS). Die Datenübertragung zwischen der Zentrale und dem Empfänger des Anwenders erfolgt in der Regel per Mobilfunkübertragung mittels GSM oder Ntrip.⁸

2.3 Umsetzung in SAPOS-Bayern

SAPOS ist ein Produkt der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland. Es stellt das amtliche Bezugssystem ETRS89 flächendeckend in Deutschland bereit. In der gesamten Bundesrepublik sind derzeit ca. 260 Referenzstationen in Betrieb, die ein zusammenhängendes Netz bilden. Die Verwaltung der Infrastruktur unterliegt der jeweiligen Vermessungsverwaltung eines Bundeslandes.⁹ In Bayern wird SAPOS vom LDBV betrieben.¹⁰

⁸ Vgl. Wanninger (2006), S. 2 ff.

⁹ <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/SAPOS/>

¹⁰ Vgl. Freitag u.a. (2013), S. 2

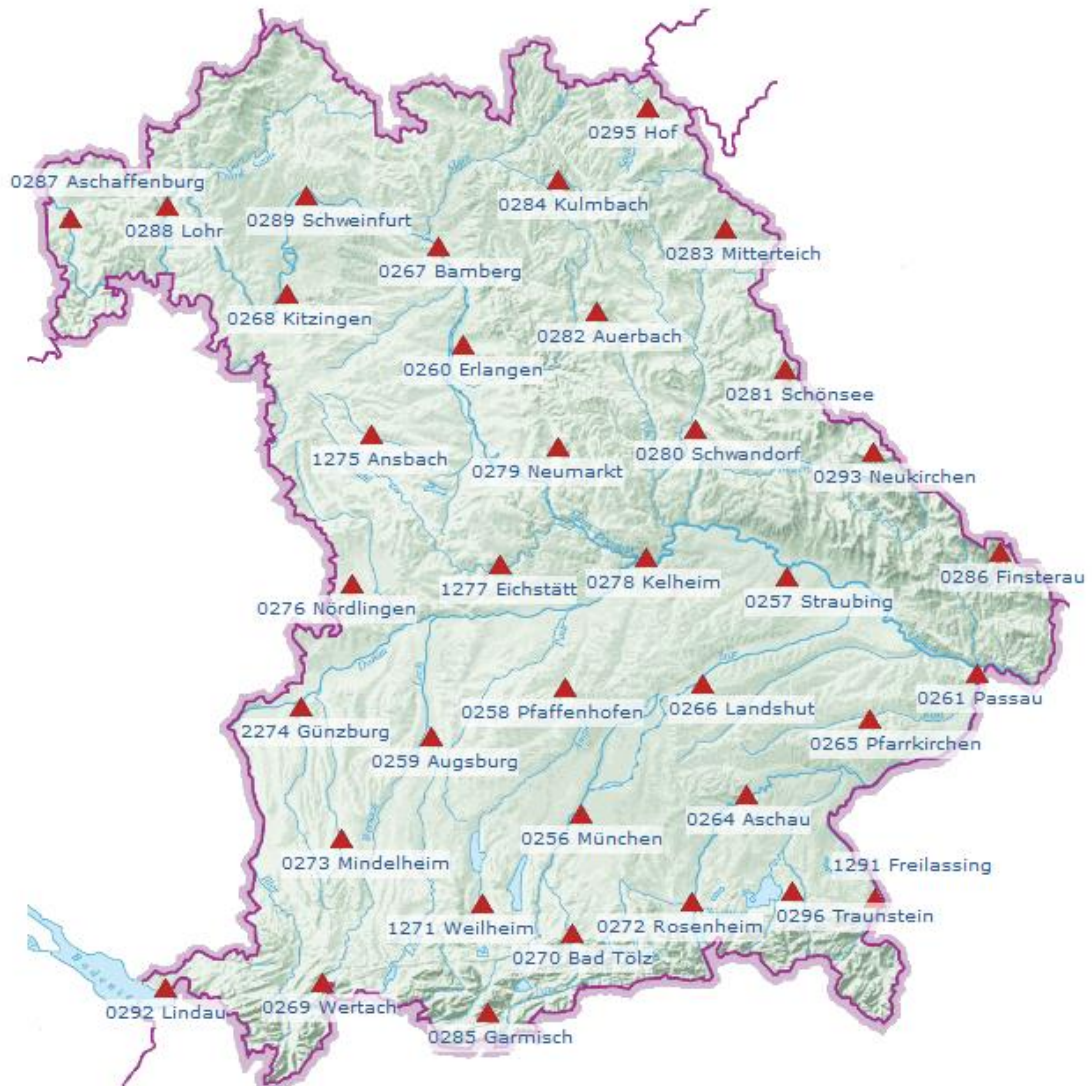


Abbildung 2-1: Stationskarte aller Referenzstationen in Bayern¹¹

Derzeit sind insgesamt 37 Referenzstationen in Bayern in Betrieb, wovon zwei Stationen in der Verantwortung des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) liegen. Jede Referenzstation hat eine eindeutige Kennzahl. Die Vernetzung erfolgt mittels der Software Trimble Pivot Platform (TPP). SAPOS bietet drei verschiedene Dienste an, deren Unterschiede in nachfolgender Tabelle erläutert werden.

¹¹ <https://sapos.bayern.de/refmap.php>

Tabelle 2-1: Dienste von SAPOS¹²

Dienst	EPS	HEPS	GPPS
Verfahren	DGNSS (DGPS)	Netz-RTK	Postprocessing
Messverfahren	Codemessung	Trägerphasen- messung + Codemessung	Trägerphasen- messung + Codemessung
GNSS	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS
Lagegenauigkeit (m)	0,3 – 0,8	0,01 – 0,02 (1 σ)	< 0,01 (1 σ)
Höhengenauigkeit (m)	0,5 – 1,5	0,02 – 0,03	0,01 – 0,02
Übertragungs- technik	Ntrip	Ntrip, GSM	Internet (Webserver)
Datenformat	RTCM 2.3	RTCM 3.1 / 2.3	RINEX
Typische Anwendung	Digitale Karten, Geoinformations- systeme	Kataster- und Ingenieur- vermessung, Land- und Forstwirtschaft, Luft- und Seefahrt	Präzisions- vermessung, Wissenschaftliche Zwecke

2.4 RTK-Monitorstationen

Die Hauptaufgabe des Betriebs der RTK-Monitorstationen besteht darin, die Qualitätssicherung von HEPS in Bayern zu gewährleisten. Dabei muss die Verfügbarkeit, Genauigkeit und Integrität dieses Dienstes unabhängig überwacht werden.¹³ In Bayern befinden sich derzeit drei Monitorstationen. Die Standorte sind so gewählt, dass die Entfernungen zur nächstgelegenen Referenzstation möglichst groß sind; somit hat das Netz-RTK die schwierigsten Voraussetzungen für eine präzise

¹² Vgl. <https://sapos.bayern.de/service.php>

¹³ Vgl. Freitag u.a. (2013), S. 2

Positionsbestimmung.¹⁴ Diese Monitorstationen simulieren also ein Empfangsgerät, wie es auch von den Anwendern benutzt wird.

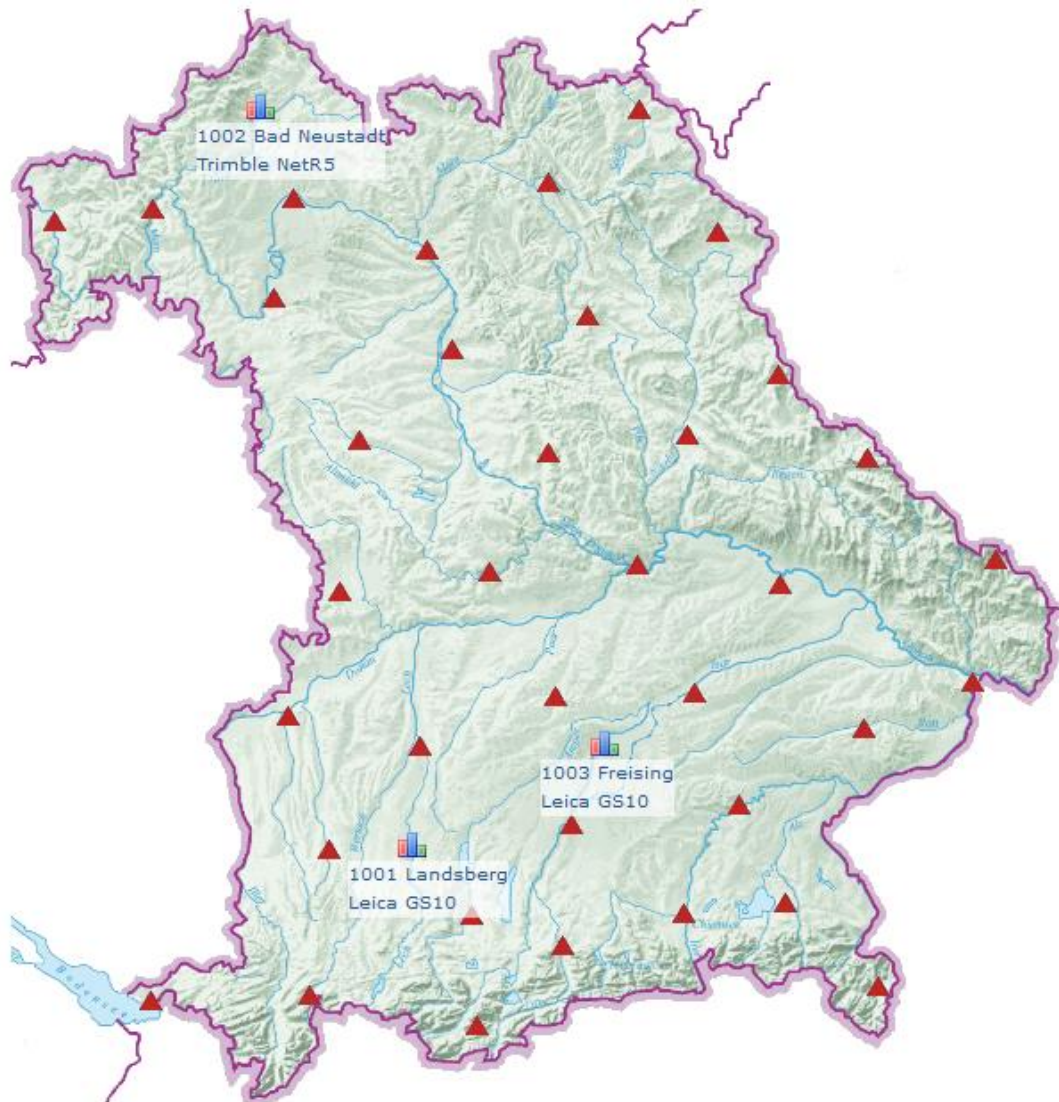


Abbildung 2-2: Stationskarte der drei RTK-Monitorstationen in Bayern¹⁵

An jeder Monitorstation werden stündlich ca. 40 RTK-Sessions aufgezeichnet. Nach jedem Verbindungsaufbau erfolgt die Positionslösung. Nach einer definierten Zeitspanne wird das Streaming der Referenzdaten unterbrochen. Der RTK-Empfänger beginnt dann wieder im Autonom-Modus zu arbeiten und eine neue RTK-Session beginnt. Die RTK-Sessions werden zur Archivierung in einer PostgreSQL-Datenbank gespeichert. Als Ergebnisse der Daten stehen die Koordinatendifferenzen zur Soll-Position und die Initialisierungszeiten zur Verfügung.

¹⁴ Vgl. Freitag u.a. (2013), S. 3

¹⁵ https://sapos.bayern.de/heps_perf.php

2.5 Troposphärische Signalausbreitung

Die Satellitensignale durchqueren auf ihrem Weg vom Satelliten zum Empfänger auf der Erde eine Reihe unterschiedlicher Schichten der Erdatmosphäre. Die beiden Schichten mit dem größten Einfluss auf das Signal heißen Troposphäre und Ionosphäre. Die Troposphäre befindet sich zwischen 0 – 10 km Höhe, die Ionosphäre zwischen 50 – 1000 km.¹⁶ Beide Schichten haben Einfluss auf die Geschwindigkeiten der Signalausbreitung, es werden folglich falsche Streckenlängen gemessen.

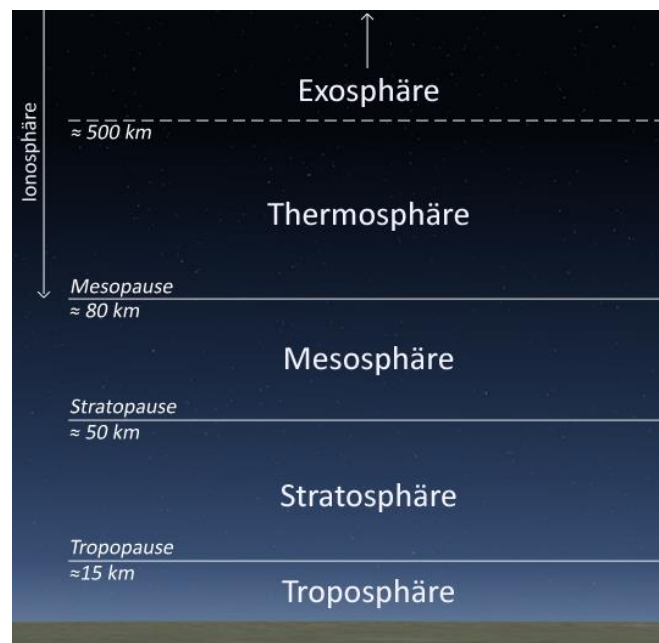


Abbildung 2-3: Aufbau der Erdatmosphäre¹⁷

Die Ionosphäre ist im Bereich der GNSS-Frequenzen dispersiv, d.h. frequenzabhängig. Die Phasen- und Gruppengeschwindigkeit der Signale werden unterschiedlich beeinflusst, ebenso wie die beiden Frequenzbänder (L1 und L2). Mithilfe von ionosphärenfreien Linearkombinationen kann der Einfluss der Ionosphäre in erster Ordnung eliminiert werden; alternativ lässt sich auch ein Ionosphärenmodell zur Korrektur verwenden.¹⁸

Die Troposphäre hingegen ist im Bereich der Radiowellen von 100 MHz bis 20 GHz nicht dispersiv. Die Signale werden somit unabhängig von der Frequenz verzögert.¹⁹ Die troposphärische Signalverzögerung ist dabei abhängig vom Brechungsindex n . Von

¹⁶ Vgl. Rothacher (2007), S. 91

¹⁷ Lang (2006)

¹⁸ Vgl. Hübner (2015a), S. 23

¹⁹ Vgl. Hübner (2015b), S. 2

diesem Brechungsindex kann die Brechzahl N abgeleitet werden, die abhängig von Temperatur, Dichte und Kompressibilität der in der Troposphäre auftretenden Gase ist. Zusätzlich besteht eine Abhängigkeit zu den Eigenschaften der Moleküle und deren Verhalten als Dipole.²⁰ Die Brechzahl N kann in einen trockenen, hydrostatischen Anteil N_d (dry) und einen feuchten Anteil N_w (wet) aufgeteilt werden:²¹

$$N = N_d + N_w \quad (2-1)$$

Die Gesamtverzögerung besteht folglich aus einem trockenen und einem feuchten Anteil. Der trockene Anteil, der ca. 90 % der Signalverzögerung bewirkt, ist gut modellierbar. Der feuchte Anteil hingegen ist lediglich für die restlichen 10 % verantwortlich, jedoch ist dieser Anteil sehr schwierig modellierbar. Gründe dafür sind meist eine ungleichmäßige Verteilung sowie eine schnelle zeitliche und örtliche Veränderung des Wasserdampfes in der Atmosphäre.²²

In Zenitrichtung durchquert das GNSS-Signal auf dem kürzesten Weg die Troposphäre, bei niedrigen Elevationen ist das Signal einem größeren Refraktionseinfluss ausgesetzt. Daher ist die Verzögerung umso größer, je kleiner der Elevationswinkel des Satelliten ist. Mithilfe von Mappingfunktionen wird die Abhängigkeit vom Zenitwinkel modelliert. Darum spricht man von einer troposphärischen Zenitverzögerung, dem ZTD (Zenith Total Delay).

Des Weiteren werden zwei verschiedene Fehlerarten durch die troposphärische Verzögerung verursacht: der relative und der absolute Troposphärenfehler. Der relative Troposphärenfehler beinhaltet einen Fehler in der Troposphärenkorrektur des Endpunkts einer Basislinie gegenüber einem anderen Endpunkt. Diese Endpunkte entsprechen den Stationen in einem Netz-RTK. Für das Netz-RTK von SAPOS ist der relative Troposphärenfehler von Bedeutung. Dieser wirkt sich stark auf die zu bestimmende Höhe aus. Ein Fehler von 1 cm in der troposphärischen Zenitverzögerung resultiert in einem Stationshöhenfehler von ca. 3 cm. Der absolute Fehler ist erst bei globalen Netzen relevant; hierbei liegt ein gemeinsamer Fehler von beiden Endpunkten der Basislinie vor.²³

²⁰ Vgl. Hübner (2015b), S. 3

²¹ Vgl. Rothacher (2007), S. 104

²² Vgl. Rothacher (2007), S. 105

²³ Vgl. Rothacher (2007), S. 107

2.6 Troposphärenmodellierung

Um den ZTD einer Station zu bestimmen, gibt es zwei verschiedene Ansätze. Zum einen können die zu bestimmenden Troposphärenparameter ohne GNSS-Beobachtungen mithilfe von Modellen und meteorologischen Messung berechnet werden. Ein weiteres Verfahren ist die Schätzung der Troposphärenparameter aus GNSS-Beobachtung unter der Anwendung von Mappingfunktionen.²⁴

2.6.1 Modellierung ohne GNSS-Beobachtungen

Hierbei gibt es eine Reihe von verschiedenen Modellen, mit denen die Zenitverzögerung berechnet werden kann. Exemplarisch sei hier auf das vereinfachte Modell von Saastamoinen verwiesen:

$$\delta\rho_{trp}(z) = \frac{2277 \cdot 10^{-6}}{\cos(z)} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e - 1.16 \tan^2 z \right] \quad (2-2)$$

Die Terme in den eckigen Klammern modellieren die troposphärischen Einflüsse. Der erste Term entspricht dem trockenen, hydrostatischen Anteil, der zweite Term entspricht dem feuchten Anteil und der dritte Term berücksichtigt die Erdkrümmung. Zur korrekten Berechnung werden meteorologischen Größen wie Temperatur T , Druck P , relative Feuchte H bzw. der partielle Wasserdampfdruck e benötigt. Diese Größen ermittelt man entweder durch Messungen an der Station oder unter Anwendung einer sogenannten Standardatmosphäre. Die Messung an der Station mithilfe von Messinstrumenten hat den Nachteil, dass sie nicht die genauen atmosphärischen Bedingungen oberhalb der Station wiedergeben können. Die Standardatmosphäre muss auf die Höhe der Station extrapoliert werden.²⁵

2.6.2 Modellierung mit GNSS-Beobachtungen

Zur Bestimmung der Troposphärenparameter werden diese aus den GNSS-Beobachtungen geschätzt und mithilfe einer Ausgleichung oder eines Kalmanfilters berechnet. Die Ermittlung des ZTD-Wertes erfolgt pro Station und Zeitintervall. Damit die Troposphärenparameter genau bestimmt werden können sollten die Sessions möglichst länger als eine Stunde dauern.²⁶ Ein großer Nachteil bei der Schätzung der Parameter ist die starke Korrelation mit der Stationshöhe, den Uhrenfehlern, und den

²⁴ Vgl. Rothacher (2007), S. 106

²⁵ Vgl. Rothacher (2007), S. 108 f.

²⁶ Vgl. Rothacher (2007), S. 111

Phasenmehrdeutigkeiten. Mithilfe von langen Sessions und möglichst unterschiedlichen Elevationen werden die Parameter allerdings sehr genau bestimmt.²⁷

2.7 Berechnete Zenitverzögerungen vom GFZ

Für diese Arbeit wurden berechnete ZTD-Werte vom GFZ verwendet. Diese Zenitverzögerungen stehen für jede SAPOS-Referenzstation in Deutschland zur Verfügung. Die ZTD-Werte sind dabei ein Produkt der GFZ EPOS Software und werden mithilfe von Precise Point Positioning (PPP) berechnet. PPP benötigt genaue Satellitenbahn- und Satellitenuhrinformationen für die exakte Positionsbestimmung. Diese werden vom International GNSS Service (IGS) zur Verfügung gestellt. Mithilfe der Beobachtungen an den SAPOS-Referenzstationen, die im RINEX-Format übermittelt werden, können die Troposphärenparameter geschätzt werden. Aus dieser Schätzung gehen Produkte wie millimetergenaue ZTD-Werte und der integrierte Wasserdampf hervor. In einem weiteren Schritt werden daraus ableitbare Produkte berechnet, wie etwa der trockene, hydrostatische Anteil und der feuchte Anteil der ZTD-Werte. Diese Daten finden Anwendung in der Wettervorhersage, Klimaforschung und Atmosphärenmodellierung. Für die hier vorliegende Arbeit waren lediglich die ZTD-Werte relevant. Die zeitliche Auflösung der ermittelten ZTD-Werte beträgt 15 min.²⁸

²⁷ Vgl. Hübner (2015b), S. 20

²⁸ Vgl. Dick u.a. (2010), S. 3 ff.

3 Konzept der Untersuchung

3.1 Verwendete Software

Die Daten für die Untersuchung und Auswertungen lagen im ASCII-Format vor. Für das Einlesen, Analysieren, Auswerten und anschließende Visualisieren der Daten wurde das Programm Matlab R2016b von MathWorks verwendet. Viele wichtige Zwischenberechnungen wurden in Tabellenform mittels Microsoft Excel durchgeführt.

3.2 Auswahl von geeigneten Messdaten

Für die Untersuchung wurden Daten der Höhendifferenzen an den RTK-Monitorstationen benötigt. Mithilfe der Software RTKMonService wurde nach bestimmten Tagen gesucht, an denen Höhendifferenzen von mindestens ± 5 cm auftraten. Für jede der drei Monitorstationen wurde auf diese Weise ein bzw. zwei Tage ermittelt, an denen große Höhenanomalien sichtbar waren. Zusätzlich wurde für jede Monitorstation für den Vergleich ein Tag ausgesucht, an dem keine Höhenanomalie auftrat und folglich als referenzieller Normalzustand anzusehen ist. Somit wurden insgesamt sieben Tage an den Monitorstationen festgelegt, die für die weitere Untersuchung als Ausgangsdaten dienen sollen:

- Bad Neustadt am 29.05.2016 mit Höhenanomalie
- Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie
- Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand
- Landsberg am 22.06.2016 im Normalzustand
- Landsberg am 24.06.2016 mit Höhenanomalie
- Freising am 04.08.2016 mit Höhenanomalie
- Freising am 05.08.2016 im Normalzustand

Außerdem wurden die berechneten ZTD-Werte der jeweils fünf umliegenden SAPOS-Referenzstationen an den sieben festgelegten Tagen vom GFZ bereitgestellt. Die nachfolgende Grafik (Abbildung 3-1) visualisiert beispielhaft die RTK-Monitorstation in Landsberg mit den fünf SAPOS-Referenzstationen.

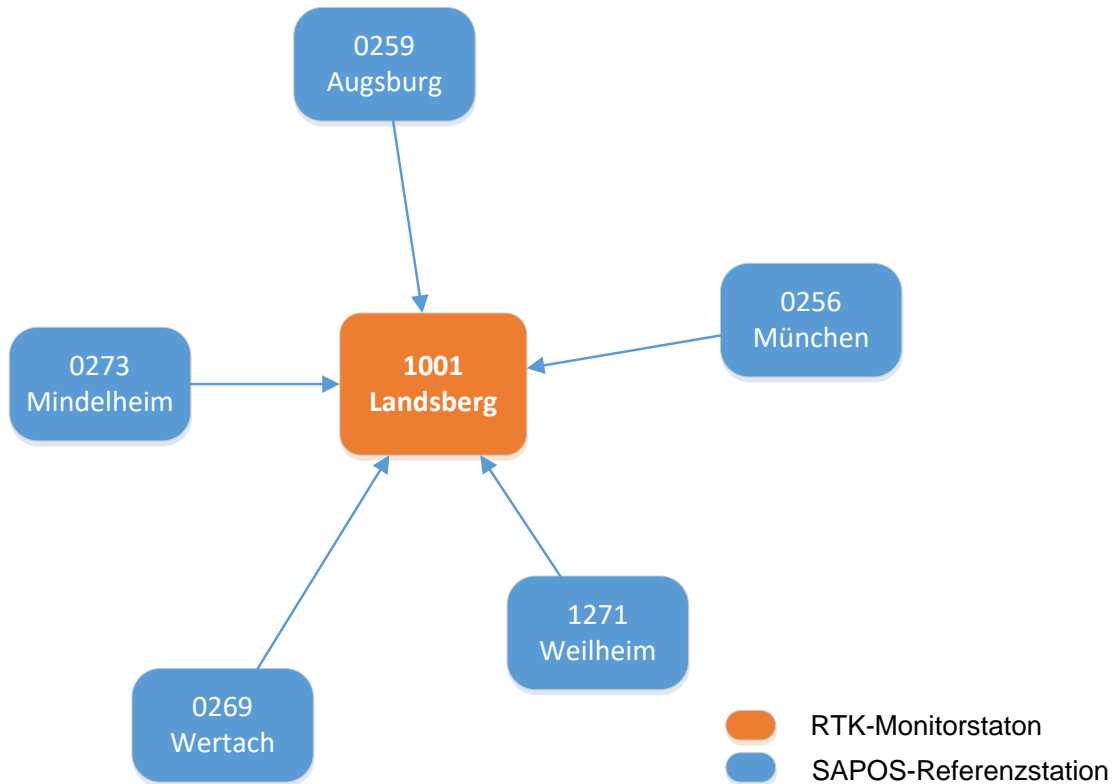


Abbildung 3-1: Beispiel RTK-Monitorstation Landsberg mit umliegenden Referenzstationen

3.3 Analyse der Ausgangdaten

3.3.1 Daten der RTK-Monitorstationen

Die Daten der entsprechenden Tage der RTK-Monitorstationen wurden aus einer PostgreSQL-Datenbank ausgelesen. Die relevanten Datensätze für die Untersuchung waren der Zeitstempel und die Höhendifferenz dh der Monitorstation. Die Höhendifferenz wird im Bezug zur Soll-Höhe der jeweiligen Station berechnet, wobei pro Tag ca. 1100 Messwerte zur Verfügung stehen. Die Soll-Höhe wurde für jede Monitorstation mithilfe mehrerer langzeit-statischen GPPS-Messungen (Postprocessing) bestimmt.

Vergleicht man die Diagramme von Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3, so erkennt man deutlich den Unterschied zwischen einem normalen Tag und einem Tag mit Höhenanomalien. So treten an einem unauffälligen Tag maximale Abweichungen von ± 5 cm auf. An einem Tag mit Höhenanomalien gibt es sehr große Abweichungen, die teilweise größer als 20 cm sind.

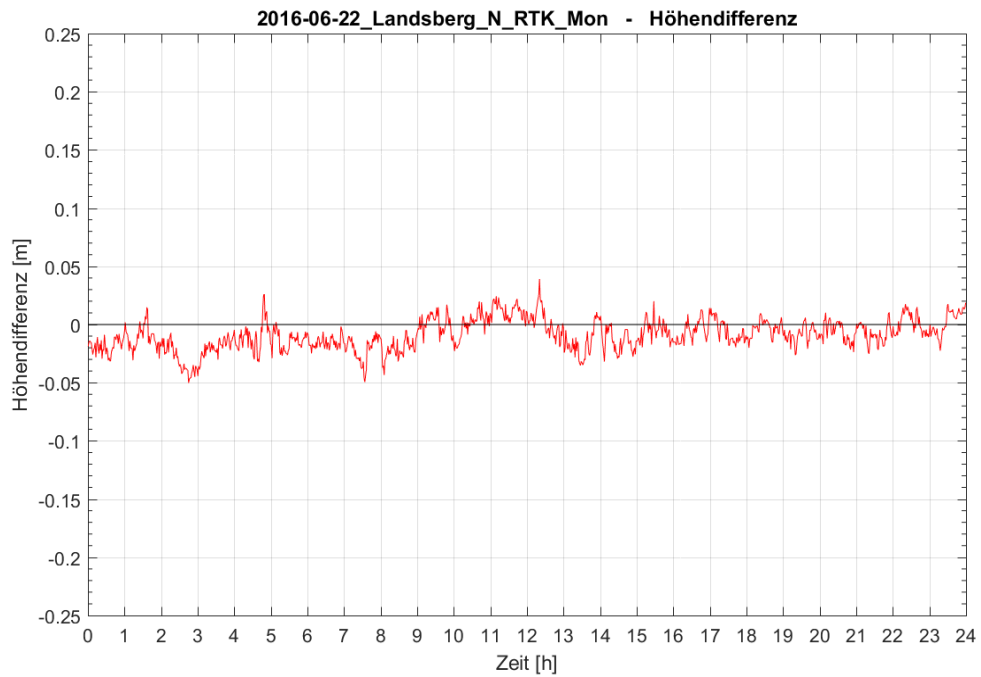


Abbildung 3-2: Höhendifferenzen der RTK-Monitorstation Landsberg am 22.06.2016 im Normalzustand

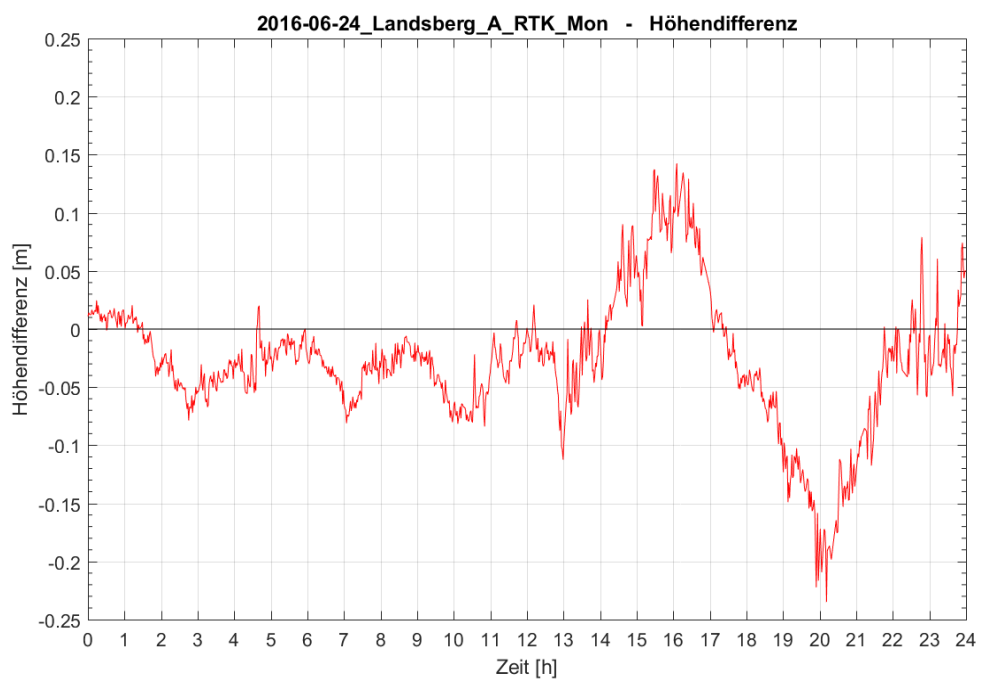


Abbildung 3-3: Höhendifferenzen der RTK-Monitorstation Landsberg am 24.06.2016 mit Höhenanomalie

3.3.2 Daten der SAPOS-Stationen vom GFZ

Für jede SAPOS-Referenzstation wurde eine ASCII-Datei zur Verfügung gestellt, die die berechneten ZTD-Werte am entsprechenden Tag enthält. Der zeitliche Abstand zwischen den Messwerten beträgt 15 min. So stehen pro Station und Tag 96 Messwerte zur Verfügung. Bei manchen Dateien fehlen allerdings an bestimmten Zeitabschnitten Messwerte. Die meisten Dateien sind allerdings vollständig.

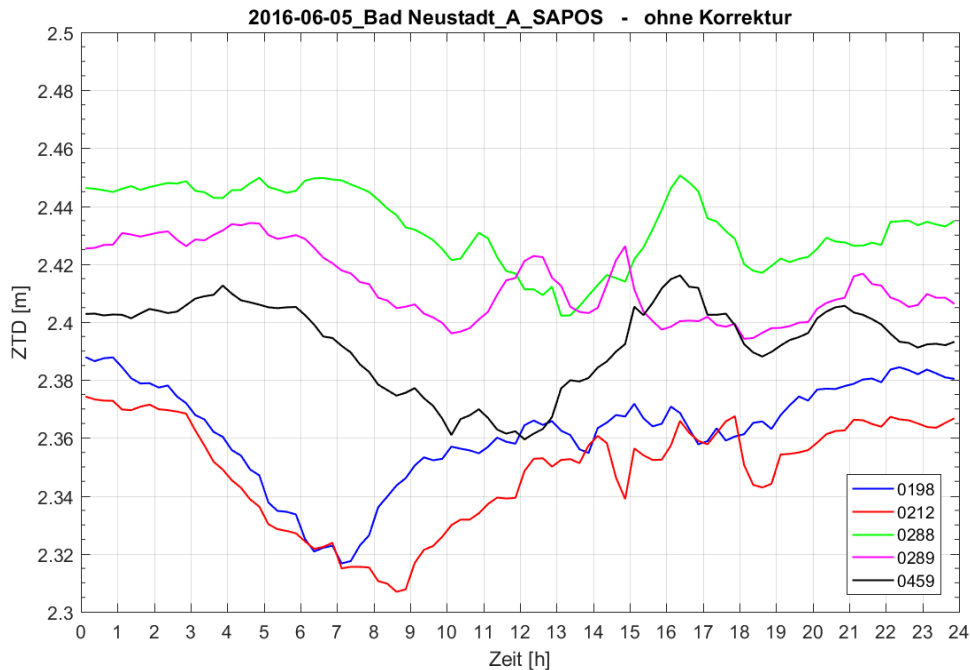


Abbildung 3-4: ZTD-Werte der SAPOS-Stationen um Bad Neustadt am 05.06.2016

Im Diagramm von Abbildung 3-4 lässt sich der zeitliche Verlauf der ZTD-Werte der fünf umliegenden SAPOS-Referenzstationen von Bad Neustadt am 05.06.2016 ablesen. Die SAPOS-Stationen sind mit ihren jeweiligen Kennzahlen gekennzeichnet. Fehlende ZTD-Werte wurden für die spätere Untersuchung linear interpoliert.

3.4 Auswertung der ZTD-Werte

Damit die Höhendifferenzen der RTK-Monitorstation mit den Zenitverzögerungen der umliegenden SAPOS-Referenzstationen verglichen werden können, müssen letztere zunächst verarbeitet werden. Ziel ist es, die ZTD-Werte der umliegenden SAPOS-Stationen auf die Bedingungen am Standort der RTK-Monitorstationen anzupassen.

3.4.1 Höhenkorrektur

Die Zenitverzögerungen der SAPOS-Stationen entsprechen der berechneten troposphärische Korrektur an genau dieser Station mit deren Stationshöhe. Für eine weitere Analyse müssen diese ZTD-Werte das gleiche Höhenniveau wie die dazugehörige RTK-Monitorstation besitzen. Dazu müssen zunächst sämtliche Stationshöhen bestimmt werden. Sowohl von den Monitorstationen, als auch von den SAPOS-Referenzstationen liegen die Positionskordinaten in sogenannten Site-Log-Dateien vor. Die Koordinaten sind räumlich kartesisch (XYZ) mit dem geodätischen Datum ETRS89. Mithilfe der Online-Funktion *CRS-Transformation Bayern* im GPPS-Shop von SAPOS Bayern²⁹ können diese Koordinaten in Gebrauchskordinaten mit separater Höhe transformiert werden. Als Zielsystem wird das Koordinatensystem UTM32 gewählt; das geodätische Datum ETRS89 wird beibehalten. Die Höhen werden als NHN-Höhen im Höhensystem DHHN92 berechnet. In Tabelle 3-1 sieht man exemplarisch die Koordinaten der RTK-Monitorstationen und die berechneten Höhen.

Tabelle 3-1: Koordinaten der RTK-Monitorstationen

RTK-Monitorstationen		3D-kartesisch (ETRS89)			UTM32 (ETRS89), NHN(DHHN92)		
Name	ID	X	Y	Z	E	N	H
Landsberg	1001	4195153.292	805927.043	4721215.688	32639690	5323764	602.78
Bad Neustadt	1002	4015613.472	723631.043	4886164.923	32586508	5575467	240.05
Freising	1003	4154037.541	863910.314	4746908.795	32703410	5364398	481.99

Für die Höhenkorrektur ist es erforderlich, Gradienten zu berechnen, die ausdrücken um welchen Wert die Höhe pro Höhenmeter an Differenz zur Bezugshöhe korrigiert werden muss. Für die Berechnung der Gradienten wird das vereinfachte Modell von Saastamoinen verwendet (siehe Kapitel 2.6.1).

$$\delta\rho_{trp}(z) = \frac{2277 \cdot 10^{-6}}{\cos(z)} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e - 1.16 \tan^2 z \right] \quad (3-1)$$

Dieses Modell eignet sich in Verbindung mit der Standardatmosphäre vor allem bei geringen Höhenunterschieden. Der maximale Höhenunterschied beträgt bei dieser

²⁹ <https://sapos.bayern.de>, Anmeldung erforderlich

Auswertung knapp 400 m. Als Startparameter werden die Parameter der Standardatmosphäre verwendet.³⁰ Diese lauten:

Temperatur: $T_0 = 18 \text{ °C}$ bzw. 291.15 K

Druck: $P_0 = 1013.25 \text{ mbar}$

Relative Feuchte: $H_0 = 50 \%$

Diese Werte beziehen sich auf die Meereshöhe $h_0 = 0 \text{ m}$. Mit folgenden Formel werden diese Parameter auf die Stationshöhen h extrapoliert:³¹

$$P = P_0 (1 - 0.0000226 (h - h_0))^{5.225} \quad (3-2)$$

$$T = T_0 - 0.0065 (h - h_0) \quad (3-3)$$

$$H = H_0 \cdot \exp(-0.0006396(h - h_0)) \quad (3-4)^{32}$$

Der partielle Wasserdampfdruck e wird folgendermaßen berechnet:³³

$$e = \frac{H}{100} \cdot \exp(-37.2465 + 0.213166 T - 0.000256908 T^2) \quad (3-5)$$

Der Zenitwinkel z wird mit 0 gon festgelegt. Dadurch vereinfacht sich das Modell von Saastamoinen auf folgende Formel:

$$\delta\rho_{trp}(0) = ZTD = 2277 \cdot 10^{-6} \left[P + \left(\frac{1255}{T} + 0.05 \right) \cdot e \right] \quad (3-6)$$

Es wird daraus ein ZTD pro Station mit Stationshöhe $h + 50 \text{ m}$ und $h - 50 \text{ m}$ berechnet. Somit erhält man pro Station zwei ZTD-Werte mit einem Höhenunterschied von 100 m . Hieraus kann ein Gradient g mit der Einheit $\frac{m}{100 m}$ berechnet werden:

$$g = \frac{(ZTD_{h+50m} - ZTD_{h-50m})}{100 m} \quad (3-7)$$

Anschließend wird mithilfe des Gradienten g und des Höhenunterschieds Δh zwischen der Soll-Höhe der RTK-Monitorstation h_{MS} und der Höhe der jeweiligen SAPOS-Referenzstation h_{RS} ein Korrekturwert k_{ZTD} für jeden ZTD-Wert berechnet. Die

³⁰ Vgl. Rothacher (2007), S. 109

³¹ Vgl. Rothacher (2007), S. 109

³² Anmerkung: Zur Unterscheidung zwischen dem partiellen Wasserdampfdruck e und der Eulerschen Zahl e wird letztere als $\exp()$ ausgedrückt.

³³ Vgl. Rothacher (2007), S. 104

ZTD-Werte der SAPOS-Stationen werden schließlich mit der Höhenkorrektur auf die Höhe der RTK-Monitorstation ZTD^{HM} (Höhe Monitorstation) korrigiert:

$$\Delta h = h_{MS} - h_{RS} \quad (3-8)$$

$$k_{ZTD} = -\frac{g}{100} \cdot \Delta h \quad (3-9)$$

$$ZTD^{HM} = ZTD + k_{ZTD} \quad (3-10)$$

Hierbei ist zu beachten, dass ein ZTD-Wert einer Station in großer Höhe kleiner ist als ein ZTD-Wert einer Station in geringer Höhe, weil das GNSS-Signal einen kürzeren Weg durchläuft und somit eine geringere Laufzeitverzögerung erfährt. Daher bekommen die ZTD-Werte von Stationen, die niedriger als die Soll-Höhe der RTK-Monitorstation sind, einen negativen Korrekturwert; höherliegende Stationen werden hingegen mit einem positiven Korrekturwert versehen.

3.4.2 Flächeninterpolation

Die ZTD-Werte liegen nun in einer Ebene mit gleichen Höhenniveau. Im nächsten Schritt ist eine Flächeninterpolation erforderlich. Dazu wird eine schiefe Ebene berechnet, die die unterschiedlichen ZTD-Werte der einzelnen SAPOS-Stationen bestmöglich annähert. Dadurch werden entfernungsabhängige Fehlereinflüsse korrigiert. Zunächst müssen hierfür die Entfernungen in Ost-West-Richtung und Nord-Süd-Richtungen zwischen der jeweiligen SAPOS-Referenzstation (E_i, N_i) und der RTK-Monitorstation (E_{MS}, N_{MS}) berechnet werden.

$$\Delta E_i = E_i - E_{MS} \quad (3-11)$$

$$\Delta N_i = N_i - N_{MS} \quad (3-12)$$

Die nachfolgende Gleichung stellt den entfernungsabhängigen Zusammenhang zwischen den höhenkorrigierten ZTD-Werten ZTD_i^{HM} der jeweils fünf SAPOS-Referenzstationen ($i = 1$ bis 5) zu einem bestimmten Zeitpunkt zur RTK-Monitorstation dar:³⁴

$$ZTD_i^{HM} = \overline{ZTD}_{MS} + a_{EW} \cdot \Delta E_i + b_{NS} \cdot \Delta N_i ; \quad i = 1 \dots 5 \quad (3-13)$$

Dabei stellen die Variablen \overline{ZTD}_{MS} (Monitorstation), a_{EW} und b_{NS} die Unbekannten dar. \overline{ZTD}_{MS} ist der gemittelte ZTD-Wert der fünf Werte ZTD_i^{HM} an der Position der Monitorstation. Die Parameter a_{EW} und b_{NS} sind entfernungsabhängige Gradienten, die

³⁴ Vgl. Wanninger (2000), S. 35

an dieser Stelle die Flächenkorrekturparameter darstellen. In Matrixschreibweise lässt sich die Gleichung folgendermaßen ausdrücken:

$$\begin{bmatrix} ZTD_1^{HM} \\ \vdots \\ ZTD_i^{HM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta E_1 & \Delta N_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \Delta E_i & \Delta N_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \overline{ZTD}_{MS} \\ a_{EW} \\ b_{NS} \end{bmatrix}_{i=1 \dots 5} \quad (3-14)$$

Pro Monitorstation fließen die fünf umliegenden Referenzstationen in die Schätzung der Parameter mit ein, sodass sich fünf Gleichungen zur Bestimmung der drei Unbekannten \overline{ZTD}_{MS} , a_{EW} und b_{NS} ergeben. Durch die Überbestimmung kann nach der Methode der kleinsten Quadrate das lineare Gleichungssystem ausgeglichen werden. Die Gleichung (3-14) stellt also eine Gleichung nach dem Schema $A \cdot x = b$ dar. Nach der Gaußschen Transformation lässt sich ein überbestimmtes Gleichungssystem mithilfe der Normalgleichung mit folgender Formel lösen:³⁵

$$A^T A x = A^T b \Leftrightarrow x = (A^T A)^{-1} \cdot A^T b \quad (3-15)$$

Eine Gewichtsmatrix wird für die Ausgleichung nicht verwendet. Der Lösungsvektor x enthält die ausgeglichenen Variablen \overline{ZTD}_{MS} , a_{EW} und b_{NS} für eine Monitorstation für einen bestimmten Zeitpunkt, d.h. so wie die ZTD-Werte der SAPOS-Stationen ändern sich diese Variablen pro Zeitepoche kontinuierlich.

Zuletzt werden die nun die höhenkorrigierten ZTD-Werte ZTD_i^{HM} der fünf SAPOS-Stationen mithilfe der berechneten Flächenkorrekturparameter verbessert und ergeben die flächenkorrigierten ZTD-Werte ZTD_i^{MS} für jede SAPOS-Referenzstation in Bezug zur Position der Monitorstation:

$$ZTD_i^{MS} = ZTD_i^{HM} - a_{EW} \cdot \Delta E_i - b_{NS} \cdot \Delta N_i ; \quad i = 1 \dots 5 \quad (3-16)$$

3.4.3 Mittlere Klaffung

Aus den nun höhen- und flächenkorrigierten ZTD-Werten der jeweils fünf SAPOS-Referenzstationen kann nun für jede Zeitepoche eine empirische mittlere Klaffung berechnet werden. Diese ergibt sich aus der Formel:³⁶

$$s = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (ZTD_i^{MS} - \overline{ZTD}_{MS})^2 ; \quad n = 5; i = 1 \dots 5 \quad (3-17)$$

³⁵ Vgl. Lothar/Strehle (2007), S. 54

³⁶ Vgl. Lothar/Strehle (2007), S. 34

\overline{ZTD}_{MS} entspricht hier dem arithmetischen Mittelwert und wurde bereits in Formel (3-13) berechnet. Die mittlere Klaffung gibt an, wie stark die Streuung der ZTD-Werte an einem bestimmten Zeitpunkt um den berechneten Mittelwert ist. Dieses statistische Maß stellt den troposphärischen Interpolationsrestfehler dar.

3.4.4 Korrelation

Aus den Daten der Höhendifferenzen der RTK-Monitorstationen und den berechneten mittleren Klaffungen aus den ZTD-Werten wird nun der Zusammenhang überprüft. Dies geschieht mithilfe der Berechnung des Korrelationskoeffizienten. Der empirische Korrelationskoeffizient r_{xy} ist ein Maß für die lineare Korrelation zwischen zwei verschiedenen paarweisen Zufallsvariablen x und y.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3-18)$$

Der Koeffizient kann Werte zwischen -1 und +1 annehmen. Dabei bedeutet der Wert 0 keinen linearen Zusammenhang; +1 bzw. -1 stellen einen vollständigen positiven bzw. negativen linearen Zusammenhang dar.³⁷

Die paarweisen Zufallsvariablen x und y entsprechen hierbei den Höhendifferenzen der RTK-Monitorstationen und den berechneten mittleren Klaffungen der ZTD-Werte. Für den Vergleich werden die Höhendifferenzen in Absolutwerte umgewandelt. Der Grund hierfür ist, dass die mittlere Klaffung ausschließlich positive Werte beinhaltet. Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten r_{xy} muss die Anzahl der Variablen x und y exakt identisch sein. Von den Daten der Höhendifferenzen stehen ca. 1100 Messwerte pro Tag zur Verfügung. Die Anzahl der ZTD-Werte und der daraus ermittelten mittleren Klaffungen beträgt allerdings 96 pro Tag. Letztere werden für die Auswertung auf die höhere Anzahl der Höhendifferenzen hochinterpoliert. Dies liegt darin begründet, dass die Höhendifferenzen eine deutlich höhere zeitliche Auflösung besitzen. Würde man diese Werte reduzieren, gingen markante Amplituden des zeitlichen Verlaufs verloren, die die Aussagekraft der Daten verfälschen würde.

³⁷ Vgl. Lothar/Strehle (2007), S. 36f

3.4.5 Vergleich mit prozessierten ZTD-Werten

Zur Kontrolle der Qualität der berechneten ZTD-Werten an der RTK-Monitorstation wurden vom GFZ die ZTD-Werte nachträglich an einer Monitorstation prozessiert. Dazu wurden GNSS-Beobachtungen an der Monitorstation im RINEX-Format an das GFZ gesendet, aus denen vom GFZ die ZTD-Werte berechnet wurden. Hierfür wurde die Station Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie und 27.06.2016 ohne Höhenanomalie ausgewählt. Diese prozessierten ZTD-Werte lassen sich mit der aus der Untersuchung berechneten mittleren ZTD-Werten \overline{ZTD}_{MS} aus der Ausgleichung der Flächeninterpolation vergleichen (siehe Kapitel 3.4.2). Diese Daten werden ebenfalls auf eine Korrelation mit den Höhenanomalien der RTK-Monitorstationen überprüft.

4 Ergebnisse der Untersuchung

4.1 Höhen- und Flächenkorrektur

Die berechneten Koordinaten und Höhen sämtlicher RTK-Monitorstationen und SAPOS-Referenzstationen befinden sich im Anhang.

Die Berechnung der Gradienten g für die Höhenkorrektur der ZTD-Werte mit Hilfe der Formel (3-7) ergab folgende Ergebnisse:

Tabelle 4-1: Gradienten für Höhenkorrektur

RTK-Monitorstation	Gradient g [$\frac{m}{100 m}$]
Landsberg (1001)	-0.0315
Bad Neustadt (1002)	-0.0350
Freising (1003)	-0.0326

Mithilfe dieser Gradienten wurden in Abhängigkeit von der Höhendifferenz zwischen der RTK-Monitorstation und den jeweiligen SAPOS-Stationen die Korrekturwerte k_{ZTD} berechnet. Die Tabelle 4-2 zeigt die Korrekturen für an der RTK-Monitorstation Bad Neustadt:

Tabelle 4-2: Höhenkorrektur für RTK-Monitorstation Bad Neustadt

RTK-Monitorstation	ID	Höhe [m]	Gradient	
Bad Neustadt	1002	240.05	-0.0350	
SAPOS-Stationen	ID	Höhe [m]	Δh [m]	k_{ZTD} [m]
Meiningen	0198	361.69	121.64	0.043
Hildburghausen	0212	404.15	164.10	0.057
Lohr	0288	176.06	-63.99	-0.022
Schweinfurt	0289	234.81	-5.24	-0.002
Schotten	0459	287.89	47.84	0.017

Die Flächeninterpolation wurde mithilfe der Formeln (3-11) bis (3-16) durchgeführt. Die numerischen Ergebnisse befinden sich im Matlab-Code.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchung an der RTK-Monitorstation von Bad Neustadt am 05.06.2016 (Höhenanomalie) und am 27.06.2016 (Normalzustand)

gezeigt. Alle weiteren Diagramme der anderen Tage und Stationen befinden sich im Anhang. Die Aussage dieses Kapitels stimmt mit allen ausgewerteten Tagen und Stationen überein.

In den folgenden Diagrammen wird gezeigt, wie sich die Korrekturen in der Höhe und die Flächeninterpolation auf den Verlauf der ZTD-Werte der SAPOS-Referenzstationen auswirken. An Stationen, an denen zu bestimmten Zeitabschnitten Messwerte fehlen, wurde diese linear interpoliert.

Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie

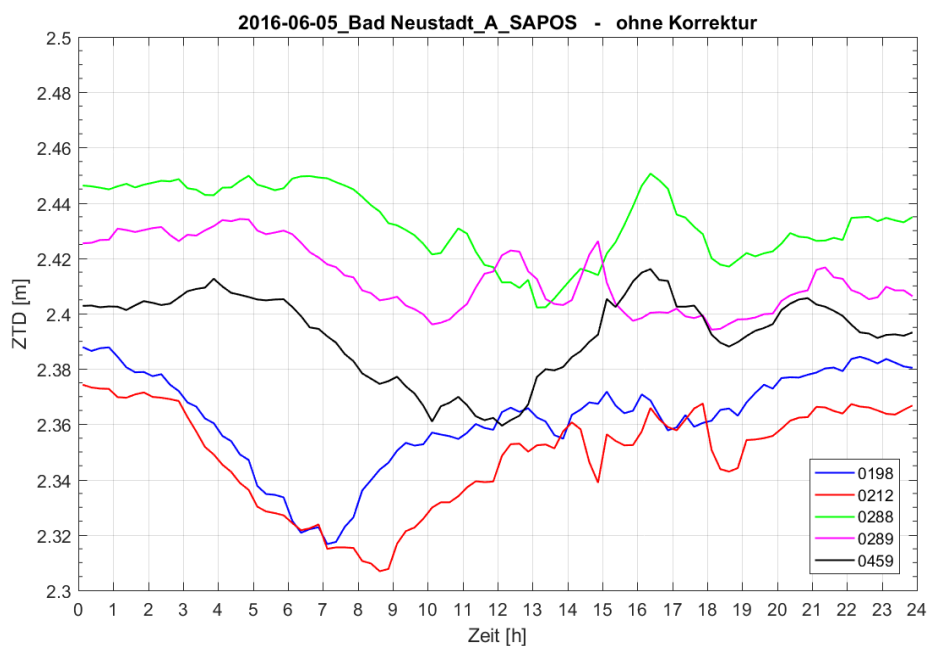


Abbildung 4-1: Bad Neustadt am 05.06.2016 ohne Korrektur

Im Diagramm der Abbildung 4-1 erkennt man deutlich den unruhigen Verlauf der ZTD-Werte an einem Tag mit Höhenanomalien. Da die Werte noch nicht korrigiert wurden, haben sie einen großen Versatz von über 6 cm.

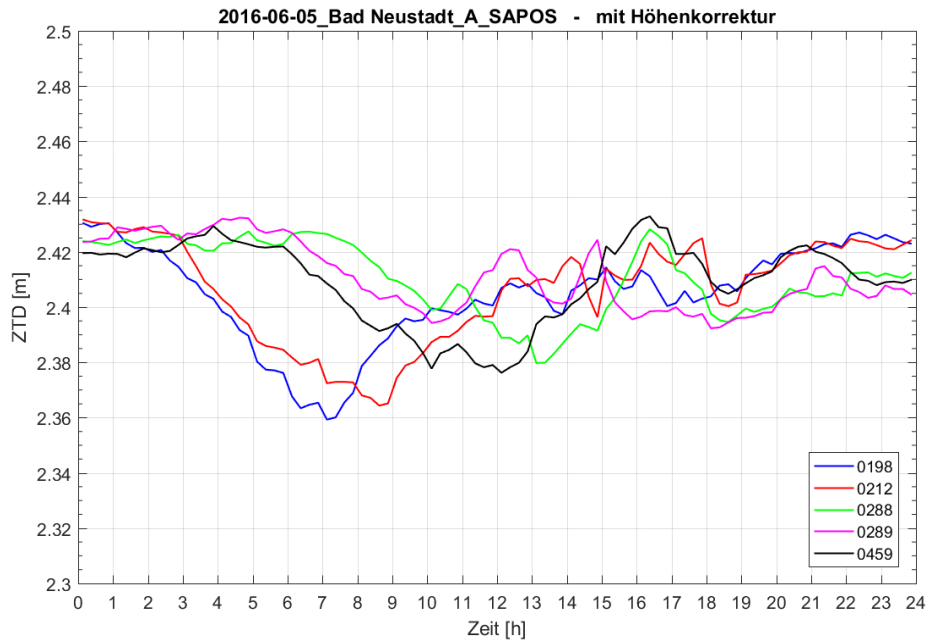


Abbildung 4-2: Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenkorrektur

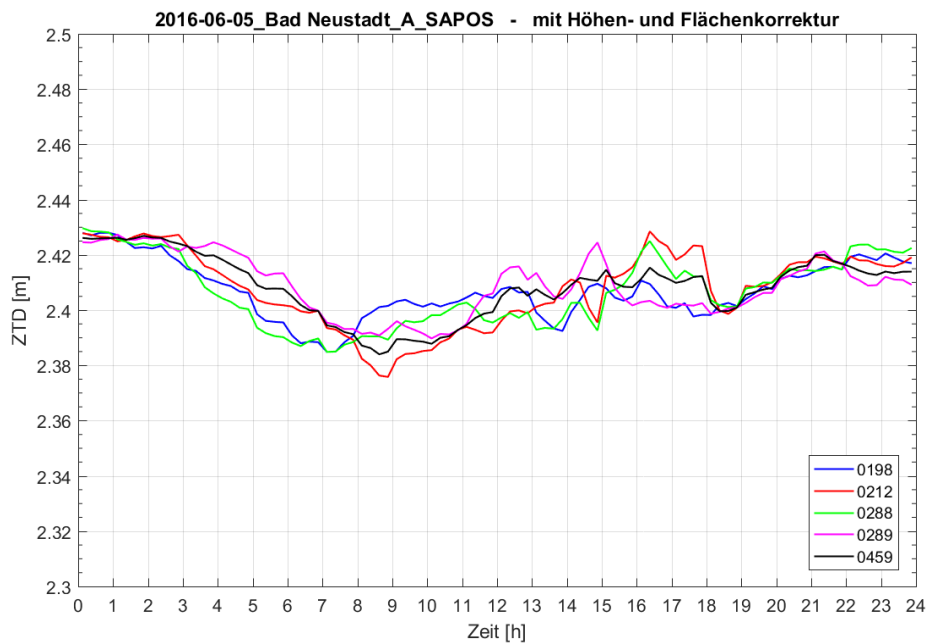


Abbildung 4-3: Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhen- und Flächenkorrektur

Vergleicht man die Diagramme aus Abbildung 4-1 und Abbildung 4-2, erkennt man sehr deutlich, wie die Höhenkorrektur die Verlaufslinien näher zusammenbringt. Abbildung 4-3 zeigt, dass die zusätzliche Flächenkorrektur nochmals erheblich die Abstände verringert. Die Flächeninterpolation bewirkt also eine starke Angleichung der ZTD-Werte.

Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand

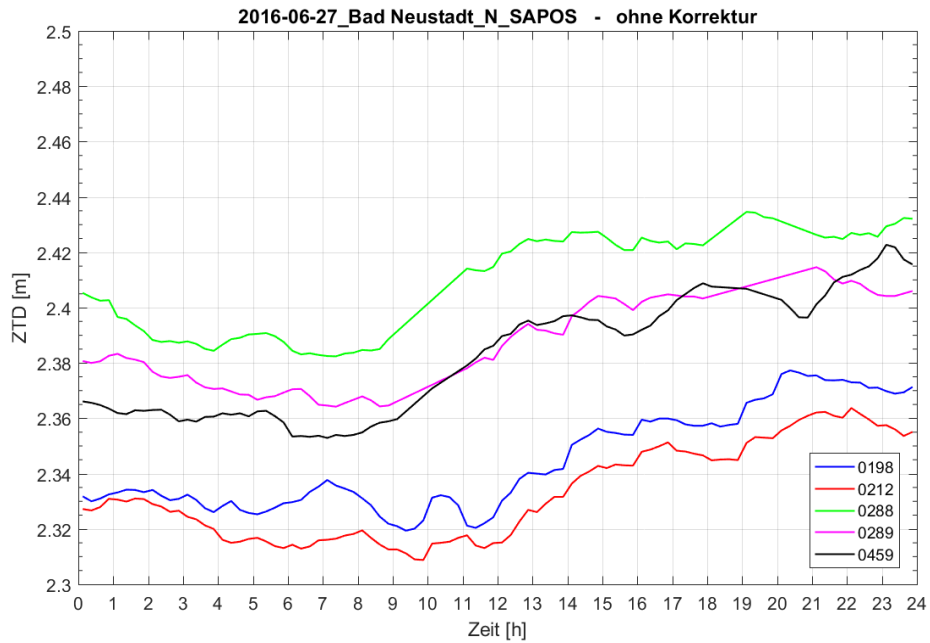


Abbildung 4-4: Bad Neustadt am 27.06.2016 ohne Korrektur

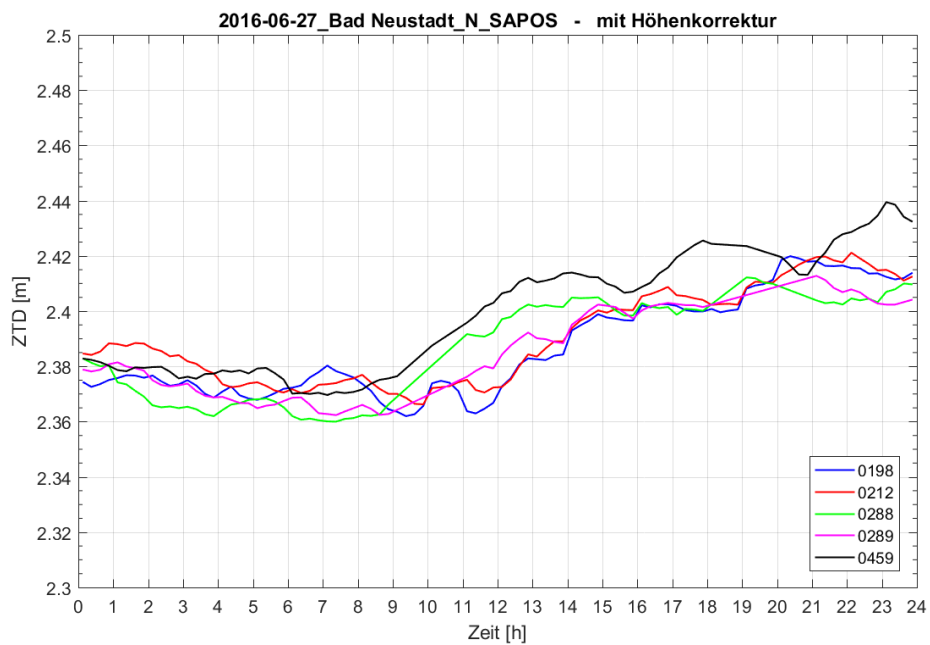


Abbildung 4-5: Bad Neustadt am 27.06.2016 mit Höhenkorrektur

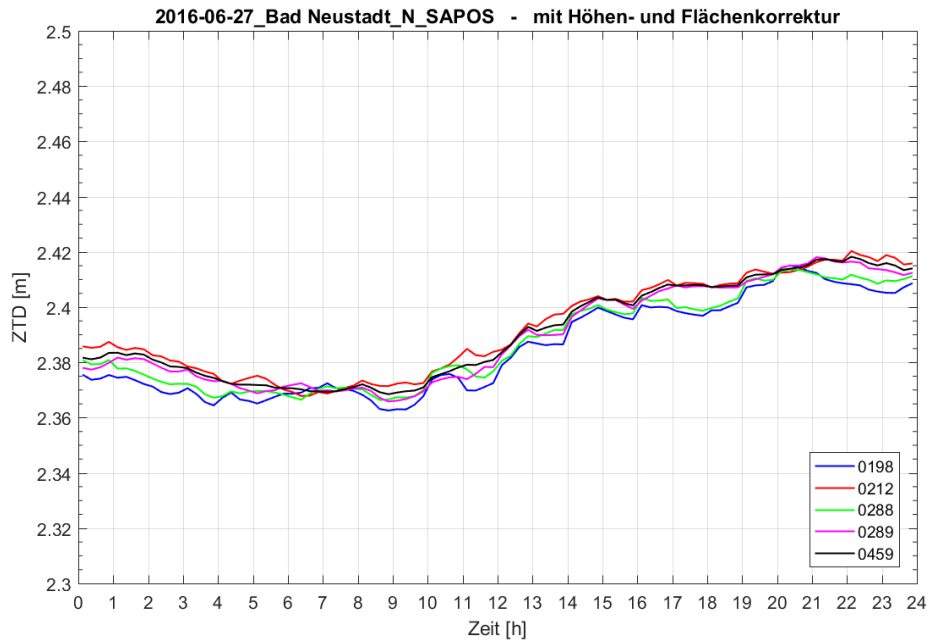


Abbildung 4-6: Bad Neustadt am 27.06.2016 mit Höhen- und Flächenkorrektur

In den Diagrammen der Abbildung 4-4 bis 4-6 erkennt man, dass der Verlauf an einem Tag ohne Höhenanomalie deutlich ruhiger ist. Auch hier wird ersichtlich, dass durch die Höhen- und Flächenkorrektur die ZTD-Werte stark aneinander angeglichen werden.

4.2 Korrelation

Aus den korrigierten ZTD-Werten wurde, wie in Kapitel 3.4.3 beschrieben, die mittlere Klaffung berechnet. In den folgenden Diagrammen wird dieses Maß (blau) mit den absoluten Höhendifferenzen der RTK-Monitorstationen (rot) verglichen.

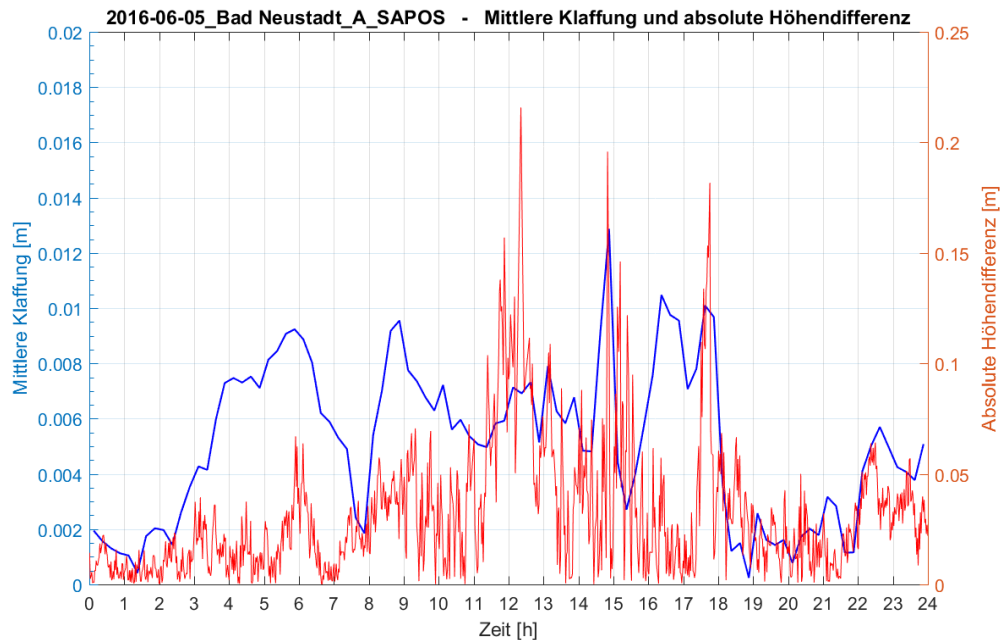


Abbildung 4-7: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz in Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie

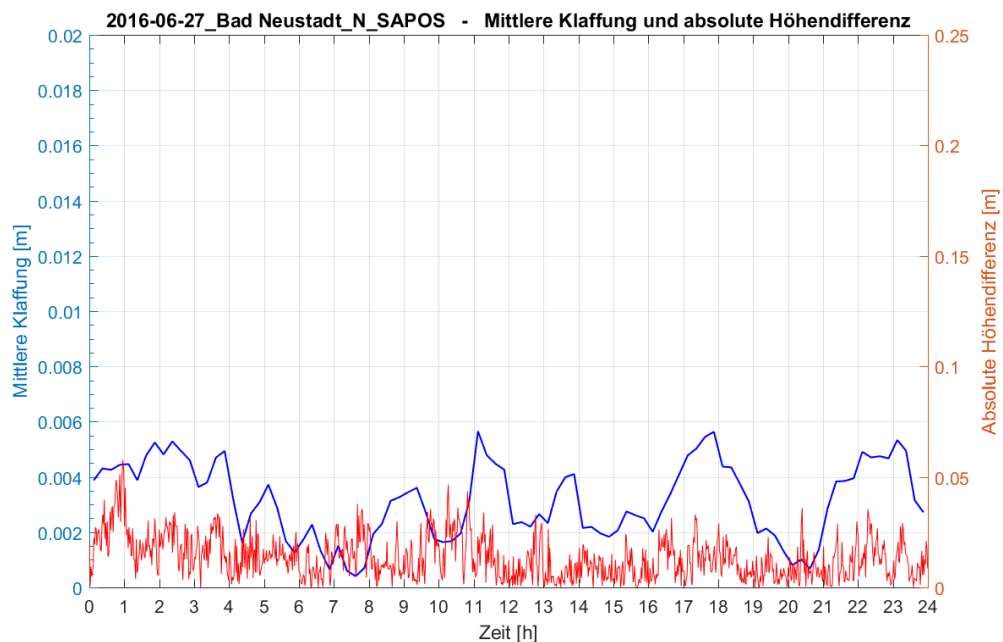


Abbildung 4-8: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz in Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand

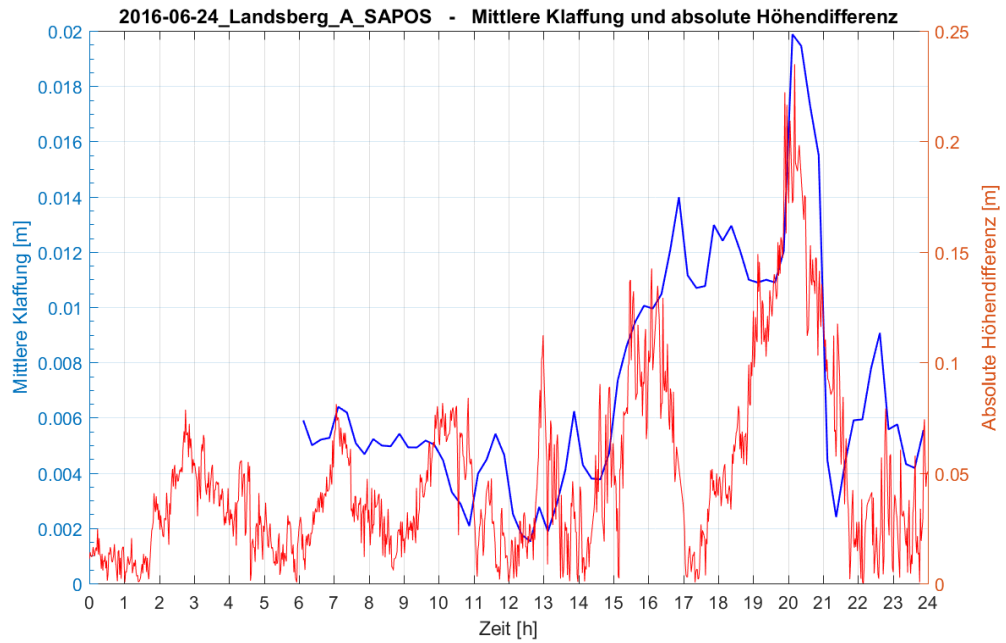


Abbildung 4-9: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz in Landsberg am 24.06.2016 mit Höhenanomalie

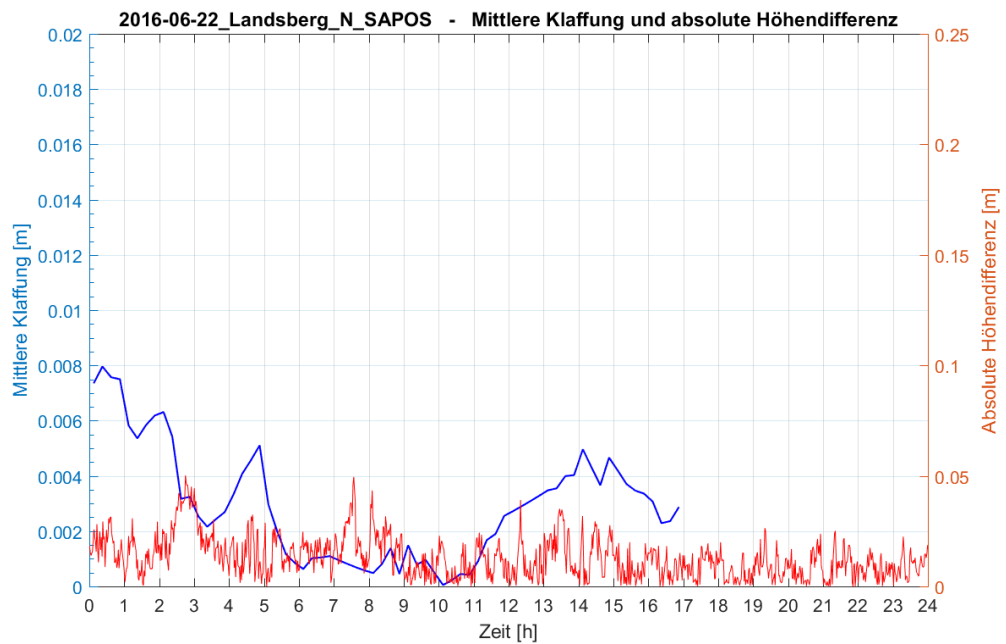


Abbildung 4-10: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz in Landsberg am 22.06.2016 im Normalzustand

Die mittlere Klaffung in den Diagrammen in Abbildung 4-9 und 4-10 war nicht für den ganzen Tag berechenbar, weil an den fehlenden Zeitabschnitten Messdaten gefehlt haben.

Vergleicht man die Diagramme der Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 von Bad Neustadt und die Diagramme der Abbildung 4-9 und 4-10 in Landsberg, so sieht man deutlich den Unterschied zwischen einem Tag mit Höhenanomalie und einem Tag im Normalzustand. Die mittlere Klaffung beträgt an einem Tag mit starken Höhenabweichungen bis zu 2 cm. An einem normalen Tag liegt diese unterhalb von 0,8 cm. Allerdings fällt auf, dass die Verläufe der mittleren Klaffung mit den Verläufen der absoluten Höhendifferenz teilweise abweichen.

Der Zusammenhang wurde mithilfe des Korrelationskoeffizienten r überprüft (siehe Kapitel 3.4.4).

Tabelle 4-3: Korrelationskoeffizienten

RTK-Monitorstation	Tag	Zustand	r
Bad Neustadt	29.05.2016	Höhenanomalie	-0.065
Bad Neustadt	05.06.2016	Höhenanomalie	0.285
Bad Neustadt	27.06.2016	Normalzustand	0.191
Landsberg	22.06.2016	Normalzustand	0.079
Landsberg	24.06.2016	Höhenanomalie	0.575
Freising	04.08.2016	Höhenanomalie	0.264
Freising	05.08.2016	Normalzustand	0.222

Bis auf eine Ausnahme, Landsberg am 24.06.2016 mit Höhenanomalie, sind die berechneten Korrelationskoeffizienten sehr klein und zeigen, dass sich kaum ein linearer Zusammenhang feststellen lässt.

4.3 Vergleich mit prozessierten ZTD-Werten

In Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 werden die gemittelten Werte \overline{ZTD}_{MS} aus der Flächeninterpolation mit den prozessierten ZTD-Werten vom GFZ verglichen.

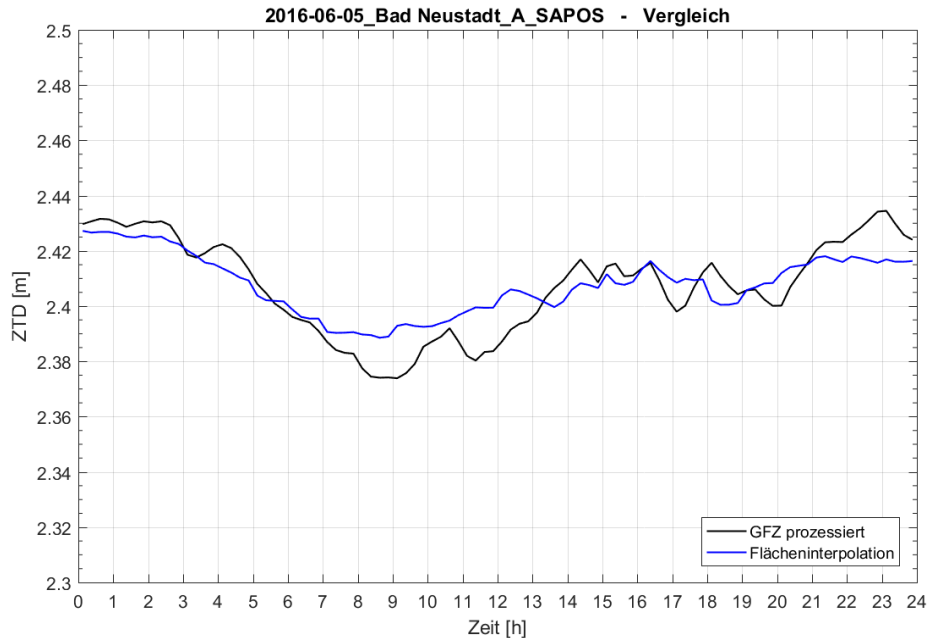


Abbildung 4-11: Vergleich von prozessierten ZTD-Werten mit gemittelten ZTD-Werten der Flächeninterpolation in Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie

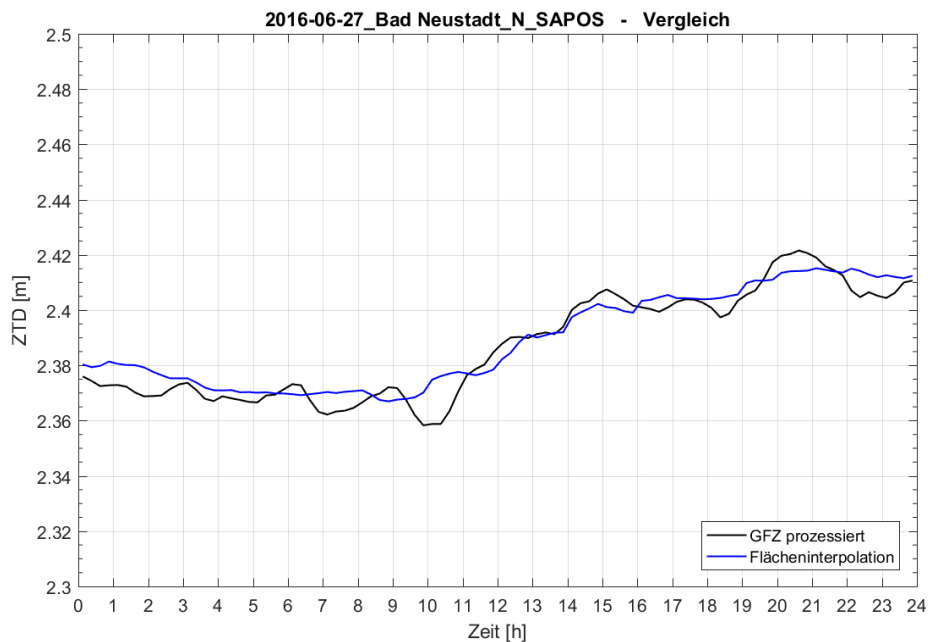


Abbildung 4-12: Vergleich von prozessierten ZTD-Werten mit gemittelten ZTD-Werten der Flächeninterpolation in Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand

Sowohl an dem Tag mit Höhenanomalie, als auch am Tag im Normalzustand erkennt man, dass die zeitlichen Verläufe der prozessierten ZTD-Werte und flächeninterpolierten ZTD-Werte sehr ähnlich sind. Auffällig ist, dass die flächeninterpolierten Werte deutlich ruhiger verlaufen, was auf die Ausgleichung zurückzuführen ist. Die Zeitreihen der prozessierten Werte vom GFZ unterliegen hingegen deutlichen Schwankungen, was eine genauere Modellierung der troposphärischen Bedingungen vermuten lässt.

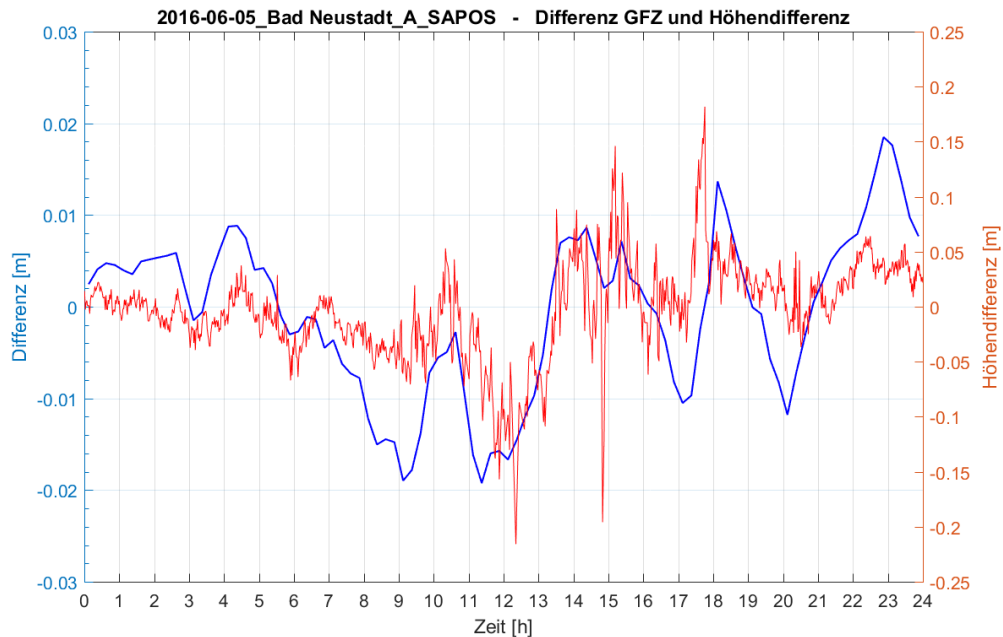


Abbildung 4-13: Vergleich der Differenzen mit Höhendifferenzen in Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie

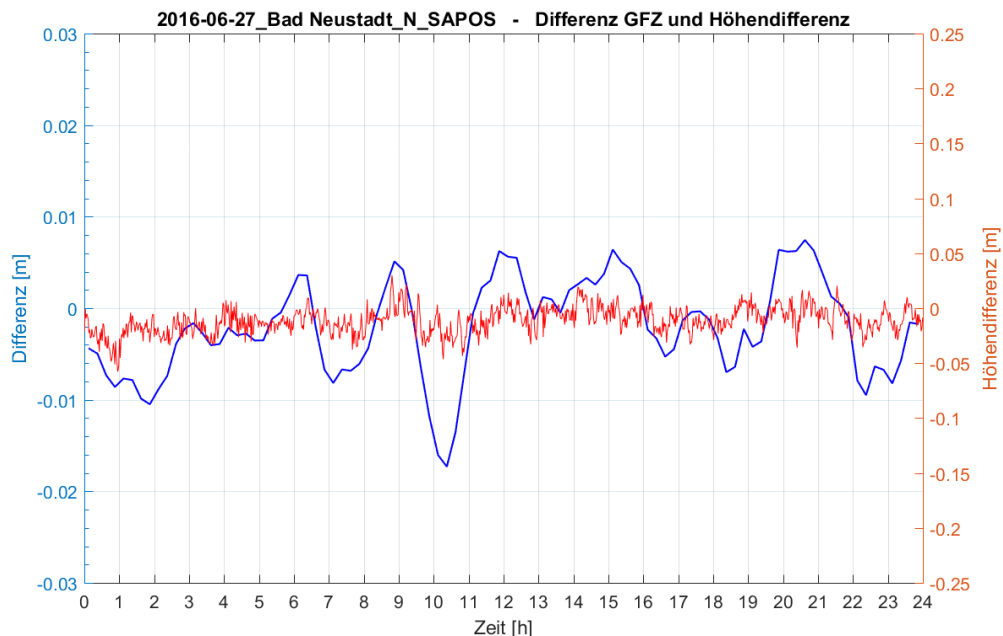


Abbildung 4-14: Vergleich der Differenzen mit Höhendifferenzen in Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand

Bildet man die Differenz zwischen den prozessierten ZTD-Werten und den flächeninterpolierten ZTD-Werten, so ergeben sich maximale Abweichungen von ca. ± 2 cm. Dies zeigt, dass die prozessierten ZTD-Werte vom GFZ sehr gut mit den höhen- und flächenkorrigierten ZTD-Werten übereinstimmen.

In den Abbildungen 4-13 und 4-14 werden die Differenzen zusammen mit den relativen Höhendifferenzen der RTK-Monitorstationen visualisiert. Hierbei erkennt man in der Zeitreihe mit Höhenanomalie (Abbildung 4-13) eine eingeschränkte Korrelation. Der errechnete Korrelationskoeffizient von $r = 0.591$ zeigt ebenfalls einen teilweise vorhandenen linearen Zusammenhang. In der Zeitreihe mit Normalzustand (Abbildung 4-14) erkennt man hingegen kaum eine Korrelation; allerdings beträgt der Korrelationskoeffizient hier $r = 0.534$.

5 Bewertung der Ergebnisse

Anhand der Diagramme der Höhenkorrektur und Flächeninterpolation (siehe Kapitel 4.1) erkennt man sehr gut, wie sich diese auf die Verläufe der ZTD-Werte auswirken und verbessern. Bei der Ausgleichung nach der Methode der kleinsten Quadrate (siehe Kapitel 3.4.2) werden allerdings Widersprüche im System bei geringer Redundanz kompensiert, d. h. die daraus geschätzten Parameter werden einander angeglichen. Diese Widersprüche können durch lokale Wetterereignisse sehr bedeutend für die Troposphärenmodellierung sein. In die Ausgleichung flossen die ZTD-Werte der jeweils fünf umliegenden SAPOS-Referenzstationen mit ein. Diese Referenzstationen haben eine Entfernung von 23 bis 80 km zur RTK-Monitorstation. Durch die teilweise großen Entfernungen und den damit verbundenen unterschiedlichen troposphärischen Bedingungen treten solche großen Widersprüche in den berechneten ZTD-Werten auf. Aufgrund der geringen Redundanz von je fünf Messwerten pro Zeitepoche werden diese in der Ausgleichung stark reduziert. Die daraus berechnete mittlere Klaffung, welche als Interpolationsrestfehler zu interpretieren ist, nimmt daher nur geringe Werte an (< 2 cm).

Die berechneten Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang zwischen den mittleren Klaffungen der ZTD-Werte und den Höhenabweichungen der RTK-Monitorstationen führen zu keinem eindeutig interpretierbaren Ergebnis. Im optischen Vergleich der Zeitreihen ist jedoch mit Sicherheit feststellbar, dass an einem Tag mit Höhenanomalie deutlich mehr Schwankungen und größere Amplituden der mittleren Klaffung auftreten als an einem Tag im Normalzustand.

Der Vergleich der prozessierten ZTD-Werte vom GFZ mit den mittleren ZTD-Werten aus der Flächeninterpolation an einem Tag mit Höhenanomalie und einem Tag im Normalzustand (siehe Kapitel 4.3) zeigt deutlich, dass die Abweichungen sehr gering sind (max. ± 2 cm). Daraus lässt sich schließen, dass auch an einem Tag mit Höhenanomalie die Troposphäre mithilfe von Flächenkorrekturparameter modellierbar ist.

6 Zusammenfassung und Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde eine Untersuchung durchgeführt, die eine Abhängigkeit der an den RTK-Monitorstationen beobachteten Höhenanomalien von nicht korrigierten troposphärischen Restfehlern im SAPOS-Dienst HEPS überprüft. Für die Analyse war es erforderlich die troposphärischen Korrekturwerte (ZTD-Werte) der umliegenden SAPOS-Referenzstationen mithilfe von Höhenkorrekturen und Flächeninterpolationen anzupassen. Im nächsten Schritt wurde aus diesen Daten Interpolationsrestfehler ermittelt, die für den Vergleich mit den Höhendifferenzen der RTK-Monitorstationen genutzt wurden. In diesem Vergleich wurden die Daten auf eine lineare Korrelation überprüft. Dies geschah anhand von Zeitreihen und der Berechnung von Korrelationskoeffizienten.

Die untersuchten Ergebnisse zeigen, dass keine nachweisbare lineare Korrelation zwischen den Höhenanomalien der RTK-Monitorstationen und nicht korrigierten troposphärischen Restfehlern im HEPS festzustellen ist. Jedoch lässt sich erkennen, dass an Tagen mit Höhenanomalien der zeitliche Verlauf der berechneten ZTD-Werte deutlich unruhiger ist und die Interpolationsrestfehler sichtbar größer sind.

Nachgewiesen werden konnte, dass die Modellierung der troposphärischen Bedingungen nach der in der Untersuchung verwendeten Methode mit den prozessierten Daten vom GFZ sehr gut übereinstimmt. Im logischen Umkehrschluss bestätigt dies, dass aus den Daten vom GFZ eine Modellierung der Troposphäre möglich ist.

Weitere Störeinflüsse, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wurden, können eine bedeutende Auswirkung auf die auftretenden Höhenanomalien an den RTK-Monitorstationen haben. Außerdem könnte die GFZ EPOS Software im Vergleich zur Vernetzungssoftware Trimble Pivot Platform Unterschiede in der Schätzung der Troposphärenparameter aufweisen. Dazu müsste überprüft werden, nach welchem Verfahren die Trimble Software die Korrekturwerte ermittelt.

In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt sieben Tage an drei RTK-Monitorstationen analysiert. Aufgrund der begrenzten Datenmenge kann diese empirische Untersuchung damit keine allgemeingültige Aussage treffen. Jedoch zeigt sie anhand der dargestellten Ergebnisse, dass ein teilweiser Zusammenhang zwischen den Höhenanomalien und den troposphärischen Restfehlern besteht, der Gegenstand einer weiterführenden Analyse sein kann.

I. Quellenverzeichnis

Printmedien

- Bhatta, Basudeb (2011): Global Navigation Satellite Systems. Insights into GPS, GLONASS, Galileo, Compass, and others. Indien: BS Publications.
- Dick, G./Bender, M./Wickert, J./Ramatschi, M. (2010): Atmosphärensondierung mit GNSS-Bodendaten am GFZ: Aktueller Stand und Ausblick. 10. SAPOS Administratorenentreffen. Helmholtz Zentrum Potsdam, Deutsches GeoForschungsZentrum. München, 2010.
- Freitag, Martin/Knöpfler, Andreas/Mayer, Michael (2013): RTKMon-Einsatz zur Überwachung und Untersuchung von RTK-Infrastrukturen. Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung / Karlsruher Institut für Technologie.
- Hübner, Wolfgang (2015a): Vorlesungsskriptum Satellitenpositionierung II. V2. Fakultät für Geoinformation, Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- Hübner, Wolfgang (2015b): Vorlesungsskriptum Satellitenpositionierung II. V3. Fakultät für Geoinformation, Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- Lother, Georg/Strehle, J. (2007): Vorlesungsskriptum Ausgleichsrechnung. Methode der kleinsten Quadrate. Fakultät für Geoinformation, Hochschule für angewandte Wissenschaften München.
- Mansfeld, Werner (2010): Satellitenordnung und Navigation. Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Rothacher, Markus (2007): Vorlesungsskriptum Satellitengeodäsie 1. (Einführung in GPS). Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie, Technische Universität München.
- Wanninger, Lambert (2000): Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen. Deutschen Geodätische Kommission (Reihe C, 508).
- Wanninger, Lambert (2006): Netz-RTK. Geodätisches Institut, TU Dresden.

Internetseiten

Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen - AdV-Online,

URL: <http://www.adv-online.de/AdV-Produkte/SAPOS/>, Stand 08.01.2017.

Lang, Niko (2006): Aufbau der Erdatmosphäre,

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Troposph%C3%A4re>, Stand: 11.01.2017.

SAPOS Bayern, URL: <https://sapos.bayern.de/>, Stand: 03.02.2017.

SAPOS Bayern. URL: https://sapos.bayern.de/heps_perf.php, Stand: 11.01.2017.

SAPOS Bayern, URL: <https://sapos.bayern.de/refmap.php>, Stand: 11.01.2017.

SAPOS Bayern, URL: <https://sapos.bayern.de/service.php>, Stand: 09.01.2017.

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Stationskarte aller Referenzstationen in Bayern 5

Abbildung 2-2: Stationskarte der drei RTK-Monitorstationen in Bayern 7

Abbildung 2-3: Aufbau der Erdatmosphäre 8

Abbildung 3-1: Beispiel RTK-Monitorstation Landsberg mit umliegenden
Referenzstationen.....13

Abbildung 3-2: Höhendifferenzen der RTK-Monitorstation Landsberg
am 22.06.2016 im Normalzustand14

Abbildung 3-3: Höhendifferenzen der RTK-Monitorstation Landsberg
am 24.06.2016 mit Höhenanomalie14

Abbildung 3-4: ZTD-Werte der SAPOS-Stationen um Bad Neustadt
am 05.06.2016.....15

Abbildung 4-1: Bad Neustadt am 05.06.2016 ohne Korrektur23

Abbildung 4-2: Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenkorrektur24

Abbildung 4-3: Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhen- und Flächenkorrektur.....24

Abbildung 4-4: Bad Neustadt am 27.06.2016 ohne Korrektur25

Abbildung 4-5: Bad Neustadt am 27.06.2016 mit Höhenkorrektur25

Abbildung 4-6: Bad Neustadt am 27.06.2016 mit Höhen- und Flächenkorrektur.....26

Abbildung 4-7: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz
in Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie27

Abbildung 4-8: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz
in Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand27

Abbildung 4-9: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz
in Landsberg am 24.06.2016 mit Höhenanomalie28

Abbildung 4-10: Vergleich der mittleren Klaffung und der absoluten Höhendifferenz
in Landsberg am 22.06.2016 im Normalzustand28

Abbildung 4-11: Vergleich von prozessierten ZTD-Werten mit gemittelten
ZTD-Werten der Flächeninterpolation in Bad Neustadt
am 05.06.2016 mit Höhenanomalie30

Abbildung 4-12: Vergleich von prozessierten ZTD-Werten mit gemittelten
ZTD-Werten der Flächeninterpolation in Bad Neustadt
am 27.06.2016 im Normalzustand30

Abbildung 4-13: Vergleich der Differenzen mit Höhendifferenzen in Bad Neustadt
am 05.06.2016 mit Höhenanomalie31

Abbildung 4-14: Vergleich der Differenzen mit Höhendifferenzen in Bad Neustadt
am 27.06.2016 im Normalzustand31

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Dienste von SAPOS	6
Tabelle 3-1: Koordinaten der RTK-Monitorstationen.....	16
Tabelle 4-1: Gradienten für Höhenkorrektur	22
Tabelle 4-2: Höhenkorrektur für RTK-Monitorstation Bad Neustadt	22
Tabelle 4-3: Korrelationskoeffizienten	29

IV. Abkürzungsverzeichnis

AdV	Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
DGNSS	Differential Global Navigation Satellite System
DGPS	Differential Global Positioning System
DHDN90	Deutsches Hauptdreiecksnetz 90
EPS	Echtzeit Positionierungs-Service
ETRS89	European Terrestrial Reference System 89
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPPS	Geodätischer Postprocessing Positionierungs-Service
GPS	Global Positioning System
HEPS	Hochpräziser Echtzeit Positionierungs-Service
IGS	International GNSS Service
LDBV	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung
NHN	Normalhöhennull
Ntrip	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPP	Precise Point Positioning
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
SAPOS	Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung
UTM	Universal Transverse Mercator
ZTD	Zenith Total Delay

V. Anhang

1. Koordinaten und Höhen aller Stationen

RTK-Monitor-Stationen		3D-kartesisch(ETRS89)			UTM32 (ETRS89), NHN(DHNN92)		
Name	ID	X	Y	Z	E	N	H
Landsberg	1001	4195153.292	805927.043	4721215.688	32639690	5323764	602.78
Bad Neustadt	1002	4015613.472	723631.043	4886164.923	32586508	5575467	240.05
Freising	1003	4154037.541	863910.314	4746908.795	32703410	5364398	481.99
SAPOS-Stationen		3D-kartesisch(ETRS89)			UTM32 (ETRS89), NHN(DHNN92)		
Name	ID	X	Y	Z	E	N	H
Meiningen	0198	3990488.174	733588.405	4905256.874	32600269	5605547	361.69
Hildburghausen	0212	4000365.868	758132.149	4893599.134	32622961	5587647	404.15
München	0256	4177482.976	856761.086	4727789.788	32692675	5335225	534.10
Pfaffenhofen	0258	4146844.347	844141.837	4756634.772	32685003	5378479	448.59
Augsburg	0259	4168820.720	802292.699	4744816.101	32640222	5359298	510.37
Aschau	0264	4161326.191	911136.273	4731743.533	32748951	5343416	460.72
Landshut	0266	4136271.342	891364.457	4757159.368	32733329	5381118	402.23
Wertach	0269	4238117.929	779034.669	4687877.374	32606407	5273066	907.24
Mindelheim	0273	4201228.822	778201.039	4720500.077	32611358	5322049	625.15
Lohr	0288	4051345.332	683284.460	4862496.274	32541085	5538066	176.06
Schweinfurt	0289	4038610.304	729762.607	4866385.673	32588966	5544630	234.81
Schotten	0459	4013979.601	644393.806	4898564.028	32508532	5594157	287.89
Weilheim	1271	4208628.762	828986.083	4705282.173	32660359	5300536	581.99

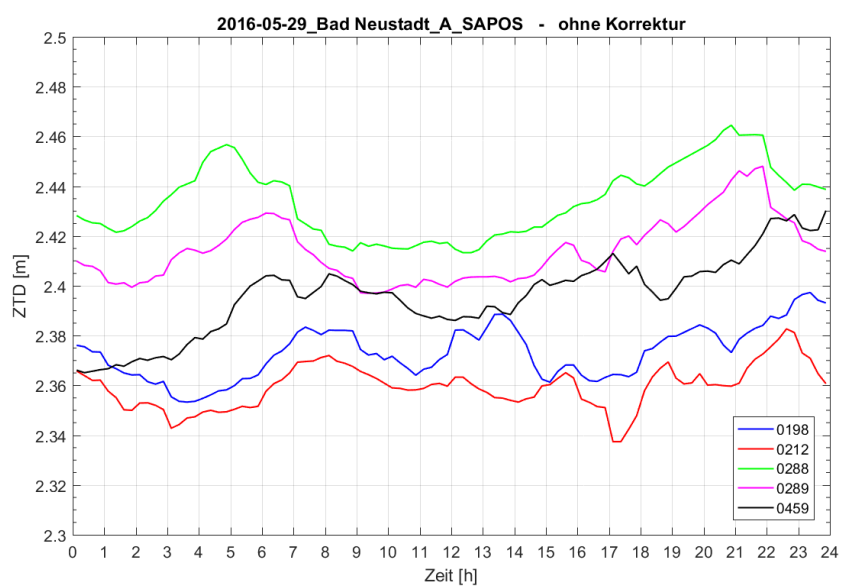
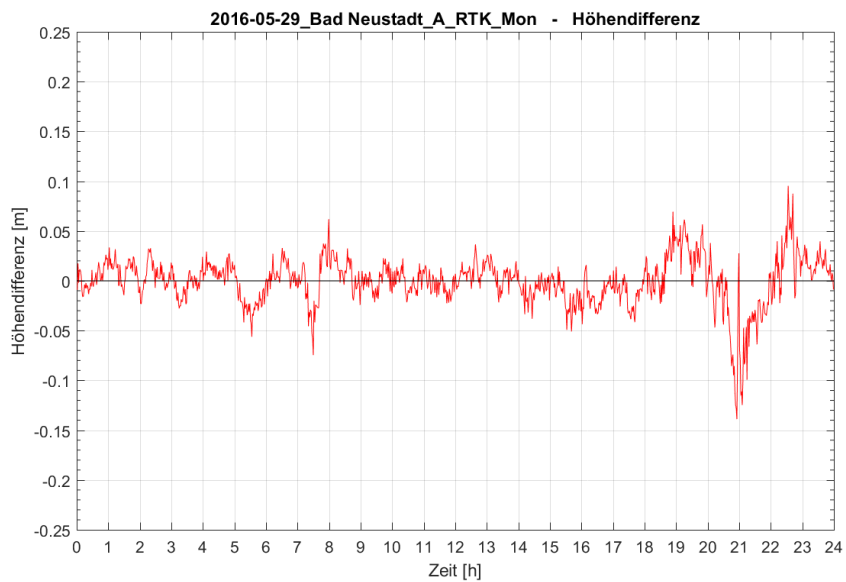
2. Berechnung der Gradienten für Höhenkorrektur

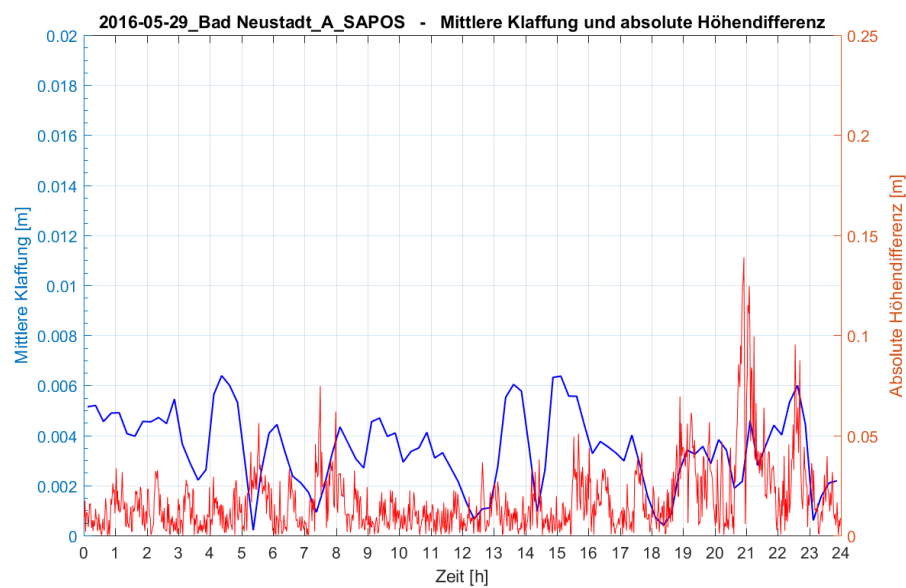
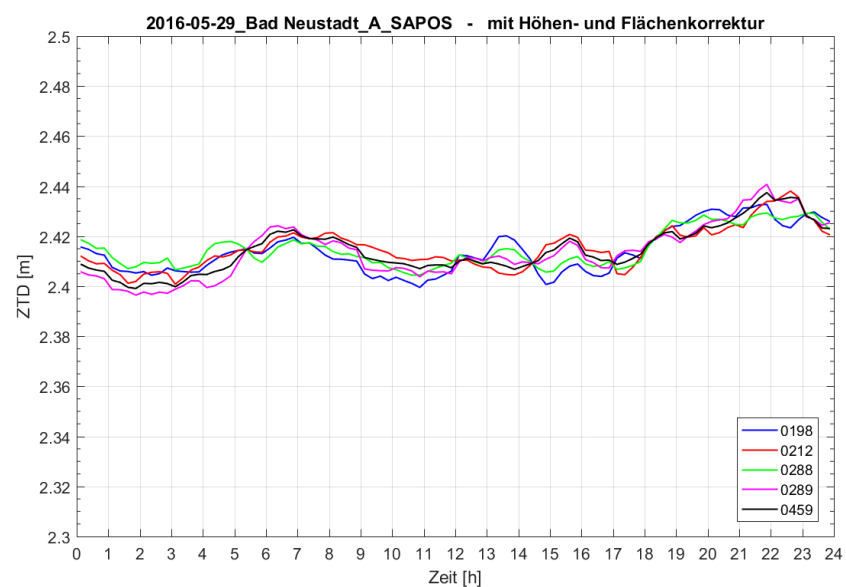
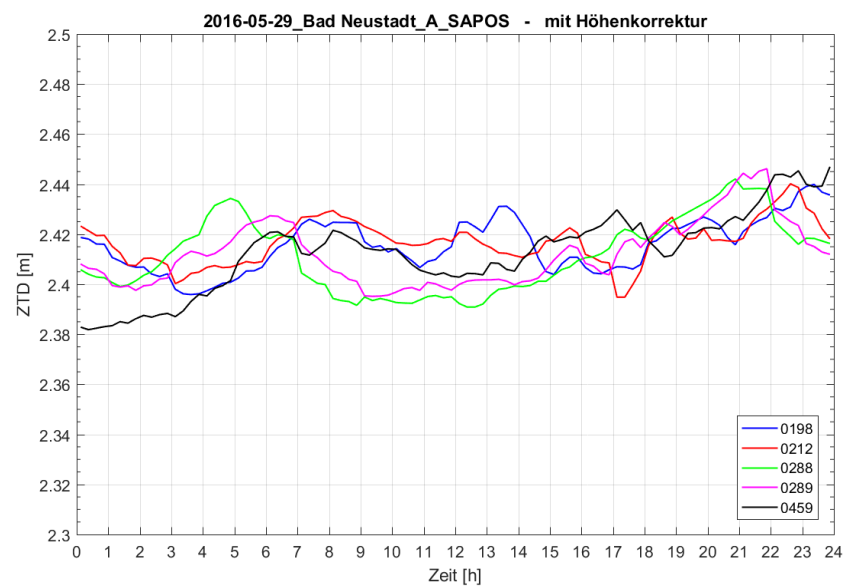
Standardatmosphäre			
T_0	291.15 K		
p_0	1013.25 mbar		
$h_0 =$	0 m		
H_0	50 %		
Station	Landsberg (1001)	Bad Neustadt (1002)	Freising (1003)
Höhe	602.78	240.05	481.99
Höhe + 50 m	652.78	290.05	531.99
Höhe - 50 m	552.78	190.05	431.99
Extrapolation auf Stationshöhe			
p	943.17	984.86	956.89
T	287.23	289.59	288.02
H	34.00	42.88	36.74
e	5.515	8.106	6.271
ZTD	2.203	2.323	2.242
Extrapolation auf Stationshöhe +50 m			
p	937.54	979.02	951.19
T	286.91	289.26	287.69
H	32.93	41.53	35.58
e	5.228	7.688	5.947
ZTD	2.187	2.306	2.226
Extrapolation auf Stationshöhe -50 m			
p	948.83	990.72	962.62
T	287.56	289.91	288.34
H	35.11	44.28	37.93
e	5.816	8.546	6.614
ZTD	2.219	2.341	2.258
Gradient(m/100 m)	-0.03150	-0.03501	-0.03257

3. Höhenkorrektur aller RTK-Monitorstationen

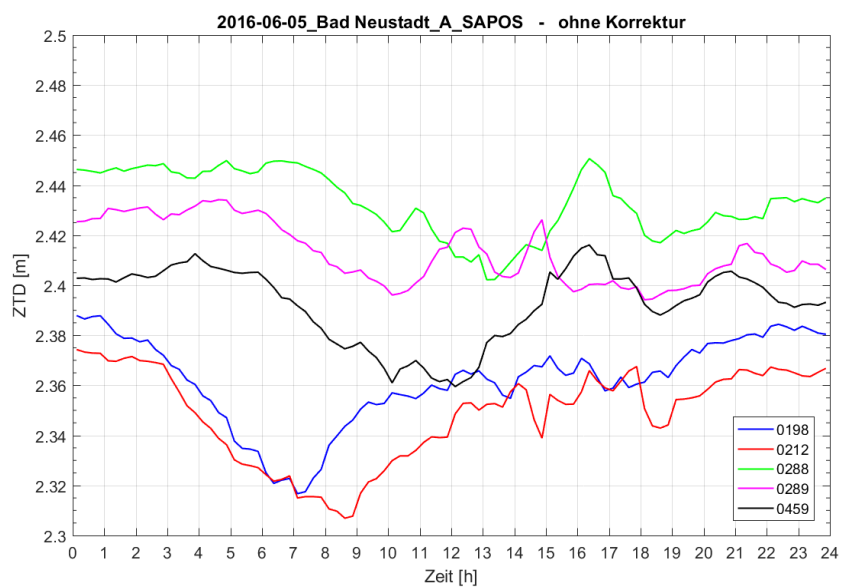
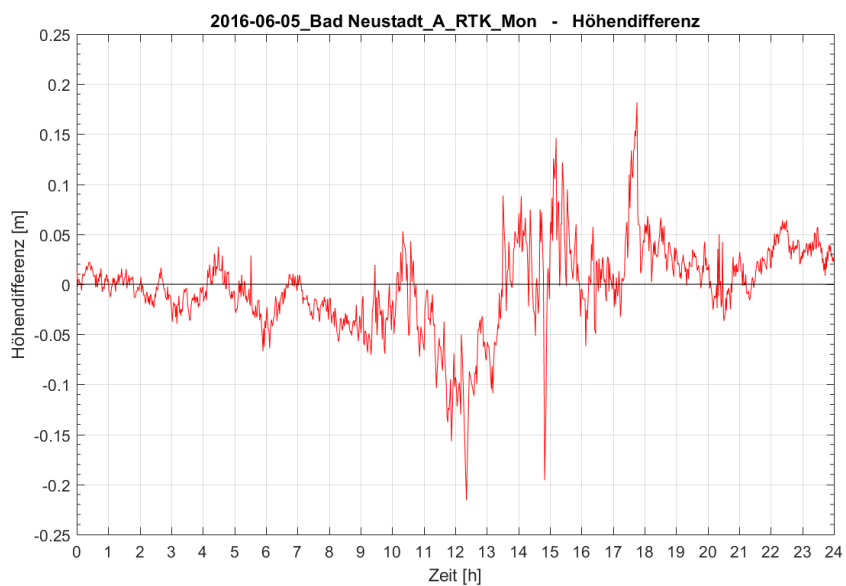
RTK-Monitorstation	ID	Höhe [m]	Gradient	
Landsberg	1001	602.78	-0.03150	
SAPOS-Stationen	ID	Höhe [m]	Δh [m]	k_{ZTD} [m]
München	0256	534.10	-68.68	-0.022
Augsburg	0259	510.37	-92.42	-0.029
Wertach	0269	907.24	304.46	0.096
Mindelheim	0273	625.15	22.37	0.007
Weilheim	1271	581.99	-20.80	-0.007
RTK-Monitorstation	ID	Höhe [m]	Gradient	
Bad Neustadt	1002	240.05	-0.03501	
SAPOS-Stationen	ID	Höhe [m]	Δh [m]	k_{ZTD} [m]
Meiningen	0198	361.69	121.64	0.043
Hildburghausen	0212	404.15	164.10	0.057
Lohr	0288	176.06	-63.99	-0.022
Schweinfurt	0289	234.81	-5.24	-0.002
Schotten	0459	287.89	47.84	0.017
RTK-Monitorstation	ID	Höhe [m]	Gradient	
Freising	1003	481.99	-0.03257	
SAPOS-Stationen	ID	Höhe [m]	Δh [m]	k_{ZTD} [m]
München	0256	534.10	52.11	0.017
Pfaffenhofen	0258	448.59	-33.40	-0.011
Augsburg	0259	510.37	28.37	0.009
Aschau	0264	460.72	-21.28	-0.007
Landshut	0266	402.23	-79.76	-0.026

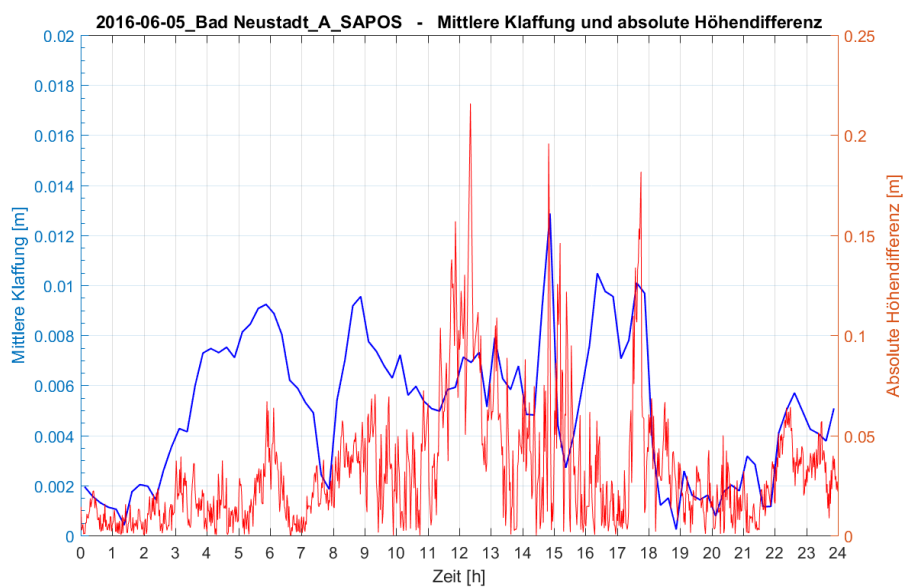
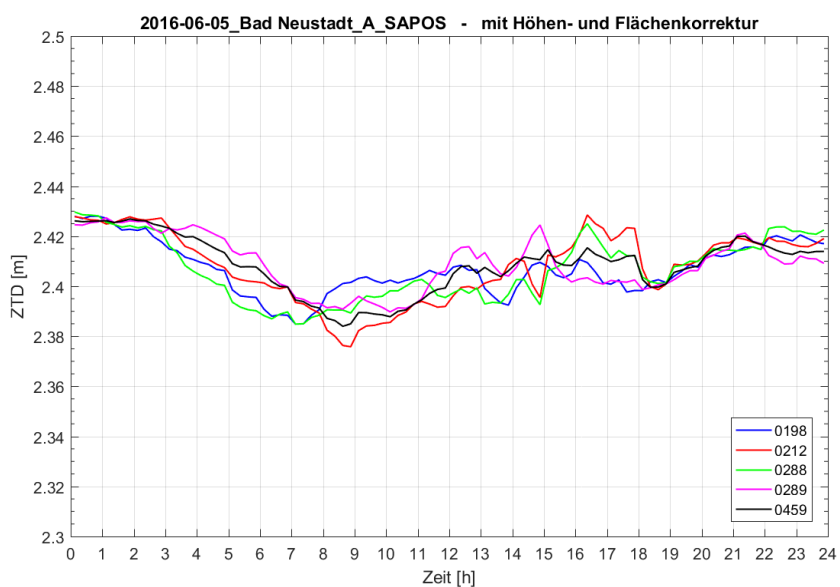
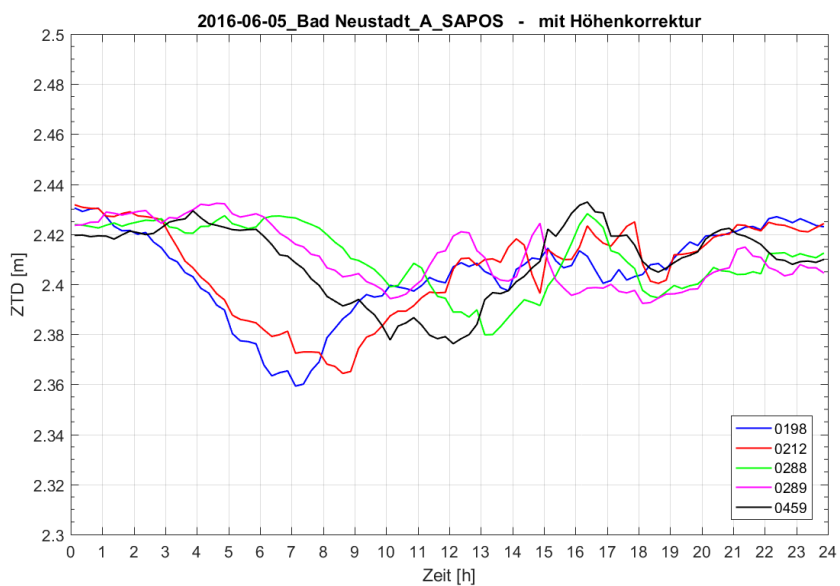
4. Diagramme und Vergleiche aller RTK-Monitorstation und Tage

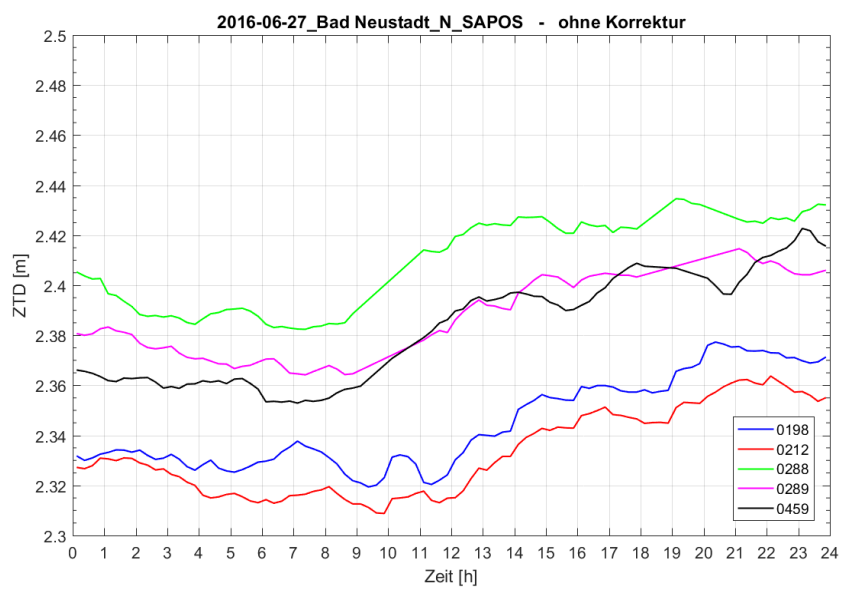
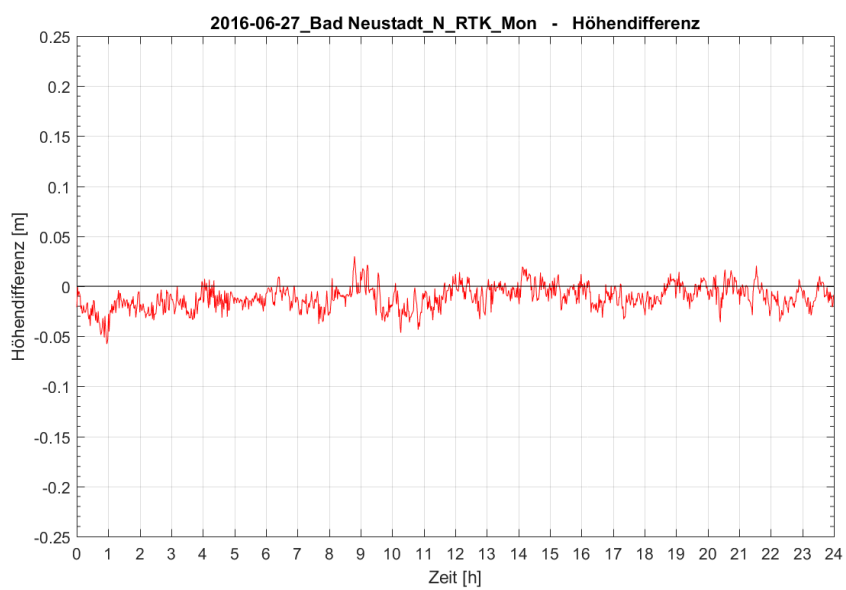
Bad Neustadt am 29.05.2016 mit Höhenanomalie

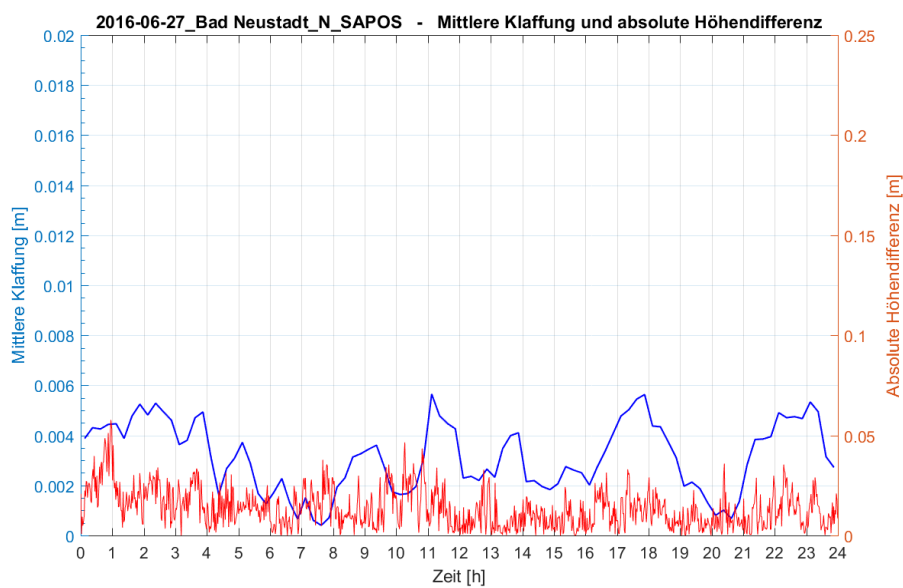
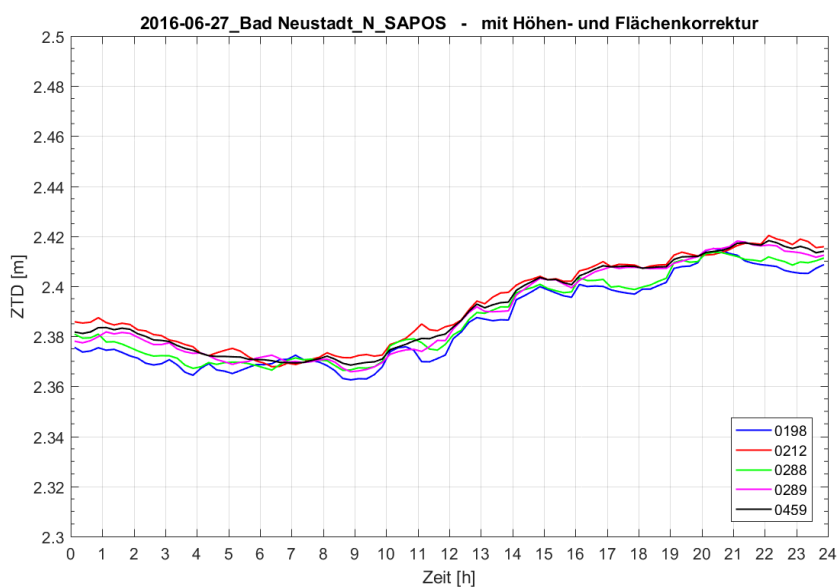
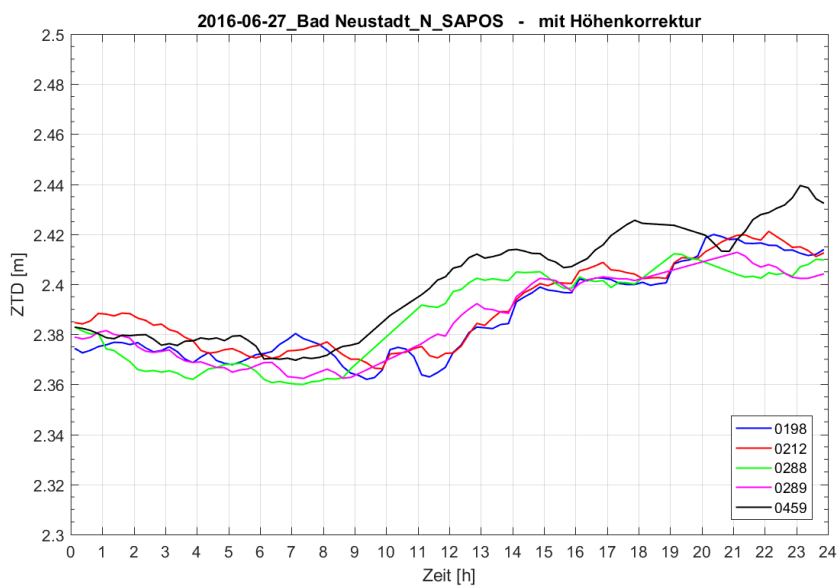


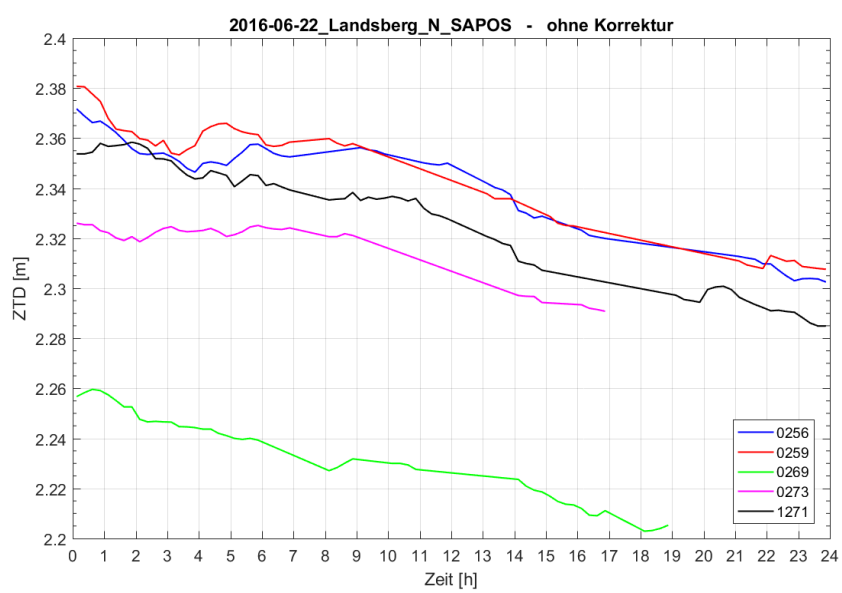
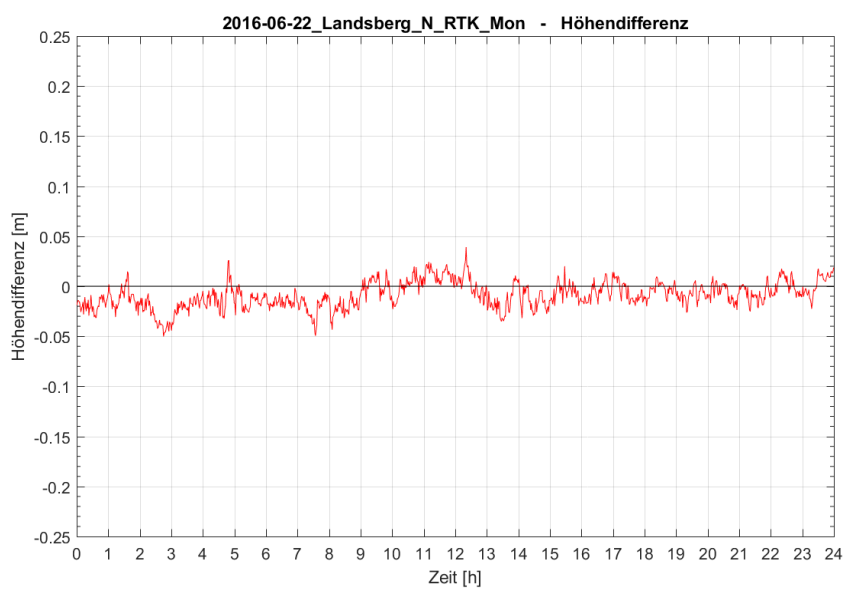
Bad Neustadt am 05.06.2016 mit Höhenanomalie

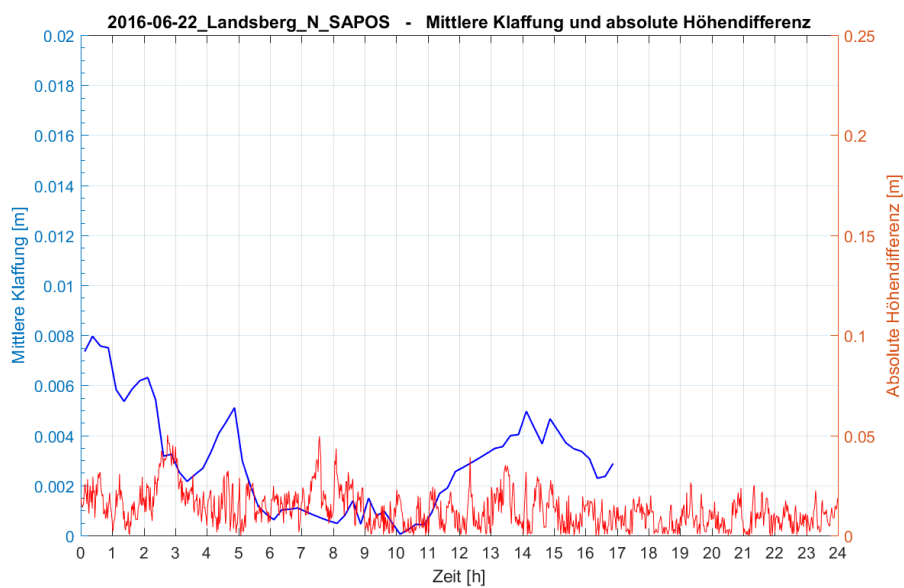
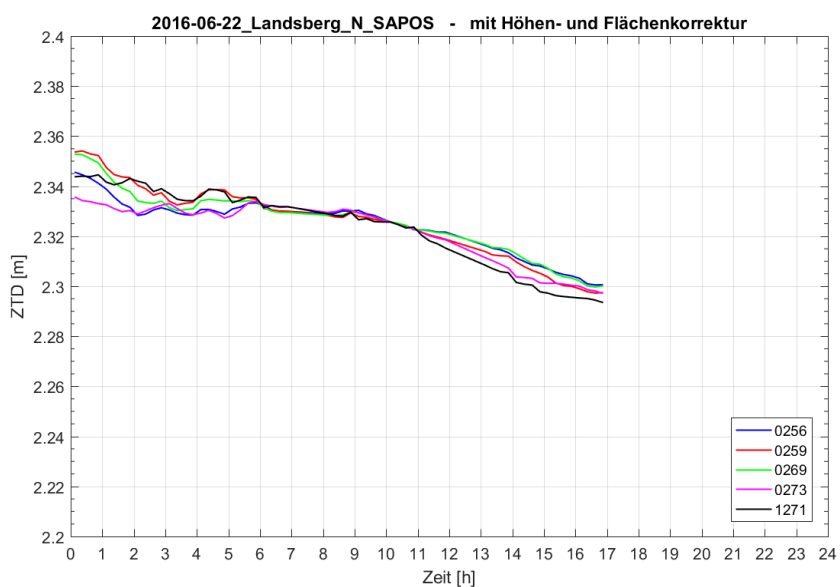
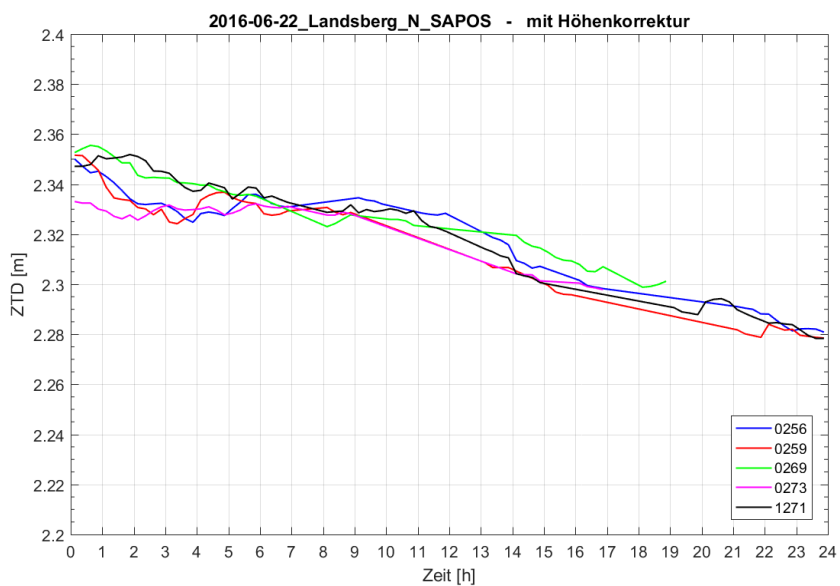




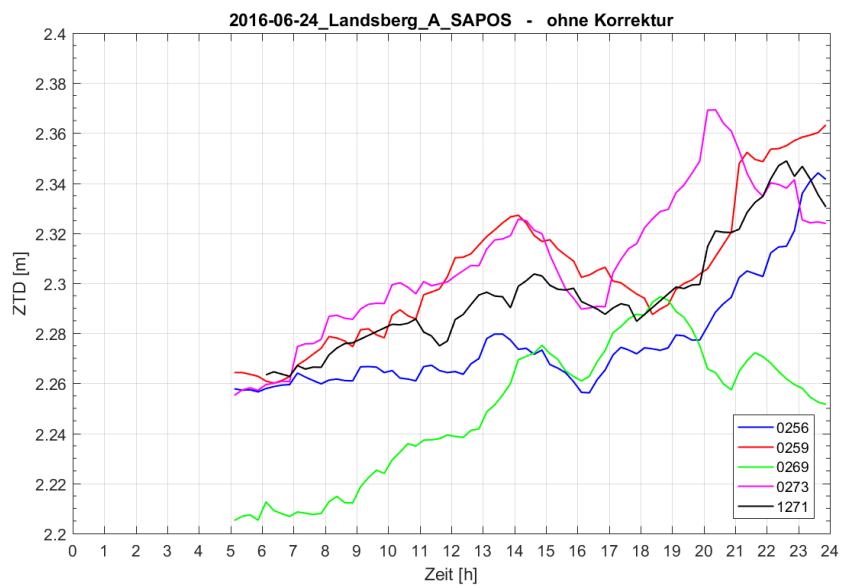
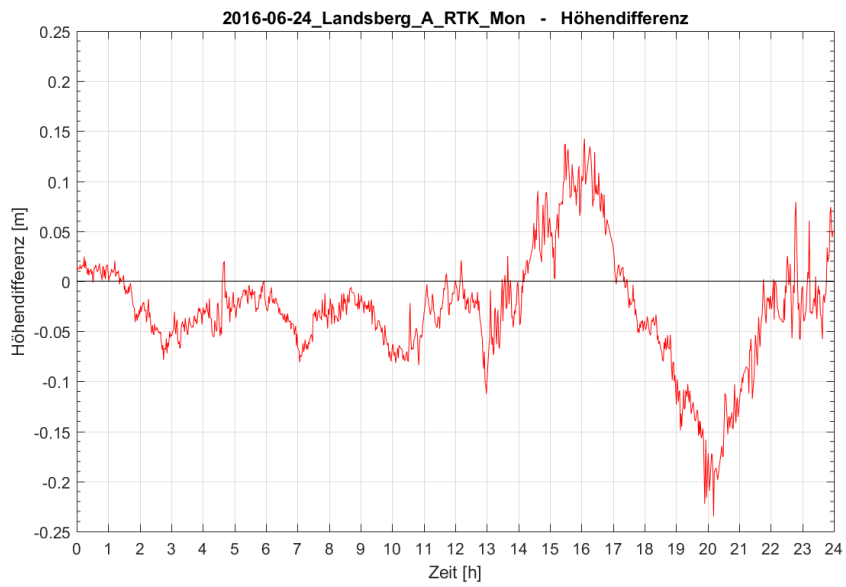
Bad Neustadt am 27.06.2016 im Normalzustand

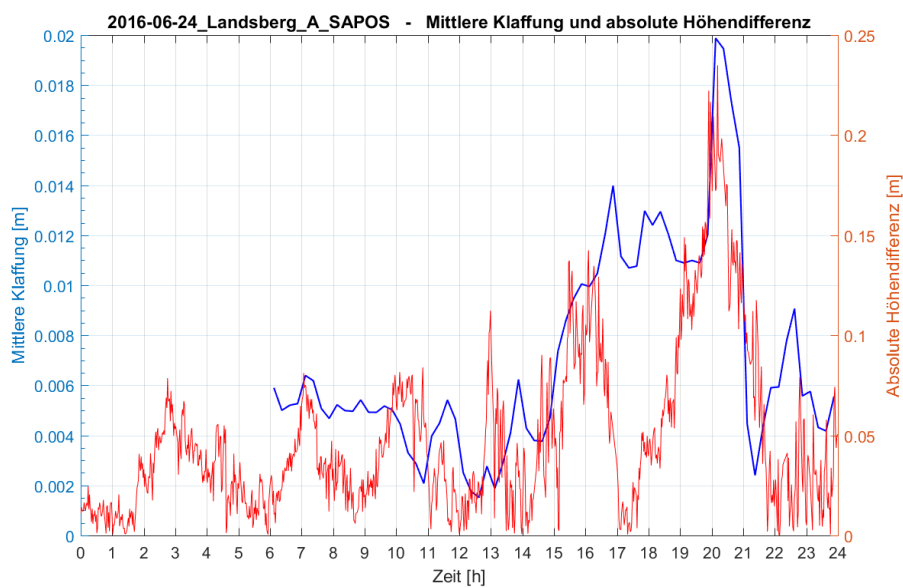
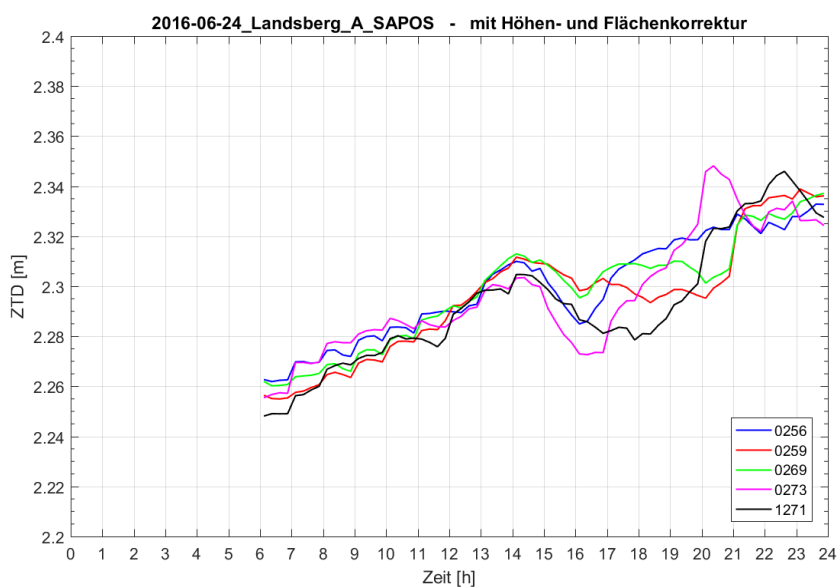
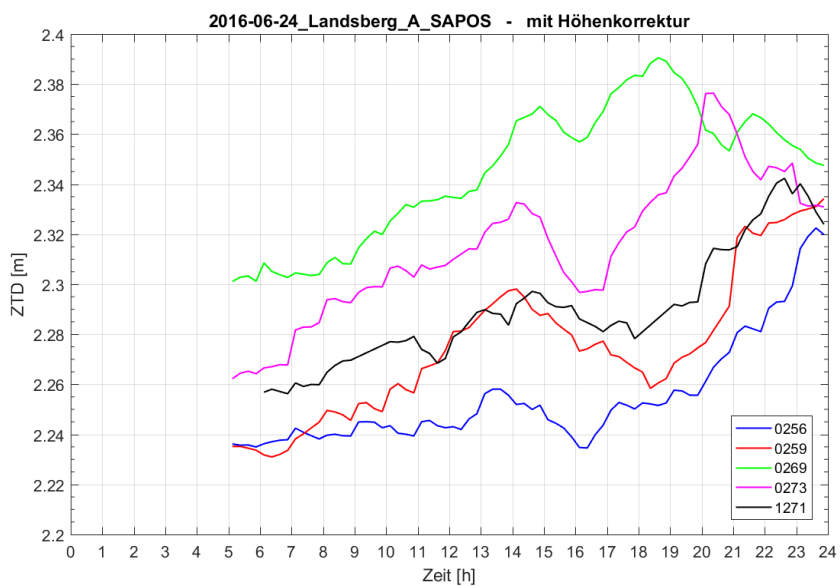


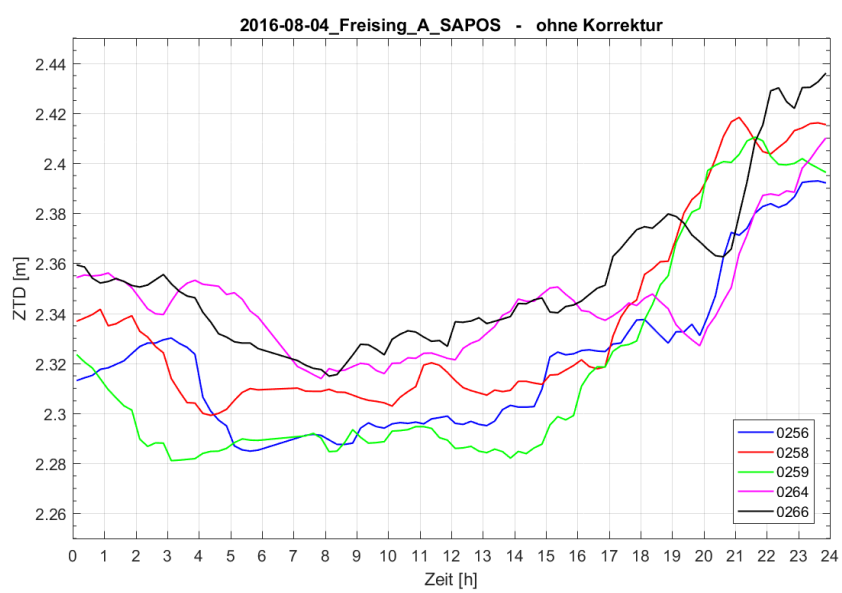
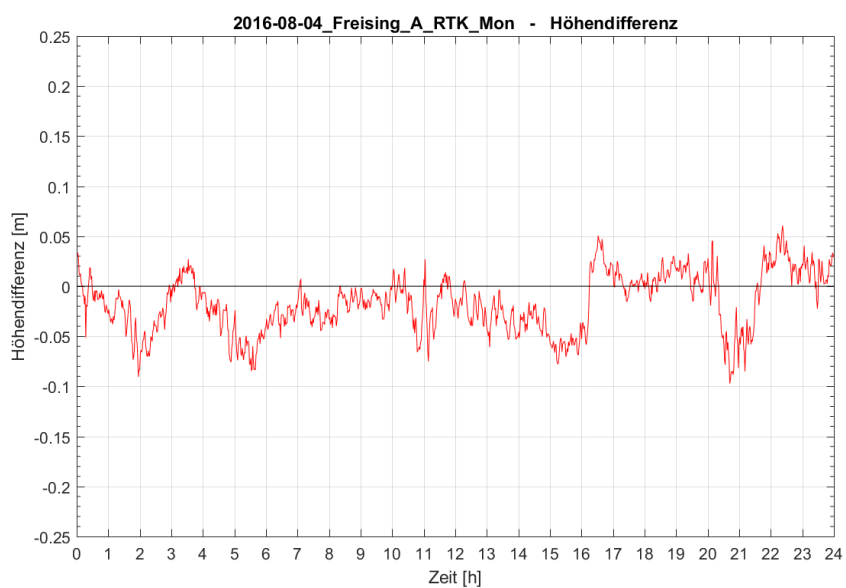
Landsberg am 22.06.2016 im Normalzustand

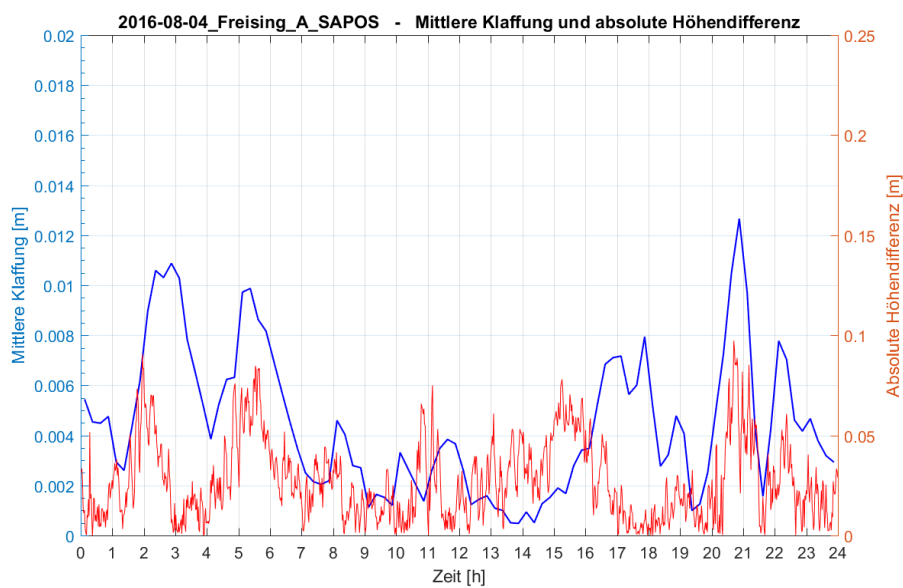
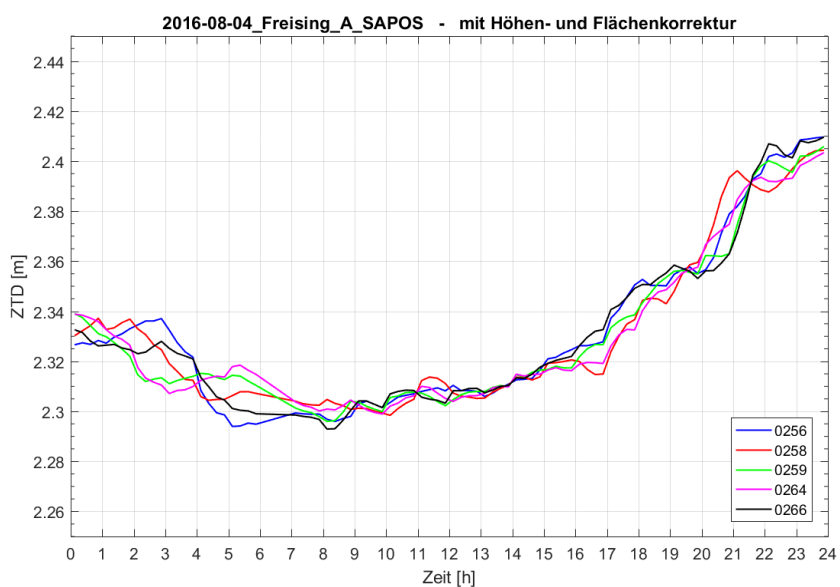
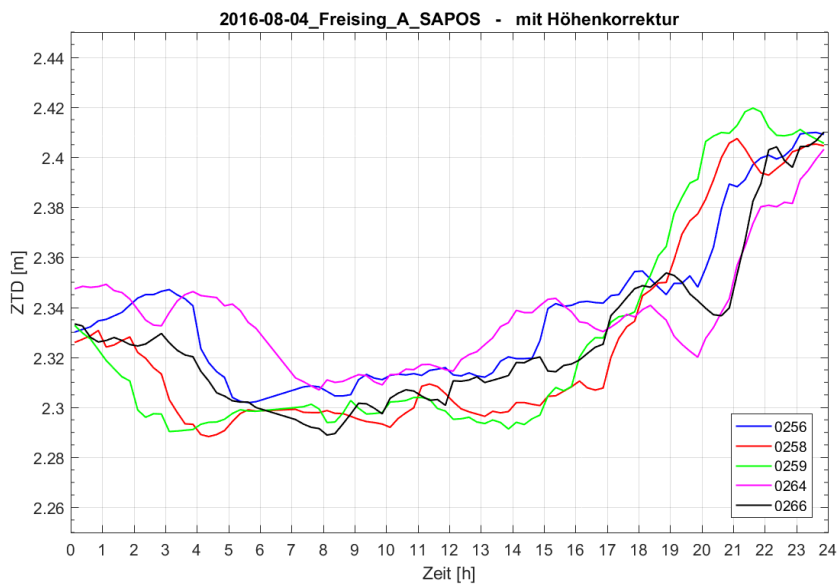


Landsberg am 24.06.2016 mit Höhenanomalie





Freising am 04.08.2016 mit Höhenanomalie



Freising am 05.08.2016 im Normalzustand