

MASTER THESIS

ZENTRUM FÜR GEOINFORMATIK – PARIS LODRON-UNIVERSITÄT SALZBURG

UWE FELDMANN-WESTENDORFF

Divergenz globaler und kontinentaler
Bezugssysteme –
Auswirkungen auf die hochgenaue
GNSS-Positionsbestimmung im ETRS89

HANNOVER 2012

Master Thesis

im Rahmen des Universitätslehrganges
«Geographical Information Science & Systems» (UNIGIS MSc)
am Zentrum für Geoinformatik (Z_GIS) der
Paris Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Divergenz globaler und kontinentaler Bezugssysteme – Auswirkungen auf die hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung im ETRS89

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Uwe Feldmann-Westendorff
U1269, UNIGIS MSc Jahrgang 2006

zur Erlangung des Grades

«Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc (GIS)»

Gutachter

Ao. Univ.-Prof. Dr. Josef Strobl

Hannover, 30.06.2012

Dank

Diese Arbeit bildet den Abschluss des Masterstudiums *Geographical Information Science and Systems* an der Paris Lodron-Universität in Salzburg. Aus diesem Grund möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Personen bedanken, die mich unterstützt haben, dieses Ziel zu erreichen.

Ein besonderer Dank geht an Dr.-Ing. Cord-Hinrich Jahn, der nicht nur diese Arbeit betreut hat, sondern mich während der vergangenen Jahre auch immer wieder ermunterte, das einmal aufgenommene Masterstudium abzuschließen.

Herrn Professor Dr. Strobl danke ich für die Zustimmung zu einer Masterarbeit in einem sehr speziellen Themengebiet.

Ebenfalls möchte ich mich bei Dr.-Ing. Martin Schmitz und Dr.-Ing. Gerhard Wübbena bedanken, die mich bei der Ideenfindung, Konzeption und Umsetzung intensiv und jederzeit unterstützt haben. Ein großer Dank gebührt Dr.-Ing. Hans-Jürgen Goldan als besonders kritischen und stets konstruktiven Begleiter meiner Arbeit.

Schließlich danke ich meiner Frau Jana und meinen Kindern Céline und Leander für die Geduld und das Verständnis, dass sie mir in dieser Zeit entgegengebracht haben.

Für die großzügige Unterstützung des Masterstudiums bedanke ich mich bei meinem Arbeitgeber, dem Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Niedersachsen in Hannover.

Die für die Untersuchungen in dieser Arbeit genutzten GNSS-Beobachtungsdaten stellten die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Hamburg, Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein sowie das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie freundlicherweise zur Verfügung.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat. Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind als solche entsprechend gekennzeichnet.

Hannover, 30. Juni 2012



Uwe Feldmann-Westendorff

Zusammenfassung

Im Rahmen der INSPIRE-Initiative der EU erfolgt die Einführung des ETRS89 in einer zunehmenden Zahl europäischer Länder. Ziel ist es, alle raumbezogenen Daten in Europa einheitlich in einem Bezugssystem zu referenzieren. Punktorte in einem globalen Referenzrahmen wie dem ITRF unterliegen der Plattentektonik und sind entgegen der gewohnten Sichtweise der Anwender zeitvariant. Aus diesem Grund entschied sich EUREF in seiner Beschlussfassung zum ETRS89 von 1990 dazu, das Bezugssystem zur Epoche 1989.0 in Koinzidenz mit dem ITRS auf den stabilen Teil der Eurasischen Kontinentalplatte zu fixieren.

Für die satellitengestützte Positionierung und Navigation mit GNSS ist die Nutzung globaler Referenzrahmen grundlegend. Ergebnisse sowohl der absoluten als auch der relativen Positionsbestimmung aller Genauigkeiten liegen originär im Bezugssystem der Satelliten vor. Fortschritte in der Messtechnik und den Auswertemodellen sowie die Modernisierung und Errichtung von GNSS führen heute zu signifikant gesteigerten Genauigkeiten in der Realisierung der Bezugssysteme. Damit offenbaren sich in der Bereitstellung durch den IERS, ebenso wie in den Positionierungsdiensten, immer deutlicher Schwächen in der Definition des ETRS89. Eine Ursache hierfür ist die zunehmende Divergenz zwischen dem ETRS89 und den Referenzrahmen des ITRS aufgrund der Drift der Eurasischen Platte von rund 25 mm/a in Mitteleuropa. Erschwerend kommen großräumige Intraplattendeformationen in Skandinavien und im Mittelmeerraum hinzu.

RTK-Positionierungsdienste beziehen sich mit ihren GNSS-Referenzstationen in der Regel auf Koordinaten im ETRS89, die zur Beseitigung der Widersprüche zum Bezugssystem der Satelliten a priori in den aktuellen ITRF transformiert werden. Die im Vernetzungsprozess in Echtzeit berechneten und im Beobachtungsraum zurück transformierten Korrekturdatenmodelle ermöglichen dem Nutzer eine direkte Positionierung im ETRS89.

In der vorliegenden Masterarbeit wird die Position vertreten, dass dieser *workaround* zu einem schleichend wachsenden Einfluss auf die RTK-Positionsbestimmung führt. Zur Überprüfung wird ein Simulationsmodell entwickelt, das zeit- und raumabhängige Analysen auf Basis eines realen Testdatensatzes ermöglicht. Die Ergebnisse werden empirisch in Näherungsformeln gefasst. Ein Ansatz zur Lösung des Problems stellt der Vorschlag zu einer möglichen Erweiterung des offenen Standards RTCM 3.1 dar. Seine Umsetzung setzt voraus, dass Positionierungsdienste zukünftig auf Referenzstationskoordinaten im ITRF aufsetzen und das ETRS89 über Transformationsparameter bereitstellen.

Schlüsselworte: GNSS, Bezugssystem, ETRS89, Plattentektonik, Positionierungsdienst, Network RTK, Precise Point Positioning, PPP, Beobachtungsraum, Zustandsraum, RTCM

Abstract

The introduction of the ETRS89 occurs in an increasing number of European countries within the context of the INSPIRE-Initiative. The goal is that all spatial related data in Europe is referenced to a unique reference system. Point locations in a global reference frame are subject of plate tectonic and are contrary to the familiar view of users time variant. For that reason, EUREF decided in a resolution on ETRS89 in 1990, that the reference system coincides with ITRS of epoch 1989.0 and to fix it to the stable part of the Eurasian continental plate.

The use of global reference frames is essential for satellite-based positioning and navigation with GNSS. Results of both absolute and relative position determination of all kind of accuracies refer originally to the satellite's reference system. Progress in measurement techniques and processing models as well as the modernization and establishing of GNSS lead today to significant increase of accuracy in the realization of reference systems. Therefore, deficiencies of the ETRS89 definition become more obvious through availability of IERS and also through positioning services. One reason for this is the increasing divergence between ETRS89 and the reference frames of the ITRS due to the drift of the Eurasian plate of about 25 mm/year in Central Europe. This is complicated further by large scale intraplate deformations in Scandinavia and in the Mediterranean area.

RTK positioning services generally refer their GNSS reference station coordinates to the ETRS89, which are transferred a priori to the satellite's reference system to remove inconsistencies with the actual ITRF. The real-time networking processing transforms the correction data models into observation space in that way, that the user can directly perform positioning in ETRS89.

The present Master Thesis supports the position that this workaround will led to a steady and growing impact on RTK positioning. A simulation model has been developed for verification, which allows time and space dependent analysis based on field test data sets. The results are summarized empirically with approximate formulas. The extension of the open Standard RTCM 3.1 is one possible approach for a solution. Its realization requires that positioning services and future reference coordinates are based on ITRF and that ETRS89 is obtained by transformation parameters.

Keywords: GNSS, Reference System, ETRS89, Plate Tectonics, Positioning Services, Network RTK, Precise Point Positioning, PPP, Observation Space, State Space, RTCM

«The more „absolute“ the positions become and the more accurate, the more the temporal variations caused by the body tide, tidal loading, ground subsidence, crustal rebound, tectonic movements, etc., will be in evidence.»

PETR VANÍČEK ET AL.

(1983, p. 377)

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-------------|
| Abbildungsverzeichnis | XV |
| Tabellenverzeichnis | XVII |
| Abkürzungsverzeichnis | XIX |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Globale Bezugssysteme im Kontext satellitengestützter Positionsbestimmung | 1 |
| 1.2 Problemstellung | 2 |
| 1.3 Forschungsfrage und Hypothese | 3 |
| 1.4 Vorgehen und Abgrenzung | 3 |
| 1.5 Struktur der Arbeit | 4 |
| 2 GNSS-Positionsbestimmung | 7 |
| 2.1 Modernisierung und Errichtung von GNSS | 7 |
| 2.1.1 GPS (Vereinigte Staaten von Amerika) | 7 |
| 2.1.2 GLONASS (Russische Föderation). | 9 |
| 2.1.3 Galileo (Europäische Union). | 10 |
| 2.2 Nutzeranforderungen im Vermessungs- und Geoinformationswesen | 12 |
| 2.3 Hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung | 13 |
| 2.3.1 Relative Positionierung | 13 |
| 2.3.2 Absolute Positionierung | 15 |
| 2.3.3 Beobachtungs- und Zustandsraum | 17 |
| 3 Bezugssysteme und ihre Realisierung | 19 |
| 3.1 Begriffserklärung | 19 |
| 3.2 Realisierung und Bereitstellung | 21 |
| 3.2.1 Raumfestes ICRS und erdfestes ITRS | 21 |
| 3.2.2 Realisierung des ITRS durch den Referenzrahmen ITRF2005 | 21 |
| 3.2.3 Definition und Bereitstellung des ETRS89 | 23 |
| 3.3 Plattenbewegungsmodelle | 28 |
| 4 Simulation zur Divergenz der Bezugssysteme | 31 |
| 4.1 Datensatz und Software | 31 |
| 4.2 Simulationsmodell | 33 |
| 4.2.1 Ableitung eines GNSS-Zustandsraummodells | 33 |
| 4.2.2 Positionsbestimmungen in zeitlichen und räumlichen Variationen | 40 |

| | |
|--|-----------|
| 4.2.3 Überprüfung der Validität des Simulationsmodells | 44 |
| 4.3 Simulationsexperimente | 46 |
| 4.3.1 Untersuchungen an einzelnen Stationen | 46 |
| 4.3.2 Ausdehnung des Experiments in die Fläche | 58 |
| 4.3.3 Zwischenbewertung | 64 |
| 5 Lösungsansatz für Positionierungsdienste | 69 |
| 5.1 RTCM Standard 10403.1 | 69 |
| 5.2 Situation in ausgewählten Diensten | 71 |
| 5.3 Erweiterung des RTCM Standards | 72 |
| 6 Schlussfolgerung und Ausblick | 75 |
| 6.1 Schlussfolgerung. | 75 |
| 6.2 Ausblick | 76 |
| 7 Literaturverzeichnis | 77 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | GPS, GLONASS, Galileo-Abdeckung in Hannover (5° Elevation, DOY 160 2012) | 11 |
| 2.2 | Synthese von PPP und Network RTK | 16 |
| 3.1 | Bezugssystem interpretiert nach Drewes (2009a) und Koordinaten- referenzsystem nach GI-Norm ISO 19111 | 20 |
| 3.2 | Stationsgeschwindigkeiten im EPN relativ zur Eurasischen Kontinentalplatte (Lage) | 26 |
| 3.3 | Stationsgeschwindigkeiten im EPN relativ zur Eurasischen Kontinentalplatte (Höhe) | 27 |
| 3.4 | Ausgewählte Stationsgeschwindigkeiten berechnet aus APKIM2005 im Vergleich zum PB2002 | 29 |
| 4.1 | Referenzstationsnetz zur Bereitstellung von GNSS-Korrekturdaten | 32 |
| 4.2 | Zeitstrahl zum Zusammenhang zwischen Untersuchungs- und Beobachtungsepoche | 34 |
| 4.3 | Flussdiagramm zur Stufe 1 im Simulationsmodell | 37 |
| 4.4 | Individuelle Site Displacements 1980.000 relativ zur Epoche 2008.408 | 39 |
| 4.5 | Prinzip des Simulationsexperiments hinsichtlich räumlicher Variationen | 40 |
| 4.6 | Flussdiagramm zur Stufe 2 im Simulationsmodell | 41 |
| 4.7 | GNSS-Stationen als Rover-Positionen im Untersuchungsgebiet | 43 |
| 4.8 | Rover-Position 4200 (Epoche 2008.408) | 48 |
| 4.9 | Rover-Position 4200 (Epoche 1980.000) | 50 |
| 4.10 | Prinzip der Angabe der räumlichen Variation über einen Steigungswinkel | 52 |
| 4.11 | Rover-Position 0264 (Epoche 1980.000) | 54 |
| 4.12 | Ebene aus kombinierten Lage- und Höhenvektoren auf Rover-Position 0264 (Epoche 1980.000) | 55 |
| 4.13 | GPS-Satellitengeometrie auf Rover-Position 0836 und 0269 (5° Elevation, DOY 149/150 2008) | 58 |
| 4.14 | Übersicht über alle Rover-Positionen bis 100 km VRS-Distanz (Epoche 1980.000) | 60 |
| 4.15 | Rover-Positionen in unterschiedlichen VRS-Distanzen (Epoche 1980.000) | 62 |
| 4.16 | Näherungsweise berechnete Lageabweichung δ_L bis zum Jahr 2025 | 64 |
| 4.17 | Näherungsweise berechnete maximale Höhenabweichung $\delta_{h \max}$ bis zum Jahr 2025 | 65 |
| 5.1 | Koordinatentransformation in RTCM 3.1 | 70 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Konstellation modernisierter GPS-Satelliten (IIR-M und IIF) | 8 |
| 2.2 | Konstellation GLONASS-Satelliten 2. und 3. Generation (M und K) | 9 |
| 2.3 | Nutzerübersicht nach Genauigkeitsklassen | 12 |
| 3.1 | Lebenszeit nationaler ETRS89-Realisierungen ausgewählter Staaten (alle übrigen >2020) | 25 |
| 4.1 | Transformationsparameter von ETRS89/DREF91 (1989.0) nach ITRF2005 (yyyy) | 34 |
| 4.2 | Transformationsparameter von ITRF2005 (yyyy) nach ITRF2005 (2008.408) | 35 |
| 4.3 | Auswerteansatz und Parametrisierung im Referenzstationsnetz | 36 |
| 4.4 | Ausschnitt aus der SSR-Datei MTH9149p.ssr | 38 |
| 4.5 | Mittlere Site Displacements der 30 Referenzstationen relativ zur Epoche 2008.408 | 39 |
| 4.6 | Projektkoordinaten der GNSS-Stationen (Epoche 2008.408) | 43 |
| 4.7 | Auswerteansatz und Parametrisierung für Rover | 44 |
| 4.8 | Rover-Position 4200 aus lokaler VRS | 45 |
| 4.9 | Rover-Position 4200 aus räumlich variierter VRS (Epoche 2008.408) | 46 |
| 4.10 | Rover-Position 4200 aus räumlich variierter VRS (Epoche 1980.000) | 49 |
| 4.11 | Mittlerer Lageeinfluss auf Rover-Position 4200 aus räumlich variierter VRS mit vier Richtungen pro Position | 51 |
| 4.12 | Steigungswinkel α auf Rover-Position 4200 aus räumlich variierter VRS mit 20 gemittelten Positionen pro Epoche | 52 |
| 4.13 | Maximaler Höheneinfluss auf Rover-Position 4200 aus räumlich variierter VRS | 53 |
| 4.14 | Steigungswinkel β auf Rover-Position 4200 aus räumlich variierter VRS mit 20 gemittelten Positionen pro Epoche | 56 |
| 4.15 | Steigungswinkel α abgeleitet aus räumlich variierter VRS mit 20 Positionen pro Rover | 58 |
| 4.16 | Steigungswinkel α abgeleitet aus zentraler VRS mit einer Position pro Rover | 61 |
| 4.17 | Differenz zwischen gemessener und abgeschätzter Lageabweichung δ_L | 61 |
| 4.18 | Differenz zwischen gemessener und abgeschätzter maximaler Höhenabweichung $\delta_{h,max}$ | 63 |
| 5.1 | Vorschlag für einen Umsetzungsplan zur Erweiterung von RTCM 3.1 | 73 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| AdV | Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland |
| APKIM2005 | Actual Plate Kinematics Model 2005 |
| APOS | Austrian Positioning Service |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| bps | Bits per second |
| C/A | Coarse/Acquisition |
| CDMA | Code Division Multiple Access |
| CHTRS95 | Confederatio Helvetica Terrestrial Reference System 1995 |
| CRS | Coordinate Reference System |
| CS | Commercial Service |
| DGFI | Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut |
| DHDN | Deutsches Hauptdreiecksnetz |
| DORIS | Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite |
| DOY | Day of Year |
| DREF91 | Deutsches Referenznetz 1991 |
| EPN | EUREF Permanent Network |
| ESA | European Space Agency |
| ETRF2000 | European Terrestrial Reference Frame 2000 (resp. 89, yy) |
| ETRS89 | European Terrestrial Reference System 1989 |
| EU | Europäische Union |
| EUREF | Reference Frame Subcommittee for Europe |
| FDMA | Frequency Division Multiple Access |
| FKP | Flächenkorrekturparameter |
| FOC | Full Operational Capability |
| GIOVE | Galileo In-Orbit Validation Element |
| GIS | Geographisches Informationssystem |
| GLONASS | Global'naja Navigatsioannaja Sputnikovaya Sistema (GNSS) |
| GNSMART | GNSS State Monitoring and Representation Technique |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| GPS | Global Positioning System |
| GRAF | German Reference Network |
| GTRF | Galileo Terrestrial Reference Frame |
| HEPS | Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service |

| | |
|-----------------|---|
| IAG | International Association of Geodesy |
| IERS | International Earth Rotation and Reference Systems Service |
| IGS | International GNSS Service |
| INSPIRE | Infrastructure for Spatial Information in the European Community |
| IOC | Initial Operational Capability |
| IOV | In-Orbit Validation |
| ISO | International Organization for Standardization |
| ITRF2005 | International Terrestrial Reference Frame 2005 (resp. 89, 2000, 2008, yy) |
| ITRS | International Terrestrial Reference System |
| LLR | Laser Lunar Ranging |
| MAC | Master Auxiliary Concept |
| mas | Milliarcsecond |
| MGI | Militärgeographisches Institut |
| NNR | Not Net Rotation |
| NUVEL | Northwestern University Velocity Model |
| OS | Open Service |
| OSR | Observation Space Representation |
| PB2002 | Plate Boundary 2002 |
| PCV | Phase Center Variations |
| PPP | Precise Point Positioning |
| PRS | Public Regulated Service |
| PZ-90.02 | Parametri Zemli (Erdparameter 1990 Version 02) |
| RMS | Root Mean Square |
| RTCM | Radio Technical Commission for Maritime Services |
| RTK | Real-Time Kinematic |
| SA | Selective Availability |
| SAPOS | Satelliten-Positionierungsdienst der deutschen Landesvermessung |
| SC-104 | Special Committee 104 |
| SLR | Satellite Laser Ranging |
| SPS | Standard Positioning Service |
| SSR | State Space Representation |
| SWIPOS | Swiss Positioning Service |
| UML | Unified Modeling Language |
| UNAVCO | University Navstar Consortium |
| UTM | Universal Transverse Mercator |
| VLBI | Very Long Baseline Interferometry |
| VRS | Virtual Reference Station |
| WG | Working Group |
| WGS84 | World Geodetic System 1984 |

1 Einleitung

Die Einleitung gibt eine Übersicht über den Inhalt der Masterarbeit. Zu Beginn wird in die Zusammenhänge zwischen den globalen Bezugssystemen, der satellitengestützten Positionsbestimmung und den Einflüssen der Plattentektonik eingeführt. Die daraus resultierende Problemstellung mündet in einer zentralen Forschungsfrage und der Aufstellung einer Hypothese. Das allgemeine Vorgehen sowie Abgrenzungen und Struktur der Arbeit bilden den Übergang in den Hauptteil.

1.1 Globale Bezugssysteme im Kontext satellitengestützter Positionsbestimmung

Die Nutzung globaler Bezugssysteme in der satellitengestützten Positionierung und Navigation ist fundamental. Koordinatenergebnisse aller Genauigkeitsklassen, von der autonomen Positionsbestimmung im Meterbereich bis hin zu wenigen Millimetern Auflösung über hunderte Kilometer in relativen Verfahren, liegen zunächst im Referenzsystem der Satelliten vor. Nachdem man anfänglich bemüht war, diese Ergebnisse nutzbringend in die klassischen Bezugssysteme der Landesvermessung zu transformieren, kam mit dem Aufbau nationaler und multinationaler Geodateninfrastrukturen im letzten Jahrzehnt der Wunsch auf, alle raumbezogenen Daten in Europa in einem einheitlichen Referenzsystem vorzuhalten und zu verarbeiten – wofür sich die globalen Bezugssysteme selbstverständlich anbieten.

Aus wissenschaftlicher Sicht ist es notwendig, exakte Definitionen zur Abbildung der Wirklichkeit zu formulieren. Dies beinhaltet in den Geowissenschaften naturgemäß die Annahme der physikalischen Eigenschaften der Erde. Ein erst seit wenigen Jahrzehnten nachgewiesenes Phänomen ist die Plattentektonik als Theorie großräumiger Veränderungen der Erdkruste. Sie nimmt Einfluss auf die Realisierung der theoretischen Konzepte eines Bezugssystems in einem praxisorientierten Referenzrahmen. Aufgrund der gering erscheinenden linearen Bewegungsraten tektonischer Kontinentalplatten von wenigen Zentimetern pro Jahr beschloss man Anfang der 1990er Jahre, auch im Zuge der Europäischen Integration, ein fest mit der Eurasischen Platte verbundenes Bezugssystem einzurichten. Dies sollte nicht zuletzt der gewohnten Sichtweise der Nutzer von unveränderlichen Koordinaten gerecht werden.

Durch die kontinuierlich zunehmende Divergenz globaler und kontinentaler Bezugssysteme, verbunden mit der fortschreitenden Entwicklung der Mess- und Auswerteverfahren sowie der Modernisierung und dem Aufbau von globalen Navigationssatellitensystemen, sind zukünftig Probleme in den etablierten regionalen und lokalen Positionierungsdiensten zu erwarten. Welche Nutzergruppen sie in welcher Größenordnung betreffen und welche konzeptionellen Maßnahmen auf Grundlage offener Standards ergriffen werden können, untersucht diese Masterarbeit.

1.2 Problemstellung

Das europäische Bezugssystem ETRS89 (*European Terrestrial Reference System*) hat sich 2012 in Mitteleuropa aufgrund der Bewegung der Eurasischen Kontinentalplatte von seiner ursprünglichen Lage um nahezu 60 Zentimeter entfernt. Dies kann direkt proportional als Fehler in die Satellitenbahnen übertragen werden, die in allen Anwendungsbereichen entscheidend für die Positionsgenauigkeit des Nutzers sind.

Positionierungsdienste stellen Korrekturdatenmodelle für die entfernungsabhängigen Anteile des GNSS-Fehlerhaushaltes zur Verfügung. Damit sind regionale Nutzer aus dem Vermessungs- und Geoinformationswesen in der Lage, in Referenzstationsnetzen über mittlere Entfernungen Positionen in Zentimetergenauigkeit in Echtzeit im ETRS89 zu bestimmen. Da die Positionierungsdienste in der Regel auf Referenzstationskoordinaten im ETRS89 aufsetzen, pflanzt sich der Fehleranteil der Bezugssystemdivergenz in Abhängigkeit von der Korrekturdatenaufbereitung des Dienstes systematisch in die Position des Nutzers fort. Die üblicherweise im Beobachtungsraum behandelten Korrekturen werden vom Bezugssystem der Satelliten im aktuellen ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) in das Bezugssystem ETRS89 transformiert.

Zur Drift der Kontinentalplatte und den daraus entstehenden Problemen kommen Deformationszonen innerhalb der Platte hinzu. Sie widersprechen der Definition einer starren Eurasischen Platte, wie sie dem ETRS89 zugrunde liegt. Dies hat zur Folge, dass im Genauigkeitsbereich Zentimeter mit den bisherigen Konzepten keine langfristig konsistenten nationalen Realisierungen des ETRS89 auf dem Kontinent möglich sind.

Die beschriebene Problemstellung betrifft heute nur einen kleinen Teil der Nutzer aus dem Vermessungs- und Geoinformationswesen. In Anbetracht steigender Genauigkeitsansprüche einerseits und der sich kontinuierlich fortbewegenden, regional deformierenden Kontinentalplatte andererseits, wird sie jedoch zunehmend relevant.

1.3 Forschungsfrage und Hypothese

Die ungestörte Simulation der Auswirkungen der Plattentektonik auf die Positionsbestimmung mit GNSS in räumlichen und zeitlichen Variationen ist der Kern dieser Masterarbeit. Gelingt dieser Ansatz, so unterstützen die Ergebnisse die Beantwortung der folgenden Forschungsfrage:

Wie wirken sich globale Lageänderungen und Intraplattendeformationen der Eurasischen Kontinentalplatte auf ein statisch definiertes europäisches Bezugssystem ETRS89 bei der Nutzung GNSS-basierter Referenzierung von Geodaten aus, und sind die gegenwärtig eingesetzten Bereitstellungsverfahren unter diesen Gesichtspunkten noch zeitgemäß?

Die Fragestellung wird um folgende Existenzhypothese ergänzt:

Drift und Deformation der Eurasischen Kontinentalplatte führen bei der hochgenauen GNSS-Positionsbestimmung zu zeitvarianten Realisierungen des statisch definierten ETRS89 (inkonsistenter Systemzustand) und damit zu Qualitätseinbußen beim Nutzer.

Ziel der Masterarbeit im wissenschaftstheoretischen Sinne ist es, diese Hypothese experimentell zu verifizieren. Dabei ist die gewählte Versuchsanordnung, also die Simulation, hinsichtlich ihrer Validität zu überprüfen.

1.4 Vorgehen und Abgrenzung

Eine wesentliche Herausforderung liegt in der Entwicklung eines belastbaren Simulationsmodells und der Ableitung entsprechender Fehlergrößen. Sind sie signifikant vorhanden, und bleibt die gestellte Hypothese damit unwiderlegt, sollen empirische Formeln für die näherungsweise Berechnung der zu erwartenden Abweichungen bestimmt werden. Die Funktionalität der Formeln wäre unabhängig zu überprüfen und ein standardbasierter Lösungsansatz für Positionierungsdienste vorzuschlagen.

Für die Problemstellung der Intraplattendeformationen werden die Konzepte zur Realisierung und Bereitstellung der Bezugssysteme aus der Literatur heraus zitiert, erläutert und diskutiert. Eigene empirische Untersuchungen hierzu werden nicht vorgenommen.

Im Rahmen der Masterarbeit gelten folgende Abgrenzungen:

- Die Betrachtungen zur Realisierung und Bereitstellung kontinentaler Bezugssysteme beschränken sich auf Europa und damit auf das ETRS89.
- Als Verfahren zur hochgenauen GNSS-Positionsbestimmung werden ausschließlich Echtzeit-Ansätze in regionalen Positionierungsdiensten behandelt.
- Der Untersuchungsraum für das Simulationsmodell wird auf die Bundesrepublik Deutschland eingegrenzt.
- Der Untersuchungszeitraum zur Verschiebung der Kontinentalplatte wird auf sieben Jahrzehnte um die Beobachtungsepoche herum beschränkt.
- Aufgrund der Testdaten werden nur GPS-Beobachtungen ausgewertet.
- Lokale Deformationen, wie Salzstockeinbrüche oder Kavernen, werden nicht betrachtet.

1.5 Struktur der Arbeit

Im Anschluss an die Einleitung gibt Kapitel 2 einen Überblick über relevante Aspekte der GNSS-Positionsbestimmung. Neben der Modernisierung von GPS und GLONASS sowie der Errichtung von Galileo sind dies die Nutzeranforderungen aus dem Vermessungs- und Geoinformationswesen an Positionierungsdienste. Einen wichtigen Abschnitt für das Verständnis der später folgenden Simulationsexperimente stellt die hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung im letzten Teil des zweiten Kapitels dar. Es werden die Konzepte zur relativen und absoluten Positionierung und zur Modellierung im Beobachtungs- und Zustandsraum vermittelt.

Kapitel 3 behandelt die Definition, Realisierung und Bereitstellung globaler Bezugssysteme. Dabei werden kontroverse Auffassungen zur Festlegung und Realisierung des ETRS89 dargelegt. Den Abschluss des Kapitels bilden eine Einführung in die Plattentektonik sowie ein Vergleich geophysikalischer und geodätischer Plattenbewegungsmodelle.

Die Untersuchungen in Kapitel 4 stellen den Kern der Arbeit dar. Nach einer Übersicht über den Testdatensatz und die eingesetzte Software folgt die Entwicklung des Simulationsmodells zur Abschätzung der Auswirkungen der Plattentektonik auf die Positionsbestimmung mit GNSS. Die darauf basierenden Experimente in räumlichen und zeitlichen Variationen führen zur Ableitung konkreter empirische Näherungsformeln. Eine

Zwischenbewertung schließt das Kapitel mit einer zusammenfassenden Darstellung der Ergebnisse in Diagrammform und einem Vergleich mit unabhängigen Abschätzungen ab.

In Kapitel 5 werden Lösungsvorschläge zur Einführung globaler Koordinaten und Geschwindigkeiten auf Grundlage des offenen Standards RTCM 3.1 aufgezeigt und in einen konkreten Umsetzungsplan überführt.

Abgeschlossen wird die Masterarbeit in Kapitel 6 mit der Beantwortung der vorstehenden Forschungsfrage und der Überprüfung der gestellten Hypothese sowie einem Ausblick.

2 GNSS-Positionsbestimmung

Wichtiger Ausgangspunkt für die in dieser Arbeit untersuchten Effekte sind die zukünftig zu erwartenden Qualitätssteigerungen in der hochgenauen GNSS-Positionierung. Einflüsse, die in der Vergangenheit vernachlässigt werden konnten, gewinnen damit zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig zeichnet sich ein Wandel in den Auswertekonzepten ab, dessen Ursachen ebenfalls mit dem Fortschritt von GNSS verbunden sind.

Kapitel 2.1 gibt eine Kurzübersicht über den aktuellen Stand der Modernisierung von GPS und GLONASS sowie der Errichtung von Galileo. Welche Nutzeranforderungen im Vermessungs- und Geoinformationswesen bestehen, hinterfragt Kapitel 2.2. Im letzten Abschnitt stehen die konventionelle relative Positionierung und ihre konzeptionelle Ergänzung, das Precise Point Positioning, im Vordergrund (Kapitel 2.3).

2.1 Modernisierung und Errichtung von GNSS

Während GPS und GLONASS bereits erste Modernisierungsprogramme durchlaufen, befindet sich das europäische Galileo erst am Anfang seiner Errichtungsphase¹. Aus Sicht der hochgenauen Positionierung ist Interoperabilität zwischen den genannten Systemen besonders wichtig, um sie auf Basis offener Standards gemeinsam nutzen zu können.

2.1.1 GPS (Vereinigte Staaten von Amerika)

Mitte 1995 erreichte das US-amerikanische GPS nach 22 Jahren Entwicklungs- und Ausbaizeit *Full Operational Capability* und nahm seinen Regelbetrieb auf. Eine hohe Akzeptanz im zivilen Sektor und damit verbundene ökonomische Entwicklungsmöglichkeiten führten im Jahr 2000 in den USA zu der politischen Entscheidung, die Sicherheitskomponente *Selective Availability* bis auf Weiteres abzuschalten. Somit steht zivilen Nutzern heute im *Standard Positioning Service* eine Genauigkeit (3D) von rund 15 m in der autonomen Positionierung kostenfrei zur Verfügung. Mit der bereits 1998 vom Weißen Haus angekündigten Modernisierung des GPS war unter anderem beabsichtigt, zivilen Anwendern ein zweites Signal zur Verfügung zu stellen (L2C) und die Nutzung vom militärischen Sektor unabhängig zu machen.

¹ Das chinesische COMPASS wird nicht betrachtet, da eine globale Abdeckung hierfür erst für 2020 geplant ist.

In einem Übersichtsbeitrag stellt GNSSInside (2012) den Stand der als GPS III bezeichneten Modernisierung dar. Nach Abschluss der ersten Phase liefern acht Block IIR-M Satelliten das Signal L2C und den der militärischen Nutzung vorbehaltenen neuen M-Code. Aktuell befinden sich in der zweiten, bis 2018 geplanten Phase zwei der 24 vorgesehenen Satelliten der Generation IIF im Orbit, welche zusätzlich das für die hochgenaue relative und absolute Positionierung bedeutsame dritte Signal auf der L5-Frequenz aussenden (Tabelle 2.1). Damit werden durch Kombination von bis zu drei Trägerphasensignalen neue Linearkombinationen ermöglicht, die schnellere Mehrdeutigkeitslösungen sowie Zuverlässigkeits- und Genauigkeitssteigerungen erwarten lassen. In der letzten Phase bis 2021 sollen 24 Block III Satelliten folgen, die ein als L1C bezeichnetes ziviles Codesignal im Bereich der L1-Frequenz hinzufügen, das den technisch veralteten C/A-Code ablösen soll.

Tabelle 2.1:
Konstellation modernisierter GPS-Satelliten (IIR-M und IIF)

| Navstar GPS Constellation Status (11-11-17) | | | | | | | | | |
|--|------------|----------------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|----------|--------------------------|----------|----------|
| Blk II Seq | PRN SVN | Internat. Code ID | NORAD Catalog Number | Orbit Plane Pos'n | Launch Date (UT) | Clock | Available/Decommissioned | | |
| [...] | | | | | | | | | |
| Block IIR-M | | | | | | | | | |
| IIR-M-1 | 53 | 17 | 2005-038A | 28874 | C4 | 05-09-26 | Rb3 | 05-12-16 | 23:30 UT |
| IIR-M-2 | 52 | 31 | 2006-042A | 29486 | A2 | 06-09-25 | Rb3 | 06-10-12 | 22:53 UT |
| IIR-M-3 | 58 | 12 | 2006-052A | 29601 | B4 | 06-11-17 | Rb3 | 06-12-13 | 03:07 UT |
| IIR-M-4 | 55 | 15 | 2007-047A | 32260 | F2-A | 07-10-17 | Rb3 | 07-10-31 | 22:46 UT |
| IIR-M-5 | 57 | 29 | 2007-062A | 32384 | C1 | 07-12-20 | Rb3 | 08-01-02 | 20:41 UT |
| IIR-M-6 | 48 | 07 | 2008-012A | 32711 | A4 | 08-03-15 | Rb3 | 08-03-24 | 20:08 UT |
| IIR-M-7 | 49 | 01 | 2009-014A | 34661 | | 09-03-24 | | | 11-05-06 |
| IIR-M-8 | 50 | 05 | 2009-043A | 35752 | E3 | 09-08-17 | Rb1 | 09-08-27 | 14:40 UT |
| Block IIF | | | | | | | | | |
| IIF-1 | 62 | 25 | 2010-022A | 36585 | B2 | 10-05-28 | Rb1 | 10-08-27 | 04:10 UT |
| IIF-2 | 63 | 01 | 2011-036A | 37753 | D2-A | 11-07-16 | Rb1 | 11-10-14 | 19:53 UT |

Quelle: UNB (2011)

Neben dem Weltraumsegment betreffen weitere Maßnahmen der GPS-Modernisierung den Ausbau des globalen Bodensegments und eine Verbesserung der Navigationsnachten.

2.1.2 GLONASS (Russische Föderation)

In der Sowjetunion in den 1970er Jahren ebenfalls militärisch begründet, war das System 1996 zum ersten Mal vollständig verfügbar (FOC). Aufgrund wirtschaftlicher und technischer Probleme konnte dieser Zustand in den Folgejahren jedoch nicht aufrechterhalten werden. Erst nach einem fünfjährigen Wiederaufbau wurde 2011 mit 23 aktiven Satelliten die operationelle Funktionalität wieder nahezu vollständig erlangt (GNSSInside 2012). Für die zivile Nutzung bietet auch GLONASS einen kostenfreien offenen Dienst, vergleichbar mit dem SPS von GPS, an. Die laufende Erneuerung von GLONASS besteht aus den Satelliten der dritten Generation (K), die ähnlich wie GPS IIF ein drittes, zivil nutzbares Signal auf der G5-Frequenz abstrahlen (Tabelle 2.2). Zudem soll von den bisher satellitenindividuellen Frequenzen (FDMA) auf das Codemultiplexverfahren (CDMA) umgeschwenkt werden, das einheitliche Signalfrequenzen für alle Satelliten und eine verbesserte Interoperabilität zu anderen GNSS ermöglicht. In ihm wird allgemein ein wichtiger Schlüssel zur Beteiligung von GLONASS am Massenmarkt der Navigationsanwendungen gesehen.

Tabelle 2.2:

Konstellation GLONASS-Satelliten 2. und 3. Generation (M und K)

| GLONASS Constellation Status (11-11-19) | | | | | | | | | | |
|--|------|------------------|-----------------|----------------------------|-------|---------|-----------------------------|-------------------------|-------------------------------|-----------|
| GLONASS Numbers | M? | Kosmos Number | Internat. ID | NORAD Catalog Number | Plane | Channel | Almanac Number (Slot) | Launch Date (UTC) | Status (Date withdrawn) | |
| [...] | | | | | | | | | | |
| 95 | 712 | M | 2413 | 2004-053B | 28509 | 1 | 5 | 7 | 26-Dec-04 | OK |
| [...] | | | | | | | | | | |
| 100 | 714 | M | 2419 | 2005-050A | 28915 | 3 | 4 | 17 | 25-Dec-05 | OK |
| 101 | 715 | M | 2424 | 2006-062C | 29672 | 2 | -7 | 14 | 25-Dec-06 | OK |
| 102 | 716 | M | 2425 | 2006-062A | 29670 | 2 | 0 | 15 | 25-Dec-06 | OK |
| 103 | 717 | M | 2426 | 2006-062B | 29671 | 2 | -7 | 10 | 25-Dec-06 | OK |
| 104 | 718 | M | 2431 | 2007-052C | 32277 | | | | 26-Oct-07 | 20-Oct-11 |
| 105 | 719 | M | 2432 | 2007-052B | 32276 | 3 | 2 | 20 | 26-Oct-07 | OK |
| 106 | 720 | M | 2433 | 2007-052A | 32275 | 3 | 3 | 19 | 26-Oct-07 | OK |
| [...] | | | | | | | | | | |
| 119 | 731 | M | 2459 | 2010-007A | 36400 | 3 | -3 | 22 | 1-Mar-10 | OK |
| 120 | 732 | M | 2460 | 2010-007C | 36402 | 3 | 3 | 23 | 1-Mar-10 | OK |
| 121 | 735 | M | 2461 | 2010-007B | 36401 | 3 | 2 | 24 | 1-Mar-10 | OK |
| 122 | 736 | M | 2464 | 2010-041C | 37139 | 2 | -2 | 9 | 2-Sep-10 | OK |
| 123 | 737 | M | 2465 | 2010-041B | 37138 | 2 | -1 | 12 | 2-Sep-10 | OK |
| 124 | 738 | M | 2466 | 2010-041A | 37137 | 2 | -1 | 16 | 2-Sep-10 | OK |
| 125 | 701K | K1 | 2471 | 2011-009A | 37372 | 3 | -5 | 3 | 26-Feb-11 | CHK |
| 126 | 742 | M | 2474 | 2011-055A | 37829 | 1 | 6 | 4 | 2-Oct-11 | OK |
| 127 | 743 | M | 2475 | | | 1 | -4 | 2 | 4-Nov-11 | CHK |
| 128 | 744 | M | 2476 | | | 1 | 5 | 3 | 4-Nov-11 | CHK |
| 129 | 745 | M | 2477 | | | 1 | 5 | 7 | 4-Nov-11 | CHK |

Quelle: UNB (2011)

Mit geodätischen GNSS-Empfängern aufgezeichnet, stehen heute GPS- und GLONASS-Daten zur hochgenauen GNSS-Positionsbestimmung zur Verfügung. Geräteabhängige systematische Abweichungen bei GLONASS erschweren jedoch eine streng kombinierte Auswertung. Deren Gewinn liegt weniger in der erzielbaren Koordinatengenauigkeit, als in der gesteigerten Zuverlässigkeit und einem höheren Informationsgehalt, insbesondere für die physikalischen Parameter der Atmosphäre. Das von GLONASS genutzte Referenzsystem PZ-90.02 weicht vom GPS-Referenzsystem WGS84 (G1150) mit drei Translationen um wenige Dezimeter ab (ESA 2012).

2.1.3 Galileo (Europäische Union)

Besonderes Merkmal von Galileo ist die von der Europäischen Union politisch angestrebte nicht-militärische Konzeption und Kontrolle sowie technische Systemunabhängigkeit. Die durch Unklarheiten über eine mögliche Finanzierungsbeteiligung des Privatsektors und durch technische Probleme seit 2003 verzögerte Entwicklungs- und Validierungsphase bewegt sich gegenwärtig mit dem Start der ersten zwei von vier IOV-Satelliten im Oktober 2011 dem Ende zu. Mit Vergabe der EU zum Bau von 22 weiteren operationellen Satelliten und den Dienstleistungen zur Beförderung in den Orbit, tritt das Vorhaben nun in die so genannte Errichtungsphase ein. InsideGNSS (2012) berichtet über aktuelle Planungen der ESA von acht Raketenstarts zwischen 2013 und 2015. Dabei geht man davon aus, dass 2014 eine anfängliche Betriebsbereitschaft (IOC) erreicht sein wird. Schließlich fehlen dann noch vier Satelliten zur endgültigen Konstellation von Galileo (30 Satelliten), die ursprünglich für 2008 vorgesehen war.

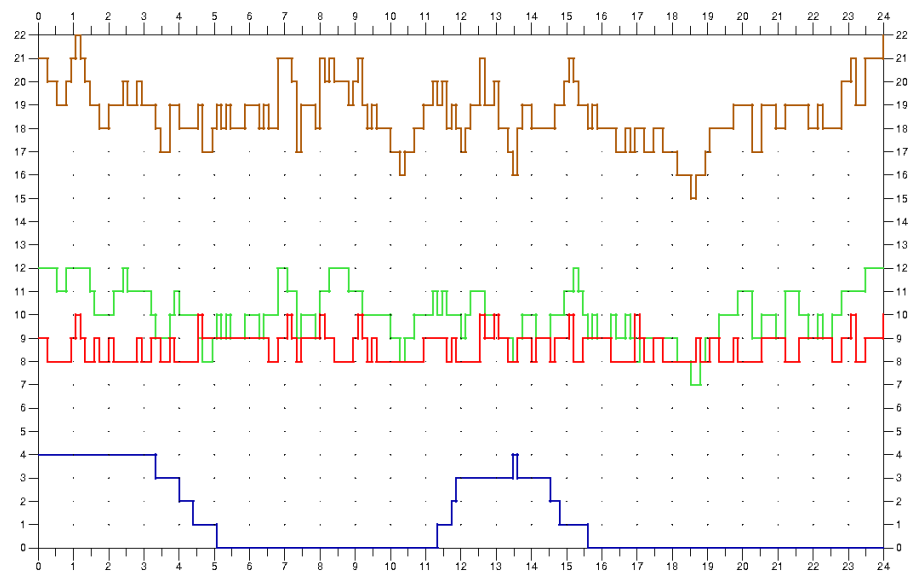
Galileo wird Signale auf drei Trägerfrequenzen (E1, E6 und E5) und Varianten derselben (a, b, c) senden, die interoperabel zu GPS nutzbar sind. Für die Bereitstellung wurde ein Dienstkonzept entworfen, das unter anderem einen offenen (OS), einen kommerziellen (CS) und einen öffentlich regulierten Dienst (PRS) vorsieht. Schüler (2009) stellt Untersuchungen vor, welche die Nutzbarkeit der Kombination von GPS und Galileo in einem Positionierungsdienst vergleichbar zu *SAPPOS*[®] (vgl. Kapitel 5.2) für die hochgenaue Positionierung in Echtzeit zum Gegenstand haben. Dabei wird in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht eine 2F-Kombination von GPS L1/L5 und Galileo E1/E5a bevorzugt, die in der zitierten Studie zu deutlichen Zuverlässigkeitssteigerungen bei der Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten geführt hat. Es ist anzumerken, dass die Signale E1 und E5a dem kostenfreien *Open Service* zugeordnet sind. Für einen staatlichen Positionierungsdienst könnte darüber hinaus die Nutzung des *Public Regulated Service* von Interesse sein, der besonders störresistent ausgelegt sein soll.

Der Galileo-Referenzrahmen GTRF ist wie der ITRF (GPS) eine eigenständige Realisierung des globalen Referenzsystems ITRS. Die ESA (2012) gibt eine Übereinstimmung zwischen beiden im Millimeterbereich an.

Abbildung 2.1 zeigt die Abdeckung der Systeme GPS (grün), GLONASS (rot) und Galileo (blau) am 08.06.2012 über 24 Stunden für Hannover. In der Aufsummierung von GPS und GLONASS (braun) ergeben sich zwischen 15 und 22 sichtbare Satelliten. Bei den vier zeitweise sichtbaren Galileo-Satelliten handelt es sich um die beiden Testsatelliten GIOVE-A und B und die ersten zwei In-Orbit Validation-Satelliten IOV-1 und 2.

Abbildung 2.1:

GPS, GLONASS, Galileo-Abdeckung in Hannover (5° Elevation, DOY 160 2012)



Wegen der Ausbaupläne und der bereits im Orbit befindlichen Satelliten ist damit zu rechnen, dass die verfügbare Satellitenanzahl aus allen drei GNSS im Jahr 2015 global etwa 90 Satelliten erreicht haben wird. Damit dürften in einer zu Abbildung 2.1 vergleichbaren Situation maximal ca. 30 Satelliten mit bis zu drei Trägerfrequenzen nutzbar sein.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die instrumentelle Infrastruktur der Positionierungsdienste heute in der Regel zusätzlich zu GPS auch GLONASS bedient und teilweise bereits für Galileo vorbereitet ist (z. B. *SAPPOS*[®] im Bundesland Niedersachsen). Die zur Vernetzung der Referenzstationsdaten notwendigen Programmsysteme befinden sich hinsichtlich Galileo in der Konzeptions- oder Entwicklungsphase.

2.2 Nutzeranforderungen im Vermessungs- und Geoinformationswesen

Unter Nutzeranforderungen werden diejenigen Bedingungen verstanden, die ein Nutzer an die Dienstleistung eines Positionierungsdienstes stellt. Aus Sicht des Dienstes ist es sinnvoll, die Nutzer zu klassifizieren, und zwar primär nach der Mindestanforderung *Genauigkeit*. Hierzu geben Heckmann und Jahn (2010) folgende Zusammenstellung an:

Tabelle 2.3:
Nutzerübersicht nach Genauigkeitsklassen

| Nutzer | Genauigkeit |
|---|-------------|
| Fahrzeugnavigation, Telematik, Verkehrsleitsysteme, Flottenmanagement, Polizei, Feuerwehr, Rettungsdienste, Geoinformationsdienste, Hydrographie, Umweltschutz, Land- und Forstwirtschaft | Meter |
| Vermessungs- und Katasterwesen, Ingenieurvermessung, Luftbildvermessung und Laserscanning, Geoinformationssysteme, Versorgungsunternehmen, Hydrographie, Seevermessung, Flurbereinigung, Bodenschätzung, Luftfahrt | Zentimeter |
| Bezugsrahmen, Referenzsysteme der Landesvermessung, Grundlagenvermessung, Katastervermessung, Ingenieurvermessung, wissenschaftliche und geodynamische Untersuchungen, Luftbildvermessungen, Überwachungsaufgaben (Küstenschutz, Pegel, Bauwerke) | Millimeter |

Quelle: Heckmann und Jahn (2010), verändert

Der überwiegende Teil der in Tabelle 2.3 identifizierten Nutzergruppen im Vermessungs- und Geoinformationswesen ist dem öffentlichen Sektor zuzuordnen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen einer Untersuchung im Auftrag des deutschen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zu den Einsatzpotentialen eines GNSS im öffentlichen Sektor (MICUS 2010). Dort wird für den Positionierungsdienst *SAP^{OS}*® im hochpräzisen Echtzeit-Positionierungs-Service HEPS eine Verteilung von etwa zwei zu einem Drittel zwischen öffentlichen und privaten Nutzern gefunden (a. a. O., S. 8).

Hinsichtlich der vorliegenden Fragestellung ist davon auszugehen, dass sich die Divergenz der Bezugssysteme auf die Genauigkeitsklasse Meter nicht spürbar auswirken wird. Die hochgenaue GNSS-Positionierung umfasst nach dem Stand der Technik die Klassen Zentimeter und Millimeter in Echtzeit und Postprocessing.

Heckmann und Jahn (2010) entwickeln weitere Qualitätskriterien, die als Mindestanforderungen an einen Positionierungsdienst gestellt werden können. Dies sind neben der *Zuverlässigkeit*, welche die stochastische Ergänzung zur Genauigkeit darstellt, die *Integrität* und *Verfügbarkeit* des Dienstes. Im Sinne der Informationssicherheit bilden sie

die Korrektheit der Daten und Systemfunktion (Integrität) sowie die zeitbezogene Wahrscheinlichkeit der Anforderungserfüllung (Verfügbarkeit) ab.

Über die Mindestanforderungen hinaus existieren so genannte *Leistungsanforderungen*. Hierzu können die für den Inhalt dieser Masterarbeit relevanten Merkmale *Bezugssystem* und *Standard* gezählt werden, nämlich:

- die Datenbereitstellung in einem streng definierten, widerspruchsfreien globalen Bezugssystem,
- auf Grundlage einer wohldefinierten Schnittstelle.

Auch die Unterstützung von mehreren GNSS, wie GPS, GLONASS und zukünftig Galileo oder COMPASS, kann vom Nutzer als Leistungsanforderung an den Positionierungsdienst gestellt werden.

Wirkt sich die in Kapitel 4 untersuchte Divergenz der Bezugssysteme tatsächlich signifikant und systematisch auf die Ergebnisse einer Positionsbestimmung aus, so beeinträchtigt dieser Fehler die genannte Leistungsanforderung bezüglich eines konsistenten globalen Bezugssystems.

2.3 Hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung

Streng betrachtet arbeiten alle GNSS-Messverfahren relativ, da sie sich über die Satelliten stets auf ein mit der Erdoberfläche verbundenes Netz von räumlich und zeitlich referenzierten Stationen des Kontrollsegments beziehen. In einem einheitlichen und konsistenten Referenzrahmen gelagerte globale, regionale und lokale Referenzstationsnetze liefern Korrekturdatenmodelle, um so eine hochgenaue statische oder kinematische Positionierung des Nutzers zu ermöglichen. Dies gilt sowohl für die relative (*Network RTK*) als auch für die als „absolut“ bezeichnete Positionierung (*PPP-RTK*) in Echtzeit (und analog im Postprocessing) in einem Positionierungsdienst.

2.3.1 Relative Positionierung

Die *relative Positionierung* ist das bis heute bevorzugte Verfahren in vernetzten Positionierungsdiensten. Durch Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten im Referenzstationsnetz werden in Echtzeit Korrekturdatenmodelle erzeugt, die dem Nutzer über geeignete Kommunikationswege zur Verfügung gestellt werden. Sie beschreiben die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse der Atmosphäre (Ionosphäre und Troposphäre) und der Satellitenbahnen (Orbits) bereitgestellt als satellitenindividuelle Code- und Phasenkorrekturen.

Hiermit ist der Nutzer in der Lage, eine relative Positionierung seines als *Rover* bezeichneten, simultan messenden GNSS-Empfängers innerhalb einer halben Minute über mittlere Entfernungen auf Basis gelöster Mehrdeutigkeiten durchzuführen. Als Ergebnis erhält er Koordinaten in Zentimetergenauigkeit in dem durch die Referenzstationen realisierten Bezugssystem.

Als räumlicher Abstand der Referenzstationen in einem lokalen/regionalen Positionierungsdienst haben sich Distanzen von ca. 30 bis 80 km durchgesetzt. Somit kann ein Rover in die Situation kommen, etwa 45 km entfernt von der nächsten Referenzstation Messungen durchzuführen. Entfernungsabhängige Fehlereinflüsse unterliegen bei der relativen Positionierung einer hohen räumlichen Korrelation und reduzieren sich deshalb bereits durch Differenzbildung. Referenzstationsabhängige Fehlereinflüsse, wie beispielsweise Mehrwegeeffekte, pflanzen sich dagegen in Abhängigkeit vom Verfahren der Korrekturdatenübertragung mehr oder weniger stark bis in die Position des Rovers fort.

Für die Repräsentation der Korrekturen zur Übertragung an den Nutzer stehen drei Konzepte bereit, die standardbasiert (RTCM, vgl. Kapitel 5) unterstützt werden:

1) *Flächenkorrekturparameter (FKP)*

Bei dem auf Wübbena et al. (1996) zurückgehenden Verfahren wird aus den zwischen mindestens drei Referenzstationen vorhandenen Differenzen der ionosphärischen und geometrischen Fehleranteile (Troposphäre und Orbits) jeweils eine ausgleichende Korrekturebene bestimmt. Mit den Neigungen dieser Fläche in Nord-Süd und Ost-West-Richtung stehen vier Korrekturparameter pro Satellit zur Verfügung. Der Nutzer erhält aus der Rechenzentrale des Dienstes die Messdaten und Koordinaten der nächstgelegenen Referenzstation sowie die zugehörigen FKP. Damit ist er in der Lage, seine eigenen Messungen ortsbezogen zu korrigieren und eine schnelle Positionierung relativ zu dieser Referenzstation durchzuführen.

2) *Virtuelle Referenzstation (VRS)*

Dieses Verfahren nach Wanninger (1997) wird für die Untersuchungen in Kapitel 4 eingesetzt. Auch hier überträgt der Rover zur räumlichen Zuordnung zunächst seine Näherungsposition an die Rechenzentrale. Auf einem wie oben beschriebenen Korrekturmodell aufsetzend, werden dort für einen Ort in der Nähe des Rovers die Daten einer virtuellen Referenzstation interpoliert und übermittelt. Diese nutzt der Rover, um sich über eine kurze Entfernung relativ zur VRS zu positionieren.

3) *Master-Auxiliary Concept (MAC)*

Das jüngste Verfahren (Euler et al. 2001) liefert dem Nutzer auf Basis seiner Näherungsposition die Messdaten und Koordinaten der nächstgelegenen Referenzstation, die als Master-Station dient. Darüber hinaus erhält er darauf bezogen die Koordinaten und Korrekturdifferenzen weiterer benachbarter Auxiliary-Stationen. Der Rover kann hiermit seine Position relativ zur Master-Referenzstation bestimmen.

Alle drei Repräsentationsverfahren führen mit Vor- und Nachteilen behaftet zu vergleichbaren Ergebnissen und werden heutzutage von den Positionierungsdiensten parallel angeboten. Eine wesentliche Gemeinsamkeit ist, dass sie sämtlich im Beobachtungsraum (*Observation Space Representation*) operieren. Damit werden alle geometrischen und physikalischen Fehleranteile aufsummiert und in Beobachtungskorrekturen überführt.

2.3.2 Absolute Positionierung

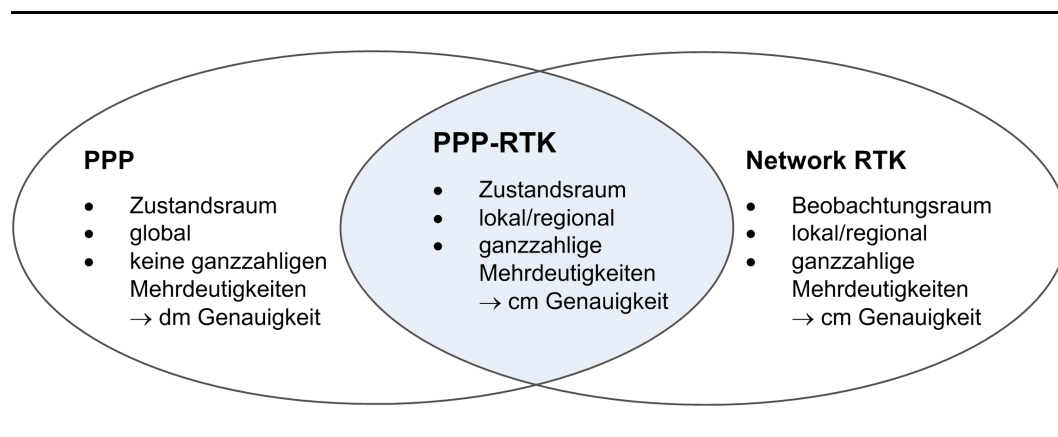
Die *absolute Positionierung* zeichnet sich dadurch aus, dass sie autonom die Code-Messungen eines einzelnen GNSS-Empfängers zur Positionsbestimmung benutzt. Eine Hinzunahme weiterer Stationen und externer Korrekturdaten entfällt. Mit diesem Verfahren werden in einer Vielzahl von Navigationsanwendungen Genauigkeiten von einigen Metern erzielt. Diese Positionierung ist unabhängig von einem Positionierungsdienst.

Das *Precise Point Positioning* nutzt zusätzlich die Zweifrequenz-Beobachtungen eines Empfängers sowie die aus einem global verteilten GNSS-Netzwerk (z. B. IGS) bereitgestellten Korrekturparameter. Diese betreffen die Satellitenbahnen und -uhren. Durch das Einführen stationsbezogener Korrekturen (Displacements, PCV, ...), das Schätzen des Empfängeruhrfehlers und der troposphärischen Laufzeitverzögerung sowie die Bildung der ionosphärenfreien Linearkombination gelingt es, höhere Genauigkeiten zu erzielen. Diese bewegen sich nach einer Einlaufzeit von ca. einer halben Stunde im Dezimeterbereich und können mit Messungen bis zu 24 Stunden Dauer zum Zentimeter geführt werden. Das Verfahren geht ursprünglich auf Zumberge et al. (1997) zurück.

Seit einigen Jahren arbeiten verschiedene Gruppen (z. B. Wübbena et al. 2005 und Mervart et al. 2008) daran, Algorithmen zur Mehrdeutigkeitslösung der Trägerphasensignale zu entwickeln, die eine lange Einlaufzeit über die nicht ganzzahlig festsetzbare ionosphärenfreie Linearkombination überflüssig machen. Dies funktioniert jedoch nur, wenn zusätzlich zu den Korrekturen eines globalen Netzwerks hoch verfeinerte Korrekturdatenmodelle aus regionalen Positionierungsdiensten bereitgestellt werden. Ziel ist das so genannte *Precise Point Positioning-RTK*.

Das PPP-RTK setzt wie das Network RTK auf eine zentrale Vernetzungsberechnung der Referenzstationsdaten eines lokalen/regionalen Positionierungsdienstes auf. Allerdings sind nun *alle* Fehlerkomponenten streng getrennt voneinander zu bestimmen, da das Eliminieren von räumlich hoch korrelierten Effekten und das Zusammenfassen in Beobachtungskorrekturen beim absoluten Ansatz nicht zielführend ist. Vielmehr werden die physikalischen Fehlerkomponenten nun in Abhängigkeit ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität separat hochpräzise prädiziert und in einem Zustandsraummodell entsprechend repräsentiert (*State Space Representation*). Hiermit ist es möglich, einen Rover so zu korrigieren, dass eine schnelle Lösung der Trägerphasenmehrdeutigkeiten gelingt und damit eine hochgenaue Positionsbestimmung in Echtzeit erreicht wird. Spezifische Fehlereinflüsse auf Referenzstationen werden dabei deutlich reduziert, da sich die Korrekturen im SSR auf die Stationsgesamtheit im Netz beziehen. Die konzeptionelle Verbindung von PPP und Network RTK zu PPP-RTK ist in Abbildung 2.2 dargestellt:

Abbildung 2.2:
Synthese von PPP und Network RTK



Quelle: Wübbena et al. (2005), verändert

Anders als beim Network RTK ist die Standardisierung eines geeigneten Korrekturdatenformats für PPP-RTK derzeit noch nicht abgeschlossen. Sie befindet sich in Bearbeitung durch die WG *State Space Representation* des SC-104 der *Radio Technical Commission for Maritime Services* (RTCM, vgl. Kapitel 5) und umfasst in der 2011 abgeschlossenen ersten Stufe wesentliche satellitenspezifische Parameter. In zwei weiteren Stufen folgen weitere Nachrichtentypen zur Beschreibung der Ionosphäre und der Troposphäre (Schmitz 2012). Parallel finden proprietäre Entwicklungen in der Industrie statt, von denen Trimble® Positioning Services derzeit am weitesten entwickelt sein dürften (Landau 2012).

2.3.3 Beobachtungs- und Zustandsraum

In Kapitel 2.1 wurde die rasch zunehmende Anzahl von verfügbaren Satellitensignalen durch Kombination verschiedener GNSS aufgezeigt. Verbunden mit weiter steigenden Nutzerzahlen und neuen Anwendungen wächst damit der Anspruch an leistungsfähiger und kostengünstiger Kommunikation zur Bereitstellung der Korrekturdatenmodelle in einem Positionierungsdienst. Hierbei zeigen sich nach Wübbena et al. (2005) neben einer physikalisch adäquaten Repräsentation weitere wesentliche Vorteile von SSR (Zustandsraum) gegenüber OSR (Beobachtungsraum):

Räumliche und zeitliche Gültigkeit

Die räumliche Gültigkeit im OSR ist auf die Ausdehnung des zugrunde liegenden Referenzstationsnetzes begrenzt. Die zeitliche Gültigkeit bestimmt derjenige Parameter mit der größten Dynamik, da im OSR alle Fehlereinflüsse in Summe behandelt werden. Maßgeblich sind demnach die Satellitenuhrparameter, die mit einer Aufdatierungsrate von höchstens 10 Sekunden zu Buche schlagen. Alle Korrekturdaten im OSR werden typischerweise mit 1 Sekunde aufdatiert.

Im SSR richtet sich die räumliche Gültigkeit nach den individuellen Eigenschaften der Fehlereinflüsse. So werden die Satellitenparameter und großräumigen Anteile der Ionosphäre und Troposphäre global beschrieben, lokale Variationen der Atmosphäre dagegen kleinräumig modelliert. Aufgrund der komponentenweisen Fehlerbehandlung variiert die zeitliche Gültigkeit zwischen hochdynamischen Parametern (Sekunden) und sich sehr langsam ändernden Größen, wie etwa den Satellitenbahnen (Stunden). Für eine performante Bereitstellung bietet sich eine Aufdatierungsfrequenz zwischen 30 und 60 Sekunden an.

Bandbreite (Datenübertragungsrate)

Aus der individuellen zeitlichen Gültigkeit der Fehlerkomponenten heraus ergibt sich ein wesentlicher Vorteil des Zustandsraummodells: Die für eine RTK-Lösung eines Rovers notwendige Datenübertragung kann durch eine optimierte Aufdatierungsrate gegenüber Korrekturen im Beobachtungsraum deutlich reduziert werden. Zudem wirken bestimmte Fehlereinflüsse auf alle Satelliten (z. B. troposphärische Laufzeitverzögerung) oder auch Signale eines Satelliten (z. B. Satellitenuhr) gleich und müssen deshalb nicht notwendigerweise pro Beobachtung als Korrektur übertragen werden.

Die Konzepte FKP², VRS und MAC sind auf eine bidirektionale Kommunikation (Mobilfunk) ausgelegt, um von der Rechenzentrale Korrekturdaten für eine relative Positionierung übertragen zu können. PPP-RTK respektive SSR dagegen bietet sich idealerweise für eine unidirektionale Bereitstellung (Rundfunk, Satellit) und damit einer unbegrenzten Anzahl von Nutzern an, da keine referenzstationsbezogenen Informationen für die Positionsbestimmung benötigt werden.

Unter diesen Voraussetzungen schätzen Wübbena et al. (2005) für eine 1000×1000 km Netzabdeckung und eine Konstellation von 12 GPS-Satelliten eine notwendige Bandbreite (exakter formuliert: Datenübertragungsrate) von 1500 bps für SSR ab. Demgegenüber steht ein Mehrfaches von 4800 bps an Datendurchsatz für FKP, VRS und MAC – verfahrensabhängig zu berechnen in Abhängigkeit von der Anzahl von Nutzern.

Als Zwischenfazit kann angenommen werden, dass SSR in den kommenden Jahren aufgrund der wachsenden Vielfalt von GNSS-Signalen eine wichtige Rolle neben dem schon etablierten OSR einnehmen wird. Sicher auch deshalb, weil alle Repräsentationsformen des OSR (FKP, VRS, MAC) aus SSR abgeleitet werden können, und damit Kompatibilität für ältere Empfänger langfristig gewährleistet ist.

Für die Arbeit ist im Weiteren von Interesse, wie das Bezugssystem in SSR behandelt wird. Da es sich um einen streng konsistenten und den vollständigen Fehlerhaushalt hochpräzise umfassenden Ansatz handelt, bei dem sich die Positionsbestimmung letztlich auf die Satellitenbahnen bezieht, eignet sich das globale Bezugssystem ITRS mit seinen Referenzrahmen ITRF_{yy} optimal.

² FKP können grundsätzlich auch unidirektional übertragen werden, zum Beispiel über eine referenzstationsindividuelle Funkfrequenz.

3 Bezugssysteme und ihre Realisierung

Das ETRS89 ist als Teil des globalen Referenzsystems ITRS erklärtermaßen an den festen Teil der Eurasischen Kontinentalplatte gebunden. Es wird durch EUREF, einer Subkommission der Internationalen Assoziation für Geodäsie (IAG) unterhalten und bereitgestellt (Torres 2005). Das ETRS89 dient als Grundlage in multinationalen Anwendungen der Positionierung, Navigation, Geoinformation und Geodynamik. So fordert die INSPIRE-Initiative der Europäischen Union zur Einrichtung einer europäischen Geodateninfrastruktur die Georeferenzierung von Geodaten im Bezugssystem ETRS89.

In Kapitel 3.1 werden unterschiedliche Definitionen aus Sicht der Geodäsie und des Geoinformationswesens gegenübergestellt. Kapitel 3.2 erläutert die regelmäßige Realisierung des globalen Referenzsystems ITRS durch den International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) und das Bezugssystem ETRS89. Zum Schluss erfolgt ein Blick auf geophysikalische und geodätische Plattenbewegungsmodelle (Kapitel 3.3).

3.1 Begriffserklärung

Widerspruchsfreie Bezugssysteme sind Voraussetzung für exakte und zuverlässige Ergebnisse geodätischer Messverfahren. Darum ist es aus wissenschaftlicher Sicht grundlegend, diesbezüglich theoretische Festlegungen zur Abbildung der realen Welt zu treffen. Nach Drewes (2009a) gelten folgende drei Unterscheidungen:

1) Referenzsystem (Reference system)

Das Referenzsystem *definiert* Konstanten, Konventionen, Modelle und Parameter als notwendige Basis zur mathematischen Darstellung geometrischer und physikalischer Größen.

2) Referenzrahmen (Reference frame)

Der Referenzrahmen *realisiert* das Referenzsystem physisch (durch feste Punkte an der Erdoberfläche) und mathematisch (durch Koordinaten).

3) Geodätisches Datum (Geodetic datum)

Das Geodätische Datum *fixiert* eindeutig die Relation zwischen System und Rahmen (durch die Ursprungskoordinaten, die Richtung der Achsen und den Maßstab).

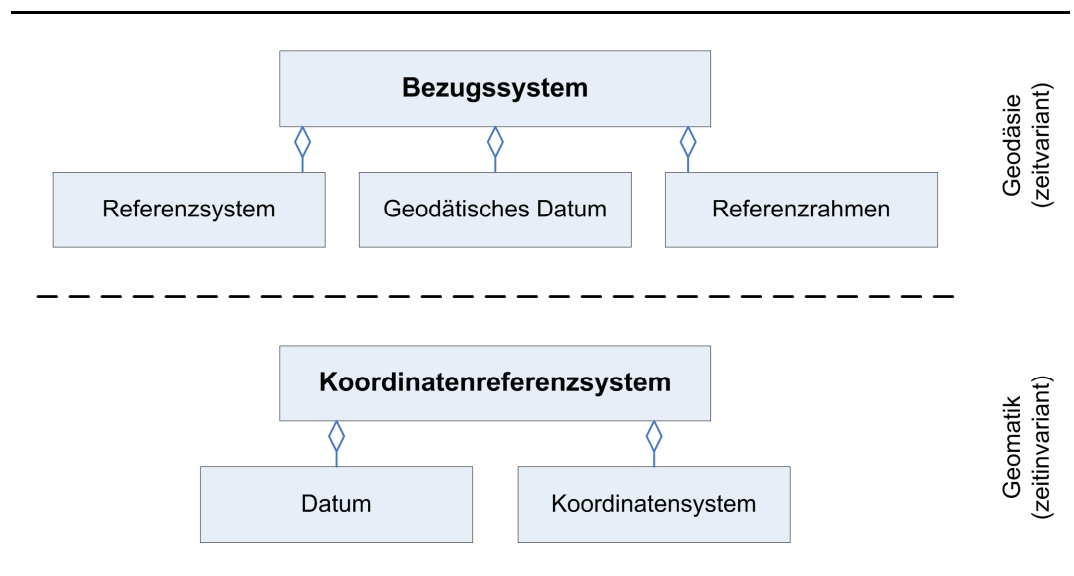
Übergeordnet wird im deutschen Sprachgebrauch häufig der Begriff *Bezugssystem* verwendet, mit dem die drei Komponenten Referenzsystem, Referenzrahmen und Geodätisches Datum implizit umschrieben werden. Ein englisches Pendant hierzu existiert nicht.

Im Gegensatz zur wissenschaftlichen Sichtweise der Geodäsie vereinfacht die Geomatik³ die genannten Definitionen für die praktische Anwendung im Geoinformationswesen. Nach der internationalen GI-Norm ISO 19111, *Spatial referencing by coordinates* teilt sich ein Koordinatenreferenzsystem (*Coordinate reference system*) in ein Datum und ein zugehöriges mathematisches Koordinaten- und Abbildungssystem (ISO 2003). In diesem Modell kann die Lage eines Punktes im Raum (Position) eindeutig beschrieben werden. Eine spezielle Unterscheidung zwischen Referenzsystem und -rahmen wird dabei nicht getroffen. Das CRS wird modellseitig zeitinvariant betrachtet. Im Falle einer Änderung der Realisierung ist die Einführung eines neuen CRS vorgesehen.

Für die korrekte Einordnung der Untersuchungsergebnisse dieser Arbeit ist es notwendig, der strengen Unterscheidung zwischen *Referenzsystem* und *Referenzrahmen* zu folgen. Übergeordnet wird an geeigneten Stellen der Begriff *Bezugssystem* verwendet. Die Festlegungen in der Geodäsie und der Geomatik sind in Abbildung 3.1 grafisch dargestellt.

Abbildung 3.1:

Bezugssystem interpretiert nach Drewes (2009a) und Koordinatenreferenzsystem nach GI-Norm ISO 19111



Quelle: ISO 19111 (2003), verändert (UML Notation)

³ *Geomatik* im Sinne von Barthelme (2005, S. 39 ff.) als integrierende Fachrichtung der Wissenschaftsfelder der Geodäsie, Kartographie, Geographie und Geoinformatik.

3.2 Realisierung und Bereitstellung

Ziel der Realisierung eines globalen Referenzsystems ist die Bereitstellung eines widerspruchsfreien Referenzrahmens als internationaler Standard für alle geowissenschaftlichen Anwendungen. Diese Aufgabe fällt unter den Erdwissenschaften der Geodäsie zu.

3.2.1 Raumfestes ICRS und erdfestes ITRS

Die Satellitenbahnen in einem GNSS werden über ihre Bewegungsgleichungen in einem himmelfesten Referenzsystem beschrieben. Das hierzu vereinbarte *International Celestial Reference System* wird durch astronomische Beobachtungsverfahren zu extragalaktischen Strahlungsquellen realisiert. Internationale Konventionen zur Bestimmung der Erdorientierungsparameter (Polbewegung, Präzession und Nutation der Erdachse, Abweichung von der Internationalen Atomzeit) erlauben es, Koordinaten vom raumfesten Inertialsystem ICRS in das erdfeste Referenzsystem ITRS zu überführen (Petit und Luzum 2010). Die Bereitstellung dieser Parameter erfolgt durch den IERS am *Bureau International de Poids et Mesures* (BIPM) in Paris.

Das ITRS ist als geozentrisches Referenzsystem definiert, dessen Z-Achse mit der mittleren Drehachse der Erde zusammenfällt. Die XZ-Ebene ist durch die Z-Achse und die Sternwarte von Greenwich festgelegt. Die Y-Achse schließlich entspricht der um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedrehten X-Achse. Solcherart Systeme werden häufig auch als *Earth Centered Earth Fixed* (ECEF) bezeichnet.

3.2.2 Realisierung des ITRS durch den Referenzrahmen ITRF2005

Für die Realisierung des ITRS stellen derzeit vier geodätische Raumverfahren (VLBI, SSR, GPS, DORIS) fortlaufend Messdaten von dauerhaft mit der Erde verbundenen Beobachtungsstationen bereit, die durch internationale Analysezentren ausgewertet und unter der Koordinierung des IERS zu einem ITRF_{yy} kombiniert werden. Dabei bedeutet die Angabe yy dasjenige Jahr mit den jüngsten eingeflossenen Daten. Seit Beginn mit der Realisierung des ITRF88 erfolgten bis zum aktuellen ITRF2008 insgesamt zwölf Lösungen in zunächst jährlichen und seit 1997 mehrjährigen Zeitabständen. Der für die Untersuchungen in dieser Arbeit relevante Referenzrahmen ist aufgrund des verwendeten Datensatzes der ITRF2005. Deshalb beziehen sich die folgenden Ausführungen im Wesentlichen auf diese Realisierung und basieren auf Altamimi et al. (2007) sowie Petit und Luzum (2010).

Kontinuierliche Verbesserungen in der Mess- und Auswertetechnik führen zu immer höheren Genauigkeiten in der Realisierung. So werden seit dem ITRF2000 vier Messverfahren eingesetzt und erstmals mit dem ITRF2005 daraus unabhängig abgeleitete tages- und wochenweise Zeitreihen von Stationskoordinaten und Erdorientierungsparameter kombiniert. Der Vorteil daraus ist, nichtlineare Bewegungen der Stationen sowie Diskontinuitäten im Ursprung und Maßstab verbessert detektieren zu können. Insgesamt 608 Beobachtungsstationen an 338 weltweit verteilten Orten stellen die Eingangsdaten zwischen 1984 und 2005 für den ITRF2005 bereit. Für die Kombination der vier Verfahren müssen die gegebenenfalls an einem gemeinsamen Ort benachbarten Sensoren hochpräzise miteinander verbunden werden. Um dabei eine Größenordnung genauer als die Zielgrößen zu sein, bedarf es für zukünftige Folgeleistungen des ITRF weiterer Qualitätssteigerungen.

Jedes der vier Messverfahren trägt mit seinen individuellen Vorzügen zur Realisierung des Datums bei. Dabei bestimmt das *Satellite Laser Ranging* vornehmlich den Ursprung, während die *Very Long Baseline Interferometry* den Hauptanteil zum Maßstab liefert. Die Orientierung des ITRF2005 ist auf den ITRF2000 abgeglichen. Alle Parameter sind für die Epoche 2000.0 zu Null gesetzt (keine Translation, keine Rotation, kein Maßstab). Mit der letzten Bedingung ist der ITRF2005 implizit mit dem geophysikalischen Plattenbewegungsmodell NNR-NUVEL-1A (DeMets et al. 1994) verknüpft, das die so genannte *No-Net-Rotation*-Bedingung und damit die Konsistenz zu den Erdrotationsparametern sicherstellen soll. Sie bewirkt, dass die Summe aller tektonischen Bewegungen auf der Erdoberfläche gleich Null ist, so dass die geschätzten Geschwindigkeiten absolut betrachtet werden können.

Hauptziel des ITRF ist die Bereitstellung eines konsistenten Referenzrahmens als internationaler Standard für geowissenschaftliche Anwendungen. Als Ergebnisse liefert er dazu Stationskoordinaten, Erdorientierungs- und Transformationsparameter sowie deren zeitabhängige Veränderungsdaten. Hinzu kommt ein aus dem Geschwindigkeitsfeld der Stationen abgeleitetes globales Plattenbewegungsmodell, das auf 152 Stationsorten und 15 tektonischen Platten beruht. Als Genauigkeitsangabe zum ITRF2005 kann für die Stationskoordinaten etwa 1 cm und für die Geschwindigkeiten 1-3 mm absolut abgeschätzt werden. Der auf 934 Stationen an 580 Orten angewachsene zurzeit gültige ITRF2008 wird in Altamimi et al. 2011 beschrieben.

Aus Sicht der Definitionen in Kapitel 3.1 hinterfragt Drewes (2009a) die angewandten Methoden zur Realisierung des ITRS. Er weist darauf hin, dass die als *eindeutig* definierten Datumparameter in der Berechnung des ITRF aus Ähnlichkeitstransformationen der Ergebnisse der beteiligten geodätischen Raumverfahren gewonnen werden. Dies zerstöre aufgrund der Deformationen der Erdoberfläche, die eigentlich den Residuen der Stationskoordinaten zugewiesen werden müssten, die Eindeutigkeit des Ursprungs und des Maßstabs. Weiterhin führe die Nutzung eines nicht perfekten geophysikalischen Plattenmodells unweigerlich zu Abweichungen in den Erdrotationsparametern. Diese Mängel schließlich bewirkten Veränderungsraten in den Parametern, die physikalisch nicht gerechtfertigt sind, und gefährdeten die Langzeitstabilität des ITRF.

Als Beispiel für die Kritik⁴ von Drewes (2009a) kann die zeitabhängige Änderung des Maßstabs im ITRF betrachtet werden, der über die Definition der Lichtgeschwindigkeit eigentlich konstant sein muss. Wir können festhalten, dass immer höhere Genauigkeiten in den geodätischen Raumverfahren, sowie deren Abhängigkeit untereinander, zu Umsetzungsproblemen theoretischer Definitionen in der realen Welt führen.

3.2.3 Definition und Bereitstellung des ETRS89

Die *Subcommission for the European Reference Frame* (EUREF) der IAG hat 1990 in Florenz folgende Resolution beschlossen (EUREF 1990):

„The IAG Subcommission for the European Reference Frame

recognising the availability of the International Terrestrial Reference System (ITRS) which has been established by the International Earth Rotation Service (IERS) which is accepted worldwide and which uses SLR, LLR and VLBI observations and

noting that in such a system station positions in Europe have a common motion of the order of one centimetre per year

recommends that the system to be adopted by EUREF will coincident with ITRS at the Epoch 1989.0 and fixed to the stable part of the Eurasian Plate and will be known as European Terrestrial Reference System 89 (ETRS 89) and

accepts that this geocentric system will coincide with the World Geodetic System 84 (WGS 84) at one metre level and that, for most applications, the coordinates will have no time variation.”

⁴ Als erste Maßnahmen zur Beseitigung des Problems regt Drewes (2009a) die Einführung von Beobachtungen (anstelle von Koordinaten) und die Berücksichtigung geodätischer Platten- und Deformationsmodelle (anstelle geophysikalischer Modelle) in die Berechnungen des ITRF an.

Die Genauigkeit und Aktualität dieser Definition wird in den letzten Jahren im wissenschaftlichen Umfeld verstärkt diskutiert. Gurtner et al. (2009) weisen darauf hin, dass die Definition den „stable part“ der Eurasischen Platte nicht weiter spezifiziert und unklar bleibt, ob „fixed“ drei- oder zweidimensional zu verstehen sei. Man habe offenbar beabsichtigt, ein Bezugssystem mit einer minimalen Veränderung der Koordinaten über einen langen Zeitraum zu definieren: „[...] for most applications, the coordinates will have no time variation.“ Dem kann hinzugefügt werden, dass das 2002 eingeführte WGS84 (G1150) mit dem ITRF2000 im Zentimeterbereich übereinstimmt (ESA 2012), und damit heute nicht mehr von einem „one metre level“ gesprochen werden kann.

Festzustellen ist, dass das Bezugssystem ETRS89 zur Epoche 1989.0 als identisch mit der zu dieser Zeit gültigen Realisierung ITRF89 des ITRS definiert ist („[...] will coincident with ITRS [...]“). Die erste Bestimmung eines europäischen Referenzrahmens ETRF89 erfolgte durch eine GPS-Verdichtung von 21 europäischen SLR- und VLBI-Stationen, deren Koordinaten im ITRF89 zur Epoche 1989.0 festgehalten wurden. Jede nachfolgende Realisierung des ETRS89, die vom IERS gemeinsam mit einem neuen ITRFyy veröffentlicht wurde, beruhte letztlich nur auf einen Transformationsparametersatz zwischen ITRFyy und ITRF89 plus einer Rotation für die Drift der Eurasischen Kontinentalplatte. Ein daraus resultierendes Problem ist, dass die Widersprüche von ETRS89-Koordinaten identischer Stationen und Epochen von Lösung zu Lösung systematisch ansteigen und damit die Konsistenz im ETRS89 mit jeder folgenden ITRS-Realisierung abnimmt. Als ursächliche Einflussgröße hierfür wird die Bewegung der Eurasischen Platte vermutet, die wie der Transformationsparametersatz aus der ITRS-Realisierung heraus geschätzt wird (Gurtner et al. 2009). Der favorisierte Weg über eine direkte Transformation zwischen jeder zukünftigen ITRFyy-Lösung und einem als Referenz ausgewählten ETRFyy (z. B. ETRF2000) verspricht eine bestmögliche Beseitigung unerwünschter systematischer Effekte aus dem ITRS. Es wird hierfür eine 7-Parameter-Transformation über 31 als stabil erachtete, permanente GNSS-Stationen in Europa vorgeschlagen (Gurtner et al. 2009). Weitere Konzepte werden aktuell in EUREF diskutiert.

Die vom Parlament und Rat der Europäischen Union im Jahr 2007 verabschiedete Richtlinie 2007/2/EG zur Einrichtung einer europäischen Geodateninfrastruktur fordert in der Datenspezifikation D2.8.I.1 die einheitliche Georeferenzierung von raumbezogenen Daten im ETRS89 (INSPIRE 2009). EUREF beteiligt sich als *Spatial Data Interest Community* (SDIC) offiziell an INSPIRE. Eine Erhebung aus dem Jahr 2011 (Ihde et al. 2011) gegenüber allen EU-Mitgliedsstaaten, Beitrittskandidaten und Nicht-Mitgliedern führte zu dem Ergebnis, dass inzwischen 23 Länder das ETRS89 offiziell als Bezugssystem eingeführt haben. Von den assoziierten Staaten beabsichtigt demnach Griechenland und darüber hinaus die Türkei keine Einführung. Griechenland sieht die Nutzung des ETRS89 zumindest im Kataster vor. Die Ursachen für den Verzicht sind vermutlich in der geographischen Lage im östlichen Mittelmeerraum in der Deformationszone am Rande der Eurasischen Platte zu sehen.

Die Einführung⁵ von ETRS89 als einheitliches europäisches Bezugssystem startete im Jahr 1991 mit Deutschland. Die bis heute laufende Erweiterung (z. B. Italien und Slowakei 1996, Frankreich und Polen 2000, Österreich und Spanien 2004, Slowenien 2008) basiert auf nationale Realisierungen in unterschiedlichen ETRFyy, transformiert nach ETRS89 (Epoche 89.0). Wegen der oben beschriebenen Probleme kann es damit zu Inkonsistenzen zwischen Nachbarstaaten bis in den Zentimeterbereich kommen.

Ein Problem in der praktischen Nutzung des ETRS89 ist die unterschiedliche Gültigkeitsdauer der Koordinaten. Caporali et al. (2011) klassifizieren aufgrund von Untersuchungen im Geschwindigkeitsfeld des *EUREF Permanent Network*, das mit zurzeit etwa 250 GNSS-Permanentstationen die Verknüpfung mit dem ITRS gewährleistet, die Lebenszeit der nationalen ETRS89-Realisierungen. Unter Annahme einer Toleranz von 3 cm kann mit folgenden Zeitpunkten des Überschreitens gerechnet werden:

Tabelle 3.1:

Lebenszeit nationaler ETRS89-Realisierungen ausgewählter Staaten (alle übrigen >2020)

| Land | SCA | EST | POL | DNK | GRC | HRV | SVN | PRT |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Realisierung | 2003 | 1997 | 2001 | 1994 | 2010 | 1996 | 1994 | 1995 |
| vertikal | 2010 | 2008 | 2020 | 2015 | 2037 | 2016 | 2032 | 2021 |
| horizontal | 2052 | 2042 | 2031 | 2026 | 2011 | 2013 | 2006 | 2012 |

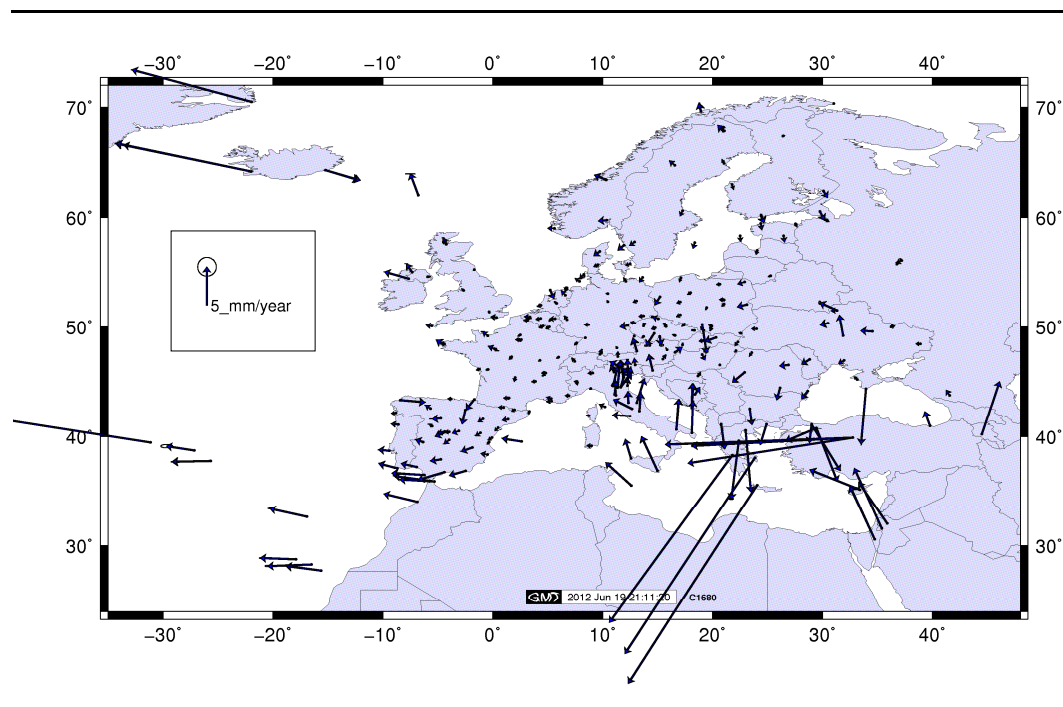
Quelle: Caporali et al. (2011), Angaben kodiert nach ISO 3166 (außer SCA = Skandinavien ohne DNK)

⁵ Dies umfasst nicht zwingend die amtliche Einführung aufgrund von Rechtsvorschriften, sondern meint die technische Realisierung.

Tabelle 3.1 liefert Jahreszahlen, die im Wesentlichen von zwei großräumigen Deformationen der Eurasischen Platte herrühren. Dies sind zum einen die Fennoskandische Landhebung (vertikal) und zum anderen die südeuropäische Deformationszone (horizontal). Die betroffenen Länder liegen nach der Festlegung von 3 cm als Toleranzwert in Abhängigkeit von ihrer Realisierung des ETRS89 nicht im stabilen Teil der Eurasischen Platte. Als eine geeignete Gegenmaßnahme schlagen Caporali et al. (2011) die Ableitung und Einführung eines adäquaten Geschwindigkeitsmodells für die Intraplattendeformationen vor, das eine Transformation vom aktuellen ITRFyy über den ETRF2000 in die jeweiligen nationale Realisierung des ETRS89 langfristig sicherstellen soll.

Abbildung 3.2:

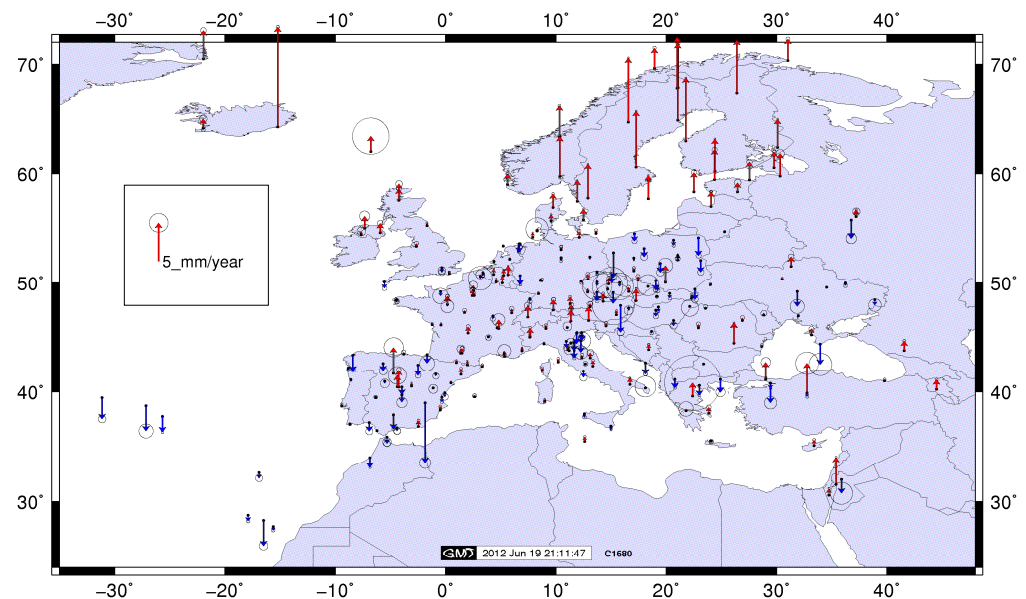
Stationsgeschwindigkeiten im EPN relativ zur Eurasischen Kontinentalplatte (Lage)



Quelle: Kenyeres (2012), unverändert, von A. Kenyeres freundlicherweise zur Verfügung gestellt

Abbildung 3.2 zeigt die Ergebnisse einer kumulativen Lösung reprozessierter GNSS-Wochenlösungen des EPN bis GPS-Woche 1680 (März 2012). Aufgrund der Aktualität ist der zugrunde liegende Referenzrahmen das IGS08 des *International GNSS Service*, eine aus GNSS-Daten berechnete Variante des ITRF2008. Das Ergebnis ist relativ zur Eurasischen Platte zu interpretieren und dokumentiert die Deformationszone in der Ägäis im östlichen Mittelmeerraum zwischen der Eurasischen, Afrikanischen und Anatolischen Platte. Interessant sind zudem die gegenläufigen Vektoren an der durch Island verlaufenden Grenze zwischen der Eurasischen und der Nordamerikanischen Platte.

Abbildung 3.3:
Stationsgeschwindigkeiten im EPN relativ zur Eurasischen Kontinentalplatte (Höhe)



Quelle: Kenyeres (2012), unverändert, von A. Kenyeres freundlicherweise zur Verfügung gestellt

Der Fennoskandische Uplift in Skandinavien verursacht eine postglaziale Hebung von bis zu 10 mm/a (Nocquet et al. 2005) und ist in Abbildung 3.3 zu erkennen.

Aus den Schwierigkeiten in der Definition und Bereitstellung des ETRS89 heraus wird klar, wie komplex sich die nachhaltige Umsetzung eines einheitlichen Bezugssystems für Europa darstellt. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass die in diesem Kapitel (3.2) beschriebenen Probleme in der Realisierung und Bereitstellung des ETRS89 auf die Plattentektonik zurückgeführt werden, aber nicht Gegenstand der Untersuchungen in Kapitel 4 sind. Die dort analysierten Effekte resultieren allein aus den zeitabhängigen Diskrepanzen in den Referenzstationskoordinaten aufgrund der Plattenbewegung und deren Beseitigung in einem Positionierungsdienst.

3.3 Plattenbewegungsmodelle

Nach Stand der Wissenschaft führen Konvektionsströmungen flüssigen Gesteins des oberen Erdmantels zu globalen Verschiebungen der festen Platten der Lithosphäre, die auf den Kontinenten etwa 100 km Mächtigkeit aufweist (Frisch und Meschede 2011). Die über geologische Zeiträume vorhandene Bewegung bewirkt dabei ein Kollidieren, Auseinanderdriften oder Vorbeigleiten benachbarter tektonischer Platten in der Erdkruste, wobei Geschwindigkeiten von einigen Zentimetern pro Jahr erreicht werden. Die Plattengrenzen befinden sich häufig an Tiefseerinnen oder Mittelozeanischen Rücken.

An konvergierenden Plattengrenzen entstehen Tiefseerinnen durch das Hinabgleiten (*Subduktion*) einer ozeanischen unter einer kontinentalen Platte (z. B. Marianengraben im Pazifischen Ozean). Das Kollidieren zweier Kontinentalplatten führt zu Hebungserscheinungen und damit zu Faltengebirgen (*Orogenese*), wie zum Beispiel den Alpen in Europa. Divergierende Plattengrenzen zeichnen entlang Mittelozeanischer Rücken Spuren der Ozeanbodenspreizung aufgrund erdmagnetischer Umpolungen (*Seafloor-Spreading*). Sie bilden durch den Aufbau neuer Kruste einen Ausgleich gegenüber den Subduktionszonen. So genannte konservative Plattengrenzen erzeugen Querstörungen an den Mittelozeanischen Rücken, oder Längsstörungen durch Verzahnung zweier aneinander vorbeigleitender tektonischer Platten (z. B. Nordanatolische Verwerfung in der Türkei). Die genannten Deformationen führen häufig zu Vulkanismus oder Erbeben.

Der deutsche Polarforscher und Meteorologe Alfred Wegener (1880-1930) vertrat im Jahr 1912 auf Grundlage der Kongruenz der atlantischen Küsten erstmals öffentlich die Verschiebungstheorie der Kontinente. Der britische Geologe Arthur Holmes (1890-1965) mutmaßte in den 1930er Jahren konvektive Wärmeströme im Erdmantel als möglichen Antrieb der Kontinentalplatten. Erst in den 1960er Jahren gelang dem US-amerikanischen Geologen Harry Hammond Hess (1906-1969) mithilfe geophysikalischer Messungen des Seafloor-Spreadings der Nachweis der Spekulation Holmes und damit Wegeners Theorie.

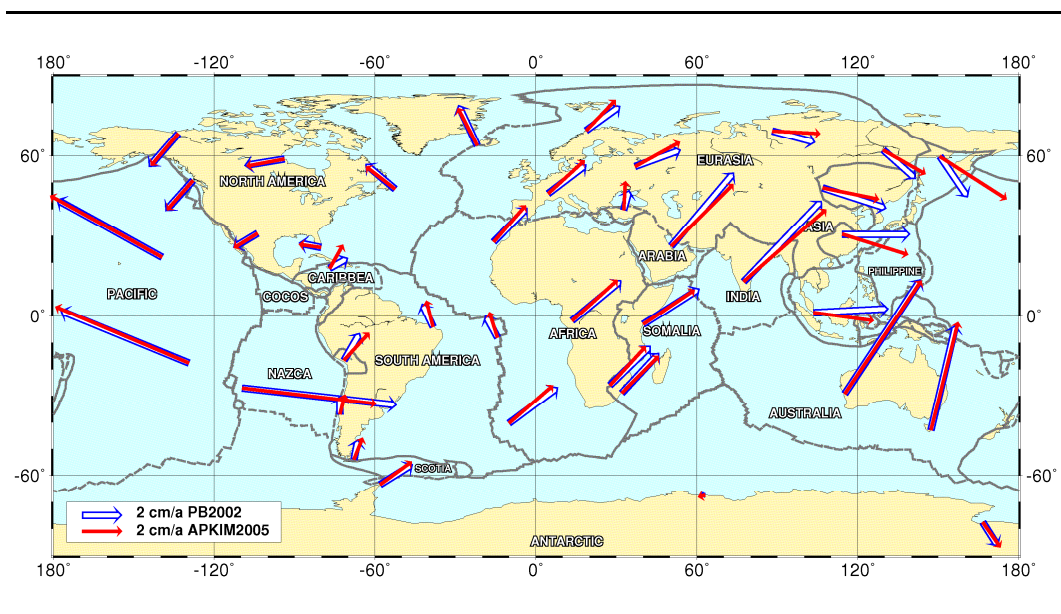
DeMets et al. (1990) veröffentlichten das aus geophysikalischen Daten, wie zum Beispiel der Geschwindigkeit der Ozeanbodenspreizung, berechnete Modell NUVEL-1 (*Northwestern University Velocity Model*), das die relative Bewegung von 11 tektonischen Platten relativ zur Pazifischen Platte beschreibt. Vier Jahre später wurde das gleiche Modell mit maßstäblich modifizierten Plattengeschwindigkeiten und einer Umrechnung in die *No-Net-Rotation*-Bedingung als NNR-NUVEL-1A (DeMets et al. 1994) präsentiert, das absolute Geschwindigkeiten realisiert (vgl. Kapitel 3.2.2).

Neben den NUVEL-Modellen gibt es bis heute eine Reihe weiter entwickelter globaler geophysikalischer Plattenbewegungsmodelle, wie zum Beispiel das PB2002 von Bird (2003). Dieses beinhaltet zusätzlich zu den 14 Hauptplatten des NUVEL weitere 38 kleinere Platten (u. a. Ägäische See und Anatolien) sowie vier definierte Deformationszonen (u. a. Mittelmeerraum). Geophysikalische Modelle repräsentieren mittlere tektonische Plattenbewegungen über geologische Zeiträume von mehreren Millionen Jahren.

Geodätische Plattenbewegungsmodelle dagegen beruhen auf der Auswertung von Beobachtungen geodätischer Raumverfahren der letzten drei Jahrzehnte. Drewes (2009b) berechnete das Modell APKIM2005 mit den Eingangsdaten des ITRF2005 (Altamimi et al. 2007). Dabei wurden 17 Hauptplatten und vier Deformationszonen (u. a. Mittelmeerraum) modelliert. Der Vergleich zwischen dem geodätischen Modell APKIM2005 und dem geophysikalischen Modell PB2002 ist anhand von ausgewählten Stationsgeschwindigkeiten in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Übereinstimmung zwischen beiden Modellen bewegt sich im Bereich weniger Millimeter, obschon signifikante Abweichungen zum Beispiel im Bereich der Philippinischen Platte zu erkennen sind.

Abbildung 3.4:

Ausgewählte Stationsgeschwindigkeiten berechnet aus APKIM2005 im Vergleich zum PB2002



Quelle: Drewes (2009b), unverändert, von H. Drewes freundlicherweise zur Verfügung gestellt

Als Fazit kann festgehalten werden, dass es auf der für das ETRS89 starr definierten Eurasischen Platte zwei Arten von Punktgeschwindigkeiten gibt, nämlich absolute aus dem ITRF (z. B. APKIM2005) und solche, die relativ zur Platte betrachtet werden (z. B. das Geschwindigkeitsfeld des EPN). Hinzu kommen, bei umfassender Betrachtung, lokale Störungen aufgrund anthropogener Eingriffe und endogener Prozesse, wie beispielsweise in Norddeutschland Rohstoffentnahmen oder Salztektunik (*Halokinese*). Diese werden in dieser Masterarbeit nicht behandelt.

4 Simulation zur Divergenz der Bezugssysteme

Die Bewegung der Eurasischen Kontinentalplatte bewirkt eine zunehmende räumliche und zeitliche Divergenz zwischen dem Referenzrahmen des kontinentalen Bezugssystems ETRS89 und den fortlaufenden Realisierungen des globalen ITRS. Ziel der folgenden Simulationsberechnung ist es, den resultierenden Einfluss auf die Positionsbestimmung in einem GNSS-Referenzstationsnetz im Gebiet der Bundesrepublik Deutschland empirisch abzuschätzen.

Im ersten Abschnitt werden der verwendete Datensatz und die eingesetzte Software vorgestellt (Kapitel 4.1). Entscheidend für repräsentative Ergebnisse ist die Qualität des Simulationsmodells, das in Kapitel 4.2 beschrieben wird. Die Berechnungen und Ergebnisse werden in Kapitel 4.3 präsentiert und einer Zwischenbewertung unterzogen.

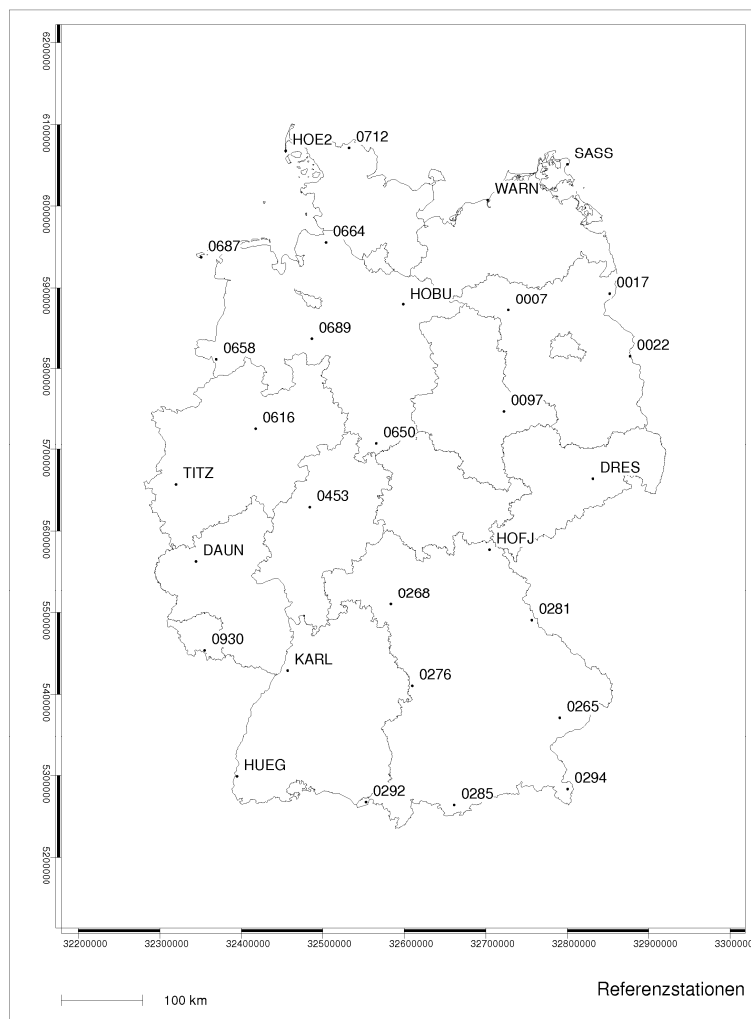
4.1 Datensatz und Software

Die Erhebung der vorliegenden GPS-GLONASS-Daten fand im Jahr 2008 an den Tagen 149 und 150 (GPS-Woche 1481) in einer bundesweiten GNSS-Kampagne statt (Feldmann-Westendorff 2009). Sie sind damit der Beobachtungsepoche 2008.408 zugeordnet und unterliegen aufgrund der Satellitenbahnen dem zu dieser Zeit gültigen globalen Referenzrahmen ITRF2005.

Der Datensatz wird durch die ETRS89/DREF91-Koordinaten der beteiligten Referenzstationen ergänzt. Sie stammen aus der Netzlösung des ursprünglichen Projektes, in der für insgesamt 600 Stationen eine mittlere Standardabweichung von 0,7 mm (E), 0,9 mm (N) und 2,6 mm (H) erzielt wurde (Feldmann-Westendorff und Westphal 2011).

Für die Realisierung des Simulationsmodells ist es zunächst erforderlich, qualitativ hochwertige GNSS-Korrekturdaten bereitzustellen. Hierfür stehen 30 Referenzstationen der Netzwerke GREF und SAPOS[®] in einem mittleren Abstand von 150 km zur Verfügung (Abbildung 4.1). Die Beobachtungsdaten von acht weiteren GNSS-Stationen dienen im anschließenden Experiment zur Positionsbestimmung in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Varianten.

Abbildung 4.1:
Referenzstationsnetz zur Bereitstellung von GNSS-Korrekturdaten



Die Auswertung der GNSS-Daten für die Simulationsberechnung erfolgt im Postprocessing-Modus mit dem Programmsystem Geo++[®] GNSMART 1.4 (Wübbena et al. 2001, 2005). Mit dem Hauptmodul GNNET ist es innerhalb eines hochpräzise georeferenzierten Stationsnetzes möglich, den GNSS-Fehlerhaushalt in seinen entfernungs- und stationsabhängigen Anteilen in einem Filter-Ansatz zur Ausgleichung undifferenzierter Beobachtungen in Echtzeit zu schätzen und in einem GNSS-Zustandsraummodell komponentenweise bereitzustellen (*State Space Representation*). Heutzutage werden hieraus in der Regel zusammenfassende Trägerphasen- und Codekorrekturen abgeleitet, die der Nutzer standardbasiert an seine eigenen RTK-Messungen zur differentiellen Positionierung (*Network RTK*) im Beobachtungsraum (*Observation Space Representation*) anbringt.

Die Software wird international in den RTK-Netzen einer Reihe von staatlichen und privaten Positionierungsdiensten eingesetzt.

Neben der originären Aufgabe der Bestimmung und Bereitstellung eines Korrekturdatenmodells ist GNNET umgekehrt in der Lage, Rover-Messungen in einem Referenzstationsnetz mithilfe von vorhandenen Korrekturen zu einer hochgenauen Koordinatenlösung zu führen. In diesem Fall übernimmt die Software damit die Aufgabe eines RTK-Empfängers zur Auswertung seiner Position.

Beide beschriebenen Möglichkeiten des Programmsystems werden genutzt, um ein zweistufiges Simulationsmodell zu implementieren.

4.2 Simulationsmodell

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsmodell hat zur Aufgabe, die geometrischen Auswirkungen der Plattentektonik auf die Positionsbestimmung mit GNSS in einem regionalen OSR-basierten Positionierungsdienst zu analysieren. Die Grundidee der Modellbildung ist dabei, alle übrigen Merkmale der Positionsbestimmung invariant⁶ zu belassen und so ihren Einfluss auszuschließen oder konstant zu halten. Gelingt dies, dann kann die Zielvariable an jedem Ort und Zeitpunkt im Simulationsmodell bestimmt werden. Die gesuchte Messgröße wäre idealerweise deterministisch ermittelbar.

In der ersten Simulationsstufe wird das GNSS-Zustandsraummodell (SSR) für diskrete Epochen berechnet, um die zeitabhängige Veränderung des vermuteten Einflusses ableiten zu können. Das eigentliche Simulationsexperiment wird in der zweiten Stufe des Modells durchgeführt. Es besteht im Kern darin, mithilfe von Testdaten Positionsbestimmungen in räumlichen und zeitlichen Variationen zu prozessieren.

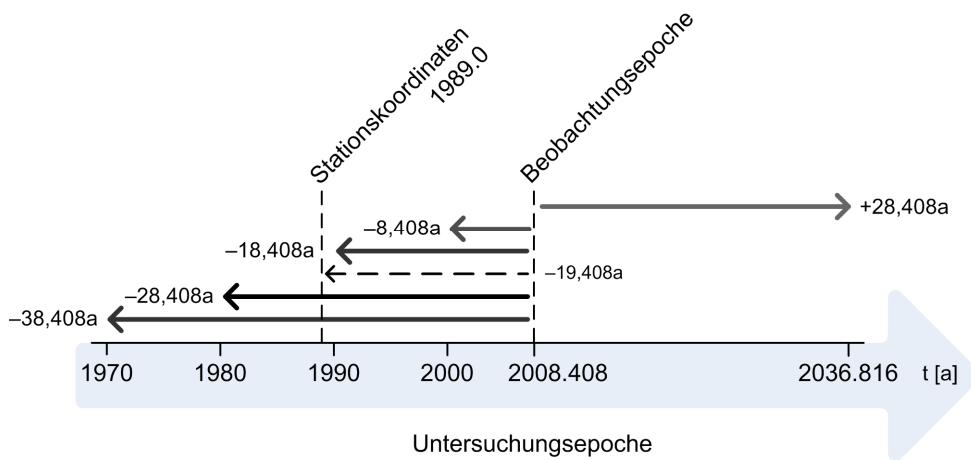
4.2.1 Ableitung eines GNSS-Zustandsraummodells

Für die Umsetzung zeitlicher Varianten im Simulationsmodell werden die Koordinaten der 30 Referenzstationen vorab in sechs Epochen transformiert. Damit ist es auf Basis identischer Daten möglich, SSR-Modelle für Zeitpunkte zu berechnen, die allein verschiedene Abstände zur Beobachtungsepoche 2008.408 aufweisen (Abbildung 4.2). Als einziger Unterschied verbleibt demnach die jeweilige Lage der Kontinentalplatte.

⁶ In der Wissenschaftstheorie *Ceteris-paribus-Klausel* (lat. „Alles andere bleibt gleich“) genannter Ansatz, der in einem Experiment neben der Manipulation der unabhängigen Variablen alle weiteren Einflüsse ausschließt.

Abbildung 4.2:

Zeitstrahl zum Zusammenhang zwischen Untersuchungs- und Beobachtungsepoche



Die Transformation der Stationskoordinaten vom ETRS89/DREF91 in das ITRF2005 geschieht mittels der von der AdV (2009) für Deutschland modifizierten 14 Parameter (Translationen, Rotationen, Maßstab sowie die zugehörigen Veränderungsraten) nach Boucher und Altamimi (2008). Mithilfe der sieben linearen Raten können die Parameter in jede gewünschte Epoche umgerechnet werden. Zur Überprüfung des in die Vergangenheit gerichteten Berechnungsansatzes, wird komplementär zur Epoche 1980.000 die Epoche 2036.816 eingerichtet. Die mit den Werten aus Tabelle 4.1 transformierten Stationskoordinaten werden zur Bestimmung der sechs SSR-Modelle in GNNET stochastisch fehlerfrei eingeführt.

Tabelle 4.1:

Transformationsparameter von ETRS89/DREF91 (1989.0) nach ITRF2005 (yyyy)

| Epoche | Δt [a] | T_1 [mm] | T_2 [mm] | T_3 [mm] | R_1 [mas] | R_2 [mas] | R_3 [mas] | S [ppb] |
|----------|----------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 1970.000 | -38,408 | 3,80 | -141,10 | 53,00 | 0,861 | -8,510 | 12,748 | -8,900 |
| 1980.000 | -28,408 | 5,80 | -142,10 | 71,00 | 1,671 | -3,610 | 4,828 | -9,700 |
| 1990.000 | -18,408 | 7,80 | -143,10 | 89,00 | 2,481 | 1,290 | -3,092 | -10,500 |
| 2000.000 | -8,408 | 9,80 | -144,10 | 107,00 | 3,291 | 6,190 | -11,012 | -11,300 |
| 2008.408 | 0 | 11,48 | -144,94 | 122,13 | 3,972 | 10,310 | -17,671 | -11,973 |
| 2036.816 | +28,408 | 17,16 | -147,78 | 173,27 | 6,273 | 24,230 | -40,170 | -14,245 |

Um einen optimalen Vernetzungsprozess zu erreichen, müssen die Koordinaten und die Beobachtungen in einem gemeinsamen Bezugssystem vorliegen. Hierzu werden dem Programm die Parameter zur Transformation von der jeweiligen Untersuchungs- in die Beobachtungsepoche 2008.408 aus Tabelle 4.2 mitgeteilt.

Tabelle 4.2:

Transformationsparameter von ITRF2005 (yyyy) nach ITRF2005 (2008.408)

| Epoche | Δt [a] | T_1 [mm] | T_2 [mm] | T_3 [mm] | R_1 [mas] | R_2 [mas] | R_3 [mas] | S [ppb] |
|----------|----------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 1970.000 | -38,408 | 7,68 | -3,84 | 69,13 | 3,111 | 18,820 | -30,419 | -3,073 |
| 1980.000 | -28,408 | 5,68 | -2,84 | 51,13 | 2,301 | 13,920 | -22,499 | -2,273 |
| 1990.000 | -18,408 | 3,68 | -1,84 | 33,13 | 1,491 | 9,020 | -14,579 | -1,473 |
| 2000.000 | -8,408 | 1,68 | -0,84 | 15,13 | 0,681 | 4,120 | -6,659 | -0,673 |
| 2008.408 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 2036.816 | +28,408 | -5,68 | 2,84 | -51,13 | -2,301 | -13,920 | 22,499 | 2,273 |

Deutlich sind die konstanten Zuwächse in den Werten zu erkennen, wobei das Vorzeichen zur Beobachtungsepoche 2008.408 wechselt. Lediglich hierdurch unterscheiden sich damit die Parameterwerte der Epochen 1980.000 und 2036.816.

Der für den Vernetzungsprozess gewählte Auswerteansatz hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität des erzeugten Zustandsraummodells. In GNNET ist es möglich, alle modellseitig relevanten Komponenten funktional und stochastisch zu parametrisieren. Der Berechnung der SSR-Modelle liegt der in Tabelle 4.3 dargelegte Ansatz zugrunde, der bereits für die Auswertung der Stationskoordinaten im ursprünglichen Projekt genutzt wurde. Notwendige Anpassungen sind das Festhalten der bekannten Stationskoordinaten und die Einführung zugehöriger Transformationsparameter in die Beobachtungsepoche 2008.408. Weitere Änderungen betreffen die drei in der Tabelle 4.3 gestrichelten Parameter, was in Kapitel 4.2.2 begründet wird.

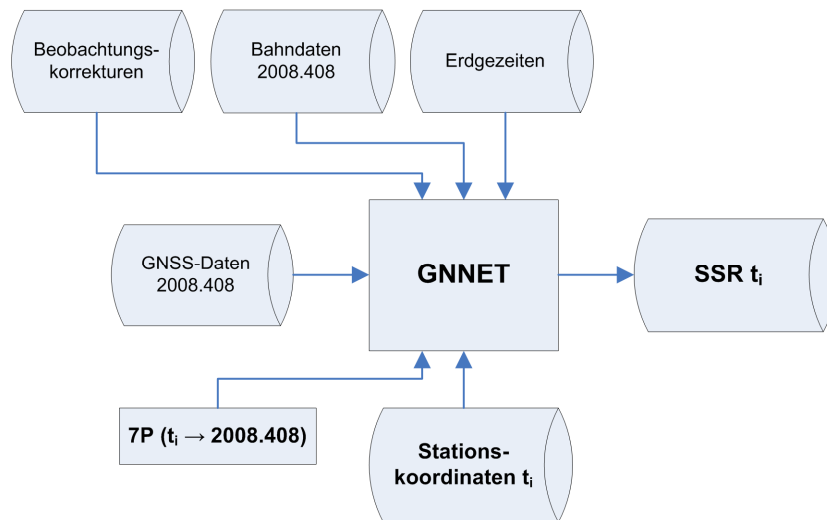
Tabelle 4.3:
Auswerteansatz und Parametrisierung im Referenzstationsnetz

| | | |
|---|----------------------|---|
| Beobachtungsauswahl | Signal | GPS L1+C/A L2+P(Y) ; GLONASS G1+C/A G2+P |
| | Intervall | Preprocessing 1s (GPS/GLO-L2 Bias), Processing 10s |
| | Elevationsmaske | 5° bzw. 8° (Mehrdeutigkeitssuche) |
| | Gewichtung | elevationsabhängig \cos^2z |
| | Datenumfang | 24h |
| Beobachtungskorrekturen | Bias | typkalibrierte GLONASS-Empfänger Bias |
| | Empfänger | individuelle Antennen PCV |
| | Satelliten | Typ Antennen PCV (igs05_1627.atx) |
| Bahndaten | Typ | Final orbits IGS (GPS, GLONASS) |
| Site Displacements | Gezeiten | Erdgezeiten, Polgezeiten (IERS) |
| | Auflasten | Oceanloading (Chalmers, FES2004) |
| Stationskoordinaten | Quelle | Netzlösung 11/2011 |
| | System | ITRF2005 (yyyy) transformiert nach ITRF2005 (2008.408) |
| | a priori Genauigkeit | fixed |
| Satelliten- und Empfängerparameter | Satellit | Uhrfehler und Bahnkomponenten, Laufzeitverzögerung, Phase Wind Up |
| | Empfänger | Uhrfehler und Laufzeitverzögerung |
| Atmosphäre | Troposphäre | Saastamoinen Troposphärenmodell, 3D-Polynomansatz (global), Niell MF mit adaptiver Optimierung <18° Elevation, vertikale Laufzeitverzögerung (stationsabhängig), Horizontalgradienten (alle Parameter getrennt nach Trocken- und Feuchteanteil) |
| | Ionosphäre | 2D-Polynomansatz (global), vertikale Laufzeitverzögerung SV-abhängig, stochastisch: individuell pro RCV/SV-Paar |
| Mehrdeutigkeiten | Linearkombination | simultane 2F-Ausgleichung (L_x) |

nach Feldmann-Westendorff und Westphal (2011)

Einen Überblick über den Ablauf der ersten Stufe des Simulationsmodells liefert Abbildung 4.3. Nur die Stationskoordinaten und die Transformationsparameter (7P) werden für die sechs Varianten (1970.000 bis 2036.816) geändert und beeinflussen das resultierende SSR-Modell. Alle übrigen Eingangsgrößen bleiben in jeder Epoche gleich.

Abbildung 4.3:
Flussdiagramm zur Stufe 1 im Simulationsmodell



Anmerkung: Der Prozess GNNET subsumiert das GNSMART-Modul GNREF.

Die strenge Auswertung von GNSS-Daten in einem Referenzstationsnetz stellt wegen ihrer hohen Komplexität einen rechenintensiven Prozess dar. Mit dem in Tabelle 4.3 dargestellten Auswerteansatz und dem beschriebenen Datenumfang von 30 Referenzstationen benötigt GNNET für die Berechnung eines SSR-Modells von 24 Stunden Umfang im Postprocessing ca. sieben Stunden Rechenzeit auf einem Multiprozessor-Rechner.

Die berechneten SSR-Modelle werden von GNNET stundenweise in Binärdateien abgelegt. Neben den Zustandsparametern etwa zur Ionosphäre und Troposphäre sind auch die Koordinaten sowie die eingeführten Transformationsparameter vom *Local Datum* (Geodätisches Datum) der Referenzstationen in den Referenzrahmen der Satellitenbeobachtungen gespeichert. Tabelle 4.4 zeigt die Startsequenz einer in den ASCII-Code umformatierten SSR-Datei am Tag 149 mit den Transformationsparametern vom ITRF2005 (1980.000) in das ITRF2005 (2008.408). Die sich anschließenden Veränderungsrate sind an dieser Stelle zu Null⁷ gesetzt, da sie bereits implizit in den Transformationsparametern enthalten sind. Die in der SSR-Datei gespeicherten Werte sind identisch mit denjenigen in Tabelle 4.2, jedoch in ihren Vorzeichen (Rotationen) und Zehnerpotenzen (Translationen und Maßstab) zur Verwendung in GNNET angepasst.

⁷ Die Transformation könnte hier alternativ durch Nutzung der Raten über die Bezugsepoche t_0 automationsgerechter formuliert werden. Als eher anschaulich für diese Arbeit wird jedoch die gewählte Vorausberechnung der Parameter erachtet (vgl. Tabelle 4.2).

Tabelle 4.4:

Ausschnitt aus der SSR-Datei MTH9149p.ssr

```

1481,313200.000,Generator,1,32130000
GNNET Nov 06 2010 23:55:27 (c) 1995-2010 Geo++ GmbH
GN_RUNBY unknown
1684,581270.4
$
1481,313200.000,Epoch Adjustment,2,32130000
1,618,970,1072,1
0.0020,0.0020,0.0020,0.0020,0.0020,0.0020
0.3393,0.3393,0.3393,0.3393,0.3393,0.3393
0.0
MTH92,000
0.0000,1.0000
00000001
$
1481,313200.000,Local Datum,1,32130000
ITRF05 80,ITRF05,2008.408,0.57,-0.28,5.11,-2.3010,-13.9200,22.4990,-0.227,1,0.000,
0.000,0.000,0.000000,0.000000,0.000000,0.000
$
1481,313200.000,Stations,3,32130000
0
0007,0000,+52.94797372,+012.39222395,0101.424,0e144280,00000000,00000000,00000000,
000000,000000,000000,000000
0017,0000,+53.06950933,+014.25821500,0061.006,0e0642c0,00000000,00000000,00000000,
000000,000000,000000,000000
0022,0000,+52.35617089,+014.54122324,0108.976,0e1642c0,00000000,00000000,00000000,
000000,000000,000000,000000
0097,0000,+51.83291844,+012.22837813,0128.051,0e1642c0,00000000,00000000,00000000,
000000,000000,000000,000000
[...]
```

(in ASCII-Code)

Zur Laufzeit von GNNET werden so genannte *Site Displacements*, also geometrische Verschiebungen der Stationen durch Gezeiten, Auflasten oder in diesem Fall auch durch die Transformation, bereitgestellt. Aufgrund der verwendeten Transformationsparameter stimmen sie mit der im ITRF2005 geschätzten Bewegung der Eurasischen Kontinentalplatte für das Untersuchungsgebiet sehr gut überein. Vergleicht man die in Tabelle 4.5 verzeichnete horizontale Geschwindigkeit pro Jahr mit dem aus den Daten des ITRF2005 berechneten Plattenbewegungsmodell APKIM2005 (DGFI 2012), so ergibt sich für den Koordinatenmittelpunkt des Netzes (51,1930° Lat. | 10,2508° Lon.) eine Abweichung von -0,09 mm/a. Neben der begrenzten Rechenschärfe können als weitere Ursache hierfür die erweiterte Modellbildung des APKIM2005 (Drewes 2009b) und die erwähnte Modifikation der Transformationsparameter von Boucher und Altamimi (2008) für die ETRS89-Realisierung im DREF91 in Deutschland (AdV 2009) angeführt werden.

Abbildung 4.4 visualisiert die Site Displacements aus Tabelle 4.5 für die Epoche 1980.000 stationsweise in Form von Vektoren. Gut zu erkennen ist die Richtung der Plattenbewegung nach Nordost. Die mittlere Abweichung der Kontinentalplatte von ihrer Lage zur Beobachtungsepoche 2008.408 beträgt im dargestellten Gebiet rund 70 cm. Sie variiert zwischen 670,5 mm im Nordwesten (HOE2) und 730,8 mm im Südosten (0294).

Tabelle 4.5:

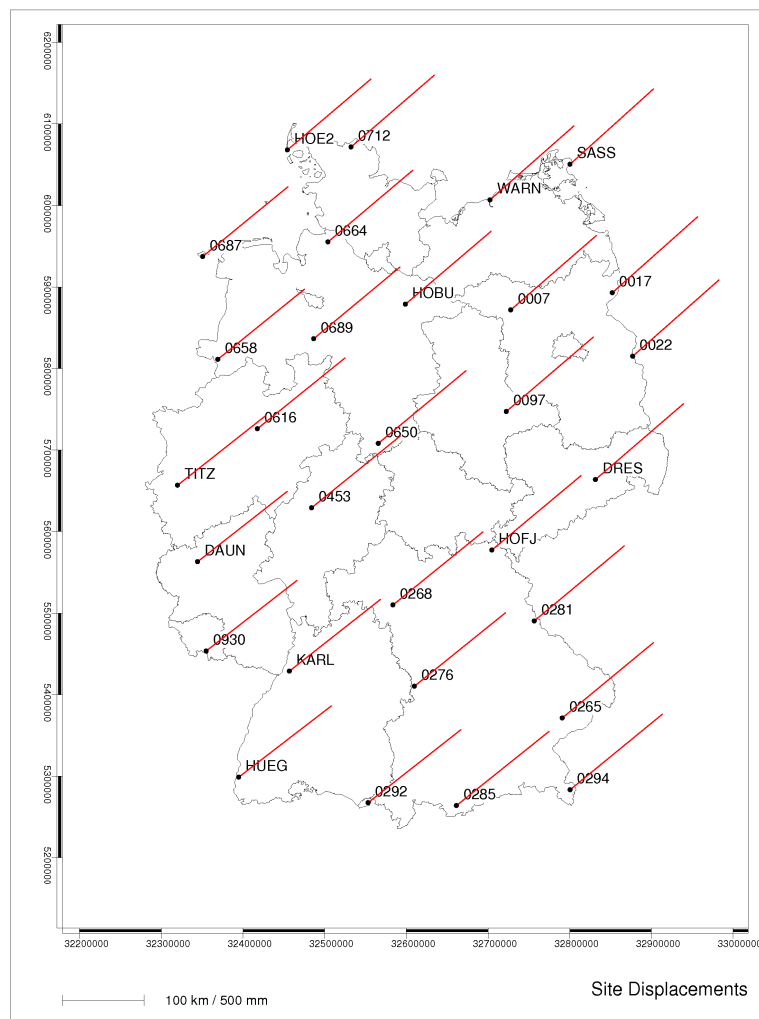
Mittlere Site Displacements der 30 Referenzstationen relativ zur Epoche 2008.408

| Epoche | Δt [a] | N [mm] | E [mm] | H [mm] | 3D [mm] | 2D [mm] | 2D [mm/a] |
|----------|----------------|---------|---------|--------|---------|---------|-----------|
| 1970.000 | -38,408 | 592,00 | 738,67 | 40,33 | 947,48 | 946,62 | 24,65 |
| 1980.000 | -28,408 | 437,77 | 546,30 | 29,90 | 700,70 | 700,06 | 24,64 |
| 1990.000 | -18,408 | 283,70 | 354,03 | 19,33 | 454,09 | 453,68 | 24,65 |
| 2000.000 | -8,408 | 129,50 | 161,80 | 8,83 | 207,43 | 207,24 | 24,65 |
| 2008.408 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2036.816 | +28,408 | -437,77 | -546,30 | -29,90 | 700,70 | 700,06 | 24,65 |

APKIM2005-DGFI 2D [mm/a] = 24,56 mm (DGFI 2012)

Abbildung 4.4:

Individuelle Site Displacements 1980.000 relativ zur Epoche 2008.408



Am Ende der ersten Stufe des Simulationsmodells liegen sechs SSR-Modelle in unterschiedlichen Lagerungen vor. Sie bilden die wesentliche Datengrundlage für die in der zweiten Stufe durchzuführenden Experimente.

4.2.2 Positionsbestimmungen in zeitlichen und räumlichen Variationen

Zur Analyse der Auswirkungen auf den Nutzer in einem heutigen Positionierungsdienst wird das Verfahren der *Virtuellen Referenzstation* angewandt (Wanninger 1997). Dabei werden künstliche GNSS-Beobachtungsdaten gewöhnlicher Weise im Beobachtungsraum berechnet und für einen beliebigen Ort im Referenznetz bereitgestellt. Dies geschieht für einen statischen GNSS-Rover in der Praxis in Bezug auf seine auf wenige Meter bekannte Näherungsposition, wobei ein zusätzlicher Abstand von ca. 5 km addiert wird. Der Rover ist damit veranlasst, Algorithmen für die Positionierung zu wählen, die entfernungsabhängige Restfehler in den Korrekturen berücksichtigen. Zum Abschluss des Verfahrens kann sich der Rover relativ zur VRS hochgenau positionieren. In dieser Arbeit werden die Beobachtungsdaten der VRS aus dem SSR-Modell heraus individualisiert und in den OSR überführt.

GNSMART bietet eine erweiterte Variante für kinematische GNSS-Rover, wie zum Beispiel Wasser- oder Luftfahrzeuge, an. Hierbei folgt die VRS dem Rover regelmäßig über seine zuletzt bekannte Position, um so den räumlichen Abstand gering zu halten und damit optimale Beobachtungen zu liefern (Wübbena et al. 2005). Ein einfacher Trick erlaubt es nun, genau diese Möglichkeit für räumlich variierende Positionsbestimmungen im Sinne des Simulationsmodells zu nutzen.

Abbildung 4.5:

Prinzip des Simulationsexperiments hinsichtlich räumlicher Variationen

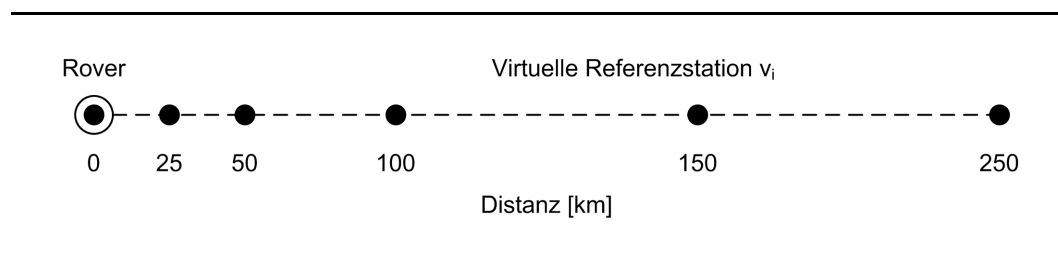
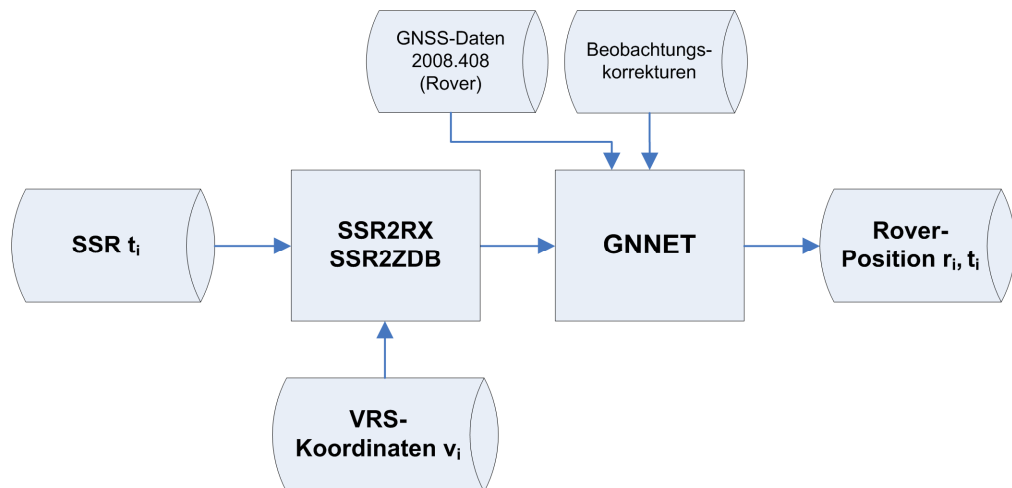


Abbildung 4.5 illustriert das Vorgehen, bei dem der Rover mit seinen realen Messungen statisch an seiner Position verbleibt. Für die erste Lösung wird die VRS herkömmlich für diesen Ort berechnet und eine Referenzposition für den Rover ausgewertet. Im Anschluss erfolgt eine Verlegung der VRS in die vier Haupthimmelsrichtungen auf in der UTM-

Abbildung definierten Abständen von 25 bis 250 km. Dadurch entsprechen die GNSS-Korrekturen (bzw. der Zustandsvektor im SSR-Modell) an jeder VRS denjenigen am Rover. Als Ergebnis kann die Auswirkung der zur Untersuchungsepoche (zeitlich) existierenden Abweichung der Bezugssysteme auf unterschiedliche Entfernungen (räumlich) zwischen einer Referenzstation und einem relativ hierzu messenden Rover bestimmt werden.

Der Programmablauf für die zweite Stufe des Simulationsmodells ist in Abbildung 4.6 dargestellt, die als Fortsetzung von Abbildung 4.3 gelesen werden kann. Die Module SSR2RX und SSR2ZDB transformieren die GNSS-Informationen aus dem Zustands- in den Beobachtungsraum. Bei jedem der 21 Durchläufe pro Rover-Position r_i und Epoche t_i entstehen VRS-Beobachtungsdaten für einen vorab definierten Ort v_i . Aus diesen und den realen GNSS-Daten erzeugt GNNET die zu vergleichenden Koordinatenlösungen.

Abbildung 4.6:
Flussdiagramm zur Stufe 2 im Simulationsmodell

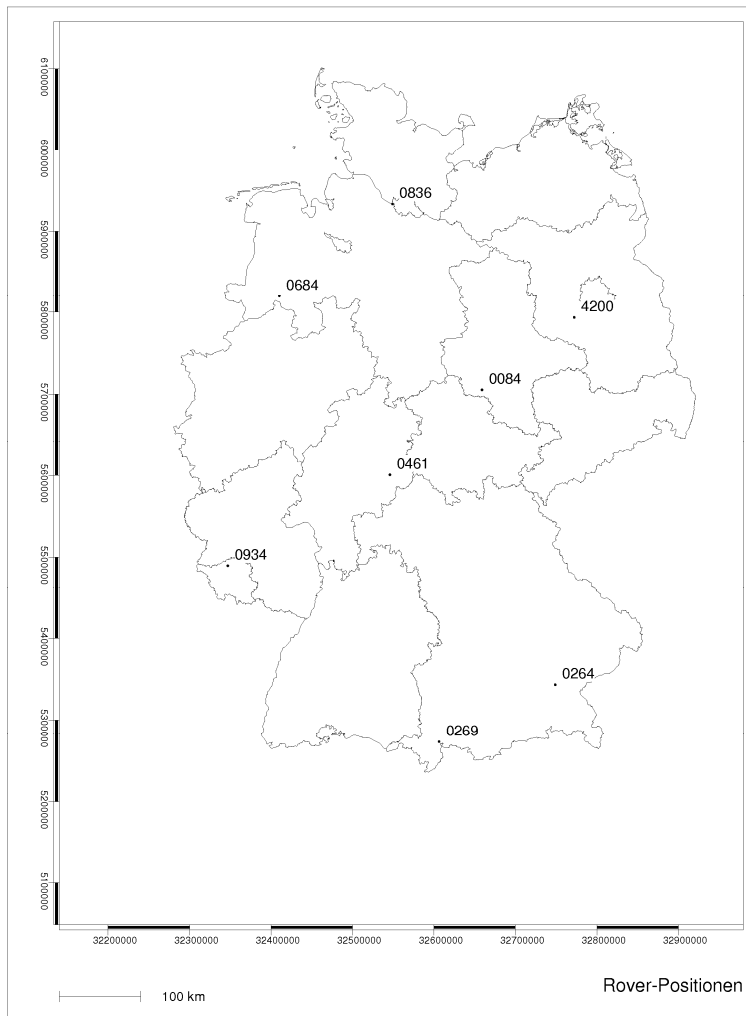


Anmerkung: Der Prozess GNNET subsumiert das GNSMART-Modul GNRT.

In der Erläuterung von Tabelle 4.3 wurde darauf hingewiesen, dass drei Parameter im Auswerteansatz der SSR-Modelle gestrichen werden mussten. Der Grund hierfür ist, dass das Modul SSR2ZDB beim Individualisieren des Modells für eine VRS zum Zeitpunkt der Auswertungen die Phasenzentrumsvariationen der Satellitenantennen sowie die Korrekturen der Polgezeiten und Ozeanauflasten noch nicht berücksichtigt hat. Da diese Fehleranteile zwar von geringerem Einfluss sind, beim Übergang vom SSR auf OSR aber nicht herausfallen, müssen sie im SSR-Modell zuvor vernachlässigt werden.

Das Experiment wird auf acht über das Untersuchungsgebiet verteilten GNSS-Stationen durchgeführt, die relativ zu einer VRS als Rover eines Nutzers in einem Referenzstationsnetz betrachtet werden können (Abbildung 4.7).

Abbildung 4.7:
GNSS-Stationen als Rover-Positionen im Untersuchungsgebiet



Auch für diese GNSS-Stationen sind hochgenaue Koordinaten aus der Projektlösung (vgl. Kapitel 4.1) bekannt. Im Simulationsexperiment werden jedoch nur relative Vergleiche von VRS-Lösungen untereinander durchgeführt, um unerwünschte Einflüsse von außen auszuschließen. Die externen Koordinaten sind zur Information in Tabelle 4.6 mitgeteilt.

Tabelle 4.6:

Projektkoordinaten der GNSS-Stationen (Epoche 2008.408)

| Station | E [m] | N [m] | h [m] |
|-------------------|---------------|--------------|----------|
| 0836 Hamburg-West | 32549188,0376 | 5933396,1853 | 50,6627 |
| 0684 Fürstenau | 32410260,7671 | 5819839,2588 | 100,9501 |
| 4200 Beelitz | 33362501,4619 | 5787778,9863 | 80,8028 |
| 0084 Sangerhausen | 32659079,3052 | 5705007,0959 | 208,9743 |
| 0461 Fulda | 32546000,5379 | 5600530,7997 | 355,3086 |
| 0934 Wadern | 32347061,0678 | 5489498,9416 | 354,9878 |
| 0264 Aschau | 33303091,8742 | 5341383,5353 | 505,7271 |
| 0269 Wertach | 32606410,4323 | 5273068,9541 | 955,4885 |

ITRF2005, UTM-Abbildung

Analog zur Berechnung der SSR-Modelle ist für die Bestimmung der Rover-Positionen ein adäquater Auswerteanatz festzulegen (Tabelle 4.7, vgl. Tabelle 4.3). Die Auswahl der Beobachtungsdaten entspricht einem halben Sternentag, so dass eine vollständige GPS-Satellitenkonstellation erreicht wird, und somit alle diesbezüglichen Effekte einmal bestmöglich erfasst werden. Ein Grundsatz des Experiments lautet, die Bedingungen bei der Auswertung möglichst gleichartig zu stellen. Aus diesem Grund wurde die Verwendung von GLONASS-Daten verworfen, da sie empfängerseitig nicht auf allen Rover-Positionen vorhanden gewesen sind.

Ein grundsätzliches Problem der Nutzung von Korrekturdatenmodellen ist die nicht perfekte Repräsentativität der physikalischen Bedingungen am Ort des Rovers. Deshalb ist es sinnvoll, ausgewählte Effekte in der Auswertung zu parametrisieren. In Tabelle 4.7 sind dies die Anteile der Troposphäre und der Ionosphäre, die getrennt für VRS und Rover geschätzt werden. Dies ist zudem angezeigt, weil die für das Experiment konzeptionell notwendige geometrische Ausdehnung auf Distanzen bis 250 km Entfernung (vgl. Abbildung 4.5) zur Folge hat, dass VRS und Rover identische Satelliten unter abweichenden Elevationswinkeln aufzeichnen, und die Einflüsse damit nicht als gleich vorausgesetzt werden können.

Die für die Auswertung verwendeten Bahndaten werden mit dem Modul SSR2RX aus den SSR-Modellen extrahiert (Abbildung 4.6). Sie entsprechen exakt den zum Messzeitpunkt verfügbaren Navigationsnachrichten des GPS (vgl. Bauer 2011, S. 234 ff.). Über die VRS-Daten transportiert, liegen in GNSMART alle SSR-basierten Korrekturdaten konsistent zu den Broadcast-Informationen des Nutzers vor. Dadurch werden Widersprüche in der Dateninterpretation insbesondere bei der praktischen RTK-Positionierung mit Messungen von unter einer Minute Dauer vermieden.

Tabelle 4.7:
Auswerteansatz und Parametrisierung für Rover

| | | |
|---|-------------------|--|
| Beobachtungsauswahl | Signal | GPS L1+C/A L2+P(Y) |
| | Intervall | 30s |
| | Elevationsmaske | 5° |
| | Datenumfang | 12h |
| Beobachtungskorrekturen | Empfänger | individuelle Antennen PCV |
| Bahndaten | Typ | Broadcast |
| Näherungskoordinaten⁸ | Quelle | SPS (autonom) |
| | System | WGS84 (G1150, 2008.408) |
| | Genauigkeit | 1-5 m |
| Satellitenparameter | Satellit | Code Bias |
| Atmosphäre | Troposphäre | vertikale Laufzeitverzögerung (stationsabhängig), getrennt für VRS und Rover, getrennt nach Trocken- und Feuchteanteil |
| | Ionosphäre | stochastisch: individuell pro RCV/SV-Paar |
| Mehrdeutigkeiten | Linearkombination | simultane 2F-Ausgleichung (L _x) |

4.2.3 Überprüfung der Validität des Simulationsmodells

Für das Simulationsmodell ist es wissenschaftlich geboten, seine Validität zu überprüfen. Nur so können am Ende aus den Experimenten belastbare Aussagen getroffen und Schlussfolgerungen gezogen werden.

Ein erster Test des Modells sieht dazu die Berechnung einer Rover-Position in allen sechs Untersuchungsepochen über eine VRS lokal an der GNSS-Station (*short baseline*) vor. Dabei wird die Rücktransformation in die Untersuchungsepoche t_i unterdrückt, so dass die berechneten Koordinaten in der Beobachtungsepoche 2008.408 verbleiben.

⁸ Für die Definition der verlegten VRS-Position gilt: System ITRF2005 (UTM-Abbildung) in den Abständen 25 bis 250 km ausgehend von der SPS-Position der lokalen VRS.

Die in Tabelle 4.8 notierten Ergebnisse zeigen systematische Differenzen von 0,2 mm in der Ost- und 0,3 mm in der Höhenkomponente. Es ist leicht zu erkennen, dass diese mit der Positionslösung in der Epoche 2008.408 verknüpft sind. Vermutlich handelt es sich hierbei um Resteinflüsse höherer Ordnung aus Fehleranteilen, die nicht vollständig konstant gehalten werden konnten. Darüber hinaus sind die Standardabweichungen der Koordinaten des Rovers vermerkt. Sie liegen mit rund 1 mm für die Lage und 3 mm für die Höhenkomponente im Erwartungsbereich für die Positionsbestimmung mittels einer VRS und des gewählten Auswertansatzes. Die Abweichungen der Rover-Koordinaten zu den Projektkoordinaten aus Tabelle 4.6 von 5,4 mm (E), 4,5 mm (N) und 1,8 mm (h) resultieren im Wesentlichen daraus, dass nur 12 der 48 im Projekt ausgewerteten Stunden Messdauer verwendet wurden.

Tabelle 4.8:
Rover-Position 4200 aus lokaler VRS

| Epoche | Δt [a] | E [m] ; dE [mm] | sE [mm] | N [m] ; dN [mm] | sN [mm] | h [m] ; dh [mm] | sh [mm] |
|---------------|----------------------------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|------------------------|----------------|
| 2008.408 | 0 | 33362501,4565 | 0,7 | 5787778,9818 | 0,9 | 80,8010 | 3,3 |
| 1970.000 | -38,408 | 0,2 | 0,7 | 0,0 | 1,0 | 0,3 | 3,3 |
| 1980.000 | -28,408 | 0,2 | 0,7 | 0,0 | 0,9 | 0,4 | 3,2 |
| 1990.000 | -18,408 | 0,2 | 0,7 | 0,0 | 0,9 | 0,3 | 3,3 |
| 2000.000 | -8,408 | 0,2 | 0,7 | 0,0 | 1,0 | 0,3 | 3,3 |
| 2036.816 | +28,408 | 0,2 | 0,7 | 0,0 | 0,9 | 0,3 | 3,3 |

ITRF2005, UTM-Abbildung

Der Test demonstriert, dass die SSR-Modelle gleichsam wirken und sich nur durch ihre epochenbezogene Lagerung unterscheiden. Dies gilt streng genommen nur am untersuchten Ort, kann jedoch für das gesamte Untersuchungsgebiet angenommen werden.

Das Simulationsmodell ist damit bezüglich der gestellten Forderung wirksam, aus allen zeitvarianten SSR-Modellen heraus vergleichbare Ergebnisse zu liefern. Im nächsten Abschnitt wird zusätzlich die VRS-Position als räumlich wirkende Variable variiert.

4.3 Simulationsexperimente

Auf Grundlage des entwickelten Simulationsmodells werden im Folgenden Berechnungen angestellt, die die vermuteten zeitlichen und räumlichen Variationen der Zielvariablen bestimmen sollen. Die Ergebnisse werden bewertet und mit unabhängigen Abschätzungen aus der Literatur verglichen.

4.3.1 Untersuchungen an einzelnen Stationen

Im ersten Teil der Untersuchungen wird die Auswertung der GNSS-Station 4200 (bei Potsdam) in allen Epochen nach der in Kapitel 4.2.2 (Abbildung 4.5) beschriebenen Methode räumlich variiert. Die Erwartung dabei ist, dass in der Beobachtungsepoche 2008.408 kein Einfluss der Bewegung der Kontinentalplatte vorhanden ist, da das grundlegende SSR-Modell hierin gelagert ist. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.9 dargestellt.

Tabelle 4.9:

Rover-Position 4200 aus räumlich variiert VRS (Epoche 2008.408)

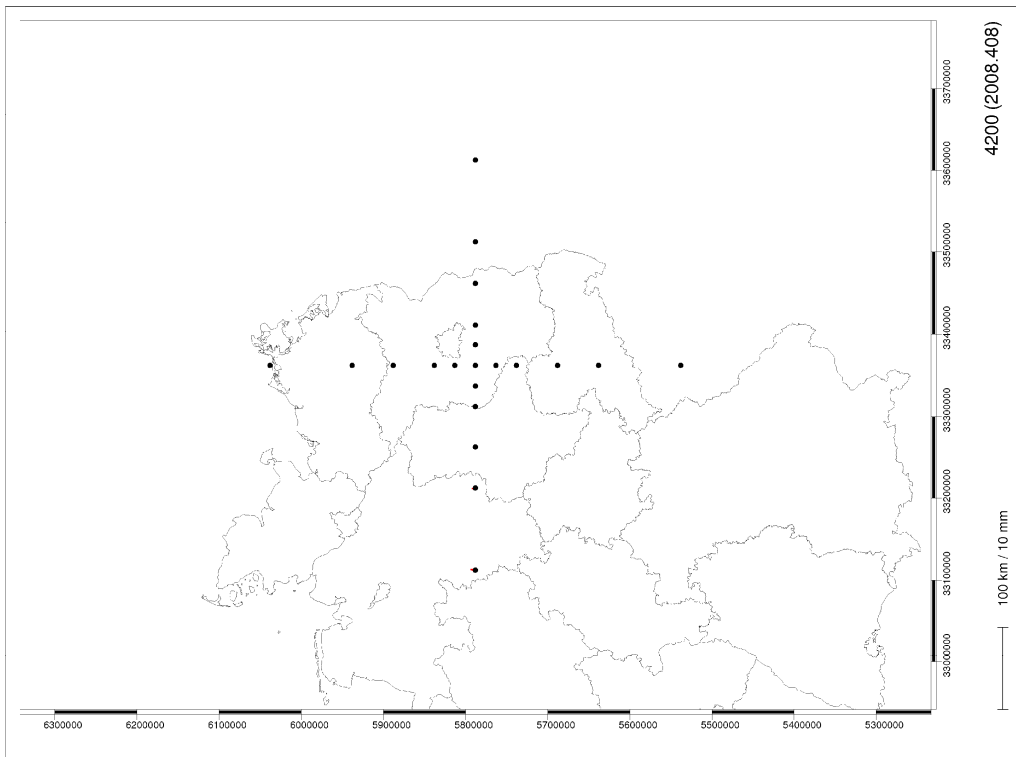
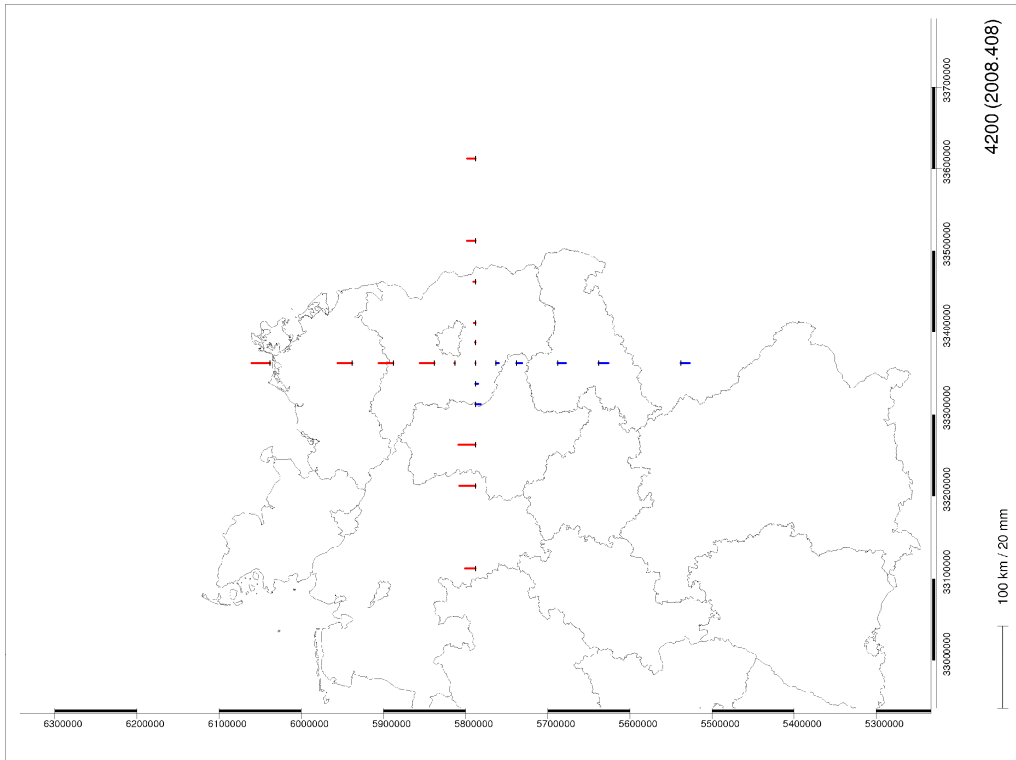
| | VRS-Position [km] | E [m] ; dE [mm] | N [m] ; dN [mm] | 2D [mm] | h [m] ; dh [mm] |
|--------------|-------------------|-----------------|-----------------|---------|-----------------|
| lokal | 0 | 33362501,4565 | 5787778,9818 | | 80,8010 |
| Nord | 25 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 0,1 |
| | 50 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 3,6 |
| | 100 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 3,5 |
| | 150 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 3,5 |
| | 250 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | 4,4 |
| Süd | 25 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,8 |
| | 50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,4 |
| | 100 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -2,1 |
| | 150 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,7 |
| | 250 | 0,2 | 0,0 | 0,2 | -1,2 |
| West | 25 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -0,7 |
| | 50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -1,2 |
| | 100 | 0,0 | 0,3 | 0,3 | 4,1 |
| | 150 | 0,0 | 0,6 | 0,6 | 3,9 |
| | 250 | 0,0 | 0,6 | 0,6 | 2,5 |
| Ost | 25 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| | 50 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,4 |
| | 100 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 |
| | 150 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 2,0 |
| | 250 | 0,0 | 0,3 | 0,3 | 2,0 |

ITRF2005, UTM-Abbildung

Die im 2D-Vektor vorhandenen Abweichungen von Null werden auf Resteffekte nicht perfekt modellierter Fehlereinflüsse zurückgeführt. Sie bleiben im Mittel mit 0,2 mm sehr gering. Größere Diskrepanzen zeigen sich dagegen in der Höhe. Es ist anzunehmen, dass sich hier die beiden im Korrekturdatenmodell nicht berücksichtigten Parameter Satellitenantennen-PCV und Ozeanische Auflasten ausdrücken, die vor allem vertikal wirken (vgl. Bauer 2011, S. 198). Die im GNSS geometrisch bedingt weniger robuste Höhenkomponente ist gegenüber Resteffekten, wie etwa aus der Troposphäre oder aus den Antennen-PCV, besonders anfällig.

In Abbildung 4.8 sind die Tabellenwerte an den VRS-Positionen angetragen, obwohl sie richtigerweise im Zentrum an der Rover-Position auftreten. Durch die in Kapitel 4.2.2 entwickelte Vorgehensweise gelingt es so jedoch, den funktionalen Zusammenhang im Experiment sichtbar zu machen. Die Abbildung zeigt die in der Auswertung der Rover-Position vorhandenen Resteffekte. Sie bleiben in der Lage mit maximal 0,6 mm vernachlässigbar gering, wirken in der Höhe aber bis zu 4,4 mm.

Abbildung 4.8 (gedreht):
Rover-Position 4200 (Epoche 2008.408)



UTM-Abbildung, Vektoren rot = positiv | blau = negativ, Maßstab rechts halbiert

Identische Berechnungen der Rover-Position 4200 liegen für alle vier weiteren Epochen vor. Im Detail werden hier stellvertretend die Ergebnisse der Epoche 1980.000 vorgestellt, bei der wegen des Zeitabstands von 28 Jahren bereits größere Widersprüche zu erwarten sind (Tabelle 4.10).

Tabelle 4.10:

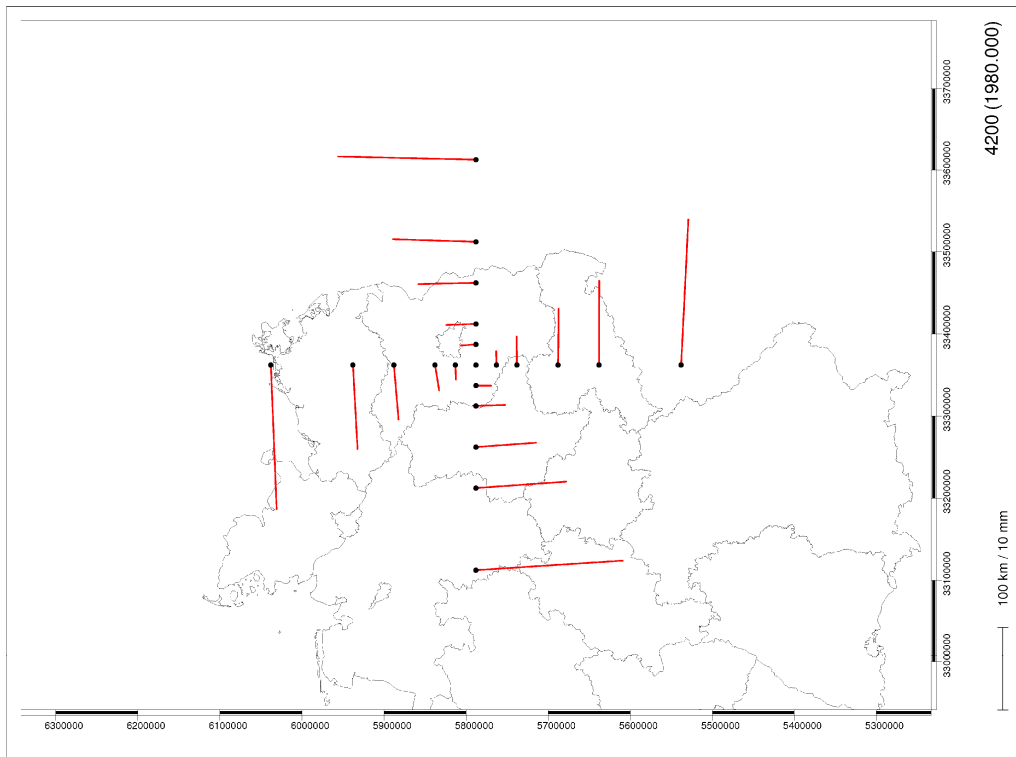
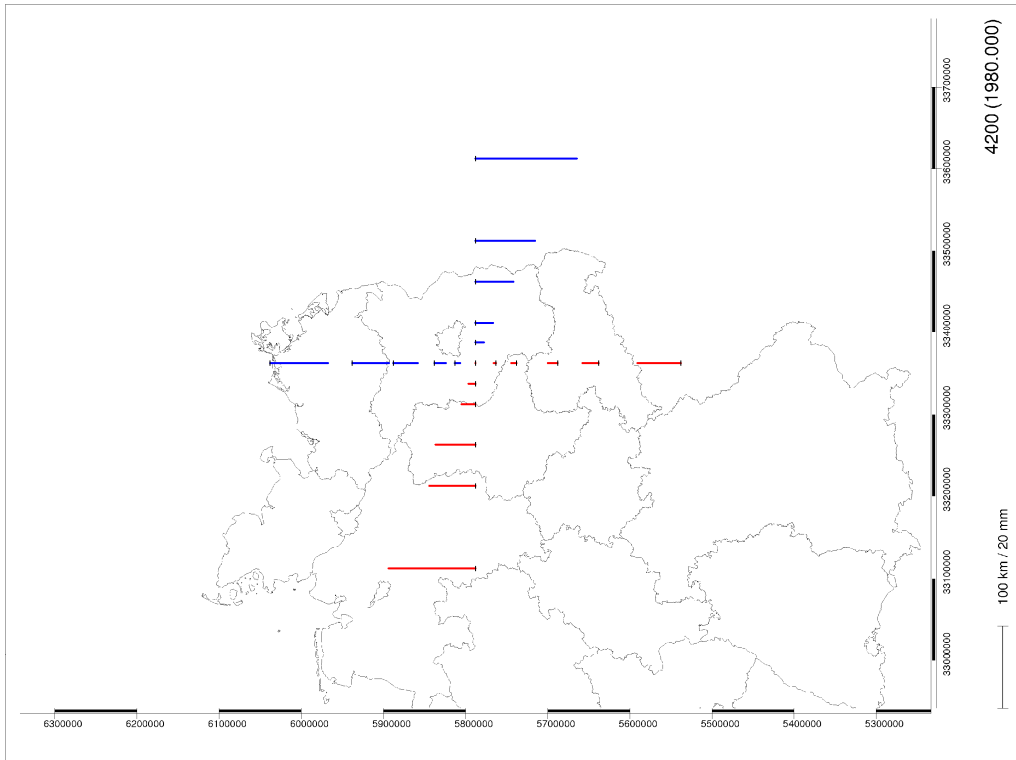
Rover-Position 4200 aus räumlich variiertes VRS (Epoche 1980.000)

| VRS-Position [km] | E [m] ; dE [mm] | N [m] ; dN [mm] | 2D [mm] | h [m] ; dh [mm] | |
|--------------------------|------------------------|------------------------|----------------|------------------------|-------|
| lokal | 0 | 33362500,8913 | 5787778,5668 | 80,7673 | |
| Nord | 25 | -1,7 | 0,0 | 1,7 | -1,3 |
| | 50 | -3,1 | -0,6 | 3,2 | -2,8 |
| | 100 | -6,7 | -0,5 | 6,7 | -5,9 |
| | 150 | -10,3 | -0,7 | 10,3 | -8,9 |
| | 250 | -17,7 | -1,4 | 17,8 | -14,1 |
| Süd | 25 | 1,7 | 0,2 | 1,7 | 0,6 |
| | 50 | 3,4 | 0,2 | 3,4 | 1,2 |
| | 100 | 6,8 | 0,1 | 6,8 | 2,3 |
| | 150 | 10,2 | 0,0 | 10,2 | 3,9 |
| | 250 | 17,6 | -1,2 | 17,6 | 10,5 |
| West | 25 | -0,1 | -1,9 | 1,9 | 1,6 |
| | 50 | 0,1 | -3,4 | 3,4 | 3,4 |
| | 100 | 0,4 | -7,5 | 7,5 | 9,6 |
| | 150 | 0,5 | -10,9 | 10,9 | 11,2 |
| | 250 | 0,3 | -18,0 | 18,0 | 21,2 |
| Ost | 25 | -0,1 | 1,8 | 1,8 | -2,1 |
| | 50 | -0,3 | 3,7 | 3,7 | -4,4 |
| | 100 | -0,4 | 7,1 | 7,1 | -9,3 |
| | 150 | -0,1 | 10,2 | 10,2 | -14,6 |
| | 250 | -0,7 | 17,0 | 17,0 | -24,7 |

ITRF2005, UTM-Abbildung

Tatsächlich liefert die Epoche 1980.000 signifikant größere Abweichungen. Sie belaufen sich in den Mittelwerten auf 8,0 mm für den 2D-Vektor. Darüber hinaus ist von der Rover-Position aus ein entfernungsabhängig zunehmender Einfluss zu erkennen. Dieser beträgt bei einer Distanz von 250 km zwischen Rover und VRS maximal 18,0 mm für die Lage und -24,7 mm für die Höhe.

Abbildung 4.9 (gedreht):
Rover-Position 4200 (Epoche 1980.000)



UTM-Abbildung, Vektoren rot = positiv | blau = negativ, Maßstab rechts halbiert

In Abbildung 4.9 ist ein augenfälliger Zusammenhang zwischen den Lagevektoren links und den Höhenvektoren rechts zu erkennen. Offensichtlich erzeugt die Transformation beim Übergang in den OSR eine signifikante Rotation und Verkipfung, die entsprechend der Anlage des Simulationsmodells ursächlich auf die Bewegung der Kontinentalplatte zurückzuführen ist.

Der Grafikvergleich zwischen den beiden Abbildungen 4.8 und 4.9 kann zusammengefasst wie folgt interpretiert werden:

Wird die Transformation aus dem aktuellen globalen in das fixierte kontinentale Bezugssystem in einem OSR-basierten Positionierungsdienst implizit über das Korrekturdatenmodell vorgenommen, so erfährt eine Positionslösung relativ zu einer Referenzstation einen zeit- und entfernungsabhängigen Lage- sowie zusätzlich richtungsabhängigen Höhenfehler.

Die Ergebnisse der Auswertung der GNSS-Station 4200 in den weiteren Epochen sind über alle vier Himmelsrichtungen für die Lage gemittelt in Tabelle 4.11 wiedergegeben. Deutlich ist der entfernungs- und zeitabhängige Zuwachs des Einflusses abzulesen. Weiter ist zu erkennen, dass die zu 1980.000 komplementäre Auswertung der Epoche 2036.816 zu nahezu identischen Ergebnissen führt. Dies untermauert die in Kapitel 4.2.3 aufgezeigte Validität des Simulationsmodells.

Tabelle 4.11:

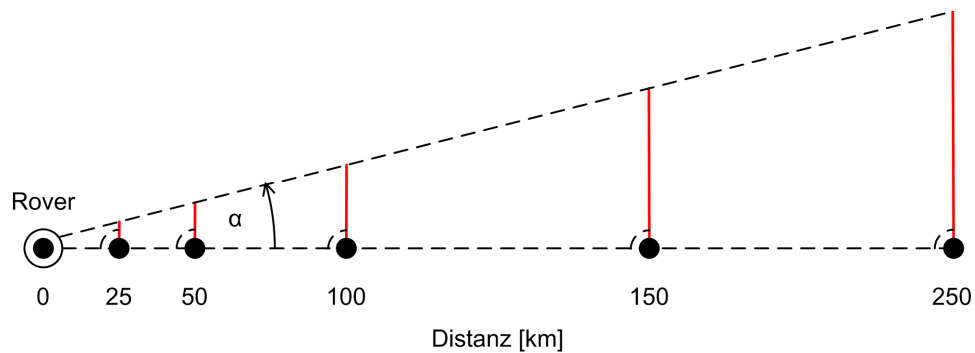
Mittlerer Lageeinfluss auf Rover-Position 4200 aus räumlich variiert VRS mit vier Richtungen pro Position

| Epoche | 1970.000 | 1980.000 | 1990.000 | 2000.000 | 2008.408 | 2036.816 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| VRS-Position [km] | 2D [mm] | | | | | |
| 25 | 2,4 | 1,8 | 1,1 | 0,5 | 0,0 | 1,7 |
| 50 | 4,7 | 3,4 | 2,2 | 1,0 | 0,1 | 3,6 |
| 100 | 9,5 | 7,0 | 4,4 | 2,1 | 0,2 | 7,3 |
| 150 | 14,1 | 10,4 | 6,6 | 3,0 | 0,3 | 10,6 |
| 250 | 23,7 | 17,6 | 11,2 | 5,0 | 0,3 | 17,7 |

Eine funktionale Darstellung kann über den Steigungswinkel α gefunden werden, der über die senkrecht zur Verbindung Rover – VRS stehenden Lageabweichungen berechnet wird. Das Prinzip ist in Abbildung 4.10 skizziert.

Abbildung 4.10:

Prinzip der Angabe der räumlichen Variation über einen Steigungswinkel



Die berechneten Steigungswinkel für die Lageabweichung sind pro Epoche zusammengefasst in Tabelle 4.12 enthalten.

Tabelle 4.12:

Steigungswinkel α auf Rover-Position 4200 aus räumlich variiertes VRS mit 20 gemittelten Positionen pro Epoche

| Epoche | 1970.000 | 1980.000 | 1990.000 | 2000.000 | 2008.408 | 2036.816 |
|---------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| α ["] | 0,0196 | 0,0144 | 0,0091 | 0,0042 | 0,0004 | -0,0146 |
| $s\alpha$ ["] | 0,0008 | 0,0006 | 0,0008 | 0,0006 | 0,0005 | 0,0009 |

Mit den Winkeln α_i aus Tabelle 4.12 ist es möglich, eine empirische Formel abzuleiten, die zur Fehlerabschätzung für beliebige Zeitpunkte und Entfernungen zur Referenzstation dient. Es ist zu beachten, dass diese Näherung streng nur für den durch die GNSS-Station 4200 abgedeckten Untersuchungsraum gilt. Im ersten Schritt wird eine lineare Regression nach der Methode der kleinsten Quadrate durch die Zufallsvariablen α_i (Steigungswinkel) an den Epochen t_i ($x_i = \text{Epoche } t_i - 2008.408$) berechnet. Es gilt das lineare Modell:

$$\alpha_i = a + bx_i + v_i \quad (4.1)$$

Die Ergebnisse der Schätzung lauten:

$$a = 0,01 \text{ mas} \pm 0,12 \text{ mas}$$

$$b = -0,509 \text{ mas/a} \pm 0,0048 \text{ mas/a}$$

Aus der Ausgleichung ergibt sich, dass der Parameter a statistisch nicht signifikant ist. Mit dem Ergebnis für den Parameter b kann über die Bogenformel eine Ableitung zur näherungsweisen Bestimmung des Betrages der *Lageabweichung* δ_L angegeben werden:

$$\delta_L = \left| 0,509 \text{ mas/a} \cdot \Delta_t \cdot d \cdot \frac{1}{\rho} \right| \quad (4.2)$$

mit

Δ_t Zeitdifferenz Beobachtungs- und Koordinatenbezugsepoche [a],

d Distanz Rover–Referenzstation [m],

ρ $2,0626 \cdot 10^8$ [mas].

Mithilfe dieser Formel kann der Lageeinfluss praxisorientiert für beliebige Zeitpunkte und Entfernungen berechnet werden. Ein Beispiel:

Man stelle sich im Juni 2012 einen Nutzer in einem Positionierungsdienst mit einer FKP-basierten RTK-Messung 25 km relativ zur nächsten Referenzstation vor. Der Dienst basierte auf Koordinaten im Bezugssystem ETRS89 (Epoche 1989.0), die für den Vernetzungsprozess in das aktuelle ITRF transformiert würden. Die Rücktransformation in das ETRS89 geschähe implizit über die Korrekturdaten im OSR. Es ergäbe sich nach Gleichung (4.2) eine Lageabweichung von $\delta_L = 1,4 \text{ mm}$.

Da die Höhenkomponente zusätzlich zur Entfernung richtungsabhängig variiert, können keine geeigneten Mittelwerte angegeben werden. Aussagekräftiger sind deshalb zunächst die Maximalwerte in Tabelle 4.13, die sich für die vier Himmelsrichtungen ergeben.

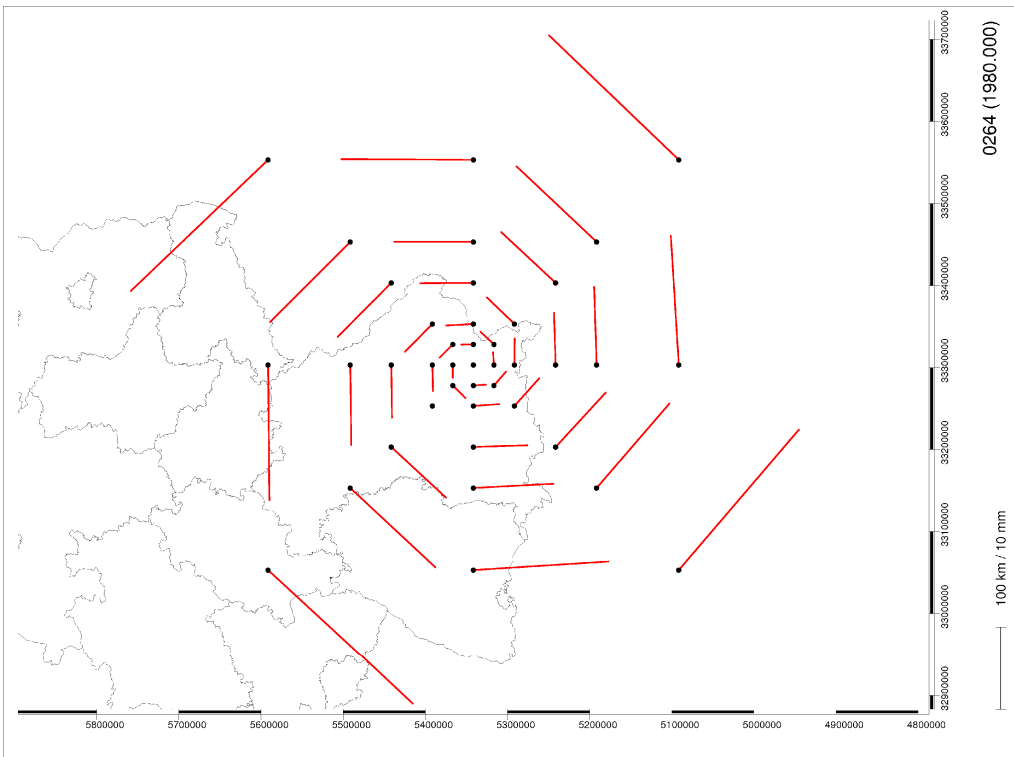
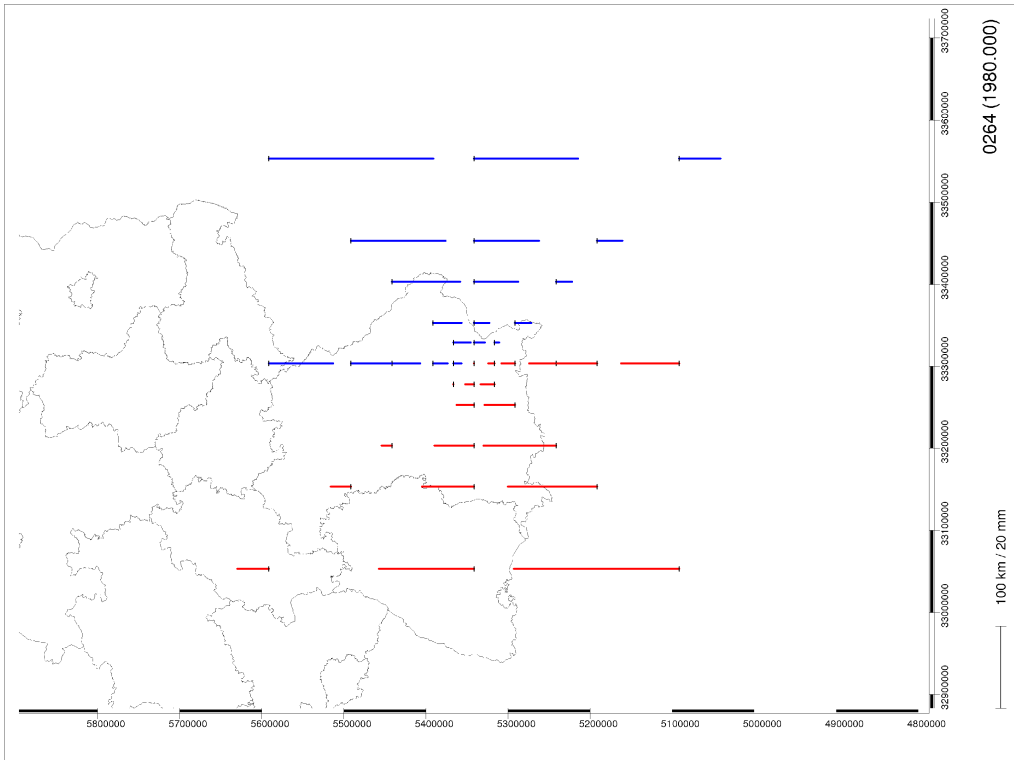
Tabelle 4.13:

Maximaler Höheneinfluss auf Rover-Position 4200 aus räumlich variiertes VRS

| Epoche | | 1970.000 | 1980.000 | 1990.000 | 2000.000 | 2008.408 | 2036.816 |
|--------------------------|-----|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| VRS-Position [km] | | 1D [mm] | | | | | |
| Ost | 250 | -32,4 | -24,7 | -16,7 | -8,9 | (2,0) | 22,9 |

Um die Zusammenhänge deutlicher herauszuarbeiten, wird das Experiment mit der GNSS-Station 0264 (Aschau am Inn) wiederholt. Zusätzlich zu den Haupthimmelsrichtungen erfolgt hier die Berechnung von VRS-Positionen in die vier Nebenhimmelsrichtungen (NO, SO, SW, NW). Die daraus berechneten Abweichungen sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

Abbildung 4.11 (gedreht):
Rover-Position 0264 (Epoche 1980.000)



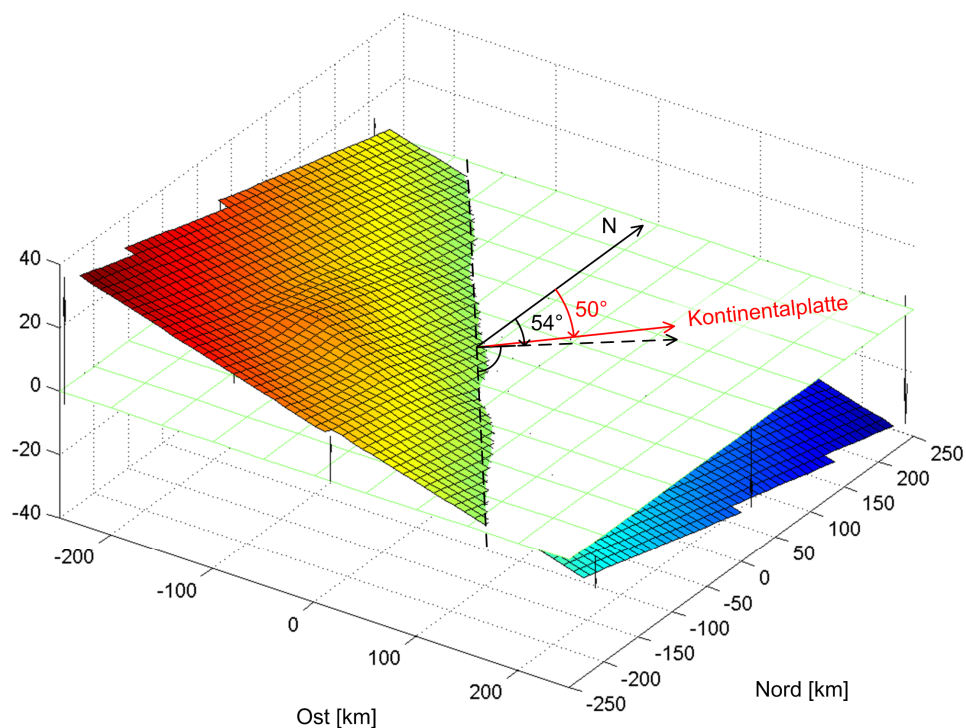
UTM-Abbildung, Vektoren rot = positiv | blau = negativ, Maßstab rechts halbiert

Im Vergleich zu Abbildung 4.9 erscheinen die Vektoren nahezu perfekt rotationssymmetrisch und damit geringer von Resteffekten aus der Auswertung behaftet. Dies kann mit einer besseren Qualität der Beobachtungsdaten auf der GNSS-Station 0264 begründet werden. Auf der linken Seite verlaufen alle Vektoren orthogonal zur Verbindungslinie Rover – VRS. Im rechten Bild ist eine von Nordwest nach Südost gedacht verlaufende Gerade zu erkennen, in der die aufgespannte Ebene geschnitten wird.

In einer weitergehenden Analyse wird nun eine Fläche durch die kombinierten Lage- und Höhenvektoren gelegt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.12 zu betrachten. Die Abweichungen in den äußeren Eckpunkten betragen $-40,1$ mm (NO), $-10,0$ mm (SO), $40,2$ mm (SW) und $7,7$ mm (NW).

Abbildung 4.12:

Ebene aus kombinierten Lage- und Höhenvektoren auf Rover-Position 0264 (Epoche 1980.000)



Die Fläche, die bis auf geringfügige Anomalien als Ebene bestimmt ist, schneidet die Untersuchungsebene in Punkt 0264 unter einem Azimut von 54° . Diese Richtung passt näherungsweise mit dem Azimut des Geschwindigkeitsvektors von $49,95^\circ$ in diesem Punkt überein, der dem Plattenbewegungsmodell APKIM2005 auf der Internet-Seite der UNAVCO (2012) entnommen werden kann.

Entsprechend zur Lageabweichung ist es möglich, den maximalen Höheneinfluss funktional zu beschreiben. Nach Abbildung 4.12 kann der größte Höhenfehler in einem Azimut von $54^\circ \pm 180^\circ$ erwartet werden. Da im Experiment Messwerte auf den Haupthimmelsrichtungen vorliegen, kann die maximale Höhenabweichung wie folgt approximiert werden:

$$d_{h \max} = -\frac{d_{h \text{ Nord}}}{\cos 54^\circ}, \quad d_{h \max} = -\frac{d_{h \text{ Ost}}}{\sin 54^\circ}, \quad (4.3)$$

$$d_{h \max} = \frac{d_{h \text{ Süd}}}{\cos 54^\circ}, \quad d_{h \max} = \frac{d_{h \text{ West}}}{\sin 54^\circ}. \quad (4.4)$$

Aus den so für die Rover-Position 4200 ermittelten maximalen Höhenabweichungen pro Epoche werden die in Tabelle 4.14 genannten Steigungswinkel β_i analog zu α berechnet.

Tabelle 4.14:

Steigungswinkel β auf Rover-Position 4200 aus räumlich variiertes VRS mit 20 gemittelten Positionen pro Epoche

| Epoche | 1970.000 | 1980.000 | 1990.000 | 2000.000 | 2008.408 | 2036.816 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| β ["] | 0,0260 | 0,0182 | 0,0107 | 0,0026 | 0,0016 | -0,0289 |
| $s\beta$ ["] | 0,0051 | 0,0057 | 0,0055 | 0,0048 | 0,0087 | 0,0106 |

Die für β_i mitgeteilten Standardabweichungen weisen eine deutlich abfallende Genauigkeit gegenüber α auf (vgl. Tabelle 4.12). Auffällig ist zudem die starke Abweichung der Epoche 2036.816 gegenüber 1980.000. Schließlich weicht die Beobachtungsepoche 2008.408 stärker vom Erwartungswert Null ab. Das insgesamt schlechtere Genauigkeitsniveau begründet sich in der höheren Aufnahme von Resteffekten in der Höhenkomponente.

Gleichwohl wird wiederum eine Regression analog nach Modellansatz (4.1) bestimmt, wobei diesmal zur Stützung zusätzlich die Bedingung $a = 0$ mas in die Ausgleichung eingeführt wird ($\beta_{2008.408} = 0$ mas). Das Ergebnis ist:

$$a = 0 \text{ mas}$$

$$b = -0,731 \text{ mas/a} \pm 0,0755 \text{ mas/a}$$

An der Standardabweichung und dem Intervall der Verbesserungen ist die gegenüber der Regression durch α_i um eine Zehnerpotenz schlechtere Genauigkeit ablesbar.

Es ergibt sich für die genäherte Bestimmung des Betrages der *maximalen Höhenabweichung* $\delta_{h \max}$:

$$\delta_{h \max} = \left| 0,731 \text{ mas/a} \cdot \Delta_t \cdot d \cdot \frac{1}{\rho} \right| \quad (4.5)$$

mit

Δ_t Zeitdifferenz Beobachtungs- und Koordinatenbezugsepoche [a],

d Distanz Rover–Referenzstation [m],

ρ $2,0626 \cdot 10^8$ [mas].

Damit kann das Beispiel von oben vervollständigt werden:

Der Nutzer wäre zusätzlich an einer präzisen Höhenbestimmung interessiert und möchte die für ihn maximal zu erwartende Höhenabweichung aufgrund der Rücktransformation in das ETRS89 wissen. Diese wäre nach Gleichung (4.5) unter einem Azimut von 54° mit $\delta_{h \max} = 2,1 \text{ mm}$ abzuschätzen.

Es verbleibt anzumerken, dass die minimale Höhenabweichung bei einem Azimut von ca. $144^\circ \pm 180^\circ$ vorhanden ist.

4.3.2 Ausdehnung des Experiments in die Fläche

Neben den Ergebnissen an einzelnen Stationen ist das Verhalten des Effekts in der Fläche von Interesse. Für diesen Teil der Untersuchungen werden zunächst die in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Berechnungen für die Epochen 2008.408 und 1980.000 auf sechs weiteren GNSS-Stationen wiederholt (vgl. Abbildung 4.7). Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.15 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 4.15:

Steigungswinkel α abgeleitet aus räumlich variiertes VRS mit 20 Positionen pro Rover

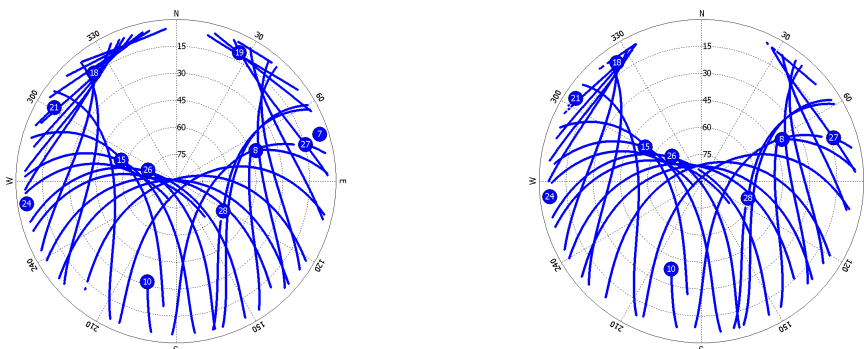
| Rover-Position | 0836 | 0684 | 4200 | 0084 | 0461 | 0934 | 0264 | 0269 |
|----------------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Epoche | α ["] | | | | | | | |
| 2008.408 | 0,0004 | 0,0014 | 0,0004 | 0,0009 | 0,0009 | 0,0005 | 0,0002 | 0,0001 |
| 1980.000 | 0,0154 | 0,0152 | 0,0144 | 0,0145 | 0,0149 | 0,0145 | 0,0132 | 0,0133 |
| $s\alpha_{1980}$ ["] | 0,0004 | 0,0008 | 0,0006 | 0,0014 | 0,0030 | 0,0006 | 0,0007 | 0,0005 |

Positionen sortiert von Nord nach Süd

Die sich aus Restfehlern ergebenden Abweichungen gegenüber dem Erwartungswert Null für die Epoche 2008.408 liegen im Mittel bei 0,0006 Winkelsekunden und können als Rauschen akzeptiert werden. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse für die Epoche 1980.000 eine breitenabhängige Verteilung von 0,0154" bis 0,0133". Neben der Möglichkeit nicht aufgedeckter Effekte höherer Ordnung ist eine wahrscheinliche Ursache hierfür in der ortsabhängigen Satellitengeometrie zu suchen. Diese wirkt differentiell klein auf die Qualität der erzielten Koordinatenergebnisse. Abbildung 4.13 visualisiert die unterschiedliche Satellitenabdeckung im selben Zeitraum von 12 Stunden.

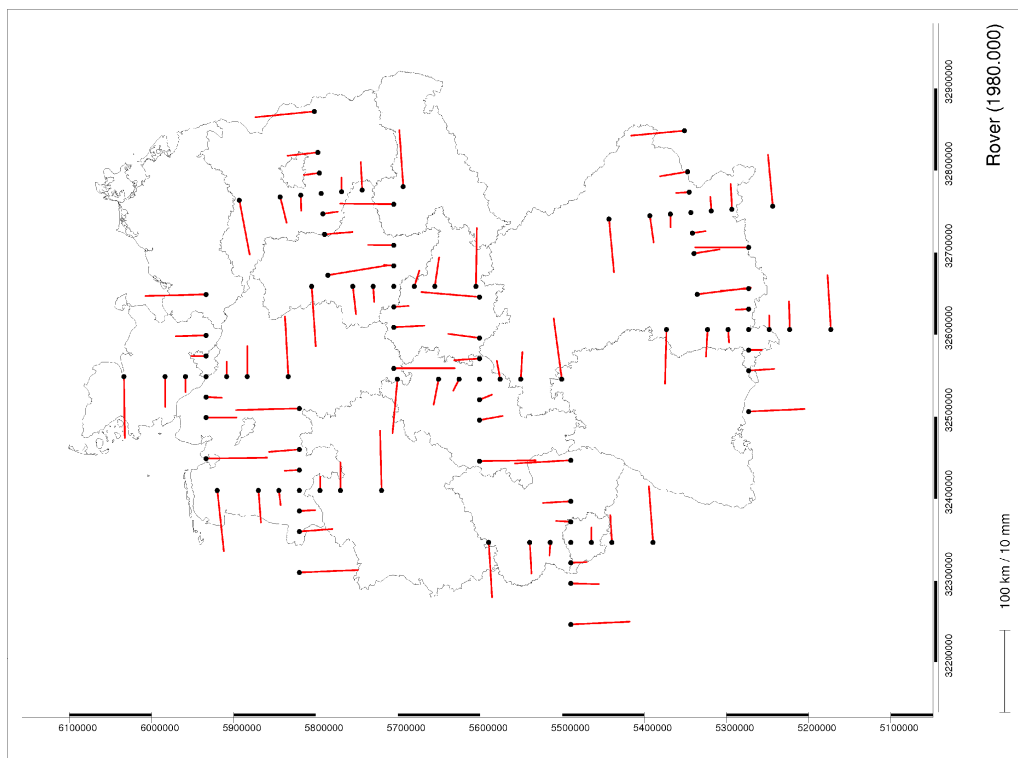
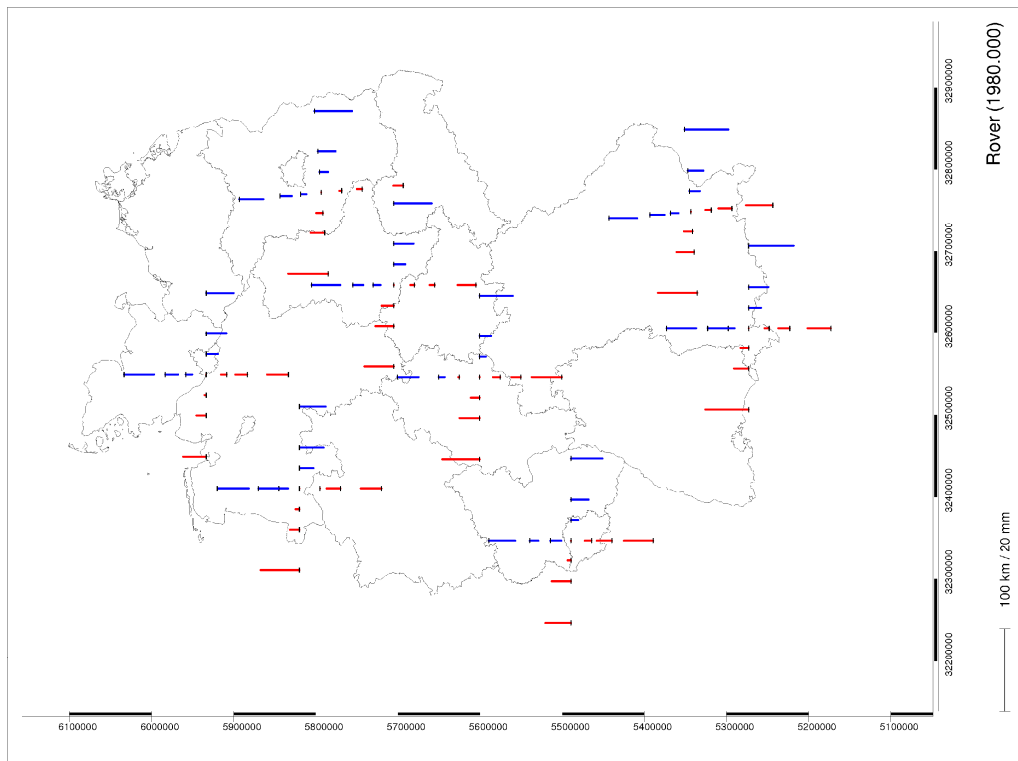
Abbildung 4.13:

GPS-Satellitengeometrie auf Rover-Position 0836 und 0269 (5° Elevation, DOY 149/150 2008)



Die Ergebnisse der Auswertung der Rover-Positionen werden in Abbildung 4.14 in einer Übersicht dargestellt. Wegen der unvermeidlichen Überschneidungen sind die VRS-Positionen nur bis 100 km enthalten. Sehr gut ist die flächenhafte Homogenität der Ergebnisse zu erkennen, die jedoch auch kleinere stationsabhängige Restfehler aufzeigt. Diese Ergebnisse stützen die Validität des Simulationsmodells dahingehend, dass die Ergebnisse einzelner Rover-Positionen im Untersuchungsgebiet an beliebigen anderen Orten im Rahmen der erzielbaren Genauigkeit reproduziert werden können.

Abbildung 4.14 (gedreht):
Übersicht über alle Rover-Positionen bis 100 km VRS-Distanz (Epoche 1980.000)



UTM-Abbildung, Vektoren rot = positiv | blau = negativ, Maßstab rechts halbiert

Die bisher genutzte Methode zur Darstellung des untersuchten Effekts an einem Einzelpunkt wird nun modifiziert. Ausgangspunkt ist eine zentral zwischen den untersuchten Stationen liegende VRS-Position (51,0045° Lat. | 9,6556° Lon.). Von dieser aus wird der Steigungswinkel α für jede Rover-Position individuell bestimmt (Tabelle 4.16).

Tabelle 4.16:
Steigungswinkel α abgeleitet aus zentraler VRS mit einer Position pro Rover

| Rover-Position | 0836 | 0684 | 4200 | 0084 | 0461 | 0934 | 0264 | 0269 |
|----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Epoche | α ["] | | | | | | | |
| 1980.000 | 0,0150 | 0,0148 | 0,0150 | 0,0159 | 0,0133 | 0,0145 | 0,0140 | 0,0140 |
| Distanz [km] | 283 | 217 | 268 | 126 | 50 | 256 | 368 | 382 |

Positionen sortiert von Nord nach Süd

Die Resultate in Tabelle 4.16 können wie folgt betrachtet werden: Verglichen mit den in Tabelle 4.15 aus 20 pro Rover-Position ausgewerteten Steigungswinkeln verbleibt eine maximale Abweichung von 0,0016 Winkelsekunden auf Station 0461. Der RMS aus dem Vergleich aller acht Stationen beträgt 0,0008". Die unterstellte Breitenabhängigkeit ist schon aufgrund der höheren Unsicherheit der Berechnung aus nur einer Position nicht erkennbar.

Besieht man die an den GNSS-Stationen auftretenden Lagefehler und vergleicht diese direkt mit der aus Gleichung (4.2) berechneten empirischen Lageabweichung δ_L , so ergeben sich die Zahlen in Tabelle 4.17:

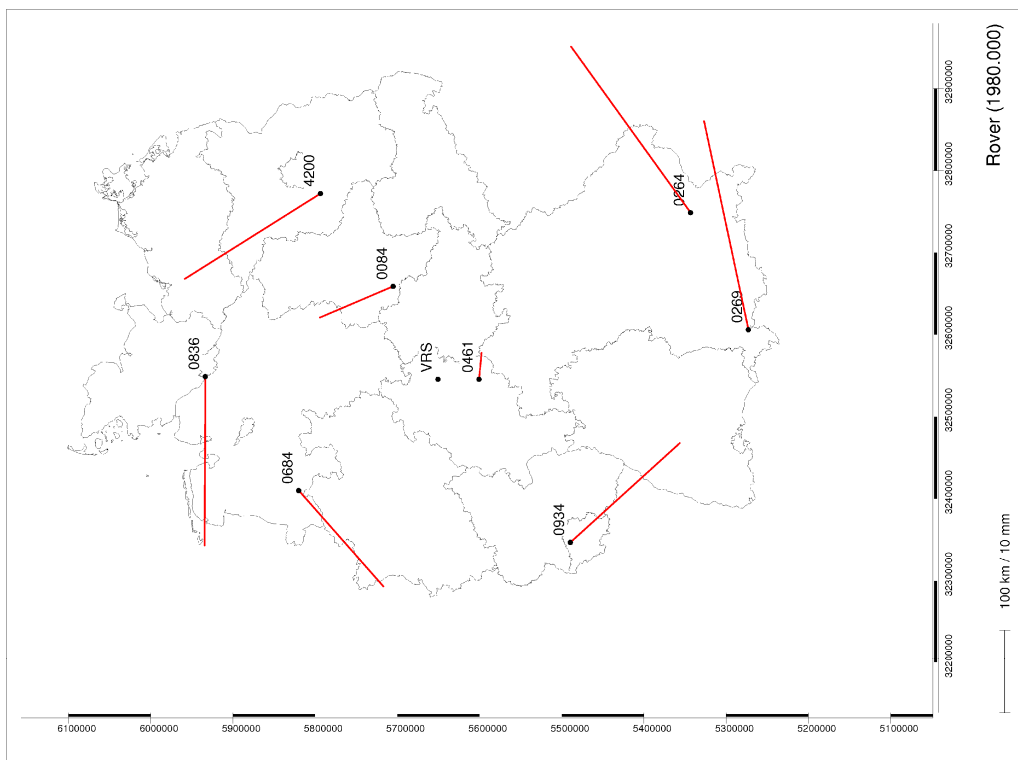
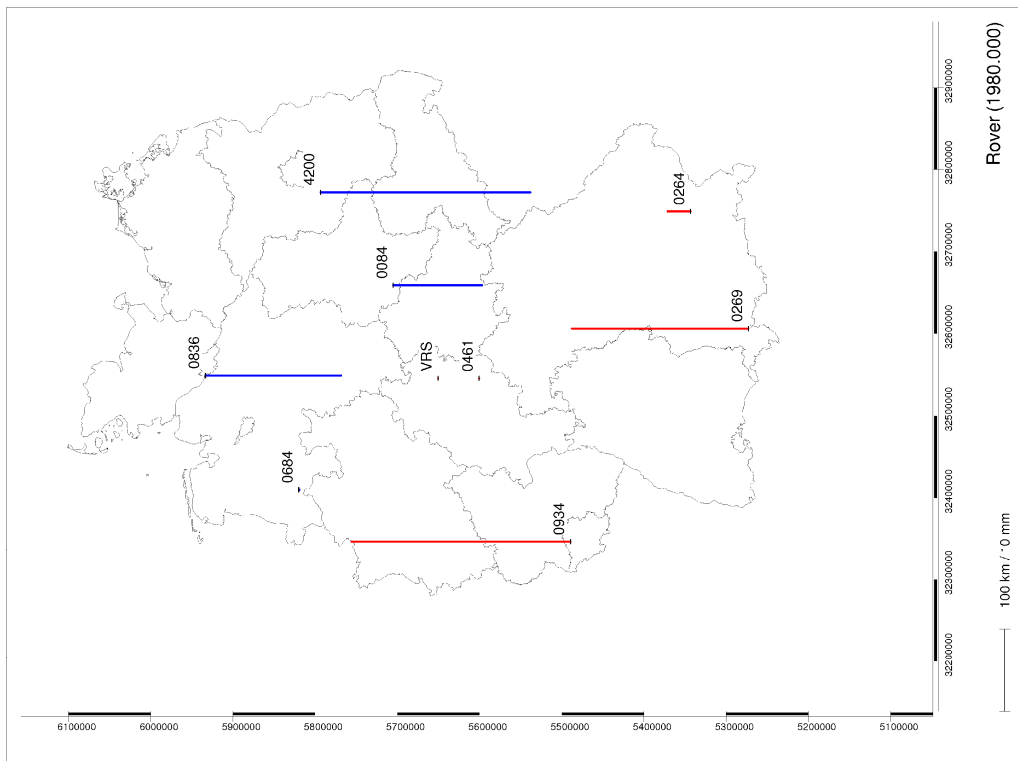
Tabelle 4.17:
Differenz zwischen gemessener und abgeschätzter Lageabweichung δ_L

| Rover-Position | 0836 | 0684 | 4200 | 0084 | 0461 | 0934 | 0264 | 0269 |
|-----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
| | δ_L [mm] | | | | | | | |
| Messung | 20,6 | 15,6 | 19,5 | 9,7 | 3,2 | 18,0 | 24,9 | 26,0 |
| Gleichung (4.2) | 19,8 | 15,2 | 18,7 | 8,8 | 3,5 | 17,9 | 25,8 | 26,8 |
| Differenz [mm] | 0,8 | 0,4 | 0,8 | 0,9 | -0,3 | 0,1 | -0,9 | -0,8 |

Der aus den Differenzen berechnete RMS beträgt 0,7 mm. Es zeigt sich, dass die empirische Formel (4.2) gute Abschätzungen für den Lagefehler δ_L liefert.

Abbildung 4.15 (gedreht):

Rover-Positionen in unterschiedlichen VRS-Distanzen (Epoche 1980.000)



UTM-Abbildung, Vektoren rot = positiv | blau = negativ

In Abbildung 4.15 (links) sticht wiederum das in der Lage rotationssymmetrische Verhalten um die zentrale VRS herum hervor. Die größte Abweichung misst 26,0 mm an der Station 0269. In der Höhenkomponente (rechts) ist ebenfalls wie in Abbildung 4.11 eine Schnittgerade zu erkennen. Die größte Höhenabweichung beträgt, durch die Kippung erzeugt, 26,6 mm auf der Station 0934.

Auch die Höhenfehler an den GNSS-Stationen können zur Überprüfung von Gleichung (4.5) direkt mit den Ergebnissen der maximalen Höhenabweichung $\delta_{h \max}$ verglichen werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf denjenigen Positionen, die sich gemeinsam mit der VRS in der Nähe des Azimuts (54°) der Plattenbewegung befinden (Tabelle 4.18).

Tabelle 4.18:

Differenz zwischen gemessener und abgeschätzter maximaler Höhenabweichung $\delta_{h \max}$

| Rover-Position | 0836 | 0684 | 4200 | 0084 | 0461 | 0934 | 0264 | 0269 |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| δ_h [mm] | | | | | | | | |
| Messung | 16,5 | 0,1 | 25,5 | 10,8 | 0,0 | 26,6 | 2,8 | 21,5 |
| $\delta_{h \max}$ [mm] | | | | | | | | |
| Gleichung (4.5) | 28,5 | 21,8 | 27,0 | 12,7 | 5,0 | 25,8 | 37,0 | 38,4 |
| Differenz [mm] | 12,0 | 21,7 | 1,5 | 1,9 | 5,0 | -0,8 | 34,2 | 16,9 |
| Azimut [°] | 1 | 321 | 58 | 64 | 180 | 231 | 171 | 147 |

Unter Ausnahme der Rover-Position 0934 liegen alle $\delta_{h \max}$ über den aus der Auswertung vorhandenen Höhenabweichungen δ_h . Das Azimut der GNSS-Station 0934 weicht mit 3° am geringsten von $54^\circ + 180^\circ$ ab. Die Differenz von $-0,8$ mm zwischen beiden Angaben fällt damit bereits in den Bereich der Unsicherheit der empirischen Formel. Trotzdem liefert offenbar auch diese Gleichung gute Näherungen für die zu erwartende Fehlergröße.

4.3.3 Zwischenbewertung

Die Ergebnisse der Simulationsexperimente weisen unter Annahme einer ausreichenden Validität des Modells darauf hin, dass die Bewegung der Eurasischen Kontinentalplatte spürbaren Einfluss auf die hochgenaue GNSS-Positionsbestimmung nimmt. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass die genutzten Korrekturdaten im Beobachtungsraum modelliert werden und eine Transformation dieser Korrekturen vom aktuellen globalen Referenzrahmen der Satellitenbahndaten ITRF_{yy} in das kontinentale Bezugssystem ETRS89 stattfindet. Genau das jedoch ist gegenwärtig in den standardbasierten Positionierungsdiensten der Fall – auch deshalb, weil die Arbeiten an einem internationalen Standard zur Übertragung von Korrekturdaten im Zustandsraum zurzeit noch andauern.

Die im Beispiel des vorherigen Abschnitts gewählte realistische Annahme von 25 km Distanz zwischen Referenzstation und Rover führt im Jahr 2012 zu einer systematischen Abweichung, die im Bereich von 1-2 Millimetern noch deutlich innerhalb der heutigen Gesamtgenauigkeit einer RTK-Lösung von 10-20 Millimetern liegt. Dementgegen wirken die in Zukunft zu erwartenden weiteren Genauigkeitssteigerungen einerseits und die kontinuierlich wachsende Diskrepanz zwischen den Bezugssystemen andererseits. Damit wird das Problem zunehmend größer und bedarf einer Lösung.

Abbildung 4.16:
Näherungsweise berechnete Lageabweichung δ_L bis zum Jahr 2025

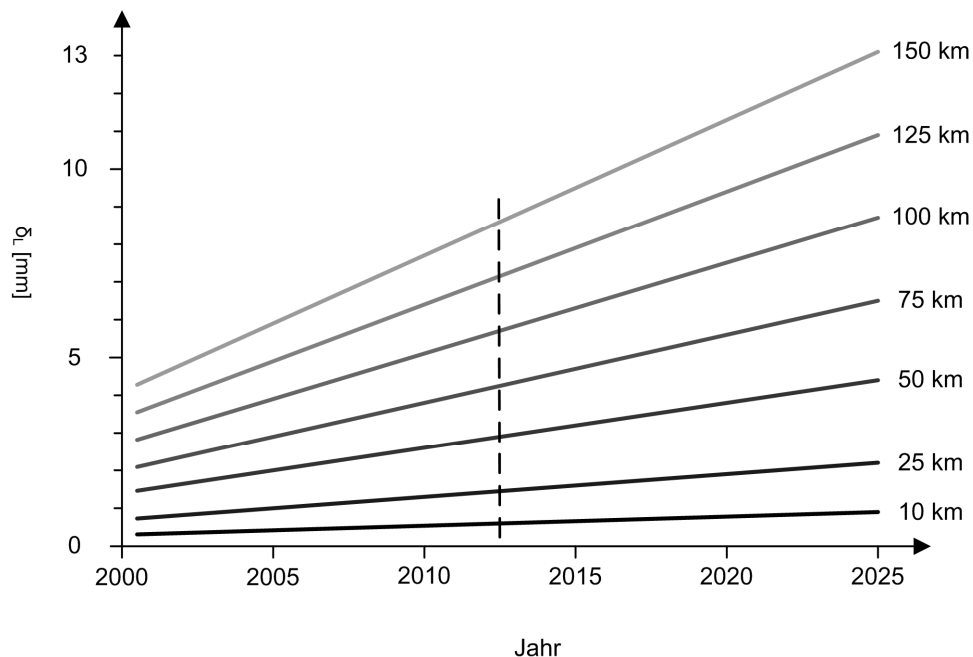
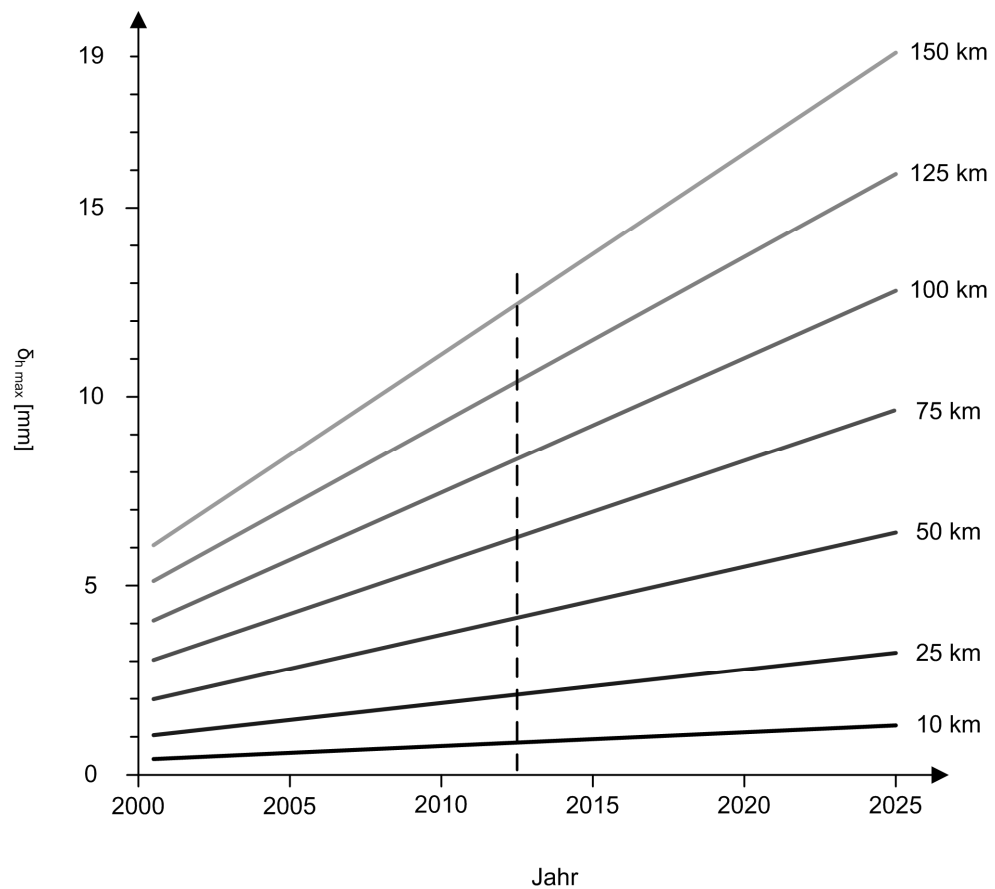


Abbildung 4.16 zeigt die Entwicklung der zunehmenden Lageabweichung δ_L bis 2025 für Entfernungen von 10 bis 150 km zwischen Referenzstation und Rover. Die gleichen Vorausberechnungen sind in Abbildung 4.17 für die maximale Höhenabweichung $\delta_{h \max}$ dargestellt. Die gestrichelte Linie markiert die Situation im Juni 2012. Beide Abbildungen dokumentieren das Ergebnis der Simulation in einer grafischen Kurzform.

Abbildung 4.17:

Näherungsweise berechnete maximale Höhenabweichung $\delta_{h \max}$ bis zum Jahr 2025



Die aufgezeigten Abweichungen müssen in Abhängigkeit des Verfahrens betrachtet werden, mit dem die Korrekturdaten an den Nutzer übertragen werden. Die in Kapitel 2.3.1 beschriebenen Konzepte FKP und MAC wirken unmittelbar, da der Rover die Beobachtungsdaten einer realen Station nutzt (nächste Referenzstation, bzw. Master-Referenzstation). Der Einfluss kann direkt im Diagramm abgelesen werden. Misst ein Rover nacheinander zu zwei diametral gelegenen Referenzstationen, so verdoppelt sich der Einfluss.

Bei einer VRS dagegen werden deren Daten im Beobachtungsraum aus mindestens drei benachbarten Stationen abgeleitet. Dies führt zu einem mittelbaren Einfluss, der nicht direkt im Diagramm abgelesen werden kann.

Abschließend steht der Vergleich mit Abschätzungen anderer Autoren aus. Die häufig in der einschlägigen Literatur zu findende Daumenregel (*Rule of Thumb*) von Wells et al. (1986) bezieht sich ursprünglich auf die Auswirkung eines Satellitenbahnfehlers auf eine Basislinie in der relativen Positionierung mit GPS. Sie soll die obere Schranke für den Betrag von d_b liefern und lautet:

$$\frac{\|d_b\|}{b} = \frac{\|d_r\|}{\rho} \quad (4.6)^9$$

mit

- d_r Satellitenbahnfehler [m],
- b Basislinienlänge [m],
- ρ Entfernung zum Satelliten [m],
- d_b Basislinienfehler [m].

Dabei wird der Satellitenbahnfehler d_r durch den Betrag der Plattenbewegung zwischen 1989 und 2012 substituiert. Zum Vergleich mit den beispielhaft berechneten Ergebnissen aus Kapitel 4.3.1 setzen wir $d_r = 23,5 \cdot 24,65 \text{ mm} = 0,58 \text{ m}$ sowie $b = 25\,000 \text{ m}$ und $\rho = 20\,000\,000 \text{ m}$. Als Resultat ergibt sich $d_b = 0,7 \text{ mm}$.

Beutler et al. (1988) schätzen den Einfluss aus der systematischen Abweichung (*bias*) der horizontalen Koordinaten der fixierten Stationen eines Netzes. Der resultierende Effekt ist demnach eine Rotation um eine horizontale Achse, die in der Ebene senkrecht zur Richtung der Koordinatenabweichung (Verschiebungsvektor) steht. Der Rotationswinkel beträgt (in Radiant):

$$\omega = \frac{1}{4} \cdot \frac{\sin^2 z_{\max}}{1 - \cos z_{\max}} \cdot \frac{\Delta_0}{\rho} \quad (4.7)^{10}$$

mit

- z_{\max} maximale Zenitdistanz zum Satelliten [m],
- Δ_0 Verschiebungsvektor [m],
- ρ Entfernung zum Satelliten [m].

⁹ Original-Notation nach Wells et al. (1986), Ch. 5.01 Requirements for accurate orbital information

¹⁰ Original-Notation nach Beutler et al. (1988), p. 37

Mit den Eingangswerten $z_{\max} = 85^\circ$, $\Delta_0 = 0,58 \text{ m}$ und $\rho = 20\,000\,000 \text{ m}$ ergibt sich ω mit $0,0016''$. Umgerechnet auf eine Distanz von 25 km zwischen Referenzstation und Rover resultiert daraus eine Höhenabweichung von $d_h = 0,2 \text{ mm}$.

Alle drei Ergebnisse befinden sich in der Größenordnung Millimeter. Die zum Vergleich herangezogenen Überschläge erbringen dabei geringere Abschätzungen, was erklärt werden soll:

Es ist zu beachten, dass die Arbeiten von Wells et al. (1986) und Beutler et al. (1988) lediglich ähnliche Problemstellungen behandeln und diese zudem rein geometrisch im Koordinatenraum betrachten. Darüber hinaus wurden sie vor über zwei Jahrzehnten für Einflussgrößen entwickelt, die damals deutlich größere Beträge annehmen konnten, als es beim vorliegenden Problem der Fall ist. Satellitenbahnfehler und Datumsunsicherheiten von 10 m und mehr gehören heute der Vergangenheit an.

Die eigenen, empirisch aufgebauten Untersuchungen dagegen umfassen zusätzlich die vielschichtigen Auswirkungen der Transformation im Beobachtungsraum. Aufgrund der vorhandenen Korrelationen zwischen den beteiligten physikalischen (z. B. Atmosphäre) und geometrischen Parametern (z. B. Satellitenbahnen) kommt es in der Auswertung dieser Daten zu Verstärkungen respektive Veränderungen der Effekte.

Dieser Unterschied ist ein wesentlicher Grund für die Entscheidung gewesen, das Problem in einem Simulationsmodell empirisch näher zu untersuchen.

5 Lösungsansatz für Positionierungsdienste

Nach der Zwischenbewertung der Simulationsergebnisse handelt es sich bei der Divergenz der Bezugssysteme um ein Problem, für das eine grundlegende Lösung gefunden werden soll. In Europa etablierte GNSS-Positionierungsdienste arbeiten in der Regel auf Basis nationaler Realisierungen des kontinentalen Bezugssystems ETRS89. Dabei benutzen sie zur Echtzeitübertragung von Beobachtungen und Korrekturen die Standards der US-amerikanischen Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM).

In Kapitel 5.1 wird eine kurze Einführung in den RTCM-Standard Version 3.1 mit Blick auf die Behandlung der Referenzsysteme gegeben. Im zweiten Abschnitt folgt die gegenwärtige Situation in ausgewählten Positionierungsdiensten (Kapitel 5.2). Einen Ansatz zur Lösung der aufgezeigten Bezugssystemproblematik zeigt Kapitel 5.3 auf.

5.1 RTCM Standard 10403.1

RTCM 10403.1, kurz RTCM 3.1, ist die aktuelle Version des vom *Special Committee 104* (SC-104) seit den 1980er Jahren entwickelten Standards für *Differential GNSS Services*. Hersteller und Dienstanbieter, öffentliche und private Institutionen definieren diesen Standard gemeinsam, um Interoperabilität in der Echtzeitübertragung von Beobachtungsdaten und -korrekturen herzustellen. Damit werden GNSS-Applikationen zu Wasser, zur Luft und zu Land unterstützt.

RTCM 3.1 liegt mit fünf Ergänzungen (*Amendments*) zuletzt vom Juli 2011 vor (RTCM 2011). Er enthält rund 50 verschiedene Nachrichtentypen, die unter effizienter Nutzung der regulär zur Verfügung stehenden Bandbreite GPS und GLONASS *Network RTK* für eine zentimetergenaue Positionsbestimmung in Echtzeit ermöglichen. Neben diesen auf den Beobachtungsraum bezogenen Nachrichten werden zurzeit ergänzende Typen entwickelt, um zukünftig Zustandsraumparameter transportieren zu können. Sie sind erforderlich, damit weitere GNSS (Galileo, COMPASS, ...) und zusätzliche Signaltypen (GPS L5, GLONASS G5, ...) bei begrenzter Übertragungsbandbreite für die hochgenaue Positionierung genutzt werden können. Diese Entwicklung ermöglicht in Zukunft ein standardbasiertes *PPP* (*Precise Point Positioning*) *RTK*.

RTCM 10403.1 - Amendment 1 (aus 2007) behandelt die *Coordinate Transformation Messages* (Entwicklung ab 2003). Sie erlauben dem Dienstanbieter die Übertragung von Parametern zur Koordinatentransformation von einem globalen erdfesten Referenzrahmen in ein lokales geodätisches Datum (z. B. DHDN oder MGI). Dabei werden globale (z. B. ITRF) und kontinentale an tektonische Platten gebundene Referenzrahmen (z. B. ETRF) bisher nicht scharf unterschieden. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass kontinentale Bezugssysteme als Ursprung der Dienste genutzt werden, und nur aufgrund von Deformationen innerhalb der Platte (z. B. durch postglaziale Landhebung oder anthropogene Einflüsse, wie extensiven Rohstoffabbau) Anpassungen vorzunehmen sind. Eine Lösung zur Einführung von globalen, zeitvarianten Koordinaten und deren Transformation in ein kontinentales Bezugssystem ist im RTCM 3.1 in die Zukunft verschoben (RTCM 2011, p. 3-71-C).

Abbildung 5.1:
Koordinatentransformation in RTCM 3.1

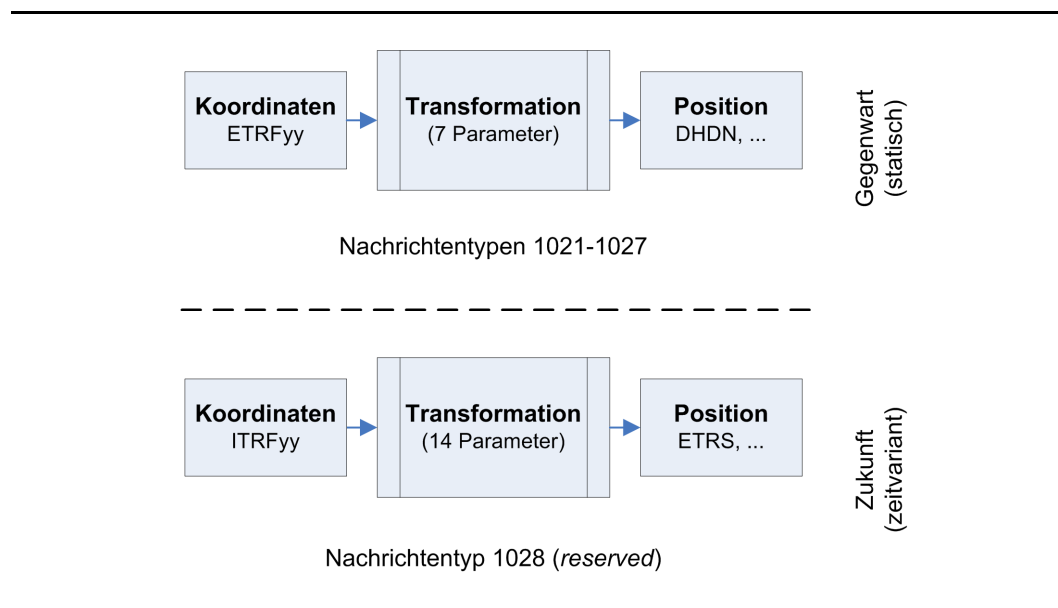


Abbildung 5.1 veranschaulicht die Situation. In der oberen Hälfte ist der heute in RTCM 3.1 implementierte Prozess zur Transformation von Koordinaten aus einem plattengebundenen Referenzrahmen in ein lokales Datum dargestellt. Der in der Grafik unten skizzierte Weg erlaubt in Zukunft die Transformation von einem globalen Referenzrahmen in das kontinentale Zielsystem. Diese kann der gegenwärtigen Transformation vorgeschaltet werden. Der für die Erweiterung notwendige Nachrichtentyp 1028 ist im Standard reserviert („Reserved for Global to Plate-Fixed Transformation“).

Ein weiterer Mangel von RTCM 3.1 ist die bislang fehlende Möglichkeit für einen Dienstanbieter, dem Rover innerhalb des Echtzeitdatenstroms explizit mitzuteilen, in welchem Referenzsystem er originär arbeitet (z. B. ETRS89). Diese Information wird dem Nutzer bisher nur durch externe Metadaten (z. B. Produktblätter) bereitgestellt.

Die Untersuchungen in dieser Arbeit zeigen, dass es insbesondere bei Korrekturdatenmodellen im Beobachtungsraum sinnvoll ist, die Prozessierung in einem Positionierungsdienst originär im Referenzrahmen der Satelliten laufen zu lassen. Dies ist jedoch nur dann effizient möglich, wenn eine zeitvariante Transformation in ein kontinentales Bezugssystem formuliert werden kann.

5.2 Situation in ausgewählten Diensten

Am Beispiel der staatlichen Positionierungsdienste APOS, SAPOS[®] und swipos wird die Situation zur Nutzung der Bezugssysteme bei europäischen *Service Providern* erläutert. Die folgenden Angaben sind den Quellen APOS (2010), SAPOS (2011) und swipos (2008) entnommen:

Der Austrian POSitioning Service (APOS) bietet für hohe Genauigkeiten in Echtzeit (Standardabweichung 15 mm (2D) ; 40 mm (1D)) den Dienst APOS-RTK an. Die Korrekturdaten werden im Standard RTCM 3.1 als VRS oder über MAC bereitgestellt. Eine Transformation vom ETRS89 in das staatliche österreichische Bezugssystem MGI kann standardkonform genutzt werden. Koordinatengrundlage des Dienstes bildet das Bezugssystem ETRS89 in einer Realisierung aus dem Jahr 2002.

Im Gegensatz zu APOS und swipos ist SAPOS[®] als Satelliten-Positionierungsdienst der deutschen Landesvermessung föderal organisiert. Die Netzwerke der Bundesländer arbeiten auf Grundlage einer homogenen ETRS89-Realisierung (ETRS89/DREF91). Für den hochpräzisen Echtzeit-Positionierungsservice HEPS wird eine Genauigkeit von 10-20 mm für die Lage- und 20-30 mm für die Höhenkomponente angegeben. Grundlage sind über RTCM 3.1 die Vernetzungsrepräsentationen VRS und MAC. Transformationen in klassische amtliche Bezugssysteme werden in einigen Ländern¹¹ über die RTCM-Nachrichtentypen angeboten (vgl. Abbildung 5.1 oben). SAPOS[®] ist Mitglied des RTCM SC-104.

¹¹ Der überwiegende Teil der Bundesländer hat sein amtliches Lagebezugssystem bis Mitte 2011 bereits auf das ETRS89 in UTM-Abbildung umgestellt, vgl. Adv (2011) und Kreitlow et al. (2010).

Mit dem Dienst swipos-GIS/GEO bietet der Swiss Positioning Service (swipos) über das VRS-Konzept und RTCM 3.1 eine Genauigkeit von 20 mm (2D) und 40 mm (1D) Standardabweichung. Die Ergebnisse können in das lokale System LV95 transformiert werden. Der Dienst setzt auf das Bezugssystem CHTRS95 auf, das zum Zeitpunkt 1993.0 identisch mit dem ETRS89 festgelegt wurde.

Private Service Provider, wie zum Beispiel Trimble® VRS Now™, arbeiten technisch grundsätzlich vergleichbar zu den staatlichen Einrichtungen. Allerdings bieten sie neben RTCM teilweise auch proprietäre Schnittstellen an.

Alle drei beschriebenen Dienste nutzen den Standard RTCM 3.1 und betreiben ihre Vernetzung auf Basis der nationalen ETRS89-Realisierungen. Das Problem der Divergenz der Bezugssysteme wird dabei, wie im Beispiel in Kapitel 4.3.1 beschrieben, umgangen: Die Koordinaten der Referenzstationen werden vor dem Vernetzungsprozess in das aktuelle ITRF transformiert und die Rücktransformation in das ETRS89 implizit, jedoch zunehmend fehlerbehaftet über die Korrekturdaten umgesetzt. Sinnvoller erscheint es dagegen, die ohnehin vorgesehene Erweiterung des Standards um Nachrichtentyp 1028 voranzutreiben (vgl. Abbildung 5.1 unten).

5.3 Erweiterung des RTCM Standards

Im Jahr 2011 brachte Schmitz (2011) im RTCM SC-104 Anmerkungen und Vorschläge zu den Transformationsnachrichten des RTCM 3.1 ein. Dabei wurde der Bedarf nach einer Referenzsystem-Nachricht angemeldet, wie sie in Kapitel 6.1 erwähnt ist. Sie soll das „*RTCM Service CRS System*“ transportieren und damit unter anderem SSR-Nachrichtentypen referenzieren.

Zur Lösung des Problems der Divergenz der Bezugssysteme trägt die Forderung nach Umsetzung des Nachrichtentyps 1028 bei. Dazu werden zwei Alternativen diskutiert:

- Regelmäßig aufdatierte Transformationsparameter oder Koordinaten,
- feste Transformationsparameter und zugehörige Veränderungsdaten.

Als Vorteil der ersten Möglichkeit wird angeführt, dass sie grundsätzlich mit bereits vorhandenen Nachrichtentypen betrieben werden könnte. Allerdings würden dem Nutzer damit in kurzen Abständen (täglich, wöchentlich, ...) wechselnde Transformationsparameter oder Koordinaten zugemutet, die zudem von der Software des Rovers korrekt ausgewertet werden müssten.

Eher geeignet scheint deshalb die zweite Option zu sein, bei der die festen Parameter vorteilhaft mit einer langen Gültigkeitsdauer (maximal diejenige des zutreffenden ITRF) ausgestattet wären. Unabhängig davon wird es Mischungen geben müssen, um Übergangsweise auch ältere, nicht kompatible Rover bedienen zu können.

RTCM erarbeitet als Nonprofit-Organisation seine Standards offen und mehrheitsbasiert, so dass alle Mitglieder ausreichend Einfluss auf das Ergebnis nehmen können. Daraus folgt ein entsprechender Aufwand an Kommunikation und Zeitdauer des Verfahrens. Ein Umsetzungsplan zur Erweiterung des Standards könnte unter optimistischen Annahmen etwa wie folgt aussehen (Tabelle 5.1):

Tabelle 5.1:

Vorschlag für einen Umsetzungsplan zur Erweiterung von RTCM 3.1

| Zeitpunkt | Aktivität | Akteur |
|---------------|--|---|
| 2012 Herbst | Proposal in SC-104 | z. B. Provider |
| 2013 Frühjahr | Entwicklung der Nachrichtentypen (1028, ...) | SC-104 WG Transformation |
| 2013 Sommer | Interoperabilitätstests | Soft- und Hardware-Hersteller, Provider |
| 2013 Herbst | Verabschiedung eines Amendments | SC-104 |
| ab 2014 | Einführung | Provider und Nutzer |

Neben den Aktivitäten des Standardisierungsgremiums ist es wichtig, weitere Vorarbeiten zur anschließenden Einführung in den Positionierungsdiensten zu leisten. So sind staatliche Anbieter gefordert, alle ihrerseits notwendigen administrativen Voraussetzungen zur Nutzung neuer Standards zu schaffen. Im Falle von SAPOS[®] würde dies beispielsweise die Abstimmung innerhalb der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) betreffen, um die hoheitliche Aufgabe der Bereitstellung des Raumbezugs einheitlich zu gewährleisten. In diesem Zusammenhang spielt die von Jahn (2009) diskutierte Frage nach Trennung von Koordinaten des amtlichen Nachweises (Bezugssystem ETRS89) und technischen Koordinaten zum Betrieb des Positionierungsdienstes (Referenzrahmen ITRFyy) eine wichtige Rolle. Private Provider dagegen sind wegen ihrer unternehmerischen Freiheit und marktwirtschaftlichen Ausrichtung häufig eher in der Lage, schnell und flexibel auf neue Situationen zu reagieren.

Da sich die Drift der Kontinentalplatte permanent fortsetzt, wird der Einfluss des untersuchten Effekts bezüglich des beispielhaften Nutzers (25 km) aus Kapitel 4 bis Mitte 2014 weiter auf $\delta_L = 1,6 \text{ mm}$ und $\delta_{h_{max}} = 2,3 \text{ mm}$ angewachsen sein.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Das letzte Kapitel der Masterarbeit behandelt zu Beginn die Beantwortung der eingangs formulierten Forschungsfrage und die Überprüfung der gestellten Hypothese. Abschließend wird auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit ein Ausblick in die nähere Zukunft der Positionsbestimmung mit GNSS gewagt.

6.1 Schlussfolgerung

Wie wirken sich globale Lageänderungen und Intraplattendeformationen der Eurasischen Kontinentalplatte auf ein statisch definiertes europäisches Bezugssystem ETRS89 bei der Nutzung GNSS-basierter Referenzierung von Geodaten aus, und sind die gegenwärtig eingesetzten Bereitstellungsverfahren unter diesen Gesichtspunkten noch zeitgemäß?

Die Untersuchungen in Kapitel 4 haben gezeigt, dass die Divergenz zwischen dem Referenzrahmen ITRF und dem Bezugssystem ETRS89 aufgrund der globalen Lageänderungen der Eurasischen Platte signifikant zunehmende Effekte in der Positionsbestimmung mit GNSS bewirken. Dies gilt für den in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Technik in den Positionierungsdiensten und betrifft die Anforderungen in den Genauigkeitsklassen Millimeter und Zentimeter im Vermessungs- und Geoinformationswesen. Intraplattendeformationen, wie sie in großräumiger Ausprägung in Kapitel 3 dargestellt sind, beeinträchtigen die Konsistenz in der Realisierung des ETRS89 auf nationaler Ebene.

Beide Ergebnisse müssen im Zusammenhang mit der Definition des ETRS89 betrachtet werden, die 1990 am Anfang des Einzugs der satellitengestützten Positionierung und Navigation in das Geoinformationswesen stand. Aus heutiger Sicht ist eine Schwäche darin, die nicht spezifizierte Festlegung des stabilen Teils der Kontinentalplatte. Auch unterlag man seinerzeit der Annahme, dass deren Bewegung auf die meisten Applikationen keinen Einfluss nehmen würde. Dies trifft unter den heute erzielbaren Genauigkeiten auf viele Anwendungen, wie zum Beispiel einem positionierungsdienstbasierten Liegenschaftskataster, jedoch nicht zu.

Als Folgerung daraus wird an dieser Stelle vorgeschlagen, die Bereitstellung des Bezugssystems durch Positionierungsdienste zukünftig auf Grundlage kinematischer Koordinaten im ITRF umzustellen, die beim Nutzer standardkonform nach ETRS89 transformiert werden. Ein konkreter Lösungsansatz dazu ist in Kapitel 5 beschrieben.

Die aufgestellte Hypothese:

(A) Drift und Deformation der Eurasischen Kontinentalplatte führen bei der hochgenauen GNSS-Positionsbestimmung zu zeitvarianten Realisierungen des statisch definierten ETRS89 (inkonsistenter Systemzustand) und damit (B) zu Qualitätseinbußen beim Nutzer

ist eine gerichtete Behauptung über die Beziehung zwischen A und B. Wie gezeigt wurde, sind A und B wahr, so dass die Verknüpfung (Implikation) der Aussagen $A \rightarrow B$ wahrheitsfunktional ebenfalls wahr ist. Die Hypothese konnte nicht widerlegt werden und trifft demnach bis auf Weiteres zu.

6.2 Ausblick

Ein Ergebnis dieser Arbeit ist die Bestätigung der Aussage von Vaníček et al. (1983), die am Anfang zitiert wird und bereits einige Jahre vor Veröffentlichung des ersten RTCM Standards und der EUREF Resolution zum ETRS89 getroffen wurde. Ihr Inhalt ist sehr aktuell, denn in der hochgenauen RTK-Positionierung findet derzeit ein Wandel von den relativen Verfahren hin zum „absoluten“ Precise Point Positioning statt. Gleichzeitig lassen die Modernisierung von GPS und GLONASS sowie die Errichtung von Galileo für die kommenden Jahre weitere Genauigkeitssteigerungen erwarten. Beide Entwicklungen erfordern eine dezidiert strenge Sicht auf alle Einflüsse. Erd- und Polzeiten, Ozean- und Atmosphärenauflasten, Massenbewegungen und tektonische Verschiebungen nehmen für Standardanwendungen an Bedeutung zu und spielen nicht mehr allein im wissenschaftlichen Bereich eine Rolle, der diesbezüglich weiteren Forschungsbedarf abdeckt.

Die Landesvermessung und das Liegenschaftskataster sind es aufgrund ihrer historischen Entwicklung gewohnt, unveränderliche Koordinaten in ihren amtlichen Nachweisen zu führen. Diese Grundregel wird durch den technologischen Fortschritt der letzten Jahrzehnte in den Mess- und Auswerteverfahren immer stärker in Frage gestellt. GNSS-Positionierungsdienste, mit denen die moderne Landesvermessung dem Kataster und anderen Bereichen des Geoinformationswesens den Zugang zum Bezugssystem bereitstellt, liefern im Gegensatz zu den terrestrischen Messverfahren der Vergangenheit quasi absolute Ergebnisse, die spürbar der Dynamik der Erde unterliegen. Um dieses Problem zu lösen, muss heute auf Seiten der Dienstanbieter die Überzeugung gewonnen werden, zukünftig globale Koordinaten *und* Geschwindigkeiten zu nutzen. Die Transformation in das Zielsystem (ETRS89) findet sodann standardbasiert auf Nutzerseite statt.

7 Literaturverzeichnis

- AdV (2009): DREF-Online und SAPOS®-Koordinatenmonitoring der Länder. AK RB 02/17 Nr. 5. Beschluss des AK Raumbezug der AdV vom 16.06.2009 (unveröffentlicht)
- AdV (2011): ETRS89/UTM – Der Bezugssystemwechsel und die Auswirkungen auf die Geodatennutzung. Übersichtsgrafik Lagebezugssysteme in Deutschland. Stand: 8/2011. Abruf: 24.05.2012. URL: <http://www.adv-online.de>
- Altamimi, Z., X. Collilieux, J. Legrand, B. Garayt, C. Boucher (2007): ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *Journal of Geophysical Research* 112, doi:10.1029/2007JB004949
- Altamimi, Z., X. Collilieux, L. Métivier (2011): ITRF2008: an improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* 85, pp. 457–473, doi:10.1007/s00190-011-0444-4
- APOS (2010): APOS Austrian POsitioning Service. Produktblatt, Stand: 6/2010. Abruf: 20.05.2012. URL: http://www.bev.gv.at/pls/portal/docs/.../austrianpositioning_service-folder.pdf
- Barthelme, N. (2005): *Geoinformatik*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg : Springer Verlag – ISBN 3-540-20254-4
- Bauer, M. (2011): *Vermessung und Ortung mit Satelliten*. 6. Auflage. Berlin : VDE Verlag – ISBN 3-879-07482-2
- Beutler, G., I. Bauersima, W. Gurtner, M. Rothacher, T. Schildknecht, A. Geiger (1988): Atmospheric Refraction and other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations. In: Brunner, F. K. (Ed.): *Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements*. Monograph 12, School of Surveying, University of New South Wales, pp. 15-43 – ISBN 0-858-39048-5
- Bird, P. (2003): An updated digital model of plate boundaries. *Geochemistry, Geophysics Geosystems*. 4, No. 3, doi:10.1029/2001GC000252

- Boucher, C. und Z. Altamimi, Z. (2008): Memo : Specifications for reference frame fixing in the analysis of a EUREF GPS campaign. Abruf: 03.02.2012.
URL: <http://etrs89.ensg.ign.fr/memo-V7.pdf>
- Caporali, A., M. Lidberg, G. Stangl (2011): Lifetime of ETRS89 Coordinates. 55th EUREF TWG Meeting in Padua, 3-4 March 2011. Abruf: 10.06.2012.
URL: http://www.euref-iag.net/TWG/.../Coordinates_ml.pdf
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus and S. Stein (1990): Current Plate Motions. *Geophysical Journal International* 101, pp. 425-478
- DeMets, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, S. Stein (1994): Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21, pp. 2191-2194
- DGFI (2012): Tectonic plate motion calculator. Zugriff: 15.02.2012.
URL: <http://www.dgfi.badw.de/fileadmin/platemotions/index.html>
- Drewes, H. (2009a): Reference Systems, Reference Frames, and the Geodetic Datum – Basic Considerations. In: Sideris, M. G. (Ed.): *Observing our Changing Earth*. IAG Symposia 133, pp. 3-9, Springer – ISBN 3-540-85425-8
- Drewes, H. (2009b): The Actual Plate Kinematic and Deformation Model APKIM2005 as basis for a non-rotating ITRF. In: Drewes, H. (Ed.): *Geodetic Reference Frames*. IAG Symposia 134, pp. 95-99, Springer – ISBN 3-642-00860-3
- ESA (2012): Reference Frames in GNSS. Stand: 23 February 2012, 11:06. Zugriff: 05.06.2012. URL: http://www.navipedia.net/index.php/Reference_Frames_in_GNSS
- Euler, H.-J., C. R. Keenan, B. E. Zebhauser, G. Wübbena (2001): Study of a Simplified Approach Utilizing Information from Permanent Station Arrays. In: *Proceedings of ION GPS-01*. September 11-14, Salt Lake City, UT
- EUREF (1990): Resolution No. 1. Symposia – Resolutions of the first EUREF Symposium in Florence, 28-31 May 1990. Abruf: 01.06.2012.
URL: http://www.euref-iag.net/html/resolutions_florence1990.pdf
- Feldmann-Westendorff, U. (2009): Von der See bis zu den Alpen – die GNSS-Kampagne 2008 im DHHN 2006-2012. In: *GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen*. Beiträge zum 83. DVW Seminar am 18. und 19. März 2009 in Dresden, S. 95-111 – ISBN 3-896-39662-4

- Feldmann-Westendorff, U. und K. Westphal (2011): Sachstand der Mess- und Auswertarbeiten – Projektanteil GNSS. Strategie-Workshop DHHN 2006-2012. 29.11.-1.12.2011, LGLN, Hannover (unveröffentlicht)
- Frisch, W. und M. Meschede (2011): *Plattentektonik*. 4. Auflage. Darmstadt : Wissenschaftliche Buchgesellschaft – ISBN 3-896-78744-6
- Gurtner, W., J. Ihde, J. Luthardt (2009): Realization of ETRS89: alternatives, future concepts. *Bollettino di Geodesia e Scienze Affini* 68, pp. 219-229
- Heckmann, B. und C.-H. Jahn (2010): Geodätischer Raumbezug. In: Kummer, K. und J. Frankenberger (Hrsg.): *Das deutsche Vermessungs- und Geoinformationswesen*. Heidelberg : Wichmann Verlag – ISBN 3-879-07487-7
- Ihde, J., J. Torres, J. Luthardt (2011): Information about the use of ETRS89 and EUREF products. EUREF Symposium in Chisinau, 25-28 May 2011. Abruf: 06.06.2012. URL: <http://www.euref-iag.net/symposia/2011Chisinau/01-08-Ihde.pdf>
- InsideGNSS (2012): All 4 GNSSes Hail Progress at 10th Munich Summit. *InsideGNSS* 7, pp. 14-19
- INSPIRE (2009): D2.8.I.1 INSPIRE Specification on Coordinate Reference Systems – Guidelines, 2009-09-07. INSPIRE Thematic Working Group Coordinate Reference Systems and Geographical Grid Systems. Abruf: 01.06.2012. URL: http://inspire.jrc.ec.europa.eu/documents/Data_Specifications/INSPIRE_Specification_CRS_v3.1.pdf
- ISO (2003): Geographic Information – Spatial Referencing by coordinates. ISO 19111:2003(E)
- Jahn, C.-H. (2009): ITRS, ITRF2005, ETRS89 – Bezugssysteme, Realisierungen und Auswirkungen. *Zeitschrift für das Öffentliche Vermessungswesen des Landes Sachsen-Anhalt* 15, S. 27-44
- Kenyeres, A. (2012): persönliche Mitteilungen. E-Mail vom 19.06.2012
- Kreitlow, S., A. Brettschneider, C.-H. Jahn, U. Feldmann-Westendorff (2010): ETRS89/UTM – Der Bezugssystemwechsel und die Auswirkungen auf die Geodatennutzung. *Kartographische Nachrichten* 60, S. 179-187
- Landau, H. (2012): Worldwide Centimeter-Accurate GNSS Positioning using Trimble RTX Technology. In: *PPP-RTK & Open Standards*. March 12-14, BKG, Frankfurt am Main

- Mervart, L., Z. Lukes, C. Rocken, T. Iwabuchi (2008): Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution in Real-Time. In: *Proceedings of ION GNSS-08*. September 16-19, Savannah, GA, pp. 397-405
- MICUS (2010): Einsatzpotentiale eines globalen Navigations satellitensystems – GNSS – im öffentlichen Sektor. Abschlussbericht V 1.0 vom 17.05.2010. Abruf: 20.05.2012. URL: <http://www.bmvbs.de/cae/servlet/contentblob/27650/publicationFile/40/abschlussbericht-gnss-langfassung.pdf>
- Nocquet, J.-M., E. Calais, B. Parsons (2005): Geodetic constraints on glacial isostatic adjustment in Europe. *Geophysical Research Letters* 32, doi:10.1029/2004GL022174
- Petit, G. und B. Luzum (2010): *IERS Conventions (2010)*. IERS Technical Notes No. 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main – ISSN 1019-4568
- RTCM (2011): *RTCM Standard 10403.1 Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services – Version 3*. RTCM Paper 177-2006-SC104-STD. Developed by RTCM Special Committee No. 104. Radio Technical Commission for Maritime Services, Arlington, VA
- SAPOS (2011): Präzise Positionierung in Lage und Höhe. Produktblatt, Stand: 7/2011. Abruf: 25.05.2012. URL: http://www.zentrale-stelle-sapos.de/SAPOS_Prospekt.pdf
- Schmitz, M. (2011): Clarifications of RTCM 3.1 Transformation Messages and Proposal of New Messages. RTCM Paper 019-2011-SC104-630. Presented at the RTCM Meeting, February 9-10, Mannheim, Germany (unpublished)
- Schmitz, M. (2012): RTCM State Space Representation Messages – Status and Plans. In: *PPP-RTK & Open Standards*. March 12-14, BKG, Frankfurt am Main
- Schüler, T. (2009): Entwicklungsstand Galileo im Kontext des „GNSS Evolution Programme“. In: *GNSS 2009: Systeme, Dienste, Anwendungen*. Beiträge zum 83. DVW Seminar am 18. und 19. März 2009 in Dresden, S. 21-37 – ISBN 3-896-39662-4
- SWIPOS (2008): Swiss Positioning Service (swipos). Produktblatt, Stand: 11/2008. Abruf: 20.05.2012. URL: <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/.../swiposbroschuereneude.pdf>
- Torres, J. (2005): EUREF – the Infrastructure for Geo-Referencing in Europe. *GEOInformatics* 8, No. 6, pp. 18-21

- UNAVCO (2012): Plate Motion Calculator. Zugriff: 20.03.2012. Stand: 17-Feb-2012 15:48:17 UTC. URL: http://www.unavco.org/community_science/science-support/crustal_motion/dxdt/model.html
- UNB (2011): Canadian Space Geodesy Forum. Stand: 17.11.2011. Abruf: 01.06.2012. URL: <http://gge.unb.ca/Resources/GPSConstellationStatus.txt>
- Vaniček P., D. E. Wells, A. Chrzanowski, A. C. Hamilton, R. B. Langley, J. D. McLaughlin, B. G. Nickerson (1983): The Future of Geodetic Networks. In: *Proceedings of the IAG Symposium on the Future of Terrestrial and Space Methods for Positioning*. August 1983, Hamburg, Germany. The Ohio State University, Columbus, Ohio, Vol. 2, pp. 372-379
- Wanninger, L. (1997): Real-Time Differential GPS Error Modelling in regional Reference Station Networks. In: Brunner, F. K. (Ed.): *Advances in Positioning and Reference Frames*. IAG Symposia 118, pp. 86-92, Springer – ISBN 3-540-64604-3
- Wells, D. E., N. Beck, D. Delikaraoglou, A. Kleusberg, E. J. Krakiwsky, G. Lachapelle, R. B. Langley, M. Nakiboglu, K. P. Schwarz, J. M. Tranquilla, P. Vaniček (1986): *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates, Fredericton, NB
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996): Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Network. In: *Proceedings of ION GPS-96*. September 17-20, Kansas City, MO, pp. 1845-1852
- Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz (2001): RTK Networks based on Geo++[®] GNSMART – Concepts, Implementation, Results. In: *Proceedings of ION GPS-01*. September 11-14, Salt Lake City, UT
- Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz (2005): PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-space Representation in RTK Networks. In: *Proceedings of ION GNSS-05*. September 13-16, Long Beach, CA
- Zumberge, J. F., M. B. Heflin, D. C. Jefferson, M. M. Watkins, F. H. Webb (1997): Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal of Geophysical Research* 102, doi:10.1029/1996JB03860