Geodätische Infrastrukturen für GNSS-Dienste (GIPS)

Reiner Jäger

Abstract
The worldwide ongoing process of the establishment of high precise DGNSS-positioning services and respective GNSS-reference station networks, which are related to the globally GNSS-consistent ITRF and ITRF-derivatives (e.g. ETRF89), implies the replacement of the georeferencing in the old independent classical national reference frames by an ITRF-related one. Accordingly the new age of GNSS-positioning services – as interdisciplinary tool with a broad and growing spectrum of precise satellite positioning, navigation, mobile GIS and mobile IT applications – requires the establishment and maintenance of a geodetic infrastructure for GNSS positioning services (GIPS). The development of mathematical models and software for a GIPS must be appropriate to fulfil the requirements of its implementation with respect to the existing and to future belongings, technical concepts and standardizations (e.g. RTCM).

The geodetic infrastructure for GNSS-services (GIPS) is divided into a transformation and a geomonitoring component.

As concerns the transformation component, the old plan position data, which is related to a classical reference frame, has to be transformed to the ITRF-related horizontal georeferencing (B, L) provided by the GNSS-service. This forward transformation (trafo-1) concerns the establishment of modern GNSS-related databases for the infrastructure for spatial information in Europe (INSPIRE) and worldwide (cadastre, GIS, navigation, urban planning, construction, transportation, meteorology, land management, precise agriculture, etc.). It is necessary for a direct horizontal positioning by GNSS services. The backward transformation (trafo-2) of the ITRF-related GNSS-position to an old classical datum is needed, because the classical non-ITRF-related reference frames will still be relevant for at least one decade or more. The presented concept and software CoPaG (COntinuously PAtched Georeferencing) solves the above 3D-datum transformation problems (trafo-1, trafo-2) by a finite element related mathematical modelling (FEM) in a strict and general concept, including quality assessment. The computed high precise parameters are stored to transformation parameter data-bases. The ellipsoidal GNSS-heights always need a further processing, in order to transform h (by H=h-N) to the physical height H referring to the height reference surface (HRS) N. The software DFHBF solves that height transformation problem (trafo-3) again in a Finite Element (FEM) concept. Global geopotential models (GPM), existing HRS models, vertical deflections, terrestrial gravity g and identical points (h, H) can be used as observations for the computation of a HRS database by the DFHBF-software. The CoPaG (trafo-2) and DFHBF (trafo-3) databases can be used on all GNSS-controller types. Alternatively the databases can be implemented as so-called reference transformations for setting up the recent world-standard of RTCM 3.1 transformation messages for the GNSS rover-clients using a RTCM transformation messages server. The new RTCM 3.1 transformation messages allow the GNSS service to provide their users with all necessary information for an RTK 2D positioning (trafo-2) and a GNSS-based heighting (trafo-3). So RTCM-compatibility is regarded as a general GIPS requirement.

The capacity of an absolute positioning by GNSS-positioning services requires, that possible changes of the coordinates of the GNSS reference stations in the amount of few millimetres are detected immediately. To solve that task, the GNSS-reference-station MONItoring by the

KArlsruhe approach and software (MONIKA) has been developed. The MONIKA approach and software can, besides the coordinate control of GNSS-positioning services, also be applied for a use of the permanent GNSS reference-stations as geosensor-networks for geodynamical questions and research, as well as for setting up temporary GNSS-arrays as a disaster monitoring and early warning GNSS service e.g. for land-slides, flood and construction areas.

The author presents the mathematical models, the software and the technical realization of the above GIPS components in a closed modular and general concept. The transformation component is deepened with respect to the part DFHBF (trafo-3). GIPS realizations for different countries and projects, such as e.g. MOLDPOS-project funded by the German Ministry of Research and Education (BMBF) and related to the Moldavian GNSS-service, are presented.

1 Definitionen und Vorbetrachtungen

1.1 GNSS-Positionierungsdienste – Geodätische Grundlagen und technischer Aufbau

Mit der breiten Nutzung von GNSS (GPS/GLONASS), und künftig auch dem europäischen GALILEO sowie dem chinesischen COMPASS, stehen mit Fertigstellung aller vier Orbitsegmente ab 2013 mindestens 105 gegenüber derzeit ca. 45 Satelliten sowie auch weitere Nutzerfrequenzen für eine präzise GNSS-basierte Positionierung und Navigation bereit [Lekkerkerk, 2010]. Die obige Prognose zur Satellitenverfügbarkeit beschleunigt weltweit die Einrichtung präziser GNSS-Positionierungsdienste. Allein in Deutschland gibt es mit SAPOS, Axio-Net und VRSNow bereits drei flächendeckende GNSS-Positionierungsdienste (Abb. 1-1). Diese ermöglichen über die Bereitstellung von RTCM-Korrekturdaten jederman eine direkte und – über einen präzisen GNSS-Empfänger als GNSS-Rover-Client (Abb. 1-1) – auch hochgenaue (cm-Genauigkeit) und flächendeckende Georeferenzierung positionsbezogener Daten im GNSS-konsistenten global zusammenhängenden International Terrestrial Reference Frame (ITRF). Im Auf- und Ausbau moderner Geoinfrastrukturen und zugehöriger positionsbezogener Geodatenbanken lösen die im ITRF georeferenzierten GNSS-Positionierungsdienste zusammen mit der technisch fortschreitenden Satellitennavigation und Mobile IT [Taylor u. Blewitt, 2006; Jäger, 2010] damit den Fortbestand der klassischen Bezugsrahmen zugunsten des ITRF-Bezugs graduell auf.

Der GNSS-konsistente erdfeste ITRF-Bezugsrahmen ist in erster Instanz über die VLBI/GNSS-Stationen des International GNSS Service (IGS) an den inertialen ECIF-Bezug angebunden. Die RINEX-Daten der GNSS-Stationen liefern die Möglichkeit mit differentiellem GNSS hochgenaue absolute erdfeste ITRF-Positionen zu bestimmen, was inzwischen über die RTCM-Korrekturdaten des IGS-IP Dienstes [Jäger, 2010] auch online möglich ist. Gleichzeitig wird auch die hochgenaue absolute GNSS-Positionierung („OPPP“) vorangetrieben [Biber et al., 2009]. In jedem Fall weisen die ITRF-Koordinaten infolge von Plattenbewegungen (ca. 2.5 cm pro Jahr auf der eurasischen Platte) sowie einer geringen Datumsdrift aller Platten ein zeitlich dynamisches Verhalten auf. Diese zeitliche Dynamik des ITRF ist über die durch den International Earth Rotation Service (IERS) bereitgestellten Parametrisierungen ebenso wie über identische Punkte aus den betreffenden Epochen genau (cm/sub-cm) modellierbar.

Der in den nationalen Territorien über die Koordinaten der Referenzstationen von GNSS-Positionierungsdiensten hergestellte Bezug kann aufgrund der o. g. Transformationsmöglichkeiten zwischen unterschiedlichen zeitlichen ITRF-Bezügen bezüglich eines bestimmten ITRF-Datums und Plattenstandes zum Zeitpunkt t_0 „eingefroren“ und auf diesem Wege statisch gehalten werden. In Europa gilt für den mit ETRF89 bezeichneten eingefrorenen ITRF-Bezug $t_0 = 1989.0$.

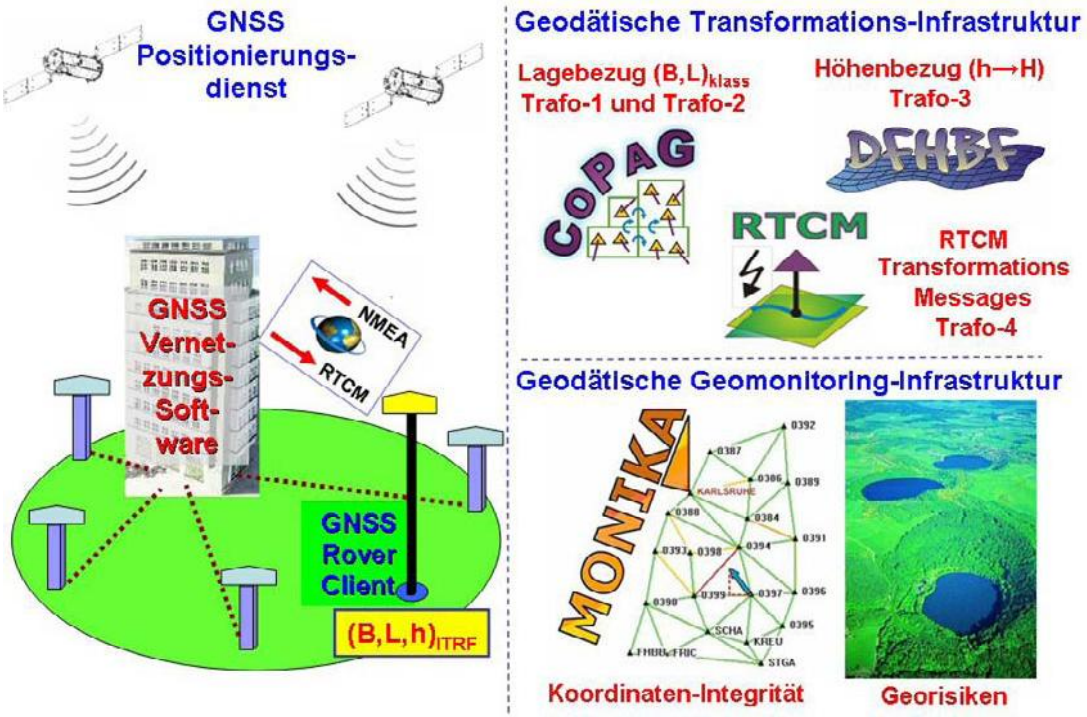

Abb. 1-1: GNSS-Positionierungsdienst und geodätische Infrastrukturen

Nach diesem Muster werden auch in anderen Staaten bzw. auf anderen Kontinenten sog. ITRF-basierte statische Bezugsrahmen für eine stetig wachsende Zahl von präzisen (1 cm bis 3 cm genauen) GNSS-Positionierungsdiensten hergestellt. Wie mit ETRF89 in Europa geschieht dies in der Regel zweistufig. D. h. zunächst erfolgt die Bestimmung der Koordinaten eines hochgenauen Referenznetzes, und hiernach werden die GNSS-Referenzstationen des betreffenden Positionierungsdienstes (Abb. 1-1) an dieses Referenznetz angeschlossen. Mittels der aus den vernetzten GNSS-Referenzstationskoordinaten in Echtzeit ermittelten und standardmäßig über mobiles Internet am GNSS-Rover-Client (Abb. 1-1) bereitgestellten RTCM-Korrekturdaten, kann so eine präzise ITRF-basierte Echzeitpositionierung unter Bestimmung dreidimensionaler Positionen $(B, L, h)_{\mathrm{ITRF}}$ auch ohne geodätische Fachkenntnisse durch jedermann im betreffenden ITRF-Bezug – in Europa ETRF89, in Brasilien SIRGAS (Kap. 4.1) etc. – erfolgen.

Damit löst der global einheitliche ITRF-Bezug die weltweit ca. 500 astronomisch und nicht zusammenhängend gelagerten klassischen Datumsbezüge ab.

1.2 Geodätische Transformations-Infrastruktur

Die geodätische Transformationsinfrastruktur umfasst – als erste Komponente der beiden Geodätischen Infrastrukturen von GNSS-Positionierungsdiensten – die vier Teilkomponenten der Transformationen Trafo-1 bis Trafo-4 (Abb. 1-1). Die aus vernetzen Referenzstationen über die GNSS-Vernetzungssoftware (Abb. 1-1) ermittelten und dem Rover-Client über mobiles Internet (standardmäßig im sog. NTRIP-Format) bereitgestellten RTCM-Korrekturen erlauben online die Ermittlung der Roverposition im ITRF-Bezug im (1-3) cm Genauigkeitsbereich. Um den einheitlichen ITRF-Bezug jedoch effektiv und interdisziplinär durchgängig nutzen zu können, müssen die in den klassischen Referenzrahmen vorliegenden Lagekoordinaten $(B, L)_{\mathrm{klass}}$ – in Deutschland dem DHDN-Datum [Jäger u. Kälber, 2000] – an den ITRF-Bezug angeknüpft werden. Dies bedeutet, dass die Lagekoordinaten $(B, L)_{\mathrm{klass}}$ hochgenau in den ITRF-Bezug

$(B, L)_{\mathrm{ITRF}}$ überführt werden müssen. Diese Aufgabe wird nachfolgend als Trafo-1 bezeichnet. Die Trafo-1 (Kap. 2.1) wurde mit der Einrichtung von GNSS-Positionierungsdiensten bisher sowohl von den in den nationalen Territorien ansässigen staatlichen Vermessungs- und anderen Verwaltungen, wie auch in starkem Maße vonseiten des Privatsektors wahrgenommen. Global betrachtet erfolgten hochgenaue Transformationen (cm-Genauigkeit) bisher eher sporadisch bzw. projekt- und zweckgebunden, und selten in landesweiter Dimension. Den definitiven legislativen Auftakt zu einer zwingenden genauen Umreferenzierung $(B, L)_{\mathrm{klass}}$ nach $(B, L)_{\mathrm{ITRF}}$ im Sinne von Trafo-1, auch im genauen Bereich, gab in Europa 2007 die Richtlinie INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) des EU-Parlaments [EU, 2007]. Erst eine solche ITRF-basierte Geodatenreferenzierung ermöglicht eine einheitliche Geodateninfrastruktur und macht den Weg frei für interdisziplinäre und wirtschaftlich bedeutsame nachhaltige Potenziale. Dies betrifft die in breitem Spektrum aufgestellten Bereiche Navigation, Verkehrs-, Bau- und Planungswesen, Management von Facilities, Mobiles GIS, Datenerfassungs- und Drohnensysteme, LBS-Dienste- und Anwendungen, Landmanagement, Umwelt-/Geowissenschaften, Landwirtschaft und nicht zuletzt auch den Katastrophenschutz-/Management. Die Realisierung der Trafo-1 wird kurz- bis mittelfristig so für alle Staaten der Welt unabdinglich. Dabei sind die Verfügbarkeit der GNSS-Positionierungsdienste sowie die aufkommende Ära des Low-Cost-GNSS zusätzlich Katalysatoren für den weltweiten Bedarf einer vereinheitlichten Geodatenstruktur und damit der Trafo-1 (Abb. 1-1) als erste Komponente der entsprechenden geodätischen Infrastruktur für GNSS-Positionierungsdienste.

Die inverse Transformation von $(B, L)_{\mathrm{ITRF}}$ nach $(B, L)_{\mathrm{klass}}$ – im folgenden als Trafo-2 (Kap. 2.1) bezeichnet – ist im operativen Betrieb von GNSS-Positionierungsdiensten jedoch noch so lange erforderlich, wie die klassischen Bezugssysteme parallel zum ITRF-Bezug nachgefragt werden. Wegen der besonderen Rechtslage sowie auch den hohen Genauigkeitsansprüchen vollziehen sich die Realisierung der Trafo-1 und die Einführung des ITRF als gesetzlich gültiger Bezugsrahmen, z. B. im Katasterwesen sowie in anderen hoheitlichen Bereichen wie Verkehrs- sowie Wasser- und Schifffahrtswesen, weltweit nur langsam. Daher besteht sicherlich bis in die kommende Dekade noch die Notwendigkeit, die Trafo-2 in einer Übergangsphase in Form einer Online-Transformation der originären GNSS-Position $(B, L, h)_{\mathrm{ITRF}}$ nach $(B, L)_{\mathrm{klass}}$ vorzuhalten.

Mit der online verfügbaren cm-Genauigkeit der GNSS-Position $(B, L, h)_{\mathrm{ITRF}}$ erschließt sich auch das Potenzial einer genauen Höhenbestimmung mittels GNSS-Positionierungsdiensten. Die GNSS-basierte Bestimmung von Landeshöhen H erfordert die Umreferenzierung des ellipsoidischen GNSS-Höhenbezugs h_{ITRF} auf die potenzialtheoretisch definierte Höhenbezugsfläche N eines klassischen Höhensystems H. Die Berechnung von Höhenbezugsflächen N [Illner u. Jäger, 1995; Jäger, 1997; Jäger u. Kälber, 2000] – und die damit einhergehende Bereitstellung des Übergangs $H = h - N$ – werden im folgenden als Trafo-3 (Abb. 1-1, Kap. 2.2) bezeichnet.

Die Transformationsaufgaben Trafo-2 und Trafo-3 münden mit den neuen RTCM 3.1 Transformationsnachrichten [Jäger u. Kälber, 2008] in eine technisch orientierte Transformationskomponente (Abb. 1-1), die als Trafo-4 (Kap. 2.3) bezeichnet wird. Die Transformationsnachrichten ermöglichen es, dass der Datumsübergang (Trafo-2) und die Höhentransformation (Trafo-3) nicht mehr auf den GNSS-Controller-Clients (Abb. 1-1) der Nutzer eines GNSS-Positionierungsdienstes geleistet werden müssen. An deren Stelle werden auf der Grundlage von Trafo-2 und Trafo-3 serverseitig bzw. seitens des GNSS-Positionierungsdienstes (Abb. 1-1) die o.g. RTCM-Transformationsmessages generiert und den GNSS-Clients bereitgestellt. Geodätischerseits kommt es hierbei darauf an, Konzepte und Software zu realisieren (Trafo-4), um die spezifischen Referenztransformationen bzgl. Trafo-2 und Trafo-3 möglichst verlustfrei in die Daten- und Modellstruktur der RTCM-Transformationsmessages abzubilden.

1.3 Geodätische Geomonitoring-Infrastruktur

Die Bereitstellung des geodätischen Raumbezugs über die Koordinaten der landesweiten Netze der Referenzstationen von GNSS-Positionierungsdiensten erfordert, dass etwaige Änderungen der GNSS-Referenzstationskoordinaten (Abb. 1-1) in der Größenordnung von Millimetern in kurzer Zeit erkannt und durch eine entsprechende Nachführung der veränderten Koordinaten berücksichtigt werden. Dies erfordert eine auf die Epochenzustandsschätzungen - typischerweise GNSS-Netzausgleichungen der RINEX-Tagesdaten – aufbauende koordinatenbezogene 3D-Deformationsanalyse [Jäger u. Spohn, 2010]. Gefordert ist im Kern des sog. Koordinatenintegritäts-Monitoring (Abb. 1-1) die echtzeitnahe Realisierung des mathematischen Modells zur statistischen Analyse einer multiepochalen und multivariaten Netzkongruenz (Kap. 3). Gleichzeitig können die Sensordaten der GNSS Referenzstationen im Bereich der Minderung von Georisiken eingesetzt werden [Jäger et al., 2007; Jäger u. Spohn, 2010]. Eine leistungsfähige geodätische Deformationsanalyse erschließt – über die zweite Komponente der geodätischen Infrastruktur von GNSS-Positionierungsdiensten – somit auch Potenzial für den entsprechenden Einsatz der GNSS-Referenzstationen als Komponente eines skalierbaren Geosensornetzwerks im Bereich von Geoforschung und Georisiken (Kap. 3). Diese zweite Teilkomponente ermöglicht es, die GNSS-Referenzstationen selbst bei der Beobachtung und Erforschung landesweiter geodynamischer Vorgänge ebenso wie für ein geodätisches Geomonitoring für regionale und lokale Deformationsvorgänge einzusetzen (Abb. 1-1, Abb. 4-4). Letzteres erfolgt durch die Anbindung zusätzlicher permanenter oder temporärer GNSS-Arrays an die GNSS-Referenzstationen, dies auch im Verbund mit anderen Systemen wie z. B. GOCA (`www.goca.info`). Mit der im IT-Zeitalter somit von der globalen bis hin zur lokalen Dimension durchgängig gangbaren Vernetzung stellen die landesweiten GNSS-Positionierungsdienste ein wichtiges Element für die Einrichtung skalierbarer Frühwarnsysteme zur Minderung unterschiedlicher Arten von Georisiken dar. Dieses auf eine leistungsfähige geodätische Deformationsanalyse zurückführende Gesamtspektrum erschließt sich zudem auch über die Implementierung der mathematischen Modelle entsprechender – früher als komplexe Deformationsmodelle und – modern als virtuelle Sensoren [Fuchs, 2010] bezeichneten weiteren Deformationsanalysemodelle.

2 Mathematische Modelle und Software zur Realisierung der geodätischen Transformationsinfrastrukturen

2.1 CoPaG-Konzept und Datenbanken zur Realisierung von Trafo-1 und Trafo-2

Dieses Kapitel befasst sich mit der homogenisierenden cm-genauen und nachbarschaftstreuen Transformation zwischen den Lagekoordinaten klassischer nationaler Bezugssysteme $(B, L)_{\text{klass}}$ und dem ITRF-Bezug $(B, L)_{\text{ITRF}}$. Mit dem nachfolgend hierzu vorgestellten CoPaG-Konzept wird mit der Trafo-1 die Verbesserung und Homogenisierung der geometrischen Qualität der klassischen Netze beim Übergang in den ITRF-Bezug erzielt. So wird die Voraussetzung für die Nutzbarkeit und Fortführung bestehender klassischer Datenbestände im ITRF geschaffen. Diese können so, wie bereits im o.g. Kontext erläutert, auf der Grundlage bzw. in Form einer einheitlichen Geodateninfrastruktur (INSPIRE, [EU, 2007]) auf breiter Basis interdisziplinär und nachhaltig ausgeschöpft werden.

Das CoPaG-Ansatzkonzept basiert auf einer streng dreidimensionalen räumlichen Ähnlichkeitstransformation [Schmitt et al., 1991] zwischen zwei Bezugsrahmen 1 und 2. Linearisiert man die Beziehung zwischen den geozentrisch kartesischen (x, y, z) und den geographischen Koordinaten (B, L, h) und führt dort eine differentielle Ähnlichkeitstransformation ein, so resultiert mit dem

Linearisierungspunkt der geographischen Koordinaten im Ausgangssystem $(B, L, h)_1$ die sog. Molodenski-Transformation. Diese lautet:

$$\left(\begin{bmatrix} B \\ L \\ h \end{bmatrix}_2 - \begin{bmatrix} \Delta B_{(a,b)_1,(a,b)_2} \\ \Delta L_{(a,b)_1,(a,b)_2} \\ \Delta h_{(a,b)_1,(a,b)_2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B \\ L \\ h \end{bmatrix}_1 \right)_i + \begin{bmatrix} v_B \\ v_L \\ v_h \end{bmatrix}_i = \Big[\text{Molodenski}\Big]_{(B,L,h)_1,i} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \Delta s \\ t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} . \tag{2-1}$$

Die in der der obigen Molodenski-Transformation als Designmatrix auftretende [3,7]-Molodenski-Matrix stellt sich ausführlich dar als:

$$\begin{bmatrix} -\sin L \cdot \frac{a \cdot W + h}{M+h} & \cos L \cdot \frac{a \cdot W + h}{M+h} & 0 & \frac{-\sin B \cdot \cos B \cdot N \cdot e^2}{M+h} & \frac{-\sin B}{M+h} & \frac{\cos B}{M+h} \\ \frac{\sin B \cdot \cos L \cdot (N \cdot (1-e^2)+h)}{(N+h) \cdot \cos B} & \frac{\sin B \cdot \sin L \cdot (N \cdot (1-e^2)+h)}{(N+h) \cdot \cos B} & -1 & 0 & \frac{-\sin L}{(N+h) \cdot \cos B} & \frac{\cos L}{(N+h) \cdot \cos B} & 0 \\ -N \cdot e^2 \cdot \sin B \cdot \cos B \cdot \sin L & N \cdot e^2 \cdot \sin B \cdot \cos B \cdot \cos L & 0 & h + a \cdot W & \cos B \cdot \cos L & \cos B \cdot \sin L & \sin B \end{bmatrix} \tag{2-2}$$

Auf der Grundlage der Position $(B, L, h)_1$ bzw. $(x, y, z)_1$ im Ausgangsbezug berechnen sich streng nicht-linear die nachfolgenden Korrekturen (ΔB, ΔL, Δh), welche wegen der i. A. unterschiedlichen Ellipsoiddimensionen im Ausgangs- (Referenzrahmen-1) und Zielbezugsrahmen (Referenzrahmen-2) vorliegen. Die Beziehungen hierfür lauten:

$$\begin{aligned} \Delta B_{(a_1,b_1),(a_2,b_2)} &= B(a_2, b_2|(X, Y, Z)_1) - B(a_1, b_1|(X, Y, Z)_1) \\ \Delta L_{(a_1,b_1),(a_2,b_2)} &= 0 \\ \Delta h_{(a_1,b_1),(a_2,b_2)} &= h(a_2, b_2|(X, Y, Z)_1) - h(a_1, b_1|(X, Y, Z)_1) \end{aligned} \tag{2-3}$$

Der Molodenski-Ansatz und die Herleitung der obigen Beziehungen (2-1), (2-2), (2-3) werden in einfacher Form ohne eine FEM-Vermaschung in der Software WTRANS (`www.geozilla.de`) bereitgestellt. Als Datums- bzw. Transformationsparameter $\boldsymbol{d}$ treten in (2-1) die drei Translationen (t_x, t_y, t_z), die Maßstabsdifferenz Δs sowie die drei Rotationen $(\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z)$ zwischen den Bezugsrahmen 1 und 2 auf.

In der für die praxisgerechte Realisierung von Trafo-1 und Trafo-2 auf der Grundlage des Molodenski-Ansatzes ((2-1), (2-2), (2-3)) erfolgten Softwareentwicklung CoPaG (COntinuously PAtched Georeferencing) wurde eine unregelmäßige FEM-Vermaschung für die betreffenden Landesgebiete implementiert (Abb. 2-1, Abb. 4-1). Anstelle eines einzigen Transformationsparametersatzes $\boldsymbol{d}$ werden in dem in CoPaG realisierten Ausgleichungsansatz – der Maschenzahl n entsprechend – n-Sätze von Transformationsparametern ($\boldsymbol{d}_i$ $i = 1, \ldots n$) geschätzt. Dabei werden zusätzliche stochastische Stetigkeitsbedingungen entlang der Maschengrenzen eingeführt (Abb. 2-1, rechts). Die Stochastizität der Stetigkeitsbedingungen entspricht dabei dem Punktrauschen in den FEM-Maschen selbst. Die Kantenstetigkeit wird ausgleichungstechnisch entweder über die Forderung von Stetigkeit für fiktive auf den Kanten gelegenen Punkten, oder über die Forderung identischer Residuen für kantennahe physikalische Passpunkte erreicht. Entsprechende Bedingungen werden jeweils bzgl. der Parameter der beteiligten benachbarten Maschen formuliert.

Mit diesem „Patching“ eines Landesgebietes in Einzelmaschen (Abb. 2-1, Abb. 4-1) werden die im Falle nur eines Transformationsparametersets $\boldsymbol{d}$ in Form eines Feldes großer Residuen, der sog. Hauptschwachform [Jäger, 1988; Jäger u. Leinen, 1992] der klassischen trigonometrischen Netze (Abb. 2-1, rechts), auftretenden Problematiken vermieden. Die FEM-Vermaschung mit lokalen Transformationsparametern ($\boldsymbol{d}_i$ $i = 1, \ldots n$) ermöglicht so mit dem CoPaG-Ansatz zum einen die notwendige Suche grober Fehler in den identischen Punkten $(B, L, h)_1$ und $(B, L, h)_2$. Bei nur einem Parametersatz $\boldsymbol{d}$ und entsprechend großen Residuen dagegen ist die Aufdeckung grober Fehler nur auf der Basis der i. A. jedoch nicht verfügbaren Kovarianzmatrizen der Netzkoordinaten möglich. Zum zweiten implizieren die großen Residuen bei nur einem Parametersatz $\boldsymbol{d}$ (Abb. 2-1, rechts) – in Anbetracht eines zu erwartenden prozentualen Interpolationsfehlers – einen betragsmäßig entsprechend größeren Residueninterpolationsfehler bei der Transformation von Neupunkten, als dies bei einer FEM-Vermaschung und kleineren Residuen (Abb. 2-1, links) der Fall ist. Bei der Trafo-1, der Überführung der klassischen Lagekoordinaten $(B, L)_{\text{klass}}$ in den ITRF-Bezug, werden die Hauptschwachformen der klassischen Netzgeometrie (Abb. 2-1, rechts) netzverbessernd getilgt. D. h., es erfolgt mit dem ITRF-Übergang bzw. der Trafo-1 die Homogenisierung und Richtigstellung der langwellig deformierten klassischen Landesnetze (Abb. 2-1, rechts). Bei der Trafo-2 wird dagegen die keinen ausgeprägten Hauptschwachformen unterliegende Geometrie des ITRF-Bezugs beim Übergang in ein klassisches Landessystem stets langwellig deformiert.

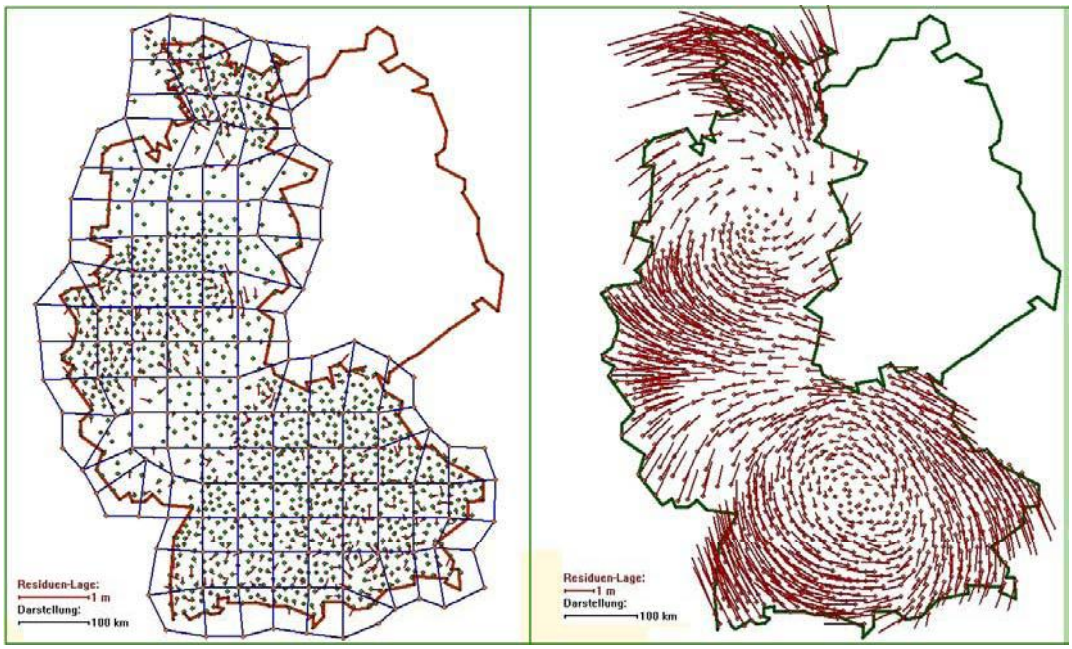

Abb. 2-1: Links: Strenge CoPaG-Transformation zwischen den Lagekoordinaten im DHDN und ITRF-Bezug ETRF89 unter Aufteilung Westdeutschlands in 81 „Patches“ mit Residuen unter 3 cm im Mittel.
Rechts: Residuen (bis 2.5 m) bei bundesweit nur einem Transformationsparametersatz bzw. nur einer Masche

Die ermittelten stetigen Transformationsparameter ($\boldsymbol{d}_i$ $i = 1, \ldots n$) werden zusammen mit den Residuen auf sog. Transformationsparameter-Datenbanken geschrieben. Neben den oben bereits genannten positiven Eigenschaften der FEM-Maschenaufteilung in Bezug auf die Suche grober Fehler und die Restklaffungsinterpolation bestehen weitere Vorteile und Alleinstellungsmerkmale des FEM-basierten 3D-Transformationsansatzes CoPaG. Dies sind:

1. Im Gegensatz zu 3D-Ansätzen in kartesischen Koordinaten kann explizit zwischen TP- (3D), AP- (2D) und Nivellement- (1D) Passpunkten unterschieden werden. Diese können unabhängig und mit individuellen Genauigkeiten zur Bestimmung der Transformationsparameter herangezogen werden.

2. Als Ausgleichungskonzept erlaubt CoPaG neben einer statistisch fundierten Qualitätskontrolle der berechneten Transformationsparameterdatenbanken auch die Berechnung einer landesweiten Genauigkeitsfläche [Jäger u. Kälber, 2008] für den Übergang zwischen ITRF und klassischen Referenzrahmen.

3. Für eine genaue Lagetransformation (Trafo-1, Trafo-2) werden die Höhen im Ausgangssystem $(B, L, h)_1$ nur in untergeordneter Genauigkeit benötigt. Daher kann die Höheninformation – z. B. im Fall von reinen Lagepasspunkten – bei der Berechnung der Transformationsparameterdatenbanken aus frei zugänglichen HBF- und Höhenmodell-Datenquellen gewonnen werden.

4. Im Molodenski-Ansatz von CoPaG kann durch eine entsprechende Aufsplittung der Spalte 4 der Molodensimatrix (2-2) in zwei Spalten – im Gegensatz zu anderen Konzepten – eine aus physikalischen Gründen auch prinzipiell notwendige Trennung zwischen einem Lage- und einem Höhenmaßstab erfolgen.

5. Die Allgemeingültigkeit der strengen 3D-Modellierung CoPaG erlaubt eine Anwendung zur Berechnung von Transformationsparameterdatenbanken für die Aufgaben Trafo-1 und Trafo-2 in beliebigen Ländern (Übersicht, siehe `www.geozilla.de`).

2.2 DFHBF-Konzept und Datenbanken zur Realisierung des Höhenübergangs Trafo-3

Die geodätische Infrastruktur für die Transformationskomponente Trafo-3 erfordert mit $H = h - N$ die Bereitstellung der Höhenbezugsfläche (HBF) N zur Überführung der ITRF-basierten ellipsoidischen GNSS-Höhe h in die physikalische Höhe H am Ort (B, L, h). Kennzeichnend für das Berechnungskonzept DFHBF (Digitale Finite Elemente (FEM) Höhenbezugsfläche) ist die stetige FEM-Repräsentation NFEM$(\boldsymbol{p}|B, L)$ der Höhenbezugsfläche (HBF) über bivariate Maschenpolynome (Abb. 2-2). Das DFHBF-Konzept (`www.dfhbf.de`) wurde erstmals in [Jäger, 1997] vorgestellt. Mit dem FEM-Modell der HBF stellt sich die Beziehung zwischen der ITRF-basierten ellipsoidischen GNSS-Höhe h und der physikalischen Landeshöhe H dar als:

$$h = H + NFEM(\boldsymbol{p}|B, L) \tag{2-4}$$

Bei älteren Gebrauchshöhensystemen (z. B. in Deutschland das DHHN12) tritt in (2-4) noch die Modellierung eines zusätzlichen Maßstabsterms hinzu. Dieser entfällt bei modernen Höhensystemen, wie den europäischen Normalhöhen (`www.euref.eu`), da deren Festlegung auf ein Referenzschwerefeld (GRS80) mit einem Niveauellipsoid basiert, dessen Oberflächenpotenzial U_0 dem Potenzialwert W_0 der Geoidoberfläche des tatsächlichen Schwerefelds der Erde entspricht.

Die Potenzialwerte $U_0 = W_0$ legen auf den jeweiligen Höhenbezugsflächen N mit den Orten $H_{\text{orth}} = H_N = 0$ zugleich das Nullniveau moderner orthometrischer bzw. Normalhöhensysteme fest. Die Höhenbezugsflächen (HBF) für orthometrische H_{orth} bzw. Normalhöhen H_N sind das Geoid $N_G(B, L)$ bzw. das Quasigeoid $N_{\text{QG}}(B, L, h)$.

Das DFHBF-Konzept zielt auf die Berechnung von Quasigeoid-Modellen N_{QG} nach der Theorie von Molodenski ab. Quasigeoidmodelle $N_{\text{QG}}(B, L, h)$ hängen im Gegensatz zu Geoidmodellen prinzipiell von der Höhe h ab. Analog zur QGeoid-Griddarstellung anderer Konzepte kann die

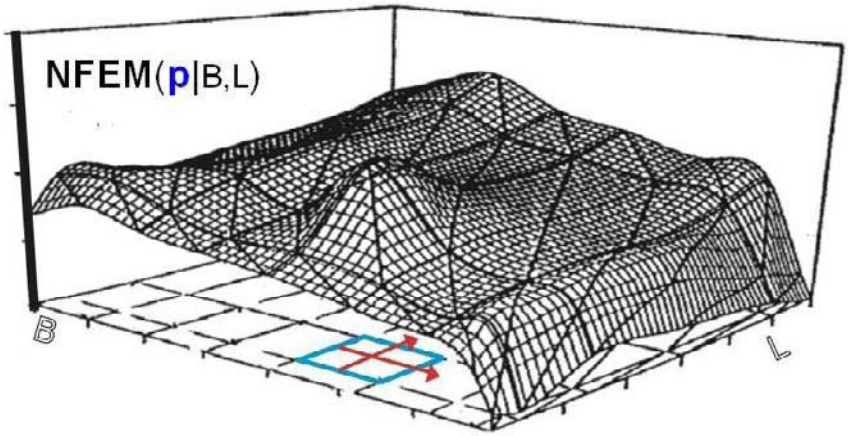

Abb. 2-2: $NFEM(\boldsymbol{p}|B,L)$ als stetige Taylorentwicklung der Höhenbezugsfläche (HBF)

resultierende Q-Geoidfläche mit $NFEM(\boldsymbol{p}|B,L)$ ((2-6), Abb. 2-2) – infolge schwacher über die Passpunkte $(B,L,h|H)$ (Abb. 4-2) eingeflossenen Höhenabhängigkeit h – für die Praxis allein in (B,L) parametrisiert werden. Die Höhenbezugsfläche (HBF) des Quasigeoids und der zugehörige Höhensystemtyp der Normalhöhen setzen sich in der modernen Geodäsie als Infrastrukturbasis zur Höhenpositionierung in GNSS-Positionierungsdiensten zunehmend durch (`www.euref.eu`). Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass im Gegensatz zu Geoid und orthometrischen Höhen, hier neben einem Geopotenzialmodell (GPM) und dem Referenzpotenzial (GRS80) keine weiteren Modelle bzw. Hypothesen zum tatsächlichen Erdschwerefeld zu deren mathematischer Darstellung am Ort $P(B,L,h)$ benötigt werden. Das gilt auch im Fall der zugehörigen Normalhöhen H_N, die terrestrisch allein aus der aus Nivellement und Schweremessungen ermittelten geopotentiellen Kote und dem Referenzschwerefeld (GRS80) am Ort $P(B,L,h)$ resultieren [Illner u. Jäger, 1995].

In einer unabhängigen zweiten Stufe kann die hypothesenfrei berechnete HBF eines Quasi-Geoids $N_{\mathrm{QG}}(B,L,h)$ mit

$$N_G = N_{QG} + \frac{\bar{g}-\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}} \cdot H \tag{2-5}$$

im Bedarfsfall punktweise in ein Geoid-Grid N_G umgeformt werden. Mit $\bar{g}$ und $\bar{\gamma}$ werden die aus einem regionalen Dichtemodel bzw. die direkt aus dem Referenzpotential berechneten mittleren Schwerewerte entlang der Lotlinie bezeichnet. Die lokale Höhe H wird in (2-5) höhentypunabhängig in untergeordneter Genauigkeit benötigt. Im DFHBF-Ausgleichungsansatz wird in (2-4) als Skalarprodukt zwischen dem ortsabhängigen sog. Vandermond'schen Vektor $\boldsymbol{f}$ und dem Unbekanntenvektor $\boldsymbol{p}$ der Polynomparameter umgeschrieben. Wir erhalten:

$$h + v = H + NFEM(\hat{\boldsymbol{p}}|B,L) = \hat{H} + \boldsymbol{f}(B,L)^{\mathsf{T}} \cdot \hat{\boldsymbol{p}}, \quad \text{mit} \tag{2-6}$$

$$\boldsymbol{f}(B,L) = [1|B',L'|B'^2, B'\cdot L', L'^2|\ldots]^{\mathsf{T}} \text{ und } \hat{\boldsymbol{p}} = [\hat{p}_{00}|\hat{p}_{10},\hat{p}_{01}|\hat{p}_{20},\hat{p}_{11},\hat{p}_{02}|\ldots]^{\mathsf{T}}.$$

Mit (B',L') werden die auf die lokalen Maschenzentren (B_0,L_0) reduzierten geographischen Koordinaten bezeichnet (Abb. 2-2). Als weitere Verbesserungsgleichungen (2-7), (2-8) und (2-9) treten mit $N_{\mathrm{QG}}(B,L,h)$ und (ξ,η) die Beobachtungskomponenten aus vorhandener QGeoid- bzw. Lotabweichungsinformation hinzu. Diese stehen in Form regionaler i. A. nicht gefitteter QGeoid-Modelle sowie globaler, ebenfalls nicht gefitteter Geopotenzialmodelle (GPM), wie z. B. EIGEN05 oder EGM2008 bereit.

$$N_{QG}(B,L,h)^j + v = NFEM(\hat{\boldsymbol{p}}|B,L) + \partial N_{QG}(\hat{\boldsymbol{d}}_N^j) \tag{2-7}$$

$$\xi^j + v = \frac{-\boldsymbol{f}_B}{M(B)+h} \cdot \hat{\boldsymbol{p}} + \partial B(\hat{\boldsymbol{d}}^j_{\xi,\eta}) \tag{2-8}$$

$$\eta^j + v = \frac{-\boldsymbol{f}_L}{(N(B)+h)\cdot \cos B} \cdot \hat{\boldsymbol{p}} + \partial L(\hat{\boldsymbol{d}}^j_{\xi,\eta}) \tag{2-9}$$

Über (2-8) und (2-9) können auch Lotabweichungen aus Zenitkamerabeobachtungen einfließen. Die Datumsanteile bzw. -Parametrisierungen ($\partial N \partial B, \partial L$) sind auf den Molodenskiansatz (2-2) zurückzuführen. Sie erlauben die Tilgung langwelliger Systematiken („Schwachformen“ [Jäger, 1988; Jäger u. Leinen, 1992]) in den Beobachtungskomponenten (2-7), (2-8) und (2-9) über Maschenverbände, sog. „Patches“ (Abb. 4-2, links). Bei gleicher Datenbasis sind die Parameter $\hat{\boldsymbol{d}}^j_N$ und $\hat{\boldsymbol{d}}^j_{\xi,\eta}$ im j-ten „Patch“ identisch. Mit H (2-10) und C (2-11) gehen die physikalischen Höhen der Höhenpasspunkte $(B, L, h|H)$ bzw. die Kantenstetigkeitsbedingungen von $NNFEM(\boldsymbol{p}|B, L)$ (Abb. 2-2) in den DFHBF-Ausgleichungsansatz ein.

$$H + v = \hat{H} \tag{2-10}$$

$$C + v = C(\hat{\boldsymbol{p}}) \tag{2-11}$$

Treten im DFHBF-Konzept physikalische Beobachtungen hinzu [Jäger, 2007], so werden diese in einem regionalen sog. Kugelkappenmodell [Schneid, 2006] mit den Kugelfunktionskoeffizienten $\overline{C}'_{n(k),m}$ und $\overline{S}'_{n(k),m}$ parametrisiert. Diese Parametrisierung wird als physikalische Komponente des DFHBF-Ausgleichungsansatzes bezeichnet. Der Vorteil der Parametrisierung in einer regionalen Kugelkappe, gegenüber einem globalen Kugelfunktionsmodell besteht darin, dass für die gleiche Auflösung einer HBF in ersterem Modell wesentlich weniger unbekannte Kugelfunktionsparameter auftreten. So erfordert die 1cm-Auflösung der HBF mit einer globalen Kugelfunktionsentwicklung den Grad und Ordnung 7200 und damit ca. 50 Mio. Unbekannte, während z. B. für die Gebietsgröße Baden-Württemberg ein Kugelkappenmodell in Grad und Ordnung von ca. $k_{\max} = 220$ ausreichend ist, welches mit ca. 50.000 Unbekannten auskommt.

Die im lokalen astronomischen System (LAV) durchgeführten Schweremessungen g_{LAV} werden neben der Gezeitenreduktion um den Zentrifugalbeschleunigungsanteil reduziert und dann in das lokale geodätische vertikale System (LGV) der Kugelkappe rotiert [Jäger, 2007]. Für den resultierenden Schwerewert g_{LGV} gilt dann in der Kugelkappenparametrisierung die Verbesserungsgleichung [Schneid, 2006]:

$$g_{\mathrm{LGV}} + v = \sum_{k=0}^{k_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{n(k)+1} \frac{n(k)+1}{r} \sum_{m=0}^{k} \left(\hat{\overline{C}}'_{n(k),m} \cdot \cos m\lambda' + \hat{\overline{S}}'_{n(k),m} \cdot \sin m\lambda'\right) \cdot P_{n(k),m}(\cos\theta'). \tag{2-12}$$

Die Parameter $(\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm})$ eines globalen Modells $V(r, \lambda\theta) = V(\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm})$ können aufgrund der an beliebigen Orten $P(B, L, h)$ identischen Gravitationspotenzialwerte in die Koeffizienten des Gravitationsmodells der Kugelkappe überführt werden. Dies geschieht, indem entsprechend der Anzahl der mit $k_{\max}$ vorliegenden Unbekannten $(\overline{C}'_{n(k),m}, \overline{S}'_{n(k),m})$ die Gleichsetzung von $V(\overline{C}'_{n(k),m}, \overline{S}'_{n(k),m}|r, \lambda', \theta')$ und $V(\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm}|r, \lambda, \theta)$ erfolgt. Wir erhalten das bzgl. der Kugelkappenkoeffizienten lineare Gleichungssystem:

$$\sum_{k=0}^{k_{\max}} \left(\frac{a}{r}\right)^{n(k)+1} \sum_{m=0}^{k} (\overline{C}'_{n(k),m} \cdot \cos m\lambda' + \overline{S}'_{n(k),m'} \cdot \sin m\lambda') \cdot P'_{n(k),m}(\cos\theta') = V(\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm}|r, \lambda, \theta) \tag{2-13a}$$

Auf der Grundlage des LGL (2-13a) lassen sich aus den Koeffizienten $(\overline{C}_{nm}, \overline{S}_{nm})$ globaler GPM generell die Parameter $(\overline{C}'_{n(k),m}, \overline{S}'_{n(k),m})$ regionaler Kugelkappen ermitteln; bei Vorliegen

der Kovarianzmatrix des globalen GPM unter Anwendung der Fehlerfortpflanzung auch deren Kovarianzmatrix. Als weitere Komponente des DFHBF-Ansatzes gehen dann die über (2-13a) ermittelten Kugelkappenparameter als direkte Beobachtungen ein. Wir erhalten:

$$\overline{C}'_{n(k),m} + v = \hat{\overline{C}}'_{n(k),m} \quad \text{und} \tag{2-13b}$$

$$\overline{S}'_{n(k),m} + v = \hat{\overline{S}}'_{n(k),m} \tag{2-13c}$$

Zur Behebung der Doppelparametrisierung bzgl. geometrischer und physikalischer Komponente erfolgt schließlich mittels der fingierten Beobachtungsgleichung die Gleichsetzung

$$0 + v_{\Delta N} = N_{QG}(\hat{\overline{C}}'_{n(k),m}, \hat{\overline{S}}'_{n(k),m}) - (\boldsymbol{f}^{\mathsf{T}} \cdot \hat{\boldsymbol{p}}) \tag{2-14}$$

bzgl. der im Ziel der Berechnungen stehenden HBF. Über die Verbesserungsgleichungen (2-13a, 2-13b, 2-13c) erfolgt auch das Fitting der GPM-Information bzgl. der Passpunkte (2-6) und (2-10). Nach Schneid [2006] erfolgen die weiteren Fortentwicklungen des DFHBF-Konzeptes zur Einbindung der physikalischen Komponente gegenwärtig im Rahmen von [Younis], wo auch die Berechnung des gefitteten QGeoidmodells von Baden-Württemberg aus GPM-Information, Passpunkten und Schweredaten erfolgt.

2.3 RTCM-Transformationsmessages – Trafo-4

Die 2007 von der amerikanischen RTCM-Kommission (`www.rtcm.org`) verabschiedeten RTCM Transformationsnachrichten [Jäger u. Kälber, 2008] wurden von 2004 bis 2007 von einer internationalen Arbeitsgruppe unter Mitwirkung des Autors dieses Beitrages entwickelt. Sie ermöglichen, dass Trafo-2 und Trafo-3 nicht mehr in Form von Transformationsparameter-Datenbanken oder Grids auf den GNSS-Controllern der Nutzer (Abb. 1-1) vorzuhalten sind, sondern von den Betreibern der GNSS-Positionierungsdienste serverseitig geleistet werden können. Die RTCM Darstellung und Parametrisierung von Trafo-2 und Trafo-3 erfolgt in zwei RTCM-Messages (1021 oder 1022) und (1023 oder 1024). In diesen RTCM-Messages sind neben einer Reihe von Konfigurationsparametern die Transformationskomponenten eines Gitters und die Parameter einer 3D-Ähnlichkeitstransformation hinterlegt (Abb. 2-3). In diesen beiden Komponenten sind beliebige bestehende sog. Referenztransformationen abzubilden.

Die algorithmische Realisierung der Message-Generierung stellt sich wie folgt dar: Das lokale RTCM Gitter wird bzgl. der seitens des Nutzers an den Betreiber (Abb. 1-1) zugesandten NMEA-Positionsmessage (B, L, h) zentriert. Bezogen auf dieses Gitter (Abb. 2-3) werden virtuelle Passpunkte im ITRF-Bezug („Source CRS“, Abb. 2-3) generiert. Unter Anwendung der designierten Referenztransformationen des GNSS-Dienstbetreibers werden die entsprechenden Passpunktpositionen im klassischen Zielbezugsrahmen („Target CRS“, Abb. 2-3) generiert. Auf der Basis dieser virtuellen Passpunkte wird als Datumsübergang (Trafo-2) eine 3D-Ähnlichkeitstransformation berechnet. Für eine im GNSS-Rover-Client nachgeschaltete Residueninterpolation werden die 3D-Residuen (vB, vL, vh) den Gitterpunkten zugewiesen. Mit Blick darauf, dass mit Vollzug der Trafo-1 künftig auch die Trafo-2 graduell überflüssig wird, kann das RTCM-Gitter bereits jetzt auch so konfiguriert werden, dass dort anstelle des Residuums vh die Geoid- bzw. Quasigeoidhöhe N repräsentiert wird.

3 MONIKA-Konzept und -Software – Geodätische Geomonitoring-Infrastruktur

Das Konzept und die Software MONIKA (Geomonitoring für GNSS-Positionierungsdienste nach dem Karlsruher Modellansatz) realisieren eine bzgl. dem Netzdesign multivariate und

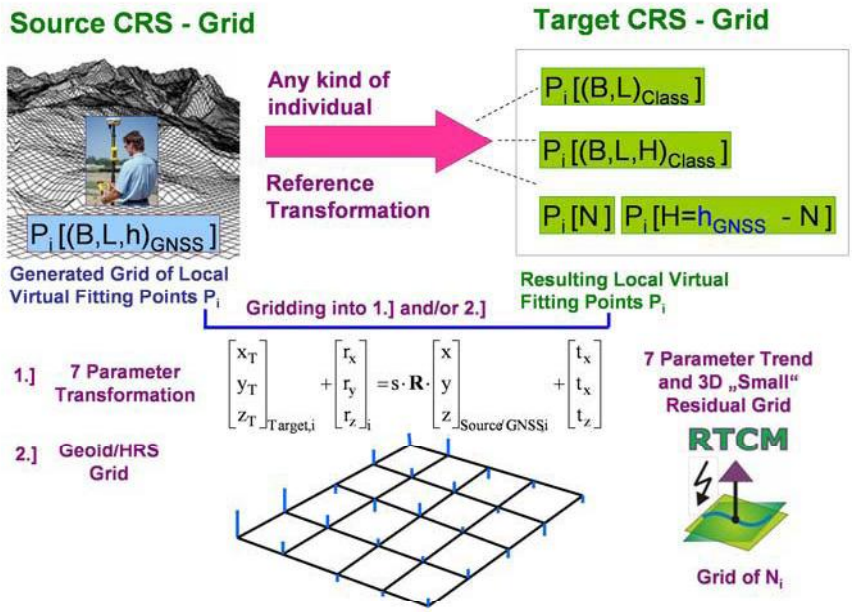

Abb. 2-3: RTCM-Transformations-Messages. Generierung über die Referenztransformationen (Trafo-2 und Trafo-3) im Konzept der virtuellen Passpunkte

multiepochale Deformationsanalyse ([Jäger et al., 2007; Jäger u. Spohn, 2010], `www.monika.ag`). Diese basiert auf den Zustandsinformationen der Koordinaten $\boldsymbol{x}'(t_i)$ und Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{C}_{x'}(t_i)$ des betreffenden Geosensornetzes bzw. GNSS-Referenzstationsnetzes zur Zeit t_i. Diese Zustandsinformationen resultieren in der softwaremäßigen Realisierung des Konzeptes MONIKA aus der baseline- bzw. netzartigen Ausgleichung der RINEX-Daten, können aber auch im SINEX-Format bereitgestellt werden. Unter Vorgabe einer Epochendauer δt wird in MONIKA die betreffende Teil- bzw. Gesamtnetzinformation $(\boldsymbol{x}'(t_i), \boldsymbol{C}_{x'}(t_i))$ automatisiert in 3D-Ausgleichungen mit statistisch fundierter Suche grober Fehler zu Tages- bzw. Mehrtagesepochen $(\boldsymbol{x}(t_i), \boldsymbol{C}_x(t_i))$ zusammengeschlossen. Diese Epochen können nahtlos aneinander liegen oder in Abständen dt überlappen bzw. auseinander liegen. Für die automatische Deformationsanalyse ist die Anzahl der Epochen n vorzugeben, für die das Basismodell einer multiepochalen Kongruenzanalyse erfolgen soll. Multivariat bedeutet, dass die aufeinander folgenden Epochennetze – vor dem Hintergrund stattfindender Änderungen im Stationsdesign – lediglich eine Schnittmenge gemeinsamer Punkte aufzuweisen haben. Das Basismodell zur Modellannahme der Kongruenz des GNSS-Netzes über alle $(i = 1, \ldots, n)$ Epochen im Zeitfenster ΔT der Deformationsanalyse lautet:

$$\boldsymbol{x}(t_i) + v_{x(t_i)} = \boldsymbol{D}_r^i \cdot d\hat{\boldsymbol{x}}_R + \boldsymbol{D}_O^i \cdot d\hat{\boldsymbol{x}}_O^i + \boldsymbol{x}_0^i \quad \text{und} \tag{3-1a}$$

$$\boldsymbol{C}_x(t_i). \tag{3-1b}$$

Mit $\hat{\boldsymbol{x}}_R$ werden die als stabil bzw. kongruent erachteten GNSS-Referenzstationen bezeichet, mit $\hat{\boldsymbol{x}}_O^i$ die bereits a priori als beweglich deklarierten Objektpunkte.

Zum Kongruenztest wird das funktionale Modell (3-1a, 3-1b) um den dreidimensionalen Zusatzparametervektor $\hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i)$ erweitert, der die Verschiebung des k-ten Referenzpunktes in der i-ten Epoche modelliert. Die betreffende Erweiterung des Gauß-Markov-Modells (3-1a, 3-1b) lautet:

$$(\boldsymbol{x}(t_i) - \boldsymbol{x}_0^i) + \boldsymbol{v}'_{x(t_i)} = \boldsymbol{D}_R^i \cdot d\hat{\boldsymbol{x}'}_R^i + \boldsymbol{D}_O^i \cdot d\hat{\boldsymbol{x}'}_O^i + \boldsymbol{B}_i^k \cdot \hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i) \quad \text{mit} \tag{3-2a}$$

$$\boldsymbol{B}_i^k \cdot \hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i) = \left[\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \ldots \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \ldots \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \right]^{\mathsf{T}} \cdot \hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i) \tag{3-2b}$$

Die Parameterschätzung (3-2a, 3-2b) kann auf der Grundlage der Designmatrix $\boldsymbol{B}_i^k$ der Modellerweiterung auf die Ergebnisse des Basismodells (3-1a, 3-1b) zurückgeführt werden [Jäger et al., 2005, 2007]. Wir erhalten für den Verschiebungsvektor $\hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i)$ und dessen Kofaktorenmatrix:

$$\hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i) = -(\boldsymbol{B}_i^{k\mathsf{T}}\boldsymbol{P}^i\boldsymbol{Q}_{vv}^i\boldsymbol{P}^i\boldsymbol{B}_i^k)^{-1} \cdot \boldsymbol{B}_i^{k\mathsf{T}}\boldsymbol{P}^i \cdot \boldsymbol{v}_{x(t_i)} \quad \text{und} \tag{3-3a}$$

$$\boldsymbol{Q}_{\hat{\nabla}\hat{\nabla}_R}^{i,k}(t_i) = (\boldsymbol{B}_i^{k\mathsf{T}}\boldsymbol{P}^i\boldsymbol{Q}_{vv}^i\boldsymbol{P}^i\boldsymbol{B}_i^k) \tag{3-3b}$$

Die statistische Prüfung der 3D-Verschiebung $\hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}(t_i)$ bzgl. der Signifikanz erfolgt auf der Grundlage der a posteriori Varianz bezogenen Testgröße [Jäger u. Spohn, 2010] als

$$T(\hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}) = \frac{\hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k\mathsf{T}} \cdot (\boldsymbol{Q}_{\hat{\nabla}\hat{\nabla}_R}^{i,k})^{-1} \cdot \hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}}{3 \cdot \hat{\bar{\sigma}}^2} \sim F_{3,r-3}, \text{ mit} \tag{3-4a}$$

$$\hat{\bar{\sigma}}^2 = \frac{\boldsymbol{v}^\mathsf{T}\boldsymbol{P}\boldsymbol{v} - \hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k\mathsf{T}} \cdot (\boldsymbol{Q}_{\hat{\nabla}\hat{\nabla}_R}^{i,k})^{-1} \cdot \hat{\nabla}\boldsymbol{x}_R^{i,k}}{r-3}. \tag{3-4b}$$

Die der obigen Deformationsanalyse unterzogenen Referenzpunkte werden zusammen mit den Konfidenzintervallen unter Trennung in Lage und Höhe visualisiert (Abb. 3-1, Abb. 4-4). Instabile Referenzpunkte werden nach erstmaligem Auftreten einer signifikanten Verschiebung im Weiteren als Objektpunkte behandelt (Abb. 3-1, Epoche 9). Die betreffenden Objektpunktverschiebungen werden dann von Epoche zu Epoche geschätzt und statistisch geprüft. Sofern sich eine 3D-Verschiebung dann wieder als nicht signifikant erweist, erhält der betreffende Punkt den Referenzpunkt-Status zurück (Abb. 3-1, Epoche 15) und wird im Folgenden wieder gemäß (3-4a, 3-4b) geprüft.

Abb. 3-1: Zeitreihe für den Hochwert der GNSS-Referenzstation Station Karlsruhe (KARL) im Verlauf eines Jahres bei 14-Tage-Epochen. Die Dreiecke bezeichnen nicht signifikante, die Vierecke signifikante 3D-Verschiebungen beim Referenz- bzw. Objektpunkt-Test

Der zeitliche Abstand ΔT_{DEF} aufeinander folgender multiepochaler Deformationsanalysen nach (3-1a, 3-1b) bis (3-4a, 3-4b) kann in MONIKA ebenfalls frei konfiguriert werden.

4 Beispiele für den Einsatz der entwickelten GIPS-Konzepte

4.1 Lagebezugssystemübergänge – Trafo-1 und Trafo-2

Die graphikunterstützte CoPaG-Software (Abb. 4-1) realisiert die statistisch kontrollierte Umformung zwischen ITRF und dem klassischen Landeslagebezug.

Die berechneten stetigen Transformationsparameter werden auf standardisierten Transformationsparameter-Datenbanken abgelegt, welche mittels Zugriffssoftware (DLL) gelesen werden können. Die Abb. 4-1 zeigt die FEM-Vermaschung von Brasilien und die identischen Punkte des

ITRF-bezogenen SIRGAS-Datums und des klassischen SAD96-Datums. Das alle Transformationskomponenten (Trafo-1 bis Trafo-4) umfassende Brasilien-Projekt wird in Zusammenarbeit mit der brasilianischen Landesvermessung IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), Rio de Janeiro durchgeführt.

Die CoPaG-Datenbanken können auf der Basis dieser DLL mit Blick auf Trafo-1 (Kap. 2.1) in beliebige GIS-Systeme implementiert werden. Eine unter Linux implementierte Web-basierte Onlinetransformation für West-Deutschland findet sich auf `www.geozilla.de`. Die im Fall der inversen Transformation (Trafo-2) als DFLBF_DB bezeichneten Datenbanken (DB) können zur Realisierung der Online-Überführung vom ITRF-Bezug $(B, L, h)_{\mathrm{ITRF}}$ in einen klassischen Landesbezug $(B, L)_{\mathrm{klass}}$ (Trafo-2) auf allen GNSS-Controllertypen eingesetzt werden, ebenso wie als sog. Referenztransformation zur Generierung von RTCM-Transformationsnachrichten (Kap. 2.3, Kap. 4.3).

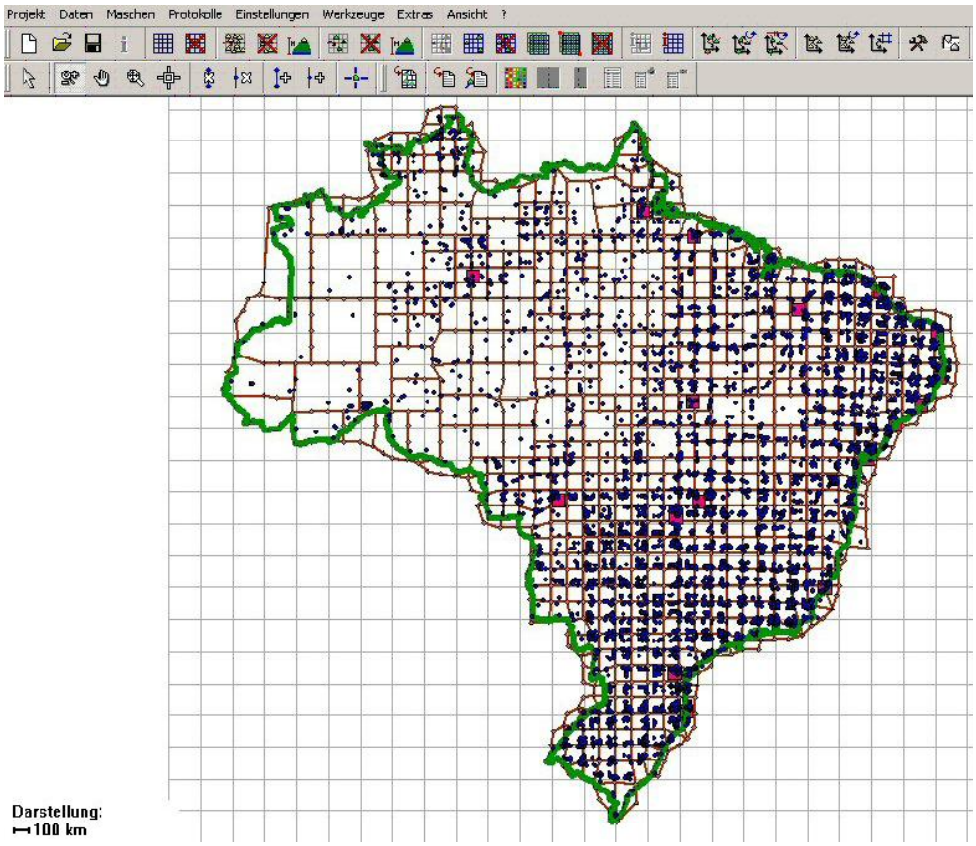

Abb. 4-1: CoPaG-Software Screenshot mit Vermaschungsansicht für Brasilien mit identischen Punkten im ITRF-Bezug (SIRGAS) und SAD96 einem der klassischen Lagedatumsbezüge Brasiliens

4.2 HBF-Berechnung und Online-Höhentransformation von h nach H – Trafo-3

Die DFHBF-Software (`www.dfhbf.de`) realisiert den in Kap. 2.2 vorgestellten Ansatz zur Berechnung von Höhenbezugsflächen in Form von Quasigeoid-Modellen.

Im Zugriff auf die – die DFHBF-Parameter $\boldsymbol{p}$ sowie die Designparameter des FEM-Gitters (Abb. 2-2, Abb. 4-2) enthaltende – DFHBF_DB erhält der GNSS-Nutzer über $NFEM(\boldsymbol{p}|B, L)$ (2-4) den Quasigeoidwert N_{QG} zur direkten Ermittlung der Normalhöhe H über $H = h - N_{QG}$.

DFHBF_DB sind auf GNSS-Controllern lauffähig und können auch als Referenztransformation zur Generierung von RTCM-Transformationsmessages (Trafo-4) verwendet werden (Kap. 2.3, Kap. 4.3).

Abb. 4-2, links zeigt als Screenshot der DFHBF-Software die FEM-Vermaschungsansicht (dünne blauen Linien, $5 \times 5km$ FEM-Maschen), die „Patches“ (dicke blaue Linien) sowie die identischen Punkte (grün) zum Projekt der Quasigeoid-Berechnung für Moldawien. Die Berechnungen wurden im Rahmen des BMBF-Projektes MOLDPOS (`www.moldpos.eu`) durchgeführt. Die Genauigkeit der berechneten Höhenbezugsfläche für Moldawien liegt bei (1-3) cm. Abb. 4-2, rechts zeigt die Unterschiede im Ergebnis der HBF zwischen der Verwendung von EGG97-Gridbeobachtungen im Vergleich zu entsprechenden EGM2008 Beobachtungen in den Verbesserungsgleichungen (2-7, 2-8, 2-9). Signifikante Unterschiede bestehen – wegen der nicht gefitteten Beobachtungstypen (2-7, 2-8, 2-9) – naturgemäß im Wesentlichen an dem passpunktlosen (Trennlinie in lila) Grenzbereich zur Ukraine.

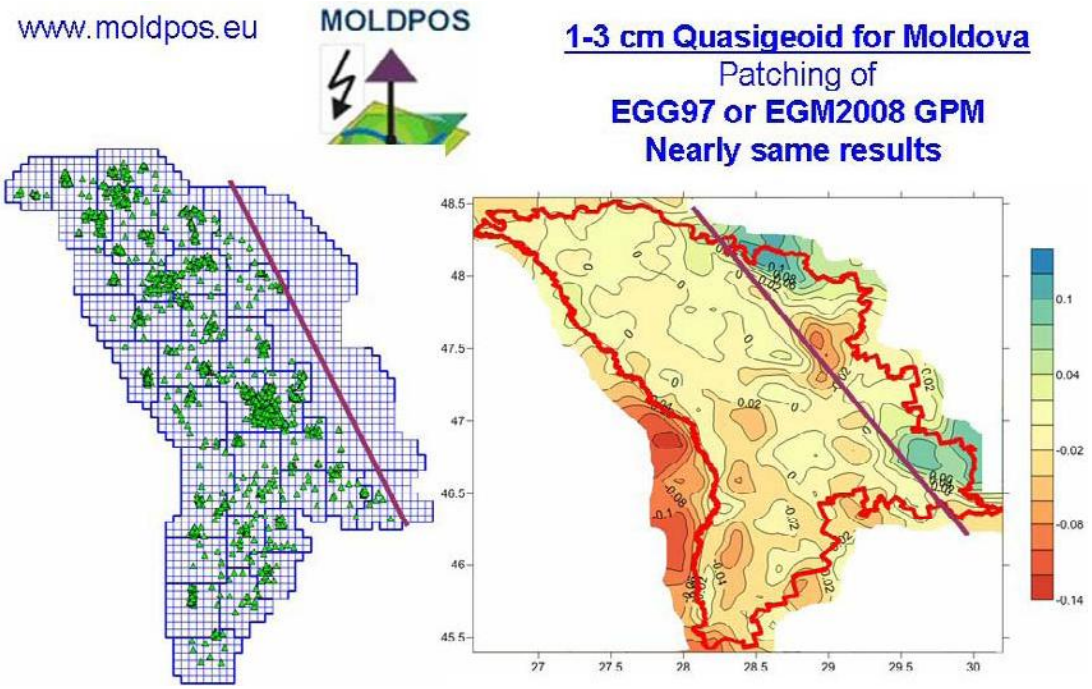

Abb. 4-2: Quasigeoidberechnung für Moldavien mittels DFHBF-Software

4.3 Generierung von RTCM-Transformationsnachrichten aus Referenztransformationen zur Lage und Höhe – Trafo-4

Die Abb. 4-3 zeigt den parallel zu den Aktivitäten in der Working Group RTCM-Transformation-Messages entwickelten RTCM-Transformationsserver GZTraS.

Neben dem RTCM-Transformationsmessages Server GZTraS wurde auch ein GNSS-Rover-Client (GZTraC) entwickelt. Beide stehen zusammen mit den Referenztransformationen der DFLBF Lagetransformations-DB für Bayern und der DFHBF-DB für Florida, USA auf `http://www.geozilla.de/eng/software/software_gztras.htm` zur Verfügung. Ein vollständiges Set von RTCM-Transformationsmessages besteht minimal aus zwei Transformationsnachrichten, (1021 oder 1022) und (1023 oder 1024). Mit den weiteren Messages (1025, 1026 und 1027) wird lediglich die etwaig benötigte Zusatzinformation, wie z. B. Projektionsinformation, bereitgestellt. Die Messages 1021 und 1023 stellen die Trafo-2 und Trafo-3 in einer Georeferenzierung mittels

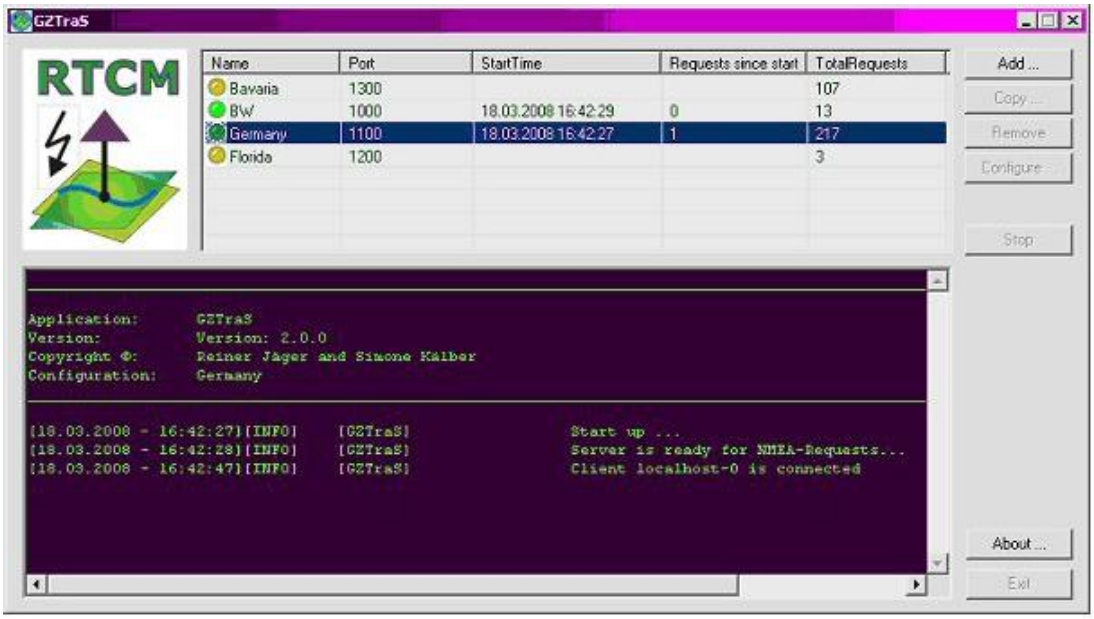

Abb. 4-3: Ansicht des Hauptfensters des RTCM-Transformations-Messages Servers GZTraS

geographischer Koordinaten (B, L), die Messages 1022 und 1024 alternativ mittels projizierter kartesischer Koordinaten bereit. Die Messages (1021 oder 1022) bzw. (1023 oder 1024) umfassen im Wesentlichen die o. g. 7 Parameter, die Georeferenzierung des lokalen RTCM-Grids sowie die Gridinformation der Residuen.

Die Konfigurierung des geometrischen und des inhaltlichen Message-Designs sowie die Festlegung der für die Message-Generierung an einem bestimmten Port (Abb. 4-3) zu verwendenden Referenztransformationen erfolgt serverseitig in GZTraS mittels einer Ini-Datei. Die Anforderung eines Sets von RTCM-Transformations-Nachrichten durch den GNSS-Rover-Client (GZTraC) basiert auf den Versand einer NMEA-Positionsmessage (Abb. 1-1) an den Server (GZTraS). Der GZTraS antwortet im TCP/IP-basierten Konzept mit dem entsprechenden RCTM-Messages-Set an die IP-Adresse des GNSS-Rover-Clients. Verlässt der Client den Gültigkeitsbereich der Message-Deklaration (Abb. 2-3), so wird GNSS-Rover-seits eine erneute Anforderung an den Server veranlasst etc.

4.4 Geodätische Geomonitoring-Infrastruktur – Beispiel zur Software MONIKA

Die Software MONIKA wird seit 2009 am Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) Baden-Württemberg zum Deformationsintegritäts-Monitoring des GNSS-Referenzstationsnetzes SAPOS eingesetzt.

Das Netzdesign für Baden-Württemberg ist in Abb. 1-1 rechts unten dargestellt, siehe dazu auch `www.sapos.de`. Die Berechnung der Zustandsinformationen $(\boldsymbol{x}'(t_i), \boldsymbol{C}_{x'}(t_i))$, welche in MONIKA zu Epochen zusammengeschlossen werden (Kap. 3), erfolgt am LGL automatisiert über die Processing-Engine der Berner GNSS-Software in Form von Mehrstunden- und Tages-Lösungen. Schnittstelle zwischen Berner GNSS-Software und MONIKA sind die SINEX-Daten der o.g. Zustandsshätzungen (Kap. 3).

Ab Ende 2010 findet die Software MONIKA (`www.monika.ag`) Einsatz am Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz Einsatz. Hier wird MONIKA zum einen

zum SAPOS Deformationsintegritäts-Monitoring und zum anderen – in einer Vernetzung mit GNSS-Stationen in Belgien und Nordrhein-Westfalen – für das geodynamische Geomonitoring-Projekt Eifel-Plume genutzt. Gegenstand des Projekts Eifel-Plume ist die Ermittlung der rezenten Bewegungsraten bzw. des Aktivitätsgrades der Eifelvulkane (Abb. 1-1, unten rechts). Die Abb. 4-4 zeigt als Screenshot auf das Hauptfenster der Software MONIKA den Ausschnitt des SAPOS-Netzes Rheinland-Pfalz als Teilbestand des geodynamischen Geosensor-Netzwerks Eifel-Plume. Die Visualisierung zeigt die mittels MONIKA auf der Basis der originären RINEX-Daten der GNSS-Stationen nachgewiesene Inkongruenz am Punkt 0514. Diese konnte ursächlich auf einen systematischen Fehler im Zusammenhang mit einem GNSS-Antennenwechsel zurückgeführt werden.

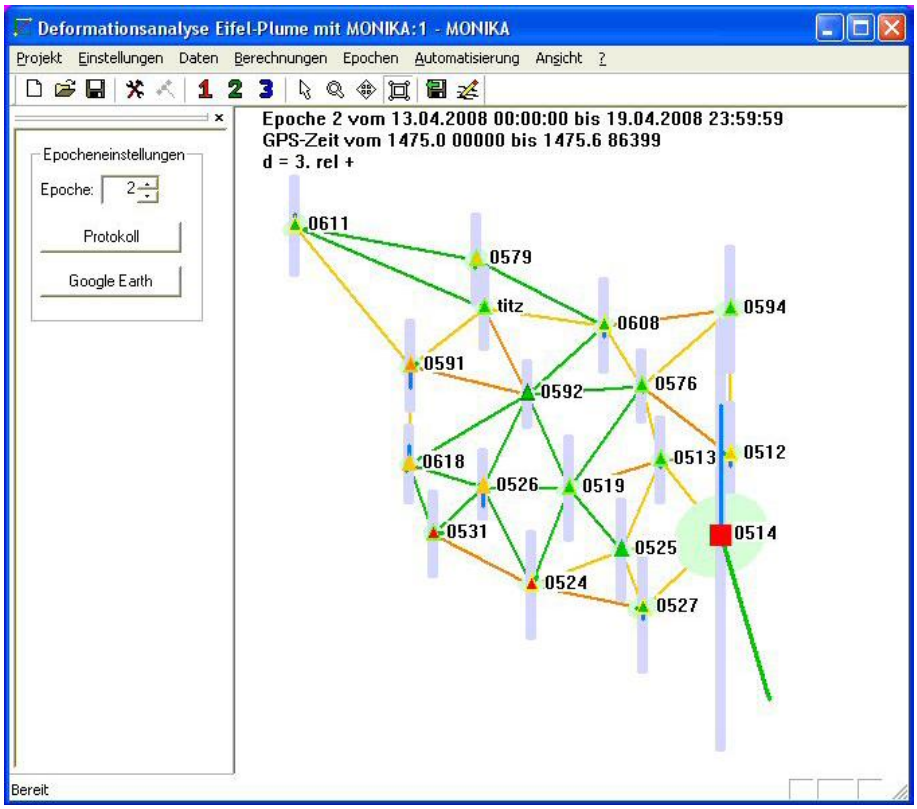

Abb. 4-4: Ansicht zur Software MONIKA. Projekt Eifel-Plume mit signifikanter „Deformation“ bei der GNSS-Referenzstation 0514 nach einem Antennenwechsel

Literatur

[EU 2007] *Richtlinie 2007/2/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. März 2007 zur Schaffung einer Geodateninfrastruktur in der Europäischen Gemeinschaft (INSPIRE).* 2007

[Biber et al. 2009] Biber, P. ; Jäger, R. ; Pilz, J. ; Zwiener, J.: *Online Precise Point Positioning (OPPP) im Server-Client-Konzept mit IGS-Produkten.* 2009. – Posterpräsentation, INTERGEO 2009, Karlsruhe

[Fuchs 2010] Fuchs, A.: *Konzipierung und Implementierung einer modularen Software (GOCA-Virtual-Sensor) sowie Algorithmen für virtuelle Sensoren im Geomonitoring und Anwendung auf die historischen Daten des Moskauer Kreml.* 2010. – Masterthesis. Fakultät für Geomatik, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft. Unveröffentlicht

[Illner u. Jäger 1995] Illner, M. ; Jäger, R.: Integration von GPS-Höhen ins Landesnetz – Konzept und Realisierung im Programm HEIDI. In: *Allgemeine Vermessungsnachrichten (AVN)* Heft 1 (1995), S. 1–17

[Jäger 1988] Jäger, R.: *Analyse und Optimierung geodätischer Netze nach spektralen Kriterien und mechanische Analogien.* Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Nr. 342, München, 1988

[Jäger 1997] Jäger, R.: Modell- und Softwareentwicklung zur Integration von GPS-Höhen in Landeshöhensysteme und zu Qualitätsanalyse und Verfeinerung von Geoidmodellen. In: *Horizonte 4/97, Zeitschrift Forschung an Fachhochschulen Baden-Württemberg, Mannheim* (1997)

[Jäger 2007] Jäger, R.: DFHRS – A rigorous Approach for the Integrated Adjustment and Fitting of Height Reference Surfaces. In: Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft – University of Applied Sciences (Hrsg.): *Forschung aktuell.* 2007, S. 78–82. – ISSN 1613-4958

[Jäger 2010] Jäger, R.: Geodätische FuE-Projekte im Bereich GNSS-Echtzeittechnologien und Mobile IT. In: Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft – University of Applied Sciences (Hrsg.): *Forschung aktuell.* 2010, S. 41–45. – ISSN 1613-4958

[Jäger et al. 2007] Jäger, R. ; Dick, H.-G. ; Spohn, P.: GNSS-Referenzstationskoordinaten-Monitoring nach dem Karlsruher Modellansatz (MONIKA) – Konzept, Realisierung und Ergebnisse. In: Chesi, G. (Hrsg.) ; Weinold, T. (Hrsg.): *14. Internationale Geodätische Woche, Obergurgl.* Wichmann-Verlag, Heidelberg, 2007

[Jäger u. Kälber 2000] Jäger, R. ; Kälber, S.: Konzepte und Softwareentwicklungen für aktuelle Aufgabenstellungen für GPS und Landesvermessung. In: *DVW Mitteilungen, Landesverein Baden-Württemberg* 10 (2000). – ISSN 0940-2942

[Jäger u. Kälber 2008] Jäger, R. ; Kälber, S.: The New RTCM 3.1 Transformation Messages – Declaration, Generation from Reference Transformations and Implementation as a Server-Client Concept for GNSS-Services. (2008). – RTCM Paper 110-2008-SC104-508. RTCM Committee SC 104. Arlington, VA, USA

[Jäger u. Leinen 1992] Jäger, R. ; Leinen, S.: Spectral Analysis of GPS-Networks and Processing Strategies due to Random and Systematic Errors. In: Defense Mapping Agency and Ohio State University (Hrsg.): *Proceedings of the Sixth International Symposium on Satellite Positioning, Columbus/Ohio (USA)* Bd. Volume 2, 1992, S. 530–539

[Jäger et al. 2005] Jäger, R. ; Müller, T. ; Saler, H. ; Schwäble, R.: *Klassische und robuste Ausgleichungsverfahren.* Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 2005

[Jäger u. Spohn 2010] Jäger, R. ; Spohn, P.: Deformation Integrity Monitoring for GNSS-Positioning Services Including a Scalable Hazard Monitoring by the Karlsruhe Approach (MONIKA). (2010). – Paper submitted to Bulletin of Geodesy and Geomatics. Firenze, Italy. In press

[Lekkerkerk 2010] Lekkerkerk, H.-J.: GNSS-Update – Interface Control. In: *Geoinformatics* 6, Vol. 13 (2010), S. 32–33

[Schmitt et al. 1991] Schmitt, G. ; Illner, M. ; Jäger, R.: Transformationsprobleme. In: *GPS und Integration von GPS in bestehende geodätische Netze*, DVW Landesverein Baden-Württemberg, 1991 (38. Jahrgang, Sonderheft), S. 125–142

[Schneid 2006] Schneid, S.: *Investigation of the Digital Finite Element Height Reference Surface (DFHRS) Concept for the Determination of Vertical Reference Systems.* 2006. – Promotion im FuE-Projekt DFHBF der HSKA. Kooperatives Verfahren zwischen der Nottingham Trent University (UK) und der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft

[Taylor u. Blewitt 2006] Taylor, G. ; Blewitt, G.: *Intelligent Positioning: GIS-GPS Unification.* Wiley & Sons, Chichester, UK, 2006

[Younis] Younis, G.: *Further Development of the DFHRS Approach and its Extension for Physical Observations.* – Dissertation im FuE-Projekt DFHBF der HSKA. Kooperatives Verfahren zwischen der Universität Darmstadt und der Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft. Promotions-Stipendium des DAAD. Laufend

Anschrift des Autors:

Prof. Dr.-Ing. Reiner Jäger
Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft
Fakultät für Geomatik
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe
reiner.jaeger@hs-karlsruhe.de