

SIRGAS: das Bezugssystem für Lateinamerika und die Karibik

Laura Sánchez, Wolfgang Seemüller, Manuela Seitz, Beate Forberg,
Franz Leismüller und Herbert Arenz

Zusammenfassung

SIRGAS (*Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*) ist zurzeit durch ein Netz von ca. 220 kontinuierlich beobachtenden GPS-Stationen (Netz SIRGAS-CON) realisiert. Dieser Referenzrahmen besteht aus zwei Hierarchieebenen: i) eine primäre Verdichtung des ITRF in Lateinamerika und der Karibik durch ein kontinentales Kern-Netz und ii) die Erweiterung dieses Kern-Netzes durch die nationalen Referenzrahmen (bzw. Verdichtungsnetze). Das Kern-Netz sorgt für die langfristige Stabilität des Bezugsrahmens; die Verdichtungsnetze ermöglichen den Zugang zum ITRF auf lokaler Ebene. SIRGAS-CON wird wochenweise prozessiert und folgende Produkte werden bereitgestellt: wöchentliche Lösungen mit schwachen Datumsbedingungen für die Einbindung des Netzes in das IGS-Polyhedron; wöchentliche Stationspositionen im ITRF als Referenzwerte für Vermessungsprojekte; und Mehrjahreslösungen für die Bestimmung der Netzkinematik. Dieser Beitrag beschreibt die Analyse und Qualität von SIRGAS-CON als aktuelle Realisierung des SIRGAS-Bezugssystems sowie die geplanten Aktivitäten, um diesen Referenzrahmen weiter zu verbessern.

Summary

At present, SIRGAS (*Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*) is realized by a network of about 220 continuously operating GPS stations (SIRGAS-CON network). It consists of two hierarchy levels: i) a core network as primary densification of the ITRF in Latin America and the Caribbean, and ii) the densification of this continental network by means of the national reference frames (i.e. densification sub-networks). The core network ensures the long-term stability of the continental reference frame; the densification sub-networks provide the accessibility to the ITRF in local levels. SIRGAS-CON is weekly processed to provide: loosely constrained weekly solutions to include the network into the IGS polyhedron, weekly positions aligned to the ITRF as reference for surveying, and multi-year solutions providing information about the network kinematics. This paper describes the analysis and quality of the SIRGAS-CON network as the current realization of the SIRGAS reference system, as well as the planned activities to continue improving this reference frame.

1 Einleitung

Die fortschreitende Anwendung von Satellitenbeobachtungsverfahren in der Landesvermessung (insbesondere GPS: *Global Positioning System*) erfordert die Nutzung von modernen Referenzsystemen, die die Konsistenz zwischen Satellitenbahnen und terrestrischen Beobachtungsstationen garantieren. Da die Satellitenbahnen im Allgemeinen in einem dreidimensionalen geozentrischen kartesischen Koordinatensystem berechnet werden, sind auch die Ergebnisse für die Stationskoordinaten auf der Erdoberfläche primär in diesem System gegeben.

Das ITRS (*International Terrestrial Reference System*) wird als international vereinbartes, weltweites Bezugssystem verwendet (IERS 2004). Es wird durch ein globales Netz von geodätischen Stationen realisiert, deren geozentrische kartesische Koordinaten und Geschwindigkeiten den Internationalen Terrestrischen Bezugsrahmen (ITRF: *International Terrestrial Reference Frame*) bilden. Die Bestimmung der Stationspositionen und ihrer säkularen Änderungen erfolgt mittels VLBI (Radio-Interferenzmessungen zu Quasaren) und Verfahren der Satellitengeodäsie – vor allem GPS, dem Doppler-Bahnbestimmungs- und Positionierungssystem DORIS und Lasermessungen (*Laser Ranging*) zum Mond und zu Erdsatelliten (LLR, SLR) (z.B. Torge 2003). Seit 1988 werden in fast jährlichen Abständen ITRF-Lösungen veröffentlicht, die eine zunehmende Anzahl genauerer Beobachtungen enthalten und damit präzisere Stationspositionen und -geschwindigkeiten bereitstellen, siehe z.B. ITRF2000 (Altamimi et al. 2002), ITRF2005 (Altamimi et al. 2007) und ITRF2008 (Seitz et al., in diesem Heft).

Die im ITRF enthaltenen GPS-Stationen (ca. 350) bilden das globale Netz des IGS (*International GNSS Service*, Dow et al. 2005). Diese werden im Prinzip als Referenzrahmen für die tägliche Berechnung von hoch-präzisen GPS-Satellitenbahnen verwendet. Da alle IGS-Stationen nicht gleich genau sind, hat das IGS die besten Stationen ausgewählt (siehe Auswahlkriterien in <http://igs.cb.jpl.nasa.gov/network/refframe.html>) und sie als verfeinerten IGS-Bezugsrahmen eingeführt. Dieser wird IGS05-Rahmen genannt. Die Bezeichnung »05« bedeutet, dass er aus dem ITRF2005 abgeleitet wurde. Die Analyse der GPS-Beobachtungen liefert u. a. hochgenaue Satellitenbahnen, Erdorientierungsparameter, Stationspositionen und -geschwindigkeiten, Informationen für Satellitenuhren sowie Troposphären- und Ionosphärenparameter. Daneben

wird das globale IGS-Netz mithilfe von regionalen Netzen verdichtet, um das sogenannte globale IGS-Polyhedron zu berechnen (Dow et al. 2005).

SIRGAS (*Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas*) ist die regionale Verdichtung des globalen ITRF in Lateinamerika und der Karibik. Dies wird durch nationale Bezugsrahmen verdichtet, um die Zugänglichkeit des kontinentalen Referenzrahmens auf lokaler Ebene zu

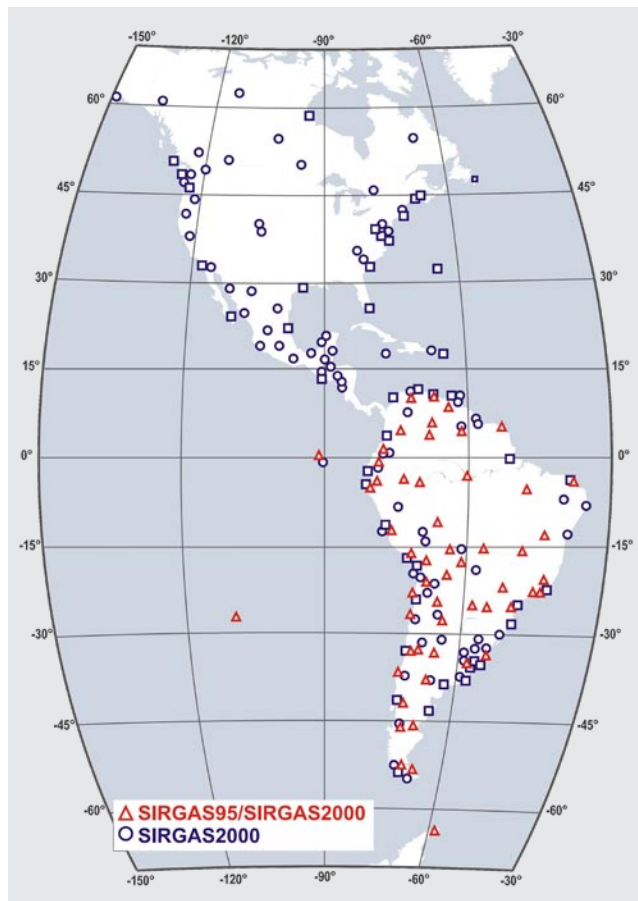


Abb. 1: Referenzrahmen SIRGAS95 und SIRGAS2000

garantieren (Sánchez and Brunini 2009). SIRGAS ist auf drei Arten realisiert: durch zwei episodische GPS-Messkampagnen und ein Netz von kontinuierlich beobachtenden GPS-Stationen. Die erste Realisierung SIRGAS95 ist ein hochpräzises GPS-Netz von 58 Punkten in Südamerika, deren Positionen auf den ITRF94 zur Referenzepeche 1995,4 bezogen sind (SIRGAS 1997). Im Jahr 2000 wurde dieses Netz neu vermessen und um Mittel- und Nordamerika erweitert (Abb. 1). Diese zweite Realisierung SIRGAS2000 beinhaltet 184 GPS-Stationen, deren Positionen im ITRF2000 zur Referenzepeche 2000,4 berechnet wurden (Drewes et al. 2005).

Die dritte Realisierung von SIRGAS liefert das SIRGAS *Continuously Operating Network* (SIRGAS-CON-Netz, das derzeit ca. 220 GPS-Stationen umfasst (Abb. 2). Diese Stationen werden wochenweise durch die SIRGAS-Analysezentren (sechs Prozessierungs- und zwei Kombina-

tionszentren, Abb. 3) prozessiert und es werden die folgenden Produkte bereitgestellt:

- Wöchentliche Lösungen für Stationspositionen mit schwachen Datumsbedingungen (siehe Abschnitt 3), die zum IGS als SIRGAS-Beitrag für das globale Polyhedron geliefert und die für die Berechnung von zukünftigen Mehrjahreslösungen des Netzes verwendet werden.
- Auf den IGS05 bezogene wöchentliche Stationspositionen für weitere Anwendungen in Lateinamerika (z. B. GPS-Positionierung, Vermessung, Kataster etc.).
- Mehrjahreslösungen mit Stationspositionen und linearen Geschwindigkeiten für die Bestimmung der Kinematik des Netzes und Unterstützung praktischer und wissenschaftlicher Anwendungen, die zeitliche Variationen der Stationspositionen benötigen.

Die operative Infrastruktur von SIRGAS-CON ist möglich dank der aktiven Beteiligung vieler lateinamerikanischer und karibischer Institutionen, die nicht nur die Messungen ihrer Stationen zur Verfügung stellen, sondern auch SIRGAS-Analysezentren betreiben, um die Verarbeitung der Beobachtungsdaten routinemäßig durchführen zu können.

2 Der Referenzrahmen SIRGAS-CON

Der Referenzrahmen SIRGAS-CON (Abb. 2) besteht derzeit aus etwa 175 Referenzpunkten der nationalen Bezugsrahmen und 48 Stationen des globalen IGS-Netzes, davon gehören 15 Stationen zum IGS05-Rahmen. Um die Konsistenz der nationalen Referenzstationen mit dem globalen Bezugssystem, in dem die GPS-Bahnen berechnet werden, zu gewährleisten, werden diese Stationen in SIRGAS-CON integriert, sodass alle durch eine einheitliche Strategie verarbeitet werden können. Dies garantiert Homogenität, Konsistenz und Genauigkeit der Stationskoordinaten auf kontinentaler Ebene. Bis zur GPS-Woche 1495 (August 2008) verarbeitete das DGFI, als IGS RNAAC SIR (*IGS Regional Network Associate Analysis Centre for SIRGAS*, Seemüller and Drewes 2008), das gesamte SIRGAS-CON-Netz in einer Ausgleichung. Angesichts der wachsenden Anzahl von SIRGAS-CON-Stationen wurde diese Verarbeitung nicht mehr durchführbar, und es war notwendig, für das Netz eine neue Analysestrategie zu definieren. Diese Strategie stützt sich auf (Brunini et al. 2010):

- i) die Festlegung eines kontinentalen Kern-Netzes als primäre Verdichtung des ITRF in Lateinamerika und
- ii) seine Erweiterung durch Verdichtungsnetze, um die geographische Verteilung von Referenzpunkten zu verbessern.

Das Kern-Netz sorgt für die langfristige und nachhaltige Stabilität des kontinentalen Bezugsrahmens; die Verdichtungsnetze ermöglichen den Zugang zum Bezugsrahmen

auf nationaler und lokaler Ebene. Obwohl Haupt- und Verdichtungsnetze als zwei verschiedene Kategorien angesehen werden können, erfüllen beide Typen von Stationen gleichermaßen die Anforderungen an die ITRF-Stationen bezüglich Leistung und Qualität.

Die Verdichtungsnetze sollen gleichzeitig die nationalen Bezugsrahmen bilden. Demzufolge soll es, als optimale endgültige Lösung, so viele Verdichtungsnetze wie

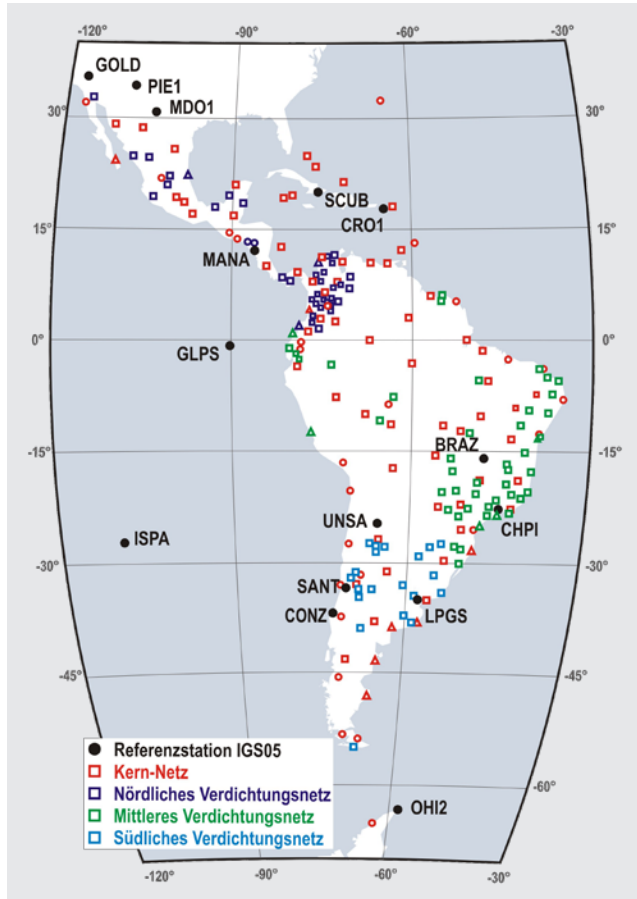


Abb. 2: Referenzrahmen SIRGAS-CON

Länder in der Region geben. Da derzeit nicht alle lateinamerikanischen Länder ein Prozessierungszentrum betreiben, werden die existierenden SIRGAS-CON-Stationen in drei Verdichtungsnetze gruppiert (Abb. 2). Die Verteilung der Stationen zwischen den Prozessierungszentren stellt sicher, dass jede regionale Station durch drei Zentren berechnet wird.

3 Wöchentliche Analyse des Referenzrahmens SIRGAS-CON

Das DGFI prozessiert das Kern-Netz, die lokalen SIRGAS-Prozessierungszentren verarbeiten die Verdichtungsnetze (Abb. 3). Sie wenden eine gemeinsame Vorgehensweise an, die von SIRGAS mit den Vorgaben der Standards von

IGS und IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*, IERS 2004) festgelegt wurde, um Lösungen für die einzelnen Verdichtungsnetze zu berechnen (siehe z. B. Natali et al. 2009, Seemüller und Sánchez 2009). In diesen Lösungen werden Satellitenbahnen, Satellitenuhren-Offsets und Erdorientierungsparameter auf die täglichen IGS-Werte fixiert und alle Stationspositionen werden mit einer Restriktion von ± 1 m ausgeglichen.

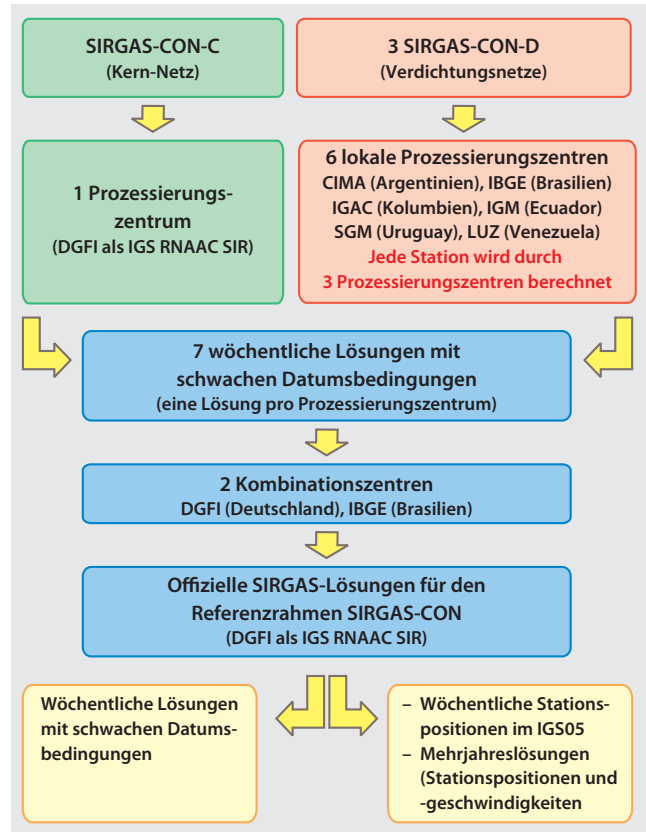


Abb. 3: Datenfluss in der wöchentlichen Analyse des Netzes SIRGAS-CON

Da diese Bedingung zu schwach für die endgültige Lagerung des Netzes ist, werden sie als *Lösungen mit schwachen Datumsbedingungen* bezeichnet.

Die individuellen Lösungen werden durch die SIRGAS-Kombinationszentren DGFI und IBGE in eine gemeinsame Lösung integriert (Abb. 4). Zunächst werden sie im IGS05 separat berechnet, um ihre Standardabweichungen zu schätzen. Daraus werden, soweit Unterschiede in den stochastischen Modellen der Prozessierungszentren vorhanden sind, Varianzfaktoren bestimmt. Die von den einzelnen Lösungen berechneten Stationspositionen werden miteinander und mit den wöchentlichen IGS-Koordinaten verglichen, um Ausreißer zu identifizieren. Sobald Inkonsistenzen (wie z. B. Beobachtungsinstrumente, Stationsnamen etc.) korrigiert und Ausreißer von den individuellen Normalgleichungen reduziert sind, wird eine Kombination für alle Stationspositionen mit schwachen Datumsbedingungen ($\sigma = \pm 1$ m für die *a priori* Werte) berechnet. Diese Lösung wird im SINEX-Format zu den IGS-Datenzentren für das globale Polyhedron geschickt

und zudem für die nächsten Mehrjahreslösungen des SIRGAS-CON-Netzes gespeichert. Danach wird eine auf den IGS05-Referenzrahmen bezogene Lösung erstellt, um wöchentliche Positionen aller SIRGAS-CON-Stationen für weitere Anwendungen in Lateinamerika bereitzustellen. Die DGFI-Kombinationen sind als offizielle SIRGAS-Lösungen bei den IGS-Datenzentren und auf der SIRGAS-Webseite (www.sirgas.org) zugänglich; die IBGE-Kombi-

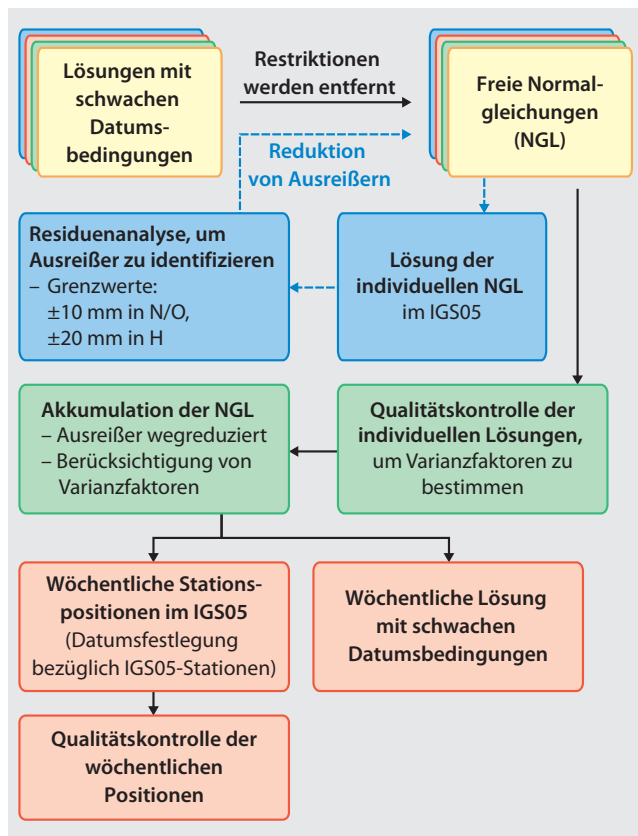


Abb. 4: Kombination der individuellen Lösungen der SIRGAS-Processierungszentren

nationen dienen zur Redundanz und Kontrolle (Sánchez et al. 2009a).

Die durchschnittliche Standardabweichung der kombinierten Lösungen stimmt sehr gut mit der berechneten Standardabweichung für die einzelnen Lösungen überein. Dies bedeutet, dass die Qualität der individuellen Lösungen beibehalten wird und die Kombination der Verdichtungsnetze keine Verzerrungen im gesamten SIRGAS-CON-Netz erzeugt. Die Wiederholgenauigkeit der Stationspositionen in den wöchentlichen Kombinationen zeigt, dass die innere Konsistenz des Netzes für die horizontalen Komponenten $\pm 0,8$ mm und für die vertikale Komponente $\pm 2,5$ mm ist. Aus der Zeitreihenanalyse und dem Vergleich mit den IGS-Koordinaten abgeleiteten RMS-Werten wird die Genauigkeit der wöchentlichen Stationspositionen mit $\pm 1,5$ mm für Nord- und Ostkomponente und $\pm 3,8$ mm für die Höhe geschätzt.

4 Kinematik des Referenzrahmens SIRGAS-CON

Die säkulare Bewegung der SIRGAS-CON-Stationen wird durch lineare Geschwindigkeiten dargestellt, die durch die Lösung von akkumulierten wöchentlichen freien Normalgleichungen über mehrere Jahre bestimmt sind. Diese Mehrjahreslösungen werden jährlich aktualisiert, um alle Stationen, die mehr als 24 Monaten gemessen haben, einzubeziehen (z. B. Seemüller et al. 2008, Seemüller et al. 2009). Die neueste Mehrjahreslösung von SIRGAS-CON, SIR09P01, umfasst die Zeitspanne vom 2. Januar 2000 bis 3. Januar 2009.

Die akkumulierten wöchentlichen Normalgleichungen enthalten die DGFI-Lösungen für das gesamte Netz bis zum 31. August 2008 und für die späteren Wochen die Kombination der vier Verdichtungsnetze (siehe Abschnitt 3). Die wöchentlichen Lösungen von Januar 2000 bis Oktober 2006, die früher mit relativen Korrekturen für die Antennen-Phasenzentrumsvariationen berechnet wurden und sich auf vorhergehende ITRF-Lösungen beziehen, wurden, gemäß den in Abschnitt 3 genannten Standards, neu berechnet. Dies liefert homogen erstellte wöchentliche Lösungen für die gesamte Zeitspanne der SIR09P01-Lösung und verbessert die Zuverlässigkeit sowie Genauigkeit der Stationspositionen und -geschwindigkeiten.

Die Verarbeitungsstrategie für den SIRGAS-Bezugsrahmen SIR09P01 stützt sich auf (Abb. 5, Seemüller et al. 2009):

- i) Berechnung von Zeitreihen und Zeitreihenanalyse (siehe graue Pfeile in Abb. 5), um Ausreißer und Diskontinuitäten zu identifizieren, z. B. Sprünge in den Stationspositionen oder Geschwindigkeitsänderungen;
- ii) Kombination von wöchentlichen Normalgleichungen (siehe blaue Pfeile in Abb. 5), um den SIRGAS-Bezugsrahmen zu berechnen.

Da die wöchentlichen Lösungen im SINEX-Format mit schwachen Datumsbedingungen gespeichert werden, ist es notwendig, freie (unverzerrte) Normalgleichungen zu erstellen. Dabei werden die enthaltenen Bedingungen entfernt und die Stationseigenschaften wie z. B. Antennen- und Empfängertypen durch Vergleich mit den log-Dateien überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Danach werden die Normalgleichungen durch die *No Net Rotation* (NNR)- und *No Net Translation* (NNT)-Bedingungen in Bezug auf den IGS05-Rahmen separat gelöst. Durch diese Bedingungen tritt keine restliche »Netto«-Drehung oder -Verschiebung des Netzes in Bezug auf die IGS05-Referenzstationen auf.

Die resultierenden Stationspositionen werden durch eine Ähnlichkeitstransformation auf einen *a priori* SIRGAS-Bezugsrahmen (den vorherigen SIRGAS-Bezugsrahmen SIR08P01, Seemüller et al. 2008) transformiert, um residuale Positionszeitreihen zu erzeugen. Stationen mit Residuen größer als ± 15 mm für die Nord- und Ostkomponente oder ± 30 mm für die Höhe (etwa das Vier-

fache der mittleren Standardabweichung der Zeitreihen werden als Ausreißer markiert. Wenn Ausreißer sporadisch (ohne Systematik) auftreten, wird die Station von der einzelnen wöchentlichen Normalgleichung reduziert. Wenn Ausreißer eine Diskontinuität in der Zeitreihe einer Station zeigen, wird eine neue Position für diese Station angesetzt. Die aus der Zeitreihenanalyse identifizierten Ausreißer und Diskontinuitäten werden in den Normal-

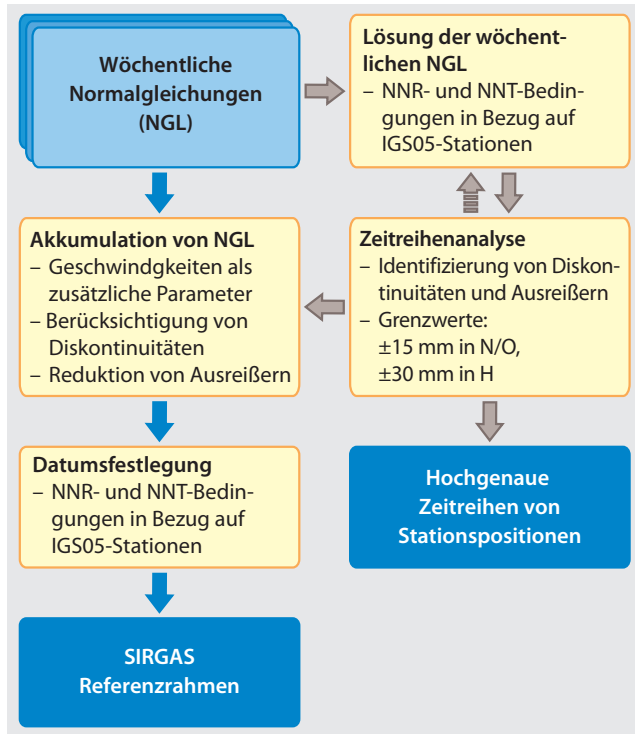


Abb. 5: Strategie für die Berechnung der Mehrjahreslösung SIR09P01 (Seemüller et al. 2009)

gleichungen gespeichert und für die Berechnung der gesamten Lösung berücksichtigt.

Die Zeitreihenanalyse zeigt darüber hinaus, dass die durch die Kombination der Verdichtungsnetze erzeugten wöchentlichen Lösungen (ab August 31, 2008) keine Diskontinuitäten oder Sprünge gegenüber den früheren Lösungen, die als das SIRGAS-CON-Netz in einem Block berechnet wurden, aufweisen und auf dem gleichen Genauigkeitsniveau sind. Daher sind die wöchentlichen Lösungen für die gesamte Zeitspanne der Zeitreihen in einer Mehrjahreslösung akkumulierbar.

Die Datumsfestlegung in der akkumulierten Lösung wird durch die Anwendung der NNR- und NNT-Bedingungen in Bezug auf den IGS05-Rahmen mittels ausgewählter zuverlässiger und in der Region SIRGAS gut verteilter IGS05-Stationen durchgeführt (Abb. 6). Da saisonale Signale (wie z.B. atmosphärische Auslasteffekte) bis jetzt nicht berücksichtigt werden und jahreszeitlich bedingte Schwankungen die Geschwindigkeitsschätzung sehr stark beeinflussen können, werden Stationen mit Beobachtungsperioden von weniger als zwei Jahren von der Berechnung ausgeschlossen.

Nach der Lösung des ersten SIRGAS-Bezugsrahmens werden die Schritte (i) und (ii) iteriert: Neue residuale Zeitreihen für die Stationspositionen werden erzeugt, wobei der zuvor berechnete SIRGAS-Bezugsrahmen als *a priori* Referenzrahmen für die Ähnlichkeitstransformation verwendet wird. Danach werden die Diskontinuitäts- und Ausreißer-Analysen wieder durchgeführt und eine neue, verfeinerte Lösung wird berechnet.

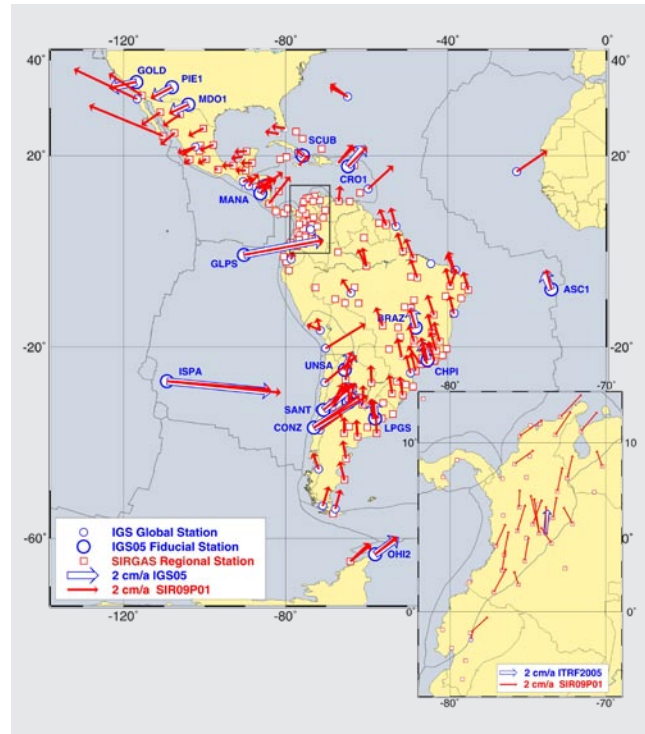


Abb. 6: Horizontale Geschwindigkeiten von SIR09P01 für SIRGAS-CON

Die endgültigen SIR09P01-Stationspositionen und -geschwindigkeiten (Abb. 6) beziehen sich auf den IGS05-Referenzrahmen mit der Referenzepoche 2005,0. Da die physikalischen Korrelationen zwischen den GPS-Beobachtungen nicht genau bekannt sind und daher nicht in der Ausgleichung des Netzes berücksichtigt werden, sind die durch die Ausgleichung erhaltenen formalen Fehler zu klein und nicht realistisch. Demzufolge werden die Standardabweichungen der Stationspositionen und -geschwindigkeiten aus den residualen Zeitreihen abgeleitet. Diese werden zur Referenzepoche mit $\pm 0,5$ mm für die horizontale Position und $\pm 0,9$ mm für die Höhe sowie mit $\pm 0,8$ mm/Jahr für die Geschwindigkeiten geschätzt.

5 SIRGAS auf nationaler Ebene

Nach der ersten Realisierung SIRGAS95 begannen die südamerikanischen Länder die Modernisierung ihrer klassischen (lokalen) Bezugssysteme, um die neuen Satellitenpositionierungsverfahren, insbesondere das GPS, konsistent anzuwenden. Da die existierenden Geodaten

in den lokalen Bezugssystemen gegeben waren und sie weiter verwendet werden sollen, war es notwendig, eine Strategie zu entwickeln, die die Integration der alten Systeme in das neue SIRGAS ermöglicht. Die allgemeine Vorgehensweise umfasst: i) Festlegung eines nationalen Haupt-GPS-Netzes (durch Pfeiler oder kontinuierlich beobachtende Stationen) als lokale Verdichtung des kontinentalen SIRGAS-Netzes, ii) Bestimmung der Transformationsparameter zwischen den alten Bezugssystemen und SIRGAS, iii) Einführung von SIRGAS als offizielles nationales Referenzsystem, und iv) Bezug aller existierenden und neuen Geodaten auf SIRGAS (z.B. Figueroa et al. 2010, Martínez and Sánchez 2009, Costa and Lima 2005, Schöldbauer und Muñoz 1999, Moirano et al. 1998, Drewes et al. 1998).

Die ersten SIRGAS-Verdichtungen wurden nur durch Monumente (Pfeiler) vermarktet. Zurzeit betreiben die meisten Länder kontinuierlich beobachtende GPS-Stationen (Tab. 1), die im SIRGAS-CON-Referenzrahmen einbezogen sind (siehe Abschnitt 2). Da die nationalen kontinuierlich beobachtenden GPS-Stationen als Bezugspunkte für die täglichen Anwendungen von satellitengestützten Navigations- und Ortungsverfahren verwendet werden, ist SIRGAS das Rückgrat für alle Projekte, die mit der Erzeugung und Nutzung von georeferenzierten Daten verbunden sind. D.h. SIRGAS wird nicht nur für wissenschaftliche Projekte auf internationaler Ebene (z.B. Überwachung von Erdkrustendeformationen, vertikale Bewegungen, Meeresspiegelvariationen, atmosphärische

Studien etc.) genutzt, sondern auch für praktische Anwendungen wie Ingenieurbauprojekte, Flurbereinigung, digitale Verwaltung von geographischen Daten, Geodateninfrastrukturen etc.

In der Praxis benutzen die SIRGAS-Länder die wöchentlichen SIRGAS-CON-Stationenpositionen als Referenzwerte für die Prozessierung ihrer Vermessungsprojekte. Um die Positionen neuer geodätischer Punkte von

Tab. 1: Nationale Referenzrahmen in der SIRGAS-Region

Land	Nationaler Referenzrahmen	Stationen Pfeiler / kontinuierlich
Argentinien	ITRF2005, Epoche 2006,6	178 / 32
Bolivien	SIRGAS95, Epoche 1995,4	125 / 1
Brasilien	SIRGAS2000, Epoche 2000,4	1903 / 71
Chile	SIRGAS2000, Epoche 2002,0	269 / 13
Costa Rica	ITRF2000, Epoche 2005,8	34 / 1
Ecuador	SIRGAS95, Epoche 1995,4	135 / 8
El Salvador	IGS05, Epoche 2007,8	34 / 1
Fr. Guyana	ITRF93, Epoche 1995,0	7 / 1
Kolumbien	SIRGAS95, Epoche 1995,4	70 / 35
Guatemala	ITRF2005, Epoche 2009,6	0 / 17
Mexiko	ITRF92, Epoche 1988,0	0 / 20
Panama	SIRGAS2000, Epoche 2000,0	20 / 3
Peru	SIRGAS95, Epoche 1995,4	47 / 3
Uruguay	SIRGAS95, Epoche 1995,4	17 / 3
Venezuela	SIRGAS95, Epoche 1995,4	156 / 5

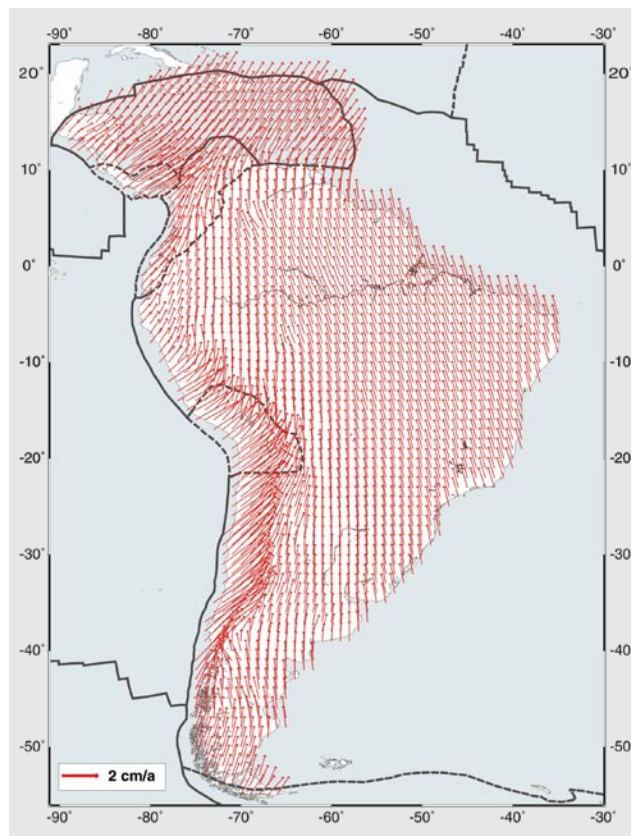


Abb. 7: Geschwindigkeitsmodell VEMOS (Velocity Model for SIRGAS) bezogen auf den ITRF2005 (Drewes and Heidbach 2010)

der Beobachtungsepoche auf die Referenzepeche des nationalen Bezugsrahmes zu extrapolieren, verwenden sie die linearen Geschwindigkeiten der neuesten Mehrjahreslösung des SIRGAS-CON-Netzes (siehe Abschnitt 4). Wenn die Geschwindigkeiten der Referenzstationen nicht bekannt sind, wird das Geschwindigkeitsmodell VEMOS (Velocity Model for SIRGAS) verwendet (Abb. 7, Drewes and Heidbach 2010). Daneben werden die Positionen der neuen Stationen vom aktuellen ITRF (bzw. IGS05), in dem die IGS-Satellitenbahnen gegeben sind, auf den für den offiziellen nationalen Bezugsrahmen ausgewählten ITRF transformiert. Auf diese Weise sind die Positionen der neuen Punkte mit denen der existierenden Geodatenbanken konsistent.

6 Rück- und Ausblick

Die Einrichtung eines einheitlichen geozentrischen Bezugssystems für Südamerika begann im Jahr 1993. Unter der Koordination des DGFI wurde 1995 eine zehntägige kontinentale GPS-Kampagne (SIRGAS95) durchgeführt, an der sich fast alle Länder Südamerikas beteiligten. Die Messkampagne wurde im Jahr 2000 (SIRGAS2000), ebenfalls unter Federführung des DGFI, wiederholt und um Stationen in Zentral- und Nordamerika erweitert. Die Prozessierung der Messkampagnen wurde 1995 durch das DGFI und die *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA, heute NGA: *National Geospatial-intelligence Agency*) und 2000 durch das DGFI, die BEK (Bayerische Kommission für die Internationale Erdmessung) und das IBGE durchgeführt. In beiden Fällen wurde eine kombinierte Lösung für Stationspositionen im ITRF (ITRF94 bzw. ITRF2000) berechnet. Diese zwei Referenzrahmen wurden durch lokale Verdichtungen als Grundlage für viele nationale südamerikanische Bezugssysteme eingeführt. Hierbei unterstützte das DGFI die Auswertung des Referenzrahmens von Chile (2001), Ecuador (1999), El Salvador (2009), Kolumbien (1998) und Venezuela (1998).

Im Jahr 2001 empfahl die »Siebte Regionale Kartographische Konferenz der Vereinten Nationen für die Amerikas« in New York die Übernahme des SIRGAS-Bezugssystems für alle amerikanischen Länder (einschließlich Kanada und USA). Demzufolge wurde der Name von »Geozentrisches Referenzsystem für Südamerika« in »Geozentrisches Referenzsystem für die Amerikas« geändert. Derzeit werden Verdichtungen von SIRGAS (bzw. ITRF) in allen südamerikanischen Ländern, Mexiko, Costa Rica, Guatemala, El Salvador und Panama als Bezugsrahmen vorgenommen. Ein Schwerpunkt der aktuellen Aufgaben von SIRGAS ist eine effektivere Beteiligung der Länder in Mittelamerika und der Karibik.

Die ersten durch Pfeiler vermarkten SIRGAS-Punkte werden nach und nach durch eine wachsende Zahl kontinuierlich beobachtender GPS-Stationen ersetzt. Als SIRGAS95 bereitgestellt wurde, waren nur zehn dieser Stationen in Betrieb, SIRGAS2000 enthielt 48 und zurzeit (Januar 2010) sind es 223. Die wöchentliche Analyse dieser Stationen wurde 1996 durch das DGFI als IGS RNAAC SIR begonnen, um das IGS-Polyhedron in Südamerika zu

erweitern. Seit 2000 werden alle existierenden Stationen im Referenzrahmen SIRGAS-CON zusammengefasst und neben dem Beitrag zum IGS-Polyhedron werden wöchentliche Stationspositionen sowie Mehrjahreslösungen im ITRF berechnet. Angesichts der Modernisierung der nationalen Referenzrahmen durch permanente GPS-Stationen und der jüngst nachgewiesenen Fähigkeit einiger lateinamerikanischer Länder eigene Prozessierungszentren zu betreiben, ist die Analyse des gesamten SIRGAS-CON-Netzes seit August 2008 aufgeteilt: sechs lateinamerikanische Institutionen berechnen jeweils einen Teil des Netzes, das DGFI und das IBGE (in Brasilien) führen die Kombination durch. Das IGS RNAAC SIR ist weiterhin im DGFI beheimatet.

Die wichtigsten Ziele von SIRGAS bezüglich des Referenzrahmens sind i) die Verbesserung der geographischen Dichte der Referenzstationen und ii) die Einrichtung eines Prozessierungszentrums in allen Ländern der Region. Das DGFI unterstützt diese Initiativen durch die Installation eigener kontinuierlich beobachtender GPS-Stationen (vier in Argentinien, zwei in Bolivien, zwei in Kolumbien, eine in Paraguay, zwei in Peru und eine in Venezuela) und durch die Ausbildung lateinamerikanischer Kollegen in der wissenschaftlichen Verarbeitung von GPS-Daten. Für diesen Zweck und dank eines Abkommens zwischen dem DGFI und der Universität Bern können SIRGAS-Partner in Lateinamerika die Berner GPS-Software unter sehr günstigen Bedingungen nutzen. Dadurch konnten bereits die Prozessierungszentren von Ecuador, Kolumbien und Uruguay in Betrieb genommen werden.

Dieser Beitrag beschreibt die kontinuierliche Analyse des SIRGAS-CON-Netzes als geometrischen Referenzrahmen in Lateinamerika. Daneben sind aktuelle Herausforderungen: die Modellierung saisonaler Signale in der Kinematik des Netzes, die Untersuchung der Atmosphäre (Troposphäre und Ionosphäre) durch die Analyse von GPS-Signalen, die Verwendung präziser Echtzeit-Positionierung und die Definition und Einrichtung eines einheitlichen vertikalen Referenzsystems.