

GPS-gestützte Überwachung der Friesenheimer Insel (Mannheim)

Andreas Schmitt¹, Michael Mayer¹, Kurt Seitz¹, Bernhard Heck¹, Werner Grüninger²

1 Einleitung

Am GIK (Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)) findet im Rahmen des Grundfachstudiums der Geodäsie und Geoinformatik jährlich für die Studierenden des sechsten Semesters das sogenannte „GPS-Praktikum“ statt. Das GPS-Praktikum hat die angeleitete, jedoch selbstständig ausgeführte Bearbeitung eines GPS-Projektes im Sinne eines integrierten Praktikums zum Inhalt. Dabei stehen die Projektplanung, die Durchführung von GPS-Beobachtungen sowie deren anschließende Auswertung, die Integration in Landesnetze sowie die Analyse, die Präsentation und die Dokumentation der Ergebnisse im Vordergrund. Diese praxisnahe Aufgabe wird in der Regel in Zusammenarbeit mit einer Vermessungsbehörde oder einem Ingenieurbüro durchgeführt.

Die hier vorgestellte Arbeit fasst den aktuellen Stand einer mehrjährigen, im Rahmen des GPS-Praktikums etablierten Kooperation des GIK mit dem Fachbereich Geoinformation und Vermessung der Stadt Mannheim zusammen,

die mit der Zielsetzung initiiert wurde, Höhenänderungen der Friesenheimer Insel nachzuweisen. Die Bearbeitung erfolgte im Rahmen einer Studienarbeit; siehe hierzu SCHMITT (2006).

Die Friesenheimer Insel liegt im Norden des Stadtgebiets von Mannheim, eingeschlossen von Neckar, Rhein, Altrhein und Industriehafen. Das Gelände wird größtenteils gewerblich genutzt. Neben Mülldeponie, Müllverbrennungsanlage, Kläranlagen und Tanklager stehen vor allem im südöstlichen Bereich um den Industriehafen viele Produktions- und Lagerhallen. Die einzigen größeren Freiflächen gliedern sich in Ackerland in der südlichen Hälfte der Insel und in Grünland entlang des Rheins. Fast die gesamte Insel ist mit Hochwasserschutzdämmen umgeben, siehe hierzu Abbildung 1.

¹ Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe

² Fachbereich Geoinformation und Vermessung, Stadt Mannheim, 68161 Mannheim

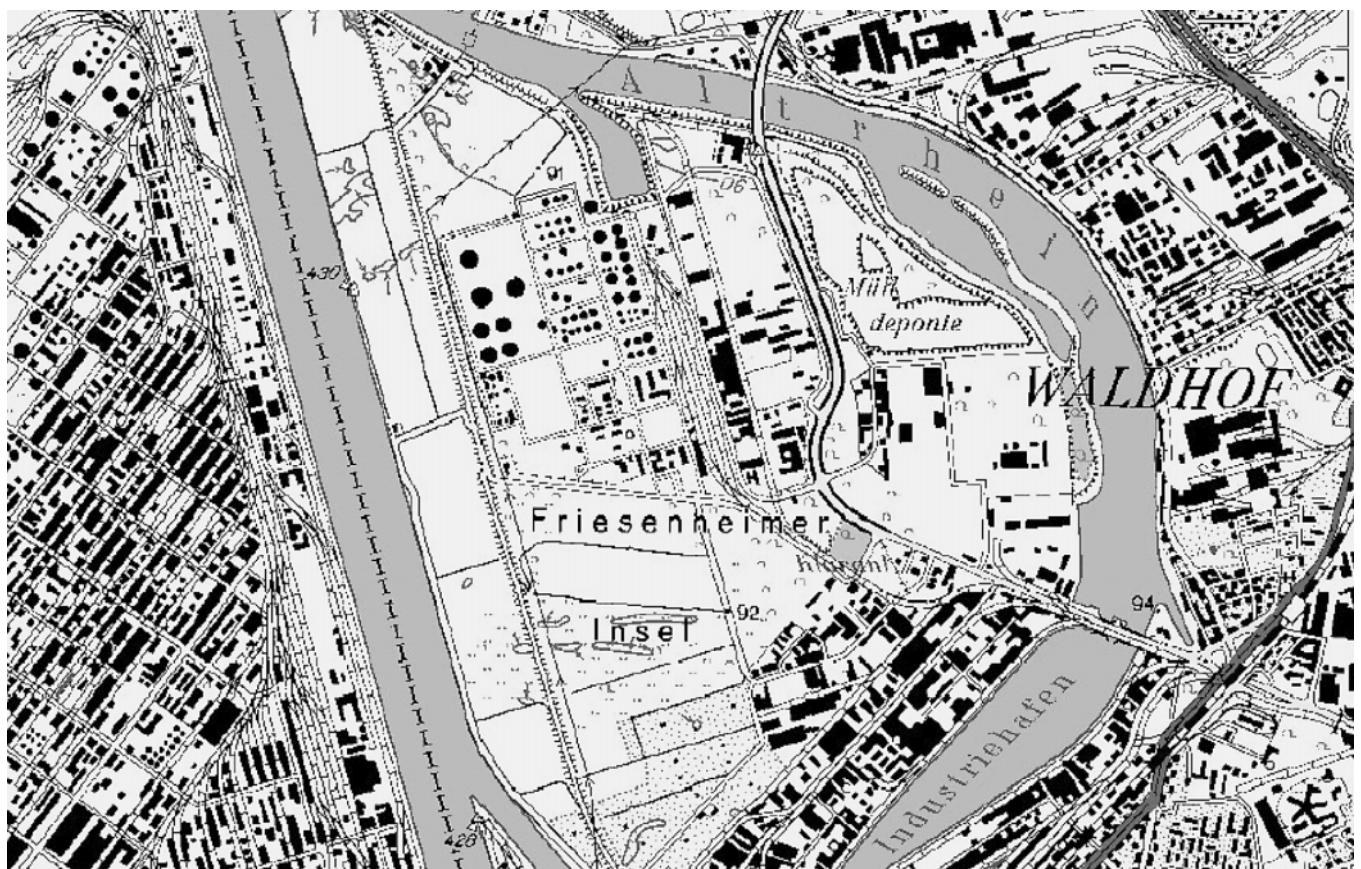


Abb. 1: Auszug aus der Topographischen Karte des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg

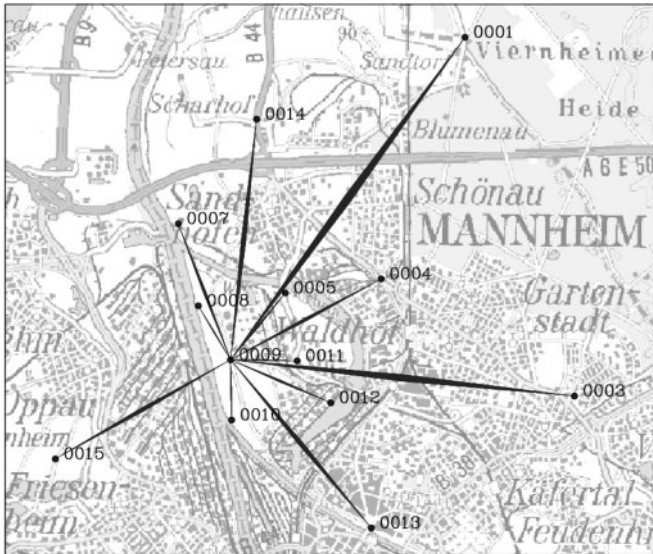


Abb. 2: Netzplot überlagert mit der Topographischen Übersichtskarte des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg

2 Datengrundlage

Das für die im Folgenden beschriebene Deformationsanalyse grundlegende geodätische Netz besteht aus 13 Punkten (Abbildung 2) und erstreckt sich über die gesamte Friesenheimer Insel sowie über Teile der Stadtgebiete von Mannheim und Ludwigshafen. Die GPS-Beobachtungen wurden auf bestehenden Messpunkten der Stadtvermessungen ausgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass es sich dabei nicht um gleichartige bzw. nicht notwendiger Weise für die Bewegungsdetektion im mm-Bereich geeignete Vermarkungen handelt, sondern im Rahmen der Punktauswahl vor allem auf GPS-Tauglichkeit (geringe Abschattungen, geringe Mehrwegeeffekte) geachtet wurde. Eine Auflistung der Messpunkte und ihre Vermarkungsart enthält Tabelle 1. Die satellitengeodätischen Grundlagen der im Folgenden beschriebenen Arbeiten sind z.B. in SEEBER (2004) zu finden.

Bisher wurden in den Jahren 2000 (23.–24. Juni), 2001 (15.–16. Juni) und 2005 (15.–16. April) insgesamt drei GPS-Messkampagnen im genannten Festpunktfeld durchgeführt. Die Messungen erfolgten mit verschiedenen Trimble-Ausrüstungen (Empfänger: 4000SSI, Antenne: Compact L1/L2 with Ground Plane; Empfänger-Antennen-Kombination 4800). Durchgehend besetzt waren in allen zweitägigen Kampagnen die Punkte 4 und 9, wobei auf Grund von einzelnen Signalabbrissen auf Punkt 4 der Punkt 9 als Referenzpunkt für die differenzielle GPS-Ba-

sislinienauswertung in allen Beobachtungskampagnen verwendet wurde. Auf den Roverpunkten wurde jeweils dreimal pro Kampagne bei unterschiedlicher Satellitenkonstellation ca. 1,5 h lang statisch gemessen. Der erstellte Logistikplan sah insbesondere vor, dass dabei jeweils eine andere Messgruppe und eine andere Ausrüstung zum Einsatz kamen. Die Aufzeichnung der Daten erfolgte mit einer Taktrate von 10 s und einem minimalen Elevationswinkel von 15° (2000, 2001) bzw. 10° (2005). Durch das Vorliegen der GPS-Beobachtungsdaten aus drei Messkampagnen wird erstmalig eine redundante geodätische Deformationsanalyse möglich, wodurch Empfehlungen für künftige Messungen ausgesprochen werden können.

3 Auswertung

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Auswertung der erfassten GPS-Beobachtungen beschrieben. Dabei wird im Speziellen auf die GPS-Basislinienauswertung, die Trennung der Lage- von der Höheninformation und die Analyse der Auswertungsergebnisse durch geodätische Deformationsanalysen eingegangen.

3.1 GPS-Basislinienauswertung

Die Auswertung der aufgezeichneten GPS-Daten erfolgte mit Trimble Geomatics Office (TGO) der Firma Trimble Geosystems (TGO 2002). Der Referenzpunkt 9 wurde in allen drei Kampagnen mit den selben in Tabelle 2 gegebenen Koordinaten eingeführt, um systematische Abweichungen zwischen den Kampagnenauswertungen zu vermeiden, die scheinbare Verschiebungen nach sich ziehen würden. Ausgewählte Auswertekarakteristika sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Ermittelt wurden diese Koordinaten durch eine statische, ca. 14 Stunden umfassende Auswertung einer Basislinie zwischen Punkt 9 und einer ca. 600 m entfernten, im ETRS89 gegebenen virtuellen SAPOS®-Referenzstation. SAPOS®-Grundlagen und weiterführende Informationen sind auf der Internetseite der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland <http://www.sapos.de> zu finden.

3.2 Bilden von GPS-Sessions und Trennung in Lage und Höhe

Das am GIK entwickelte Programm TRISETRA wandelt die binären SST-Ausgabedateien der verwendeten GPS-Auswertesoftware TGO in ASCII-Dateien und fasst dabei

Tab. 1: Punktvermarkungen und GPS-Tauglichkeit der Netzpunkte mit ihrer Punktnummer

Vermarkungsart	GPS-Tauglichkeit		
	sehr gut	gut	eingeschränkt
TP-Pfeiler	15		1, 7
Rohr mit Schacht		14	3
Bolzen	8, 9, 10	4, 5, 11, 13	12

Tab. 2: Ausgewählte TGO-Auswertekarakteristika

Auswerteparameter	Charakteristik
Referenzpunkt: 9	Breite: 49° 31' 17,41012" N; Länge: 8° 26' 17,98795" O; ellipsoidische Höhe: 141,961 m
Höhenmaske	Elevation $\geq 15^\circ$
Taktrate	10 s
Ephemeriden	Broadcast
Lösungstyp	L1 fixed; ab 5 km Basislinienlänge ionosphärenfreie Linearkombination
minimale Beobachtungszeit	3600 s
maximal behebbare Phasensprung	60 s
Troposphärenmodell	NIELL (1996), 1 stationsspezifischer Zusatzparameter pro Session

die Ergebnisse einzelner Basislinien zu Sessions zusammen. Pro Session werden dabei eine Koordinatendatei und eine Datei, welche die zugehörige Kovarianzmatrix enthält, generiert. Da mit TGO eine basislinienweise Auswertung durchgeführt wird, weist die Kovarianzmatrix Blockdiagonalstruktur auf.

Anschließend werden mit dem GLK-Programm TRAVAR die dreidimensionalen kartesischen Koordinaten und ihre Kovarianzmatrizen unter vollständiger Fehlerfortpflanzung in Lage- und Höhenanteile (van MIERLO und ILLNER 1998) umgerechnet. Für die Lagekomponente wurden Gauß-Krüger-Koordinaten bezogen auf das WGS84-Ellipsoid verwendet. Die Höhenkomponente wurde in ellipsoidischen Höhen ebenfalls bezüglich des WGS84-Ellipsoids dargestellt.

3.3 Erster Koordinatenvergleich

Um für die durchgeführte geodätische Deformationsanalyse erste Indizien hinsichtlich des Bewegungsverhaltens einzelner Punkte sowie einer eventuellen Blockbildung zu erhalten, wurden die Ergebnisse der Basislinienauswertung (Gauß-Krüger-Koordinaten, ellipsoidische Höhen) visuell analysiert. Wie die Abbildungen 3 und 4 beispielhaft zeigen, resultieren daraus keinesfalls eindeutige Aussagen, es können jedoch äußere Genauigkeitsmaße abgeleitet werden. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Variation der Höhen aller Einzelmessungen für den Punkt 15. Abbildung 4 zeigt für die Einzelmessungen von Punkt 11 die ermittelten Rechtswerte und deren Genauigkeiten. Die zeitlichen Abstände der einzelnen Koordinaten der Kampagnen sind in beiden Abbildungen zur Gewährleistung einer besseren Übersichtlichkeit gedehnt. Eine Regressionsgerade, ermittelt unter Berücksichtigung aller Sessionergebnisse des Punktes 15, lässt eine lineare vertikale Bewegung vermuten.

Abbildung 4 zeigt ergänzend ein Problem exemplarisch auf, das bei einigen Punkten beobachtet werden kann: Die Koordinatenwerte der einzelnen Sessions variieren innerhalb einer Kampagne stärker als die Mittelwerte der drei Kampagnen, sodass a-priori keine signifikante Koordinatenänderung feststellbar ist. In der Regel lassen sich durch diese Quick-Look-Analyse keine zuverlässigen Aussagen treffen, welche Punkte als fest und welche als

beweglich in eine geodätische Deformationsanalyse einzuführen sind, da die Ergebnisse unter anderem von der Festlegung des Referenzpunktes abhängen.

3.4 Sessionzusammenschluss für jede Kampagne

Während in den ersten Verarbeitungsschritten einzelne Sessions betrachtet worden sind, werden nun die zu einer Kampagne gehörenden Sessions zusammengefasst und gemeinsam als freies Netz ausgeglichen. Der Sessionzusammenschluss erfolgt getrennt nach Lage und Höhe (van MIERLO und ILLNER 1998). Hier lassen sich grobe Fehler innerhalb einer Kampagne (z.B. Zentrierfehler bei der Aufstellung, fehlerhafte Instrumentenhöhe) erkennen und eliminieren. Die Lagenetzausgleichung wird auf Basis der Gauß-Krüger-Koordinaten durchgeführt. Die ausgeglichenen Koordinaten der ersten Kampagne werden als Näherungskoordinaten für die Sessionzusammenschlüsse der Folgekampagnen herangezogen, wodurch anhand der berechneten Verbesserungen Aussagen hinsichtlich des Bewegungsverhaltens getroffen werden können. Dabei erfolgte die Datumsfestlegung über den Referenzpunkt 9. Durch die im Rahmen des Sessionzusammenschlusses durchgeführte Varianzkomponentenschätzung ist es möglich, das nach der GPS-Auswertung generell zu optimistische Genauigkeitsniveau auf ein realistisches Maß anzupassen. Die erhaltenen Vergrößerungsfaktoren sind für die Lagenetzausgleichung in Tabelle 3 und für die Höhennetzausgleichung in Tabelle 4 gegeben. Der a-priori Varianzfaktor wurde mit $\sigma_0^2 = 1 \text{ mm}^2$ eingeführt. Die erhaltenen Vergrößerungsfaktoren liegen im üblichen Bereich solcher Netzmessungen. Der durchschnittliche mittlere Punktfehler bezeichnet die mittlere Standardabweichung der Punktlage nach der Ausgleichung und kann somit als Qualitätsparameter verwendet werden. Die maximale Koordinatenänderung gibt an, um welchen Höchstwert die ausgeglichenen Koordinaten aller Netzpunkte von den Näherungskoordinaten abweichen. Die Anzahl an überbestimmenden Beobachtungen wird durch die Gesamtredundanz angegeben. Die Lagenetzausgleichung erfolgte unter Verwendung des GIK-Programms NETZ2D (VETTER 2007, SCHMITT 1995, ILLNER und JÄGER 1993). Im Rahmen der abschließenden ausreißerbereinigten Netzausgleichung wurden Eingabedateivorlagen und

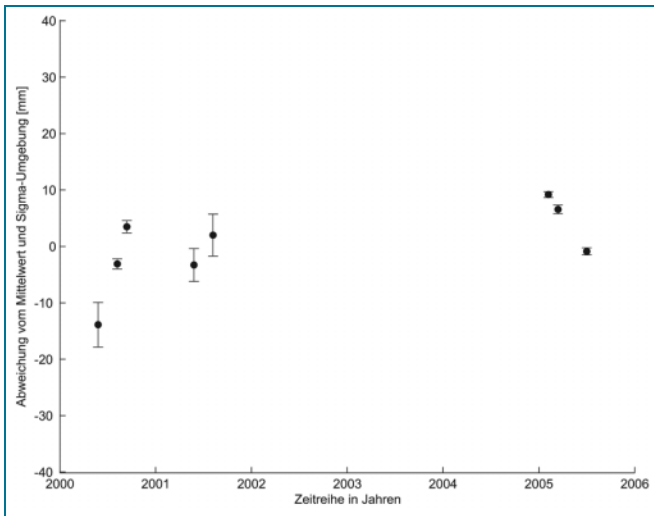


Abb. 3: Vergleich der ellipsoidischen Höhen aus allen Sessions für Punkt 15

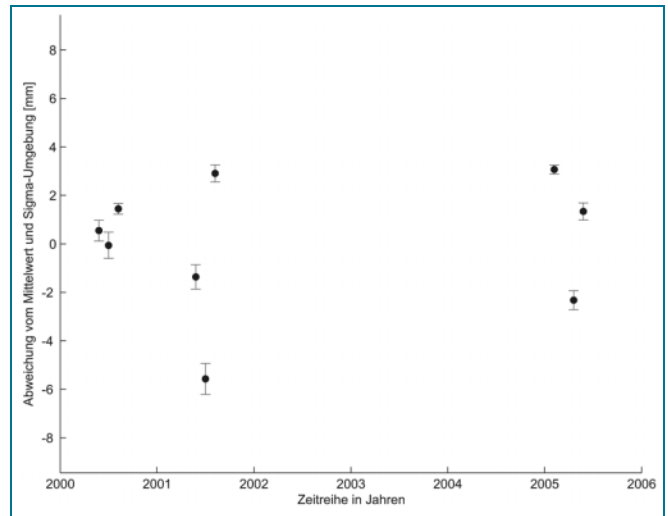


Abb. 4: Vergleich der Rechtswerte aus allen Sessions für Punkt 11

zugehörige Kovarianzmatrizen für die Deformationsanalyse ausgegeben. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, liegt die mittlere Punktlagegenauigkeit bei allen Kampagnen im Bereich von ca. ± 2 mm. Die maximale Koordinatenänderung liegt jedoch bei knapp 1 cm und übersteigt somit die Messgenauigkeit deutlich, wodurch belegt wird, dass signifikante Bewegungen erwartet werden können. Da es sich hierbei lediglich um durchschnittliche Werte handelt, die zudem von der Wahl und der Qualität des Referenzpunktes abhängen, muss für gesicherte Aussagen jeder Punkt gesondert betrachtet werden.

Die freie Ausgleichung des Höhennetzes wurde mit dem 1D-Ausgleichungsprogramm HEIDI (ILLNER und JÄGER 1995, JÄGER 2005) in ellipsoidischen Höhen durchgeführt. Näherungskordinaten sind die ausgeglichenen Höhen der ersten, in 2000 durchgeführten Kampagne. Dabei erfolgte die Datumsfestlegung wiederum über den Referenzpunkt 9. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse der Höhenausgleichung ist mit Tabelle 4 gegeben.

Nach Analyse der Ergebnisse wird deutlich, dass die maximale Höhenänderung relativ zur Ausgleichung der Kampagne des Jahres 2000 signifikant größer als die erreichte mittlere Höhen Genauigkeit ist. Der mittlere Höhenfehler ist verglichen mit dem Lagefehler etwa doppelt so groß, was bei GPS-Messungen auf Grund geometrischer und Modellrestriktionen erwartet werden kann. Genauere Aussagen erfordern wiederum eine punktweise Betrachtung.

Resümierend lässt sich feststellen, dass beim Zusammenschluss der einzelnen Sessions zu je einem zwei- bzw. ein-dimensionalen Koordinatensatz pro Kampagne durchschnittliche mittlere Fehler von ± 2 mm in der Lage und ± 4 mm in der Höhe erreicht worden sind. Eine Abhängigkeit der Genauigkeiten von der Entfernung zur Referenzstation (Punkt 9) ist erwartungsgemäß erkennbar. Im Vorgriff auf die Deformationsanalyse kann jedoch postuliert werden, dass Punktbewegungen unterhalb der Standardabweichung (mittlerer Punktfehler) mit großer Wahr-

Tab. 3: Vergleich der drei Beobachtungskampagnen – Lagenetz

Charakteristik	Kampagne 2000	Kampagne 2001	Kampagne 2005
Mittlerer durchschnittlicher Punktfehler [mm]	2,0	2,1	2,4
Maximale Koordinatenänderung [mm]	–	10,0	8,6
Gesamtredundanz	46	44	40
Vergrößerungsfaktor; $\sigma_0 = 1$ mm	4,8	4,7	8,2

Tab. 4: Vergleich der drei Beobachtungskampagnen – Höhennetz

Charakteristik	Kampagne 2000	Kampagne 2001	Kampagne 2005
Mittlerer durchschnittlicher Punktfehler [mm]	3,9	4,8	3,9
Maximale Koordinatenänderung [mm]	–	22,2	23,4
Gesamtredundanz	24	22	21
Vergrößerungsfaktor; $\sigma_0 = 1$ mm	4,1	4,2	6,1

scheinlichkeit nicht erkannt werden können. Die maximalen, relativ zu den Höhen der Kampagne des Jahres 2000 angegebenen Koordinatenänderungen können als Indiz für Bewegungen verstanden werden.

3.5 Geodätische Deformationsanalyse

Wie schon für den Sessionzusammenschluss beschrieben, wird auch die geodätische Deformationsanalyse nach Lage und Höhe getrennt durchgeführt. Dies erscheint sinnvoll, da im behandelten Anwendungsfall eine vertikale Bewegung vermutet wird. Zur Anwendung kommt die geodätische Deformationsanalyse mittels relativer Konfidenzellipsen (HECK et al. 1977), die den verwendeten, am GIK entwickelten Programmen CODEKA2D und CODEKA1D zu Grunde liegt (ILLNER et al. 1996).

Zur besseren Transparenz der einzelnen im Folgenden analysierten Deformationsszenarien werden im weiteren Verlauf Punkte, die auf der Friesenheimer Insel gelegen sind, als Inselpunkte und Punkte, die im Umland gelegen sind, als Festlandpunkte bezeichnet.

Für die geodätische Deformationsanalyse des Lagenetzes wurden acht verschiedene Modelle entworfen und analysiert, die sich hinsichtlich der Klassifikation der Netzpunkte in Stütz- und Objektpunkte unterscheiden. Im weiteren Verlauf werden die plausibelsten zwei Modelle INSELPLUS und EINZELMIN näher betrachtet.

Im Szenario INSELPLUS werden alle Inselpunkte (5, 8, 9, 10, 11, 12) als Objektpunkte behandelt, die Festlandpunkte 1, 3, 4, 7, 13, 14 und 15 hingegen als Stützpunkte, auf die eine S-Transformation (van MIERLO 1980) angewendet und deren Netz auf Kongruenz getestet wird (JÄGER und DRIXLER 1990). Beim Test dieses Szenarios mittels CODEKA2D ergaben sich für wenige der eingeführten Stützpunkte signifikante Verschiebungen, sodass diese Punkte dem Objektpunktblock zugeordnet wurden. Auffallend war, dass nur die Punkte 4, 9 und 15 in allen

Interkampagnenvergleichen horizontale Verschiebungen aufwiesen. Die Punkte 5, 10, 11 und 12 veränderten ihre Lage signifikant von 2000 nach 2001 und von 2000 nach 2005, für den Kampagnenübergang von 2001 nach 2005 konnten jedoch keine signifikanten Verschiebungen festgestellt werden. Eine Analyse der Richtungswinkel der Verschiebungsvektoren der oben genannten Punkte zeigt, dass die Verschiebungen zwischen 2000 und 2001 sowie zwischen 2001 und 2005 gegenläufig sind; zur Veranschaulichung sind die resultierenden Verschiebungsvektoren und Konfidenzellipsen ($\alpha = 5\%$) in Abbildung 5 lagerichtig, jedoch vergrößert dargestellt.

Anhand der Analyse der Bewegungsvektoren für den Kampagnenübergang von 2000 nach 2001 ist deutlich zu erkennen, dass Bewegungsraten sowohl oberhalb als auch unterhalb der Signifikanzgrenze nach Nordosten gerichtet sind. Von 2001 nach 2005 erfolgt hingegen eine Verschiebung in südwestlicher Richtung. Eine Ausnahme dabei stellen die Bewegungsraten der Punkte 4 und 12 dar, bei denen Verschiebungen in südöstlicher Richtung detektiert wurden. Eine Untersuchung der Kampagnen 2000 und 2005 ergab eine schwach signifikante Verschiebung nach Nordosten für nahezu alle Objektpunkte (Ausnahme: Punkte 12 und 15). Im Vergleich zur Referenzepoche 2000 lässt sich zusammenfassend feststellen, dass sich das Netz der Inselpunkte formstabil jedoch ebenfalls nur schwach signifikant (Kampagne 2001: ca. 7 mm; Kampagne 2005: ca. 5 mm) nach Nordosten bewegt.

Die Höhendeformationsanalyse wurde mit dem GIK-Programm CODEKA1D durchgeführt. Bei der Konzeption des Szenarios EINZELMIN wurden aus der Menge der Stützpunkte sukzessive diejenigen Festlandpunkte entfernt, die die größten signifikanten Höhenänderungen aufwiesen. In dieser Modellvariante zeigten die Punkte 5 und 14 signifikante vertikale Verschiebungen. Punkt 5 sinkt ab: Im Vergleich 2000–2001 stärker als 2001–2005, aber erst im Epochenvergleich 2000–2005 signifikant. Punkt 14 weist in den Kampagnen 2001 und 2005 dieselbe

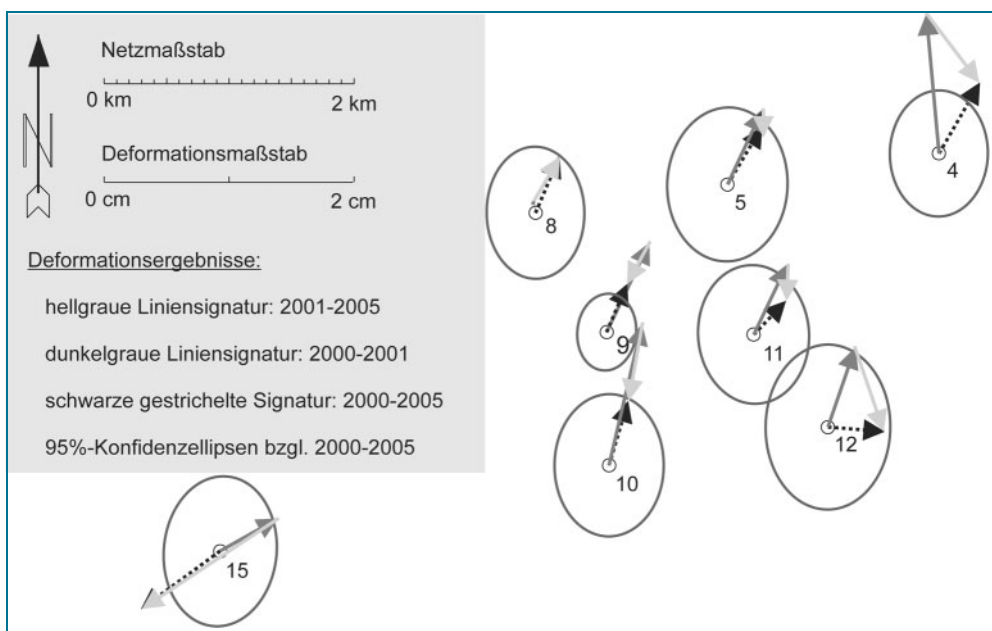


Abb. 5: Modell INSELPLUS – zweidimensionale Verschiebungsvektoren der Objektpunkte



Höhe auf, welche jedoch um 23 mm größer ist als in der Nullepoche 2000. Offensichtlich handelt es sich – im Gegensatz zur Lagekomponente – nicht um formstabile Punktblöcke, die sich relativ zueinander bewegen, sondern ausschließlich lokale Effekte führen zu signifikanten vertikalen Verschiebungen der Punkte 5 und 14.

3.6 Interpretation der signifikanten Deformationen

Im vorangehenden Unterkapitel sind die Ergebnisse der geodätischen, GPS-basierten Deformationsanalyse für Lage- und Höhenkomponenten zusammengestellt und beschrieben worden. Nun sollen die Ergebnisse interpretiert und in einen größeren Zusammenhang gestellt werden. Aus den Untersuchungen im Lagenetz kann geschlossen werden, dass die Inselpunkte einen stabilen Block formen. Eine Ausnahme bildet Punkt 12, der offensichtlich auf Grund lokaler Einflüsse ein signifikant anderes Bewegungsverhalten zeigt.

Punkt 12 liegt am Ende einer befestigten Straße, die zum einen die Zufahrt zu den Industriebetrieben bildet, zum anderen – vor allem im Bereich um die Vermarkung – als Abstellfläche z.B. für den Schwerlastverkehr dient; siehe hierzu Abbildung 6. Die Wasserfläche des Industriehafens ist ca. 15 m entfernt. Des Weiteren werden die in direkter Punktnähe vorhandenen Bahngleise beispielsweise zum Transport von Gütern genutzt. In allen getesteten Szenarien bewegt sich Punkt 12 schwach signifikant etwa 5 mm in Richtung Hafen. Erklären lässt sich diese Bewegung durch Deformationen des Straßenbelags, da in diesem Bereich Schwerlastverkehr sowohl auf der Straße als auch auf den Schienen den Untergrund erschüttert. Die GPS-Tauglichkeit von Punkt 12 wurde bereits in Tabelle 1 als eingeschränkt klassifiziert. Zu beachten ist somit weiterhin, dass Einflüsse wie z.B. Beugungs- und Mehrwegeeffekte auf Grund von potenziellen Hindernissen und Reflektoren die Qualität der GPS-Daten verschlechtern können.

Von den Festlandpunkten ist vor allem die Bewegung des Punktes 15 auffällig. Punkt 15 liegt in Ludwigshafen-Oppau, also auf der westlichen Seite des Rheins. Die Vermarkung dieses Punktes befindet sich am Rand eines Feldwegs, umgeben von bewirtschafteten Äckern. Auch hier lassen sich lokale Einflüsse nicht ausschließen, da im Umfeld mit schweren Landmaschinen gearbeitet wird und die Vermarkung (Stein mit Meißelkreuz) ungeschützt auf Bodenhöhe angebracht ist und weiterhin für die Zentrierung Millimetergenauigkeit nicht garantiert werden kann. Bevor die Bewegung dieses Punktes tektonisch interpretiert werden kann, sind im Rahmen von Folgekampagnen weitere Punkte westlich des Rheins zu beobachten, beispielsweise könnte auf die unterirdische Sicherungsplatte des TPs zurückgegriffen werden.

Wird versucht, die im Modell INSELPLUS deutlich erkennbare horizontale Bewegung der Insel zu erklären, so muss nach Einflüssen gesucht werden, die auf die Insel als Ganzes einwirken. Ein Zusammenhang des Bewegungsverhaltens mit einer Schwachform des vorliegenden Gesamtnetzes bzw. mit session- und kampagnenabhängigen Teilnetzen, die im übertragenen Sinn einer Schwingung der Punkte in der Ebene, bedingt durch die Messkon-



Abb. 6: Situation im Bereich von Punkt 12

figuration oder den Ausgleichsansatz, entspricht, kann ausgeschlossen werden. Bei frei ausgeglichenen Netzen entspricht die erste Schwachform einem Pulsieren des Netzes, was bedeutet, dass die Bewegungsvektoren alle in radialer Richtung nach innen oder nach außen zeigen würden.

Aus diesem Grund soll die topographische Lage der Friesenheimer Insel genauer betrachtet werden. Im Westen und Süden der Insel fließen Rhein und Neckar, im Norden und Osten ist sie vom Altrhein und im Südosten vom Industriehafen umschlossen. Der Hafen ist vom Neckar durch eine Schleuse abgetrennt, sodass der Wasserstand im Hafen nicht direkt von der Wasserführung des Neckars abhängt, siehe Abbildung 7.

Die topographische Situation legt nahe, den Wasserstand von Rhein und Neckar an den GPS-Messstagen in die Analyse einzubeziehen. Hierzu wurden die Daten des Pegels Worms (Rheinkilometer 443.4) erhoben. Dieser Pegel befindet sich ca. 15 km stromabwärts und berücksichtigt somit die Wassermassen von Rhein und Neckar. Mittlere Fließgeschwindigkeiten des Rheins werden mit 2–3 Knoten (1 Knoten = 1,85 km/h) angegeben. Die Friesenheimer Insel erstreckt sich von Rheinkilometer 428 bis 431. Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Verlauf des Wasserstands am Pegel Worms, woraus die qualitative Verteilung der Wasserwelle entlang des Rheins abgeleitet werden kann. Die Pegeldaten wurden von der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit Sitz in Koblenz (BAFG 2006) erhoben.

Während der Kampagne 2000 lag der Wasserstand bei etwa 2,1 m und fiel in den folgenden Tagen weiter ab. Kurz vor der Kampagne 2001 betrug der Wasserstand knapp 4,5 m und sank zum Messzeitpunkt hin langsam auf etwa 4 m ab. Während der Kampagne 2005 lagen vergleichbare Verhältnisse wie im Jahr 2000 vor; der Wasserstand betrug gut 2 m. Jedoch stieg das Wasser kurz nach der Messung rasch auf knapp 4 m an. Was dies für die Deformation der Friesenheimer Insel bedeutet, wird in Abbildung 7 durch Pfeile visualisiert: Das Wasser in Rhein und Neckar steigt an und drückt aus südwestlicher Richtung auf die aus Sedimenten bestehende Insel, die von der Seite des Hafens keinen Gegendruck erfährt, da der Wasserstand im Hafen künstlich konstant gehalten wird. Hieraus kann eine Verschiebung der Friesenheimer Insel in nordöstlicher Richtung entstehen; dies korrespondiert

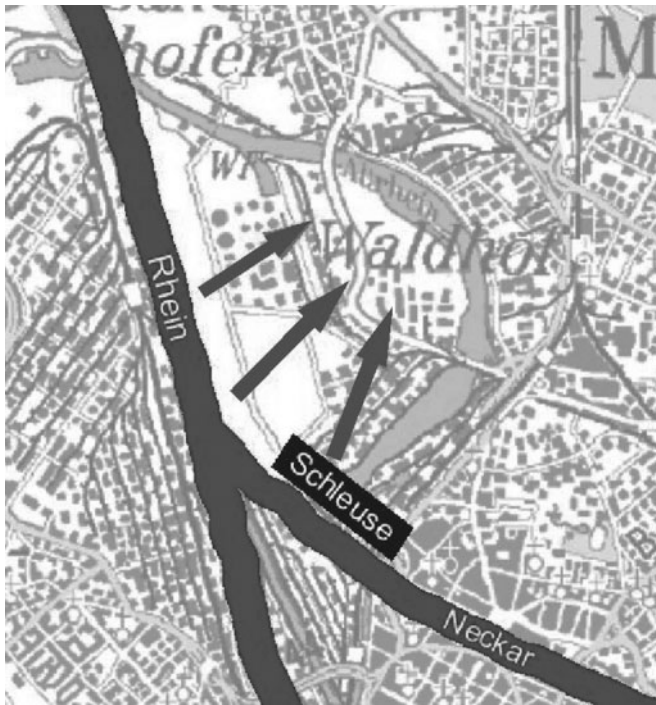


Abb. 7: Die Friesenheimer Insel – wasserbauliche Situation

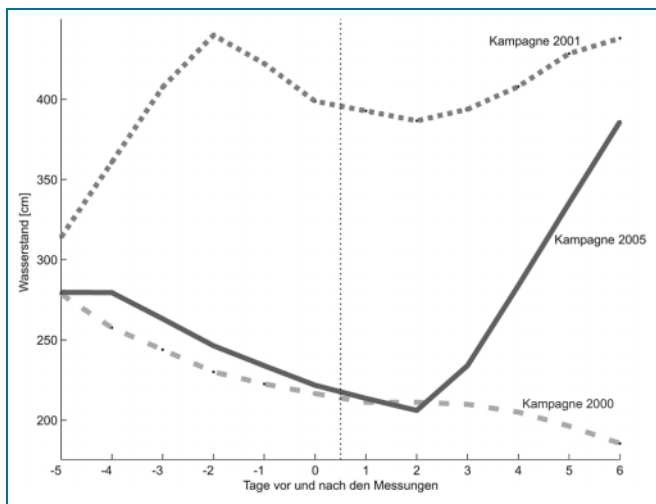


Abb. 8: Rheinwasserstand am Pegel Worms nach Tagen vor und nach GPS-Messungen

mit den Ergebnissen der Deformationsanalyse von 2000 nach 2001. Da jedoch während der Kampagne 2005 der Wasserstand wieder das gleiche Pegelniveau wie 2000 annahm, ergeben sich vergleichbare Punktkoordinaten für die Inselpunkte und die Deformationsanalyse 2001 nach 2005 belegt eine Bewegung in südwestlicher Richtung. Warum die Punkte nun beim Vergleich 2000–2005 immer noch eine minimale Verschiebung nach Nordost zeigen, kann mit der nahenden Wasserwelle, die die Insel erreicht hatte, bevor sie am Pegel Worms registriert wurde, bzw. mit einer verzögerten Reaktion der Friesenheimer Insel erklärt werden. Die Annahme, dass die Lage der Insel und der Wasserstand des Rheins korreliert sind, ist rein hypothetisch, deckt sich jedoch gut mit

den Ergebnissen der zweidimensionalen Deformationsanalyse. Zudem handelt es sich bei den aufgeführten Wasserständen um Schwankungen im Bereich des Mittelwassers, also keinesfalls um extremes Hoch- oder Niedrigwasser. Auch alternative Erklärungen für diese schwach signifikanten Effekte, die nicht nur mit dem Wasserstand des Rheins zusammenhängen, sind denkbar.

Im Gegensatz zum Lagenetz weisen im Höhennetz modellunabhängig nur zwei Punkte signifikante Verschiebungen auf, nämlich die Punkte 5 und 14. Punkt 5 sinkt über die drei Kampagnen hinweg um etwa 1 cm ab. Da nur Punkt 5 dieses Verhalten zeigt, handelt es sich hierbei gesichert um einen ausschließlich lokalen Effekt, der durch Analyse der Vermarkung (Bolzen in befestigtem Gehweg) und der direkten Umgebung des Punktes erklärt werden kann; siehe Abbildung 9. Die Vermarkung wurde neben einer der beiden Zufahrtsstraßen zur Friesenheimer Insel eingebracht. Diese Straße wird überdurchschnittlich stark vom Schwerlastverkehr genutzt. Zudem führt die Straße direkt zur Altrheinbrücke und liegt im Bereich von Punkt 5 schon auf einem künstlich aufgeschütteten Damm. Punkt 5 liegt etwa 10 m von den Widerlagern der Brücke entfernt. Bewegungen der Brücke sind nicht auszuschließen. Ständige Belastungen der Fahrbahn und des Gehwegs bzw. des aufgeschütteten Untergrunds können ein Absinken der Fahrbahn und des direkt daran anschließenden Gehwegs zur Folge haben.

Schon in der vorangehenden Beschreibung der detektierten Bewegungen wurde festgestellt, dass die signifikante scheinbare Hebung von Punkt 14 auf eine grobe Abweichung der gemessenen Höhe während der ersten Messkampagne zurückzuführen ist. Die Höhendifferenz beträgt ca. 23 mm. In Kampagne 2000 liegt der Punkt tiefer als in den beiden folgenden. Eine Erklärung für die Höhendifferenz ist in der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Antennenhöhe zu suchen: Bei den verwendeten Antennen mit Grundplatte wird die Antennenhöhe mit Hilfe eines Maßstabs bestimmt, der ähnlich wie ein Lotstock aus einem langen dünnen Rohr besteht, das am unteren Ende mit einer Metallspitze versehen ist. Gemessen wird die Schrägdistanz von der Vermarkung bis zur Unterkante der Grundplatte. Es handelt sich bei der Vermarkung von Punkt 14 um eine Rohrvermarkung, bei der die Höhenmarke zwar definiert ist, aber nicht dem Zentrum der Lagekomponente entspricht. Zudem ist das Zentrum der Lagekomponente nicht materialisiert. Es ist bekannt, dass in der letzten Kampagne als Höhenbezug die Rohroberkante verwendet wurde. Jedoch ist es auch möglich, den Stab ins Rohr selbst zu stecken, wobei er sich nach wenigen Zentimetern zwischen der Rohrrinnenwand und der Antennengrundplatte verkantet. Jedoch stimmen die beiden Höhenbezüge nicht überein, sodass bei entsprechend hohem Aufbau die festgestellte Differenz von 23 mm erklärt werden kann, siehe Abbildung 10. Die entdeckte Verschiebung beruht somit nicht auf einer Deformation, sondern auf einem groben Messfehler.

Im Höhennetz ist in Analogie zum Lagenetz eine gemeinsame Bewegungstendenz aller Punkte festzustellen. Von Kampagne 2000 nach 2001 sinken die Inselpunkte ab, steigen von 2001 nach 2005 wieder an und bleiben leicht unterhalb des Niveaus von 2000, sodass von 2000 nach



Abb. 9: Situation im Bereich von Punkt 5

2005 eine minimale Absenkung festgestellt werden kann. Diese vertikalen Bewegungen liegen zwar unter der Signifikanzgrenze, deuten aber auf ein systematisches Verhalten hin. Ob diese Bewegungen in Verbindung mit der oben postulierten Korrelation zwischen der Lage der Insel und dem Rheinpegel gebracht werden können, ist geodätisch und geologisch zu verifizieren. Prinzipiell kann aus steigendem Wasser- und damit steigendem Grundwasserspiegel ein erhöhter Druck auf den Untergrund erwartet werden, woraus ein Absinken der Friesenheimer Insel resultieren würde. Ebenso kann argumentiert werden, dass auf Grund eines erhöhten seitlichen Drucks ein Anheben der Friesenheimer Insel zu erwarten wäre.

4 Resümee und Ausblick

Die Resultate der geodätischen Deformationsanalyse zeigen, dass für ausgewählte Szenarien Blockbewegungen von Punktgruppen angenommen werden können, die sich jedoch nicht signifikant nachweisen lassen.

Zur Bestätigung einer linearen Bewegung ist auf Grund der kleinen Bewegungsraten eine größere Zeitbasis erforderlich. Um ein periodisches Deformationsverhalten nachzuweisen, muss der Epochenabstand den erwarteten Perioden angepasst werden.

Die drei bisherigen Kampagnen wurden im April/Juni durchgeführt und erfassen somit keine eventuell jahreszeitlich bedingten periodischen Effekte. Um hingegen Langzeitbewegungen zu bestimmen, erscheint die Zeitbasis zu kurz.

Da zu Beginn der ersten Messkampagne keine detaillierten Vorinformationen hinsichtlich des Bewegungsverhaltens von Einzelpunkten oder Punktgruppen vorlagen, schien es sinnvoll, die Messungen über ein großes Gebiet, das über die Friesenheimer Insel hinausreicht, auszuweiten und als Messmethode statische und wiederholte GPS-Basislinienbeobachtungen auszuwählen. Bei der Festlegung der Messpunkte sind vorhandene Punktvermarkungen der Stadtvermessungen Mannheim und Ludwigshafen verwendet worden. Bei ständig wechselnden, unerfahrenen Projektarbeitern ist – über drei Kampagnen und

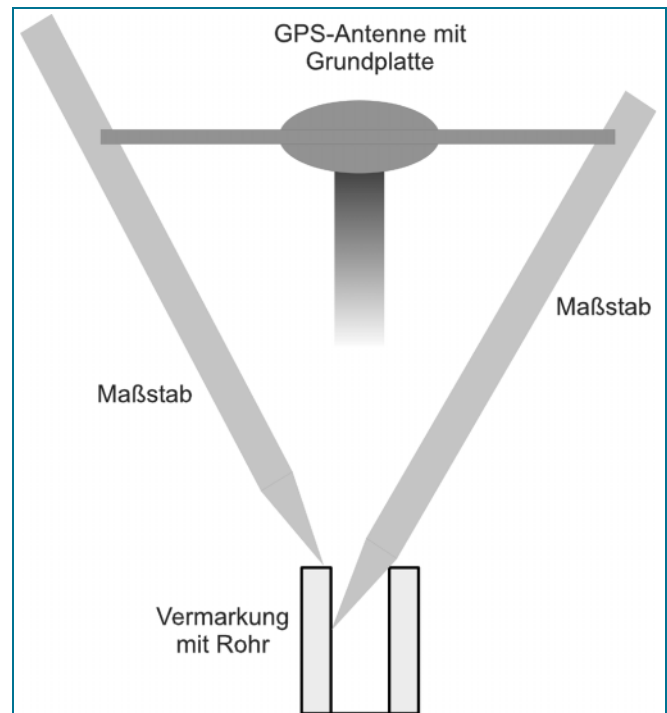


Abb. 10: Bestimmung der Antennenhöhe auf Punkt 14

fünf Jahre hinweg – die Zentrierung über der Vermarkung und die Antennenhöhenbestimmung im Millimeterbereich eine mögliche Fehlerquelle. Des Weiteren sind äußere Einflussfaktoren wie z.B. Wasserstand in Rhein und Neckar oder meteorologische Daten bisher nicht in ausreichendem Maße (räumliche und zeitliche Auflösung) erhoben bzw. erfasst worden. Bei weiteren Folgekampagnen kann durch die Einbeziehung von Pegeldata die Aussagekraft der Analysen gesteigert werden.

Aus den Ergebnissen der GPS-Auswertung, der geodätischen Deformationsanalyse und den hieraus gewonnenen Erkenntnissen und Erfahrungen können Empfehlungen für zukünftige GPS-Messkampagnen erarbeitet werden. Zunächst wird definiert bzw. präzisiert, welche Art von Deformation erfasst werden soll. Es kann angenommen werden, dass – lokale Punktdeformationen ausgeschlossen (Punkt 5, Punkt 12) – im Anwendungsfall keine gleichförmigen sondern sich wiederholende z.B. periodische Bewegungen vorliegen. Die Größe der Bewegung in Lage und Höhe liegt im Millimeterbereich. Somit können Restfehler in der Modellierung nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Im Modell INSELPLUS hat sich basierend auf den Auswertergebnissen der analysierten GPS-Messkampagnen gezeigt, dass lediglich vier Festlandpunkte als stabil angenommen werden können. Deshalb erscheint es sinnvoll, weitere Punkte im äußeren Bereich des Stadtgebietes oder darüber hinaus vor allem auf der westlichen Rheinseite zu ergänzen. Die Vermarkungen müssen dem angestrebten Genauigkeitsniveau (Millimetergenauigkeit) des Messverfahrens entsprechen. Hieraus ergibt sich, dass ungeeignete Vermarkungsarten (z.B. TP-Pfeiler: Stein mit Meißelkreuz) zwingend durch eine Vermarkung mit exakter Markierung des Zentrums und eindeutiger Höhenmarke

ersetzt werden müssen. Die Stütz- und Objektpunkte sowie deren Versicherungen sollten durch eine geeignetere Vermarkung, z.B. halbkugelförmiger Bolzen mit zentrischer Bohrung, festgelegt werden. Dabei ist durch ausreichenden Abstand zu garantieren, dass die Bewegungen der Versicherungen nicht mit den Bewegungen der Messpunkt korreliert sind. Wünschenswert wäre es, wenn bei jeder Kampagne das gleiche Instrumentarium und das gleiche Personal eingesetzt würde, was sich bisher wegen der Durchführung der Messungen im Zuge des studentischen GPS-Praktikums nicht verwirklichen ließ. Ergänzend sind meteorologische und hydrologische Daten (Wasserstand von Rhein und Neckar sowie im Hafen) zu erfassen. Des Weiteren ist die geologische Beschaffenheit des Untergrunds im Messgebiet zu berücksichtigen. Wie oben angedeutet, stellte sich die zeitliche Verteilung und Auflösung der Messkampagnen als nicht ideal heraus. Sollen jahreszeitlich bedingte Bewegungen aufgedeckt werden, so sind die Messungen mehrmals pro Jahr durchzuführen. Nach dem Abtasttheorem von Whittaker-Shannon (WEAVER 1989) soll die Abtastfrequenz, hier die Anzahl der Messungen pro Jahr, mindestens doppelt so groß sein wie die Frequenz der zu messenden Schwingung. Würde eine jährliche Periodizität vorliegen, dann müssten mindestens zwei Kampagnen pro Jahr durchgeführt werden. Empfohlen wird jedoch bei vergleichbaren Projekten, viermal pro Jahr zu messen, wodurch eine Messung pro Jahreszeit möglich wäre, um sowohl die Extreme (Sommer, Winter) als auch die Übergangszeiten (Frühling, Herbst) abzudecken.

Soll die Korrelation zwischen den Lagebewegungen der Friesenheimer Insel und dem Wasserstand des Rheins aufgezeigt werden, so müssen kurzfristig GPS-Messungen zum Zeitpunkt von Extremereignissen (Hoch- bzw. Niedrigwasser) an ausgewählten Punkten durchgeführt werden. Um aussagekräftige Vergleiche zu erhalten, erscheinen ergänzende GPS-Messungen für den Zeitpunkt des Mittelwassers – quasi als Nullmessung zur Bestimmung der mittleren Position der Punkte – sinnvoll. Säkulare Deformationen können durch Ausdehnung des Epochenabstands auf etwa fünf Jahre erfasst werden.

Um die Annahme einer periodischen Blockbewegung durch Messungen zu belegen, sollte aus wirtschaftlichen Gründen die Punktzahl optimiert werden. Unter der Hypothese, dass der Inselblock gegenüber dem fixen Festlandblock pulsiert, kann jeder Block durch eine ausreichende Anzahl an Punkten diskretisiert werden.

Dank

Die Autoren danken dem Referat 31 des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg für die Bereitstellung von GNSS-Daten.

Literatur

- [1] BAFG (2006): Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. Persönliche Kommunikation
- [2] HECK B.; KUNTZ E.; MEIER-HIRMER B. (1977): Deformationsanalyse mittels relativer Fehlerellipsen. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 84, S. 78–87

- [3] ILLNER M.; JÄGER R. (1993): Ein Konzept zur Integration von GPS in Verdichtungsnetze – Modellbildung und Ableitung von zugehörigen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsmaßen. Zeitschrift für Vermessungswesen, 118, S. 552–574
- [4] ILLNER, M.; JÄGER, R. (1995): GPS-Höhenintegration ins Landesnetz – Konzept und Realisierung im Programmsystem HEIDI. Allgemeine Vermessungsnachrichten, 102, S. 1–18
- [5] ILLNER, M.; JÄGER, R.; NKUITE, G. (1996): Koordinatenbezogene Deformations- und Sensitivitätsanalyse im Profil der Software CODEKA-1D/2D. Interner Bericht, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht
- [6] JÄGER, R. (2005): HEIDI-Kurzhandbuch. Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht
- [7] JÄGER, R.; DRIXLER, E. (1990): Deformationsanalyseverfahren am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe – Stand Februar 1990. Interner Bericht, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht
- [8] VAN MIERLO, J. (1980): Free Network Adjustment and S-Transformation. In: Beiträge aus der Bundesrepublik Deutschland zur Vorlage bei der XVII. Generalversammlung der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik vom 2. bis 14. Dezember 1979 in Canberra/Australien. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe B, Nr. 252, S. 41–54
- [9] VAN MIERLO, J.; Illner, M. (1998): Statistische Grundlagen und Modelle für die Weiterverarbeitung von GPS-Ergebnissen. Mitteilungen des DVW Landesverein Baden-Württemberg, Heft 2, Oktober 1998
- [10] NIELL, A. E. (1996): Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research, 101, S. 3227–3246
- [11] SCHMITT, A. (2006): Deformationsanalyse im Bereich der Friesenheimer Insel (Mannheim) basierend auf GPS-Beobachtungskampagnen. Studienarbeit, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht
- [12] SCHMITT, G. (1995): NETZ2D-Handbuch. Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH), unveröffentlicht
- [13] SEEBER, G. (2004): Satellite Geodesy. 2. überarbeitete Auflage, de Gruyter Verlag, Berlin
- [14] TGO (2002): Trimble Geomatics Office – User guide. Quelle: http://facility.unavco.org/project_support/polar/support/TGOuserguide.pdf
- [15] VETTER, M. (2007): Das Softwarepaket NetzCG. In: DERENBACH, H.; ILLNER, M.; SCHMITT, G.; VETTER, M.; VIELSACK, S. (Hrsg.): Ausgleichsrechnung: Theorie und aktuelle Anwendung aus der Vermessungspraxis. Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik, Universität Karlsruhe (TH), Band 2007,4, Quelle: <http://opus.ubka.uni-karlsruhe.de/univerlag/volltexte/2007/213/>, S. 96–107
- [16] WEAVER, H. J. (1989): Theory of Discrete and Continuous Fourier Analysis. John Wiley & Sons, Inc. New York

Autoren:

cand. geod. ANDREAS SCHMITT,

Dr.-Ing. MICHAEL MAYER,

Dr.-Ing. KURT SEITZ,

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. BERNHARD HECK

Anschrift:

Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH),

Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe, Tel.: 07 21/6 08-36 68

