

# Höhenbestimmung mit GPS am Beispiel von Pilotprojekten aus Baden-Württemberg

Georg Dinter, Michael Illner

## 1 Zusammenfassung

In diesem Bericht werden die Ergebnisse eines Kooperationsprojektes zwischen dem Landesvermessungsamt und Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg sowie dem Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe dargelegt. Ziel des Projektes war es, die Einsatzmöglichkeiten von GPS zur Höhenbestimmung in der Landesvermessung zu durchleuchten. Hierzu wurden zwei Teilprojekte unabhängig voneinander spezifiziert, gemeinsam gemessen und am Geodätischen Institut ausgewertet. Im ersten Teil des Berichtes erfolgt eine Projektbeschreibung und die Darstellung der verwendeten BWREF-GPS-Daten. Im zweiten und dritten Teil werden ausführlich die beiden Teilprojekte A und B behandelt sowie die Ergebnisse einiger tiefer gehenden Untersuchungen vorgestellt. Die erzielten Resultate machen deutlich, dass auch die ellipsoidischen GPS-Höhen sinnvoll für Zwecke der Landesvermessung weiterverarbeitet werden können.

Keywords: GPS-Höhen, Landeshöhen, Quasigeoidmodell EGG97, GPS-Höhenintegration, Landesvermessung

## 2 Beschreibung und Zielsetzung des Projektes

Da das GPS-Verfahren ein dreidimensionales Positionierungsverfahren ist, erhält man nicht nur die Lagekomponenten von zu bestimmenden Punkten sondern auch deren Höhenkomponenten. Da es sich hierbei um ellipsoidische Höhen - also rein geometrisch definierte Höhen - handelt, müssen diese noch in das momentan gültige Gebrauchshöhensystem - das normalorthometrische Höhensystem (NN-System) – überführt werden. In dem Projekt sollten generell Aussagen über die Genauigkeit der mit GPS bestimmten Gebrauchshöhen gewonnen werden. Deshalb wur-

de in einem ersten Feldversuch GPS dazu eingesetzt, um die über Nivellementslinien 3. Ordnung nur mühsam zu erreichende Ortschaft Bitz/Schwäbische Alb höhenmäßig zu erschließen und damit indirekt die Frage zu beantworten, ob aufwendige Nivellements 3. Ordnung durch das GPS-Verfahren ersetzt und wirtschaftlicher durchzuführen sind.

In dem zweiten gemeinsam durchgeführten Projekt wurde am Beispiel der Nivellementschleife 612 der Frage nachgegangen, ob sich GPS zur Überwachung von Nivellementknotenpunkten 1. und 2. Ordnung eignet, und ab welcher Größenordnung Höhenänderungen dieser Punkte zuverlässig aufgedeckt werden können.

### **3 GPS-Daten des BWREF-Netzes**

Zur Schaffung hochgenauer Anschlusspunkte für Zwecke des nationalen Karten- und Vermessungswesens wurde das globale ITRF-Bezugssystem (International Terrestrial Reference Frame) seit 1989 durch mehre GPS-EUREF-Kampagnen Europa weit verdichtet. Die erste Verdichtungsstufe dieses so genannten A-Netzes wurde in Deutschland durch Schaffung des DREF-Netzes als B-Netz im Jahre 1991 realisiert. Davon ausgehend entstanden in den einzelnen Bundesländern sogenannte C-Netze. Die Messung dieses C-Netzes erfolgte in Baden-Württemberg in den Jahren 1996 und 1997. Es wurde mit der Berner Software ausgewertet und als BWREF-Netz bezeichnet. Der mittlere Punktabstand in diesem Netz beträgt ca. 20km, so dass etwa ein BWREF-Punkt auf jedes Blatt einer TK25 entfällt. Diese BWREF-Punkte sind also über GPS-Messungen im ETRF-89 koordiniert; zusätzlich wurden sie durch lokale Messungen von den nächstliegenden Anschlusspunkten aus im Gauß-Krüger System bestimmt. Weiter liegen für sie auch von benachbarten Niv-Punkten abgeleitete NN-Höhen vor.

Da für eine Überführung ellipsoidisch bestimmter GPS-Höhen in ein anderes Gebrauchshöhensystem – hier das NN-System - identische Punkte benötigt werden, liegt es nahe zu untersuchen, ob sich bei entsprechend ausgedehnten GPS-Projekten hierfür die Punkte des bereits vorliegenden C-Netzes sinnvoll verwenden lassen. Nach Festlegung der zu bearbeitenden Gebiete durch das Landesvermessungsamt wurden die BWREF-Punkte erhoben, die den beiden Projekten am nächsten lie-

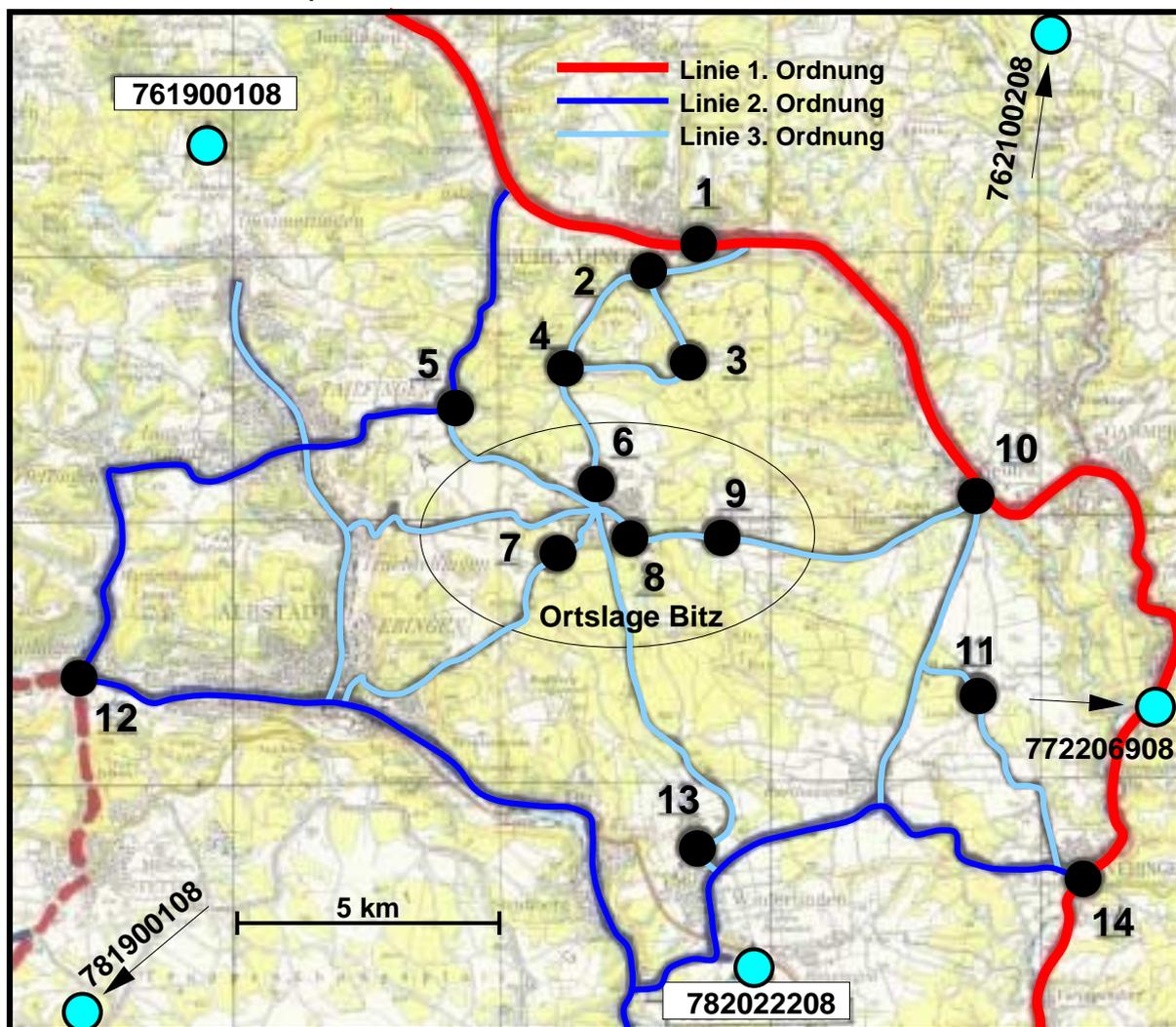
gen. Im Falle des Teilprojektes A sind dies 5 BWREF-Punkte, die das zu untersuchende Gebiet lagemäßig einschließen (siehe Abb. 1). Das Landesvermessungsamt stellte freundlicherweise alle diese 5 Punkte betreffenden und mit der Berner Software ausgewerteten GPS-Sessions in Form von dreidimensionalen kartesischen Koordinaten im System ETRF-89 mit den zugehörigen Kovarianzmatrizen zur Verfügung. Insgesamt sind dies 10 Sessions, die neben den 5 direkt benachbarten BWREF-Punkten 52 weitere Punkte beinhalten, die mit einem Abstand von bis zu ca. 100km kreisförmig um die beiden zu bearbeitenden Gebiete verteilt liegen. An dieser Stelle sei betont, dass der Rückgriff auf diese Form der GPS-Daten für das BWREF-Netz keine große Mühe bereitet, da sie ein Zwischenprodukt bei der Auswertung des BWREF-Gesamtnetzes darstellen, das gut dokumentiert sowieso vorliegt und lediglich noch auf entsprechendem Datenträger zur Verfügung zu stellen ist. Es müssen auch nicht noch einmal die originären Phasenmessungen prozessiert werden, sondern es wird direkt auf die sessionweise berechneten dreidimensionalen Koordinaten ((X, Y, Z) bzw. (B, L, h)) mit ihren Kovarianzmatrizen zurückgegriffen.

Um einen ersten Eindruck von der Genauigkeit der ellipsoidischen Höhen  $h$  der zur Verfügung gestellten BWREF-Punkte zu erhalten, wurden die ellipsoidischen Höhen der 10 GPS-Sessions in eine freie Netzausgleichung eingeführt. Sie führte für die 57 Punkte bei insgesamt 129 eingeführten Höhendifferenzen als relative GPS-Beobachtungen auf eine durchschnittliche Standardabweichung von  $\sigma_h=5.5\text{mm}$ . Als Faktor zwischen innerer und äußerer Genauigkeit der eingeführten GPS-Sessions wurde im Rahmen einer Varianz-Komponenten-Schätzung der Wert 5.4 ermittelt. Erwartungsgemäß konnten keine groben Fehler im Datenmaterial nachgewiesen werden. Der größte Höhenunterschied für eine beobachtete Basislinie betrug 791m.

## **4 Teilprojekt A: Erschließung von Bitz**

In diesem ersten Teilprojekt ging es darum, das GPS-Verfahren für die Höhenbestimmung von Punkten einer Ortschaft einzusetzen, deren Bestimmung über herkömmliches Nivellement sehr aufwendig ist. Hierzu wurden von dem Landesvermessungsamt in der Ortschaft Bitz und Umgebung 14 GPS-taugliche Punkte erkundet, vermarktet und ihre Höhen über Nivellement bestimmt. Darin eingeschlossen sind auch exzentrisch

vermarkte Punkte von Linienpunkten 1. und 2. Ordnung (vgl. Abb. 1). Der Grundgedanke des hier zur Anwendung kommenden Verfahrens ist, den absoluten Höhenbezug außerhalb des in Frage stehenden Gebietes "abzugreifen" und ihn über GPS in das eigentlich interessierende Gebiet zu übertragen, während dort dicht benachbarte Punkte (z.B. die Punkte 6, 7, 8, 9) selbst unter Umständen über Nivellement verknüpft werden könnten. Bei dieser Untersuchung liefern die BWREF-Punkte den absoluten Höhenbezug, so dass durch neue "lokale" GPS-Messungen lediglich diese Punkte noch mit den in Betracht stehenden Neupunkten und die Neupunkte selbst zur Wahrung der Nachbarschaftsgenauigkeit untereinander verknüpft werden müssen.



**Abbildung 1:** Netzübersicht des Teilprojektes A (5 helle Signaturen: direkt benachbarte BWREF-Punkte; schwarze Kreise: zu bestimmende Neupunkte)

## **4.1 Durchführung und Auswertung der lokalen Messungen**

Im Rahmen einer Hauptvermessungsübung III wurde von Studierenden des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe unter aktiver Beteiligung von Mitarbeitern des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg das "lokale" Netz mit 9 Empfängern Leica System 300 beobachtet. Während der Messungen vom 9.7.-12.7.1997 wurde jeder Netzpunkt (14 Neupunkte, 5 BWREF-Punkte) zwischen 3 und 4 mal besetzt. Die Auswertung dieser Messungen erfolgte mit der Firmensoftware Leica SKI, wobei für alle Basislinien alle Phasenmehrdeutigkeiten (ambiguities) gelöst werden konnten. Die aus dieser Auswertung resultierenden dreidimensionalen Koordinaten mit ihren Kovarianzmatrizen wurden nach dem am Geodätischen Institut der Uni Karlsruhe entwickelten Konzept weiterverarbeitet und mit den zur Verfügung gestellten BWREF-Daten zusammengeführt (van Mierlo J. und M. Illner, 1998).

## **4.2 Qualitätsanalyse der GPS-Ergebnisse**

### **4.2.1 Sessionzusammenschluss des HVÜ III-Netzes**

Im Rahmen einer Varianz-Komponenten-Schätzung wurden alle aus der SKI-Auswertung resultierenden Kovarianzmatrizen mit einem einheitlichen Faktor von 15.2 skaliert. Danach gehen die beobachteten ellipsoidischen Höhenunterschiede im Mittel mit einer a-priori Genauigkeit von etwa 1.5cm in die Ausgleichung ein. Die Genauigkeit der ausgeglichenen ellipsoidischen Höhen beträgt durchschnittlich  $\sigma_h=7.0\text{mm}$ . Die erreichten Genauigkeiten für die Projektpunkte schwanken zwischen 4.1mm und 8.6mm, mit Ausnahme des Neupunktes 5 und des BWREF-Punktes 781900108 mit Genauigkeiten von 11.8 mm bzw. 15.7 mm. Der Grund für die doch deutlich schlechtere Bestimmung dieser beiden Punkte ist im Bereich der GPS-Messungen zu suchen, konnte aber im Rahmen der Auswertung mit HEIDI2.0 nicht näher geklärt werden. Die erreichte Genauigkeit deckt sich mit den Erfahrungswerten von 4mm -10mm, die in den letzten Jahren am Geodätischen Institut der Uni Karlsruhe gemacht wurden (Dinter u. a., 1997). Andererseits lassen sich mit etwas mehr Aufwand (u. a. Verlängerung von Beobachtungszeiten) noch deutlich bessere Ergebnisse erzielen, wie dies der Sessionzusammenschluss des BWREF-Netzes und des GPS-Netzes aus dem Teilprojekt B zeigen.

Dies wird durch Genauigkeiten von 2mm-4mm bestätigt, wie sie bei der Bestimmung von vertikalen Punktbewegungen mit GPS erzielt wurden (Görres und Campbell, 1998, S. 230). Im Zuge der Qualitätsanalyse wurden durch iteratives Datasnooping im Beobachtungsmaterial der HVÜ III zwei grobe Fehler (48.8cm und -4.9cm) aufgedeckt und die entsprechenden Beobachtungen eliminiert.

#### **4.2.2 Zusammenführung des BWREF-Netzes und des HVÜ III-Netzes**

Nach der getrennten Analyse des BWREF-Teilnetzes und des Netzes der HVÜ III wurden im nächsten Schritt beide Netzteile in einer freien Netzausgleichung zu einem GPS-Gesamtnetz zusammengeführt. Entsprechend der durchgeführten Varianz-Komponenten Schätzung wurden die eingeführten Genauigkeiten mit dem Faktor 1.05 nachskaliert, so dass die ellipsoidischen Höhenunterschiede des HVÜIII-Netzes bzw. des BWREF-Netzes nun mit a-priori Genauigkeiten von 1.8cm bzw. 1.0cm in die Ausgleichung eingehen. Trotz der nun deutlich erhöhten Kontrollierbarkeit (Redundanzanteile) innerhalb des HVÜ III-Teilnetzes, wurden keine weiteren groben Fehler im Beobachtungsmaterial angezeigt. Die erreichte Genauigkeit der ausgeglichenen ellipsoidischen Höhen beträgt für die vom HVÜ III-Netz betroffenen Netzpunkte im Mittel 7.3 mm und für das gesamte GPS-Netz 6.0 mm.

Durch die Hinzunahme des BWREF-Netzes hat sich die Qualität der vom Projekt betroffenen BWREF-Punkte sehr deutlich verbessert und liegt im Mittel bei 4 mm. Dies betrifft insbesondere den Punkt 781900108, der in der "lokalen" Projektlösung nur relativ ungenau bestimmt werden konnte (siehe oben). Der Neupunkt 5 fällt auch hier mit seiner Standardabweichung von 13.4 mm deutlich aus dem Rahmen, und durch die Hinzunahme des BWREF-Netzes erfolgte eine deutliche Fixierung des Projektnetzes in seinen Randbereichen.

### **4.3 Allgemeine Aspekte zur GPS-Integration**

Die Überführung ellipsoidischer GPS-Höhen unter Verwendung des EGG97 Quasigeoidmodells (Denker, 1998) erfolgte mit dem Programm HEIDI2.0 (Dinter u. a., 1997). Hierbei werden die aus dem Modell entnommenen Höhenanomalien stochastisch in Form von direkten Beobachtungen in die Auswertung eingeführt. Qualitativ gute, hochauflösende

Modelle wie z. B. das hier verwendete EGG97-Modell weisen bei lokalen Anwendungen eine Genauigkeit von ca. 1cm-3cm auf (Denker, 1998). "Lokal" bedeutet in diesem Fall eine Gebietsausdehnung von weniger als 100km-300 km. Quasigeoidmodelle (QG) sind auf Grund ihrer Daten- und Berechnungsgrundlage in hohem Maße korreliert. Deshalb ist kaum zu erwarten, dass ein Modell punktuell falsche Daten beinhaltet, sondern vielmehr in gewissen Regionen genauer bzw. ungenauer ist als in anderen. Ursache hierfür können z. B. fehlende oder ungenaue Schweredaten, ungenügendes digitales Geländemodell, starke Abweichung von der verwendeten Standard-Dichte (Geoidmodell) sein. Langwellige und auch kurzwellige systematische Effekte verfälschen in erster Linie die Daten des QG-Modells, in Kombination aber auch die der übrigen Höhenkomponenten (Landeshöhen und ellipsoidische Höhen). Eine Trennbarkeit dieser Effekte ist im Zuge der Analyse kaum möglich (vgl. Dinter, 1997; Dinter u. a., 1997). Eine Höhenintegration unter Verwendung von QG-Modellen setzt prinzipiell voraus, dass sich die Höhenanomalien auf das gleiche Referenzellipsoid beziehen wie die im Rahmen der GPS-Auswertung ermittelten ellipsoidischen Höhen. Im allgemeinen ist diese Voraussetzung jedoch nicht exakt erfüllt.

Während die beiden ersten Aspekte hauptsächlich das stochastische Modell der Ausgleichung betreffen, müssen die beiden letzt genannten Mängel durch eine geeignete funktionale Modellbildung berücksichtigt bzw. in ihrer Auswirkung gemindert werden. Im allgemeinen ist es üblich, bei der Verwendung von QG-Modellen sogenannte Shift- und Neigungsparameter mitzuschätzen, um die genannten systematischen Effekte zu verringern (Denker, 1998). In der verwendeten Software HEIDI2.0 werden die Höhenanomalien stochastisch mit einer entfernungsabhängigen Korrelationsfunktion eingeführt. Darüber hinaus wird im funktionalen Modell ein strenger Ellipsoidübergang angesetzt, um die Auswirkungen ggf. vorhandener Datumseffekte sowie systematischer Effekte zu reduzieren. Auch wenn die angesprochenen Zusatzparameter zweifellos die gewünschte Wirkung erzielen und die Kombination von QG-Modellen mit anderen Höhensystemen deutlich verbessern oder sogar erst ermöglichen, ist deren Interpretation sehr problematisch (vgl. Dinter u. a., 1997). In diesem Bericht wurde die Nutzung solcher Zusatzparameter zwar über die Einführung des QG-Modells motiviert und begründet, aber in der Realität tragen alle Höhenkomponenten (Landeshöhen, ellipsoidische GPS-Höhen und das QG-Modell) mit ihren jeweils spezifischen Proble-

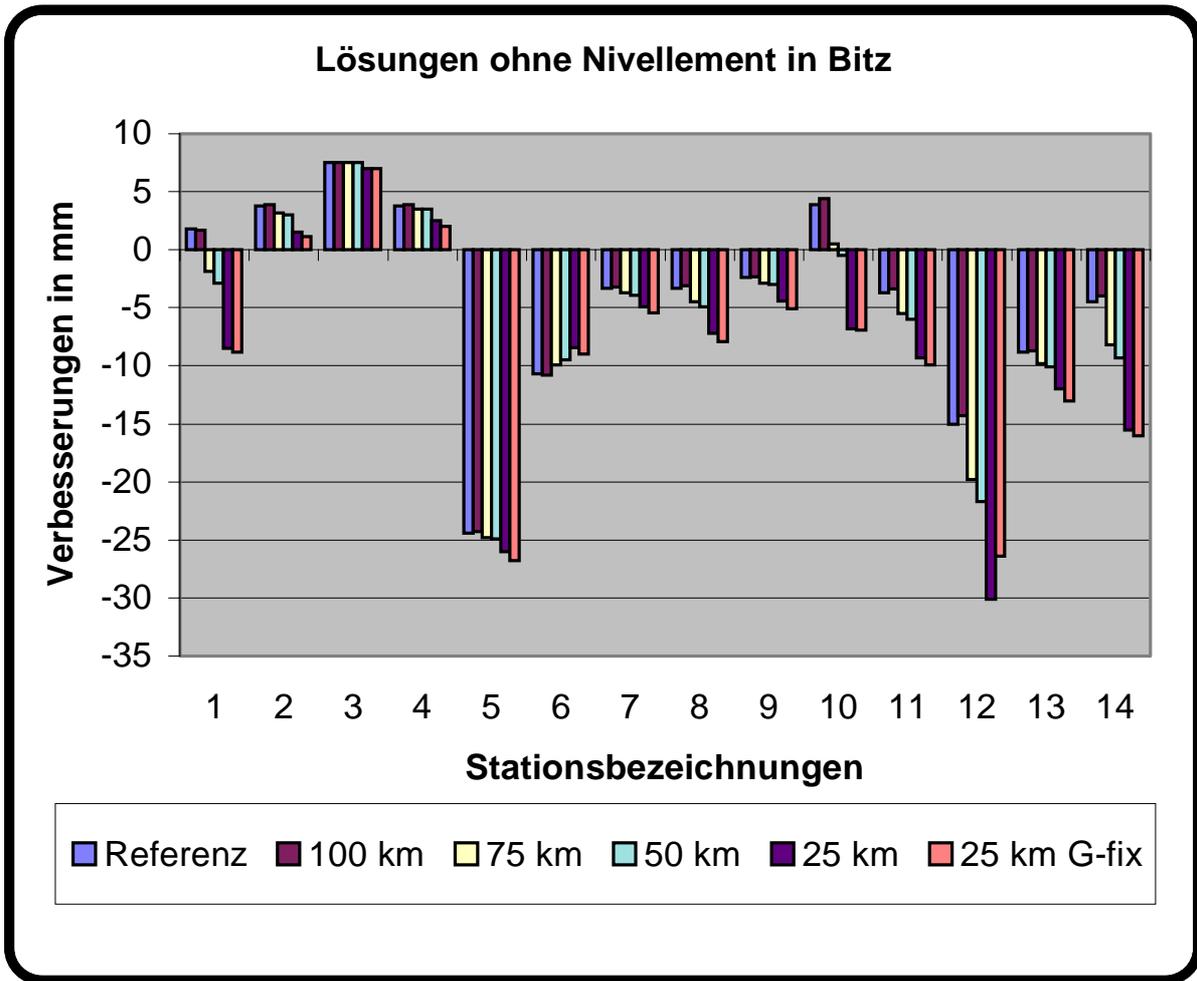
men zur Verrauschung des Gesamtproblems bei und machen die Einführung der genannten Zusatzparameter notwendig. Da die jeweiligen Einflüsse nicht trennbar sind, sollten die geschätzten Parameter nicht als Inkonsistenzen (Fehler) allein einer der genannten Komponenten interpretiert werden.

Im Rahmen dieser Projektstudie wurden einige Untersuchungen hinsichtlich der anzuwendenden Auswertestrategie durchgeführt, welche in den folgenden Abschnitten zusammenfassend dargestellt werden.

#### **4.4 Einfluß von großräumiger Integration auf die Lösung**

Im Rahmen des Projektes wurden als identische Punkte BWREF-Stationen verwendet. Zu klären ist die Frage, inwiefern es sinnvoll ist, weit über die eigentlichen Projektgrenzen hinausgehende identische Punkte in den Auswerteprozess miteinzubeziehen. Hierzu wurden um das Zentrum des eigentlichen Projektes vier Zonen mit einem Radius von 25km, 50km, 75km und 100km gebildet. In den jeweiligen Versionen werden dann nur die BWREF-Punkte eingeführt, die innerhalb der entsprechenden Zone liegen. Die Lösung mit allen hier zur Verfügung stehenden BWREF-Punkten wird im folgenden als Referenzlösung bezeichnet. Für alle Netzknoten lagen amtliche nivellierte Höhen vor, die als Näherungswerte in die Ausgleichung eingeführt wurden. Somit stellen die Unterschiede zwischen den Näherungshöhen und den ausgeglichenen Höhen auch gleichzeitig die Abweichungen der resultierenden Ergebnisse von den schon vorhandenen amtlichen NN-Höhen dar und können als ein Qualitätsmerkmal der Integration herangezogen werden. Die einzelnen Versionen wurden unabhängig voneinander ausgewertet, d.h. es wurden jeweils nur die Integrationsparameter eingeführt, die sich als signifikant erwiesen, und ggf. wurden die Genauigkeiten der Beobachtungskomponenten angepasst.

In Abb. 2 sind die Abweichungen der Integrationslösungen bezüglich der bekannten NN-Höhen der Landesvermessung für insgesamt sechs verschiedene Versionen dargestellt. Daraus läßt sich folgendes entnehmen:



**Abbildung 2:** Abweichungen der verschiedenen Integrationslösungen von den amtlichen NN-Höhen

Die im Randbereich gelegenen Punkte 1, 10, 11, 12, 13 und 14 werden durch die großräumigen Integrationen erkennbar besser bestimmt. Je kleiner der Ausschnitt gewählt wird, desto mehr divergieren die Lösungen der Randpunkte und weichen von den gegebenen NN-Höhen ab. Sehr auffällig ist der Effekt bei den Punkten 1, 12 und 14.

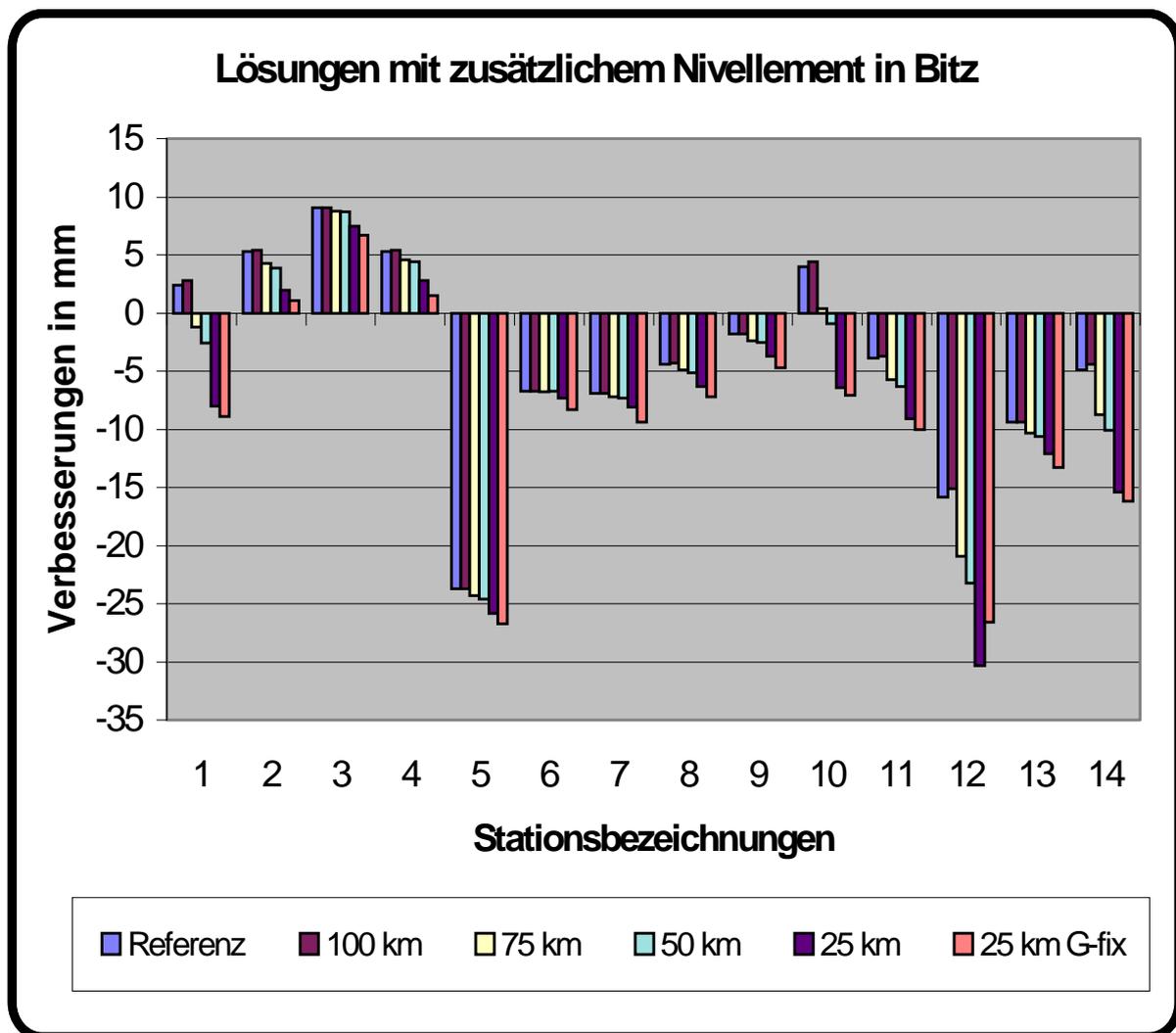
Die Lösung für den Punkt 5 weicht mit ca. -25mm bei allen Versionen recht stark von der gegebenen NN-Höhe ab. Eine Ursache hierfür ist eventuell in den GPS-Messungen zu suchen (siehe Sessionzusammenschluss). Insgesamt weichen die Punkte 5 und 12, die beide auf der Nivellementsline 2. Ordnung zwischen Hausen und Lautlingen liegen,

am stärksten von den amtlichen Höhen ab. Möglicherweise liegen in diesem Bereich auch Spannungen im amtlichen Höhennetz vor.

Die Ergebnisse machen deutlich, dass eine großräumige Integrationsstrategie einer lokalen Variante vorzuziehen ist. Weiterführende Untersuchungen ergaben, dass sich die Kontrollierbarkeit der Anschlusshöhen, die das Projekt direkt betreffen, bei großräumigen Integrationen um den Faktor 2 verbessert. Weiter war aus Testrechnungen ersichtlich, dass simulierte grobe Fehler von 3cm in den Anschlusshöhen bei den großräumigen Varianten (Referenz, 100km und 75km) erkannt werden, während sie bei den lokalen Varianten (50km und 25km) nicht aufgedeckt wurden. Ungenauigkeiten in den Anschlusshöhen, die in unmittelbarer Nähe des Projektes liegen, beeinflussen die Lösung um so stärker, je kleiner die Integrationsstrategie gewählt wird. Dies ist auch der Grund für die größeren Verbesserungen bei der 25-km Variante (siehe Abb. 2).

#### **4.5 Einfluß der Hinzunahme von lokalen Feinnivellements**

Eine Variante, das Ziel des Teilprojektes A zu erreichen und die relativen Höhenunterschiede im Bereich der zu erschließenden Ortslage Bitz mit höchster Genauigkeit zu bestimmen, besteht darin, die vier Punkte 6, 7, 8 und 9 durch ein zusätzliches Feinnivellement zu verbinden. Auf diesem Wege wird die Bestimmung des absoluten Höhenniveaus in Bitz durch GPS vergleichsweise wirtschaftlich realisiert und dennoch innerhalb der Ortslage höchste Relativgenauigkeit gewährleistet. Deshalb wurden in einem weiteren Auswerteschritt diese durchgeführten lokalen Nivellements-messungen mit den betreffenden Zwischenpunkten in die Ausgleichung mit eingeführt und alle oben schon dargestellten Integrationsversionen erneut berechnet. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 3 dargestellt. Sie zeigt, dass die Differenzen zwischen den Verbesserungen in den Punkten 6-9 in allen Versionen nahezu Null sind. Dies war auch nicht anders zu erwarten, da die Feinnivellement-messungen mit entsprechend hoher Genauigkeit ( $\text{Sigma [mm]} = 0.05 \cdot \text{SQRT}(S[\text{m}])$ ) in die Ausgleichung eingeführt wurden und somit das Ergebnis in erster Linie beeinflussen. Die maximale Änderung gegenüber der Lösung ohne zusätzliches Nivellement beträgt 4mm. Der Einfluß des zusätzlichen Nivellements auf die gesamte Integration ist



**Abbildung 3:** Abweichungen der verschiedenen Integrationslösungen von den amtlichen NN-Höhen mit zusätzlichem Nivellement in Bitz

somit klein im Vergleich zu den Auswirkungen der verschiedenen großen Integrationsbereiche.

Tab. 1 stellt die wesentlichen Kenngrößen der Integrationsberechnungen in den verschiedenen Versionen dar und lässt sich folgendermaßen interpretieren: Die lokale (25-km) Version fällt in allen Belangen deutlich gegenüber den anderen Versionen ab. Obwohl die lokale Version – was den Vergleich mit den vorliegenden NN-Höhen anbelangt - eindeutig das schlechteste Integrationsergebnis liefert, sind die resultierenden Genauigkeiten für alle Beobachtungskomponenten am besten. Die erzielten

		Einheit	Referenz	100 km	75 km	50 km	25 km
<b>Neupunkte</b>	V (mittel)	mm	7,4	7,4	7,9	8,3	10,3
	V (max)	mm	23,7	23,7	24,3	24,6	30,3
	Sigma (mittel)	mm	7,6	7,9	7,7	7,6	5,6
	Sigma (max)	mm	10,4	10,7	10,4	10,3	8,0
<b>Anschluss-Punkte</b>	V (mittel)	mm	1,4	1,3	1,2	1,0	1,0
	V (max)	mm	2,1 (10,5)	2,1 (10,4)	2,5 (9,5)	4,9	1,9
	Sigma (mittel)	mm	2,9	3,0	2,9	2,9	2,4
	Anzahl	--	52	48	41	25	7
<b>Quasigeoid</b>	V (max)	mm	20,9	21,7	37,4	28,9	7,2
	Sigma (mittel)	mm	23,0	24,0	21,9	23,1	16,4
<b>GPS - Beob.</b>	V (max)	mm	2,5	2,5	2,6	2,5	2,7
	Korr. (max)	mm	121,6	123,1	60,3	43,3	25,1
	Sigma (mittel)	mm	4,1	4,1	4,0	3,9	3,4
<b>Netz-Information</b>	BL (mittel)	Km	46	41	35	24	13
	BL (max)	Km	104	90	72	48	22
	dH (mittel)	m	189	156	132	131	79
	dH (max)	m	685	685	429	335	196

**Tabelle 1:** Charakteristische Kenngrößen der Integrationsberechnungen mit zusätzlichem Nivellement in Bitz und stochastischer Verwendung des EGG97-Quasigeoids

Genauigkeiten spiegeln jedoch nur eine innere Genauigkeit wider und können nicht allein als Maß für den Erfolg der Integration herangezogen werden.

Die a-posteriori Standardabweichungen der ausgeglichenen Höhenanomalien liegen zwischen 1.6cm und 2.4cm und bestätigen die hohe Qualität des EGG97-Modells (vgl. Denker, 1998). Die a-posteriori Standardabweichung der ellipsoidischen Höhenunterschiede liegt konstant bei etwa 4mm. Dies belegt, dass GPS dem Nivellement in großflächigen Anwendungen durchaus ebenbürtig ist. Man beachte, dass bei der Referenzlösung die Basislinienlänge im Mittel 46km (max. 104km) und der mittlere beobachtete Höhenunterschied 189m (max. 685m) beträgt. Bei diesen Distanzen und Höhenunterschieden liefert das Feinnivellement auch keine besseren Ergebnisse mehr (vgl. Görres und Campbell, 1998, Seite 229-230).

Die maximalen Verbesserungen der nivellitisch bestimmten Anschlusspunkte variieren zwischen 1.9mm und 4.9mm. Für die drei großräumigen Varianten sind zusätzlich in Klammern die maximalen

Verbesserungen der trigonometrisch bestimmten Anschlusshöhen angegeben, die lediglich mit einer Genauigkeit von 1cm in die Ausgleichung eingeführt wurden. Solche Punkte treten in den 50km- und 25km-Varianten nicht mehr auf.

Der Korrekturwert für eine GPS-Basislinie auf Grund der im Rahmen der Integration mit geschätzten Datumparameter (2 Rotationen, ggf. Maßstab und Formanpassung) wird in obiger Tabelle durch die Größe  $Koor(max)$  charakterisiert. Je länger die maximale Basislinie im Netz ist, desto größer fallen diese maximalen Korrekturen für einen beobachteten ellipsoidischen Höhenunterschied aus. Die dargestellten Größen verdeutlichen, dass die Datumparameter mit zunehmender Netzausdehnung an Bedeutung gewinnen und wesentlich zum Gelingen der Integration beitragen. Man beachte jedoch, dass auch bei der lokalen Variante (25 km) die Schätzung von 2 Rotationen unbedingt notwendig, hoch signifikant ist und für die Größe  $Koor(max)$  einen Wert von 25.1mm liefert.

#### **4.6 Standardlösungen mit fehlerfreiem Quasigeoidmodell**

Wie bereits angedeutet werden in der geodätischen Praxis aus GPS resultierende ellipsoidische Höhen häufig mit einem als fehlerfrei angenommenen Quasigeoidmodell ins Landeshöhensystem überführt.

Hierbei werden meistens Neigungs- und Shiftparameter über eine gewisse Anzahl von Anschlusspunkten mitgeschätzt. Diese Integrationsstrategie wurde im Rahmen des Projektes ebenfalls zum Vergleich für alle fünf Versionen verfolgt, wobei die Schätzung des Shifts bei der Ausgleichung von Höhendifferenzen nicht möglich/nötig ist. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Tab. 2 dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass bei dieser Strategie die Anschlusspunkte und vor allem die GPS-Beobachtungen die Inkonsistenzen alleine kompensieren müssen. Dies schlägt sich in den erreichten a-posteriori Standardabweichungen und den maximalen Verbesserungen nieder. Die Verbesserungen für die Neupunkte belegen, dass mit dieser Strategie zumindest in bewegtem Gelände keine großräumige Integration erfolgreich durchgeführt werden kann. Diese Lösungen, welche ebenfalls in den Abb. 2 und 3 jeweils als letzte Säulen und als 25km-Variante dargestellt sind, stimmen jedoch sehr gut mit den lokalen Lösungen mit stochastischem Geoid überein.

Die Interpretation der a-posteriori Standardabweichungen ist sehr kritisch, da die Berechnungen mit fehlerfreiem Quasigeoidmodell und damit mit falschen Annahmen durchgeführt wurden. Vergleichbare Untersuchungen in weniger bewegtem Gelände würden sicherlich zu anderen Ergebnissen führen, dies aber nur auf Grund der einfacheren Voraussetzungen.

		Einheit	Referenz	100 km	75 km	50 km	25 km
<b>Neupunkte</b>	V (mittel)	mm	14,1	13,9	13,5	11,7	10,4
	V (max)	mm	37,6	37,2	36,5	31,8	26,8
	Sigma (mittel)	mm	21,1	19,9	17,5	14,5	12,0
	Sigma (max)	mm	39,2	36,9	32,0	26,6	21,9
<b>Anschluss-Punkte</b>	V (mittel)	mm	4,6	4,4	3,2	2,9	1,6
	V (max)	mm	13,2	12,0	8,8	7,6	3,2
	Sigma (mittel)	mm	8,5	8,0	6,3	5,3	3,9
	Anzahl	--	52	48	41	25	7
<b>GPS- Beob.</b>	V (max)	mm	40,9	37,9	28,2	19,8	11,7
	Korr. (max)	mm	110,5	92,4	61,4	41,5	26,6
	Sigma (mittel)	mm	14,3	13,4	11,2	10,2	10,3
<b>Netz-Information</b>	BL (mittel)	km	46	41	35	24	13
	BL (max)	km	104	90	72	48	22
	dH (mittel)	m	189	156	132	131	79
	dH (max)	m	685	685	429	335	196

**Tabelle 2:** Charakteristische Kenngrößen der Integrationsberechnungen ohne Nivellement in Bitz und mit dem als fehlerfrei eingeführten EGG97- Quasigeoidmodell.

## 4.7 Beurteilung der Ergebnisse

Ziel des Teilprojektes A war, zu überprüfen, ob GPS zur höhenmäßigen Erschließung isoliert und schwer zugänglicher Ortschaften herangezogen werden kann, so dass auf die sehr aufwendigen und unwirtschaftlichen Liniennivellements verzichtet werden kann. Offen bei dieser Problemstellung waren zwei Fragen: Welche Integrationsstrategie liefert hinsichtlich der Aufgabenstellung die besten und zuverlässigsten Ergebnisse? Welche Genauigkeiten sind mit dem GPS-Verfahren erreichbar?

**Zu 1:** Die dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass die besten Ergebnisse über eine großräumige Integration mit einem stochastisch und hoch korreliert eingeführten Quasigeoid (EGG97) erzielt werden. Die Schätzung von geeigneten Datumparametern ist unabdingbare Voraus-

setzung für eine erfolgreiche Integration. Was die Relativgenauigkeit der Punkte im Bereich der Ortslage Bitz anbelangt, sind in diesem Beispiel keine wesentlichen Differenzen zwischen den Varianten mit und ohne Feinnivellement festzustellen. Bei dieser Integrationsstrategie werden mit dem hochauflösende Quasigeoidmodell EGG97 auch in bewegtem Gelände zufriedenstellende Resultate erzielt.

**Zu 2:** Die Abweichung der Referenzlösung von den amtlichen NN-Höhen der Neupunkte beträgt im Mittel 7mm. Beschränkt man sich auf die vier Punkte 6, 7, 8 und 9, welche der Erschließung von Bitz dienen, liegt die Abweichung im Mittel bei 5mm. Die Relativgenauigkeit der vier Punkte ist gewährleistet. Die erreichte Standardabweichung aller Neupunkte liegt im Mittel bei 8mm und ist als realistisch einzuschätzen. Im Rahmen des Teilprojektes A wurde das Leistungspotential von GPS zur Höhenbestimmung nicht optimal ausgeschöpft, so dass im allgemeinen noch etwas bessere Ergebnisse zu erwarten sind (siehe auch Sessionzusammenschluß des HVÜ III-Netzes).

Ob die erzielten Ergebnisse den Anforderungen der Landesvermessung genügen, muß von den entsprechenden Fachleuten selbst beurteilt werden. Hierbei sollten zwei Aspekte nicht unberücksichtigt bleiben. Zum einen sind auch die zum Vergleich herangezogenen amtlichen NN-Höhen nicht fehlerfrei und u. U. durch systematische Effekte verfälscht (z. B. Netzspannungen, Nivellement im Gebirge). Zum anderen paßt das aktuelle amtliche Höhensystem nicht zum verwendeten Quasigeoidmodell EGG97. Dieses Problem wurde bei der gesamten Untersuchung unberücksichtigt gelassen. Allerdings ist bekannt, dass die Unterschiede zwischen den Höhensystemen stark von der Geländehöhe abhängig sind und damit die Auswirkungen zumindest teilweise durch den eingeführten (hoch signifikanten) Maßstab kompensiert werden können. Mit der geplanten Umstellung des Höhensystems auf die Normalhöhen ist diese prinzipielle Inkonsistenz beseitigt, wodurch noch bessere Integrationsergebnisse zu erwarten sind.

## **5 Teilprojekt B: Überwachung der Niv-Schleife 625 mit GPS**

Die Landesvermessung hat die Aufgabe, in bestimmten Zeitabständen die Nivellementslinien 1. und 2. Ordnung hinsichtlich der Höhenänderung von Knotenpunkten zu überwachen. Da diese Schleifen sehr lang sein können, ist der zur Bewältigung dieser Aufgabe benötigte Aufwand groß und mit entsprechenden Kosten verbunden. Im Rahmen des Teilprojektes B sollte nun untersucht werden, ob diese Aufgabe durch Einsatz von GPS effizient und zufriedenstellend gelöst werden kann. Das Landesvermessungsamt Baden-Württemberg wählte in der Nivellementsschleife 612 des Deutschen Haupthöhennetzes 6 Knotenpunkte aus, deren NN-Höhen für die Problemstellung beispielhaft über GPS bestimmt werden sollten. Da die eigentlichen Knotenpunkte von ihrer Lage und Vermarkung her gesehen nicht GPS-tauglich sind, war es notwendig, in der Nähe dieser Punkte Exzentren festzulegen. Diese wurden über Feinnivellement mit den eigentlichen Knotenpunkten verknüpft, so dass Sollhöhen für alle Punkte vorlagen. Die Planung, Durchführung und Auswertung der GPS-Messungen war Gegenstand einer am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe angesiedelten Diplomarbeit, die in bewährter Weise in enger Kooperation mit der örtlichen Landesvermessung durchgeführt wurde (Schmidt, J., 1998). Die Integration der bestimmten ellipsoidischen Höhen in das Gebrauchshöhensystem sollte wie in Teilprojekt A durch Verwendung von BWREF-Punkten gelöst werden. Für die Verknüpfung der 6 Knotenpunkte mit dem existierenden BWREF-Netz wurden die nächst gelegenen 10 BWREF-Punkte ausgewählt und in die örtlichen Messungen miteinbezogen (siehe Abb. 4). Für die übrigen BWREF-Punkte wurde wie im Projekt A auf die von der Landesvermessung zur Verfügung gestellten Daten der 10 Auswertesessions zurückgegriffen.

### **5.1 Durchführung und Auswertung der Messungen**

Die GPS-Messungen in dem 16 Punkte umfassenden Netz fanden unter teilweise widrigen Umständen (bis zu 30cm Neuschnee) in der Zeit vom 24.3.- 26.3.1998 unter Beteiligung des Geodätischen Instituts sowie des Landesvermessungsamtes BaWü statt. In dieser Zeit wurde jeder Netzpunkt dreimal unabhängig voneinander besetzt und in Sessions von je 3

Stunden Dauer beobachtet. Zum Einsatz kamen 8 Empfänger des Typs Trimble 4000SSI, wobei die Höhen der Antennen über den Punkten jeweils vor und nach den Messungen über Nivellement bestimmt wurden.



**Abbildung 4:** Netzübersicht des Teilprojektes B zur Überwachung von Nivellements-knotenpunkten (helle Kreise: 10 BWREF-Punkte im Meßgebiet, schwarze Kreise: zu überprüfende Knotenpunkte)

Die Auswertung erfolgte danach im Rahmen der Diplomarbeit (Schmidt, J., 1998) am Geodätischen Institut unter Verwendung der Berner Software Vers. 4.0 und unter Nutzung präziser Ephemeriden. Die Weiterverarbeitung der Auswertergebnisse erfolgte im Anschluss daran nach

dem bewährten Karlsruher Konzept (Dinter u. a., 1997) mit dem Programmsystem Heidi2.0.

## **5.2 Qualitätsanalyse der GPS-Ergebnisse (Sessionzusammenschluss)**

### **5.2.1 Sessionzusammenschluss des Projekt-Netzes**

Aus der Varianzkomponentenschätzung der sechs Projektsessions ergab sich ein Faktor von 8.0, mit dem die eingehenden Genauigkeiten der ellipsoidischen Höhenunterschiede der tatsächlichen Genauigkeitssituation angepasst wurden. Nach der Skalierung gehen die ellipsoidischen Höhenunterschiede im Mittel mit einer Genauigkeit von 1.3 cm in die Berechnungen ein. Die resultierenden Genauigkeiten der ausgeglichenen ellipsoidischen Höhenunterschiede schwanken zwischen 4.0mm und 9.8mm. Sie beträgt im Mittel 6.2mm. Die Genauigkeit der sechs zu untersuchenden Objektpunkte (Exzentren) liegt im Mittel bei 5.4mm, während die Genauigkeit der 10 BWREF-Punkte im Mittel bei 6.6mm liegt. Bei der Qualitätsanalyse wurden keine groben Fehler aufgedeckt; der mittlere Redundanzanteil der Sessions im Projekt liegt bei 64%.

### **5.2.2 Sessionzusammenschluss des BWREF- und Projekt-Netzes**

Bei der Zusammenführung der beiden Teilnetze zu einem Gesamtnetz stellte sich auch hier heraus, dass eine Nachskalierung der Teilnetze mit dem Faktor 1.09 notwendig wurde. Die resultierende Genauigkeit der sechs Objektpunkte liegt bei 4.3mm und die der 10 als Anschlusspunkte verwendeten BWREF-Punkte bei 3.9mm. Die Genauigkeiten schwanken bei den 16 Projektpunkten zwischen 2.5mm und 5.9mm und liegen im Mittel bei 4.1mm. Im Vergleich zum Sessionzusammenschluss des HVÜIII-Netzes wird deutlich, dass hier das Leistungspotential von GPS besser genutzt wurde. Bessere Genauigkeiten sind mit normalem (wirtschaftlichen) Aufwand kaum zu erzielen. Noch auffälliger als im Teilprojekt A ist hier die positive Auswirkung der Hinzunahme von übergreifenden BWREF-Messungen. Im Mittel verbessert sich die Genauigkeit um 2mm, wovon insbesondere die BWREF-Punkte in der Randlage des Projektes profitieren. Der mittlere Redundanzanteil der im Projekt durchgeführten GPS-Messungen steigert sich durch die Hinzunahme

nahme der BWREF-Messungen von 64% auf 75%, wodurch eine gute Kontrollierbarkeit der Daten gewährleistet ist.

### 5.3 Integration der GPS-Höhen ins NN-Höhensystem

In das Teilprojekt B flossen die Ergebnisse der Untersuchungen hinsichtlich einer optimalen Integrationsstrategie aus Projekt A ein. Für die endgültige Integrationsberechnung wurde das Quasigeoidmodell EGG97 mit einer Genauigkeit von 2.2 cm hoch korreliert eingeführt. Als Integrationsparameter zur Modellierung der systematischen Effekte wurden zwei Rotationsparameter, ein Maßstab und ein Formparameter gewählt, die im Ausgleichungsprozeß alle als signifikant ( $\alpha = 0.1\%$ ) ausgewiesen wurden. Die ellipsoidischen GPS-Höhenunterschiede wurden mit einer mittleren a-priori Genauigkeit von 7mm eingeführt (Ergebnis des gemeinsamen Sessionzusammenschlusses). Für die NN-Höhen der Anschlusspunkte wurde eine a-priori Genauigkeit von 3mm zu Grunde gelegt. Als Näherungen für die zu bestimmenden Neupunkte wurden auch hier die bekannten amtlichen NN-Höhen verwendet, so dass an den resultierenden Verbesserungen direkt die Qualität der Integration abgelesen werden kann. Darüber hinaus wurden die kurzen Feinnivellimentslinien zwischen den zu überprüfenden Knoten und den GPS-tauglichen Exzentren als hochgenaue Beobachtungen berücksichtigt. Auf diesem Wege erhält man als Ergebnis der Berechnungen direkt die NN-Höhen der Knotenpunkte. Das Ergebnis der Berechnungen ist für die sechs Knotenpunkte in folgender Tabelle zusammengefasst.

Knoten	Exzentrum	NN-Höhe	Verb.	Ergebnis	Sigma
76190107	1	550,3445	0,0028	550,3473	0,0067
77190179	2	536,3825	0,0041	536,3866	0,0069
78170153	3	588,3471	0,0018	588,3489	0,0075
80180104	4	659,6456	0,0013	659,6469	0,0076
79200135	5	599,2861	<b>0,0095</b>	599,2956	0,0069
79210121	6	572,7557	-0,0005	572,7552	0,0067

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Integrationsberechnung für die 6 Knotenpunkte

Die Verbesserungen in der vierten Spalte belegen eine sehr gute Übereinstimmung der aus GPS abgeleiteten NN-Höhen (Spalte 5) mit den

amtlichen NN-Höhen (Spalte 3) und liegen im Mittel bei 3.3 mm. Die größte Verbesserung wurde für den Knoten 79200135 mit 9.5mm ermittelt. Die Genauigkeit der geschätzten Höhen liegt im Mittel bei 7.0mm und ist als realistisch einzuschätzen. Es liegt in der Natur der Sache, dass die aus den Berechnungen resultierenden NN-Höhen nicht exakt mit den amtlichen Höhen übereinstimmen. Auftretende Abweichungen können u.a. folgenden Gründe haben:

- Ungenauigkeiten in den durchgeführten Messungen und dem verwendeten Quasigeoidmodell
- Restfehler in der Modellbildung (z. B. Diskrepanz zwischen NN-Höhen und Normalhöhen)
- Ungenauigkeiten in den amtlichen NN-Höhen auf Grund von Netzspannungen
- Rezente Bewegungen der zu überprüfenden Knotenpunkte.

Die Schwierigkeit besteht nun darin, zu beurteilen, ob die ermittelten Verbesserungen für die Knotenpunkte signifikant sind und sich damit die Höhen der Punkte gegenüber den amtlichen Höhen tatsächlich verändert haben.

Eine einfach zu realisierende Möglichkeit, dies zu beurteilen, besteht darin, Neupunkte, für die Verbesserungen "verdächtig" groß ausfallen, sukzessive als Anschlusspunkte mit entsprechender a-priori Genauigkeit einzuführen. Diese Vorgehensweise ist äquivalent zur Kalmanfilterung, in der auf der Basis der prädizierten Höhe und ihrer Varianz-Information sowie zusätzlichen neuen Beobachtungen die aktuelle Höhe des Knotenpunktes geschätzt wird. Im Zuge der normalen Ausgleichung werden alle Anschlusspunkte und damit auch die Prädiktion des zu testenden Knotenpunktes statistisch überprüft. Schlägt die Teststatistik des Knotenpunktes an, so hat sich die NN-Höhe des Knotenpunktes unter den getroffenen statistischen Annahmen signifikant geändert. Führt man in diesem Sinne den Punkt 79200135 als Anschlusspunkt mit einer Genauigkeit von 3mm ein, so erhält man eine Testgröße für die normierte Verbesserung von 1.30 und für den T-Test einen Wert von 1.26. Bei kritischen Werten von 3.3 bzw. 3.5 wird klar, dass sich der Knoten 79200135 mit einer Verbesserung von 9.5mm nicht signifikant verändert hat. Netzplanungsberechnungen basierend auf der dargestellten Idee ergaben, dass in den sechs Knotenpunkten mit einer Irrtumswahrschein-

lichkeit von  $\alpha=0.1\%$  und einer Güte von  $\beta=80\%$  im Mittel Höhenänderungen von 3.1cm aufdeckbar sind. Am Beispiel des Knotens 80180104 mit dem größten Grenzwertfehler von 32.8mm wurde dies überprüft, indem er als Anschlusspunkt mit einer 3cm falschen Höhe eingeführt wurde. Dieser Fehler wurde im Zuge der Ausgleichung korrekt erkannt (geschätzter Fehler = 3.13 cm), ist jedoch nicht eindeutig einer der beteiligten Beobachtungskomponenten zuzuordnen.

## 5.4 Beurteilung der Ergebnisse

Im Rahmen des Teilprojektes B wurde an Hand eines Fallbeispielen untersucht, ob sich das GPS-Verfahren eignet, die Höhen von Nivellements-knotenpunkten 1. und 2. Ordnung zu bestimmen und hinsichtlich ihrer Stabilität zu überprüfen. Letztendlich sollte natürlich die Frage beantwortet werden, ob zur Erfüllung dieser Aufgabe die aufwendigen Kontrollnivelements durch wesentlich wirtschaftlichere GPS-Messungen ersetzt bzw. mit diesen sinnvoll kombiniert werden können. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die in diesem Beispiel aus GPS abgeleiteten ellipsoidischen Höhen weisen eine Genauigkeit von etwa 4mm auf und liegen damit am oberen Ende dessen, was mit akzeptablem wirtschaftlichem Aufwand realisierbar ist. Bedenkt man die Ausdehnung des Projektes von ca. 50km x 60km, so ist dies allerdings ein Genauigkeitsbereich, der mit dem von Nivellements über solche Distanzen durchaus konkurrieren kann (vgl. auch Görres und Campbell, 1998).

Unter Nutzung des Quasigeoidmodells EGG97 ist man bereits heute in der Lage, die sehr hohe Genauigkeit der ellipsoidischen GPS-Höhen weitestgehend in das Gebrauchshöhensystem zu überführen. Dies setzt jedoch eine Integrationsstrategie voraus, wie sie z. B. in diesem Bericht vorgestellt wurde.

Im Rahmen des Projektes konnten keine signifikanten Höhenänderungen in den sechs untersuchten Knotenpunkten festgestellt werden. Die Verbesserungen gegenüber den amtlichen Höhen betragen im Mittel 3.3mm und maximal 9.5mm. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Netzkonfiguration und das Beobachtungsdesign des Projektes es erst

ermöglichen, Höhenänderungen in der Größenordnung von 3cm statistisch fundiert nachzuweisen.

Die vorgestellte Analysestrategie ist ein geeignetes Verfahren zur Überprüfung der Nivellementknotenpunkte und ist äquivalent zur Kalmanfiltrung. Die von Görres und Campbell (1997, S. 230) getroffene Aussage: "Diese Höhengenaugigkeit kann vor allem zur Überwachung der Stabilität von Knotenpunkten in großen Nivellementsnetzen genutzt werden", wird durch die Untersuchungen im Rahmen des Projektes vollkommen bestätigt. Eine Diskussion, wie sich diese Ergebnisse letztendlich in die Praxis umsetzen lassen, ist unter den Projektpartner noch zu führen, insbesondere auch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte, die in dieser Studie ausgeklammert waren.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Untersuchungen im Rahmen des Kooperationsprojektes zeigen auf, dass man mit den aus GPS ermittelten ellipsoidischen Höhen in einen Genauigkeitsbereich von besser als 5mm vordringen kann. Insbesondere wurde deutlich, dass die Genauigkeit von GPS-Höhen weit weniger von der Projektausdehnung abhängig ist, als dies beispielsweise beim Nivellement der Fall ist. Aus diesem Grunde ist die Höhenbestimmung mit GPS für großräumige Projekte dem Nivellement überlegen. Mit Hilfe eines hochauflösenden Quasigeoidmodells, wie z. B. dem EGG97-Modell, ist eine Überführung der ellipsoidischen Höhen in Gebrauchshöhensysteme mit akzeptabler Genauigkeit bereits heute möglich, sofern auf eine geeignete stochastische und funktionale Modellbildung zurückgegriffen wird. Von entscheidender Bedeutung ist hierbei die stochastische Behandlungsweise des verwendeten Quasigeoidmodells. Darüber hinaus haben die Untersuchungen ergeben, dass großräumige Integrationen gegenüber lokalen hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit deutliche Vorteile aufweisen. Gerade für die Landesvermessungsämter ist die vorgestellte großräumige Integrationsstrategie nur mit geringem Aufwand verbunden, da die ausgewerteten GPS-Messungen in ihren C-Netzen in der Regel auf Datenträger vorliegen.

Es konnte gezeigt werden, dass sich GPS sowohl bei der Höhenbestimmung als auch bei der Höhenüberwachung sinnvoll einsetzen und mit bestehenden Verfahren auch kombinieren lässt. Insbesondere in der

Höhenüberwachung des Landeshöhensystems steckt ein großes Einsatzpotential von GPS, da sich hier der günstigere Fehlerhaushalt von GPS noch vorteilhafter auswirkt. Im Rahmen des Projektes mussten die GPS-Höhen zur Überprüfung der Knotenpunkte erst ins Zielhöhen-system überführt werden, da keine ellipsoidischen Höhen zum Vergleich vorlagen. Geht man jedoch dazu über, für die Nivellements-punkte bzw. deren Exzentren die ellipsoidischen Höhen ebenfalls vorzuhalten, könnten in Zukunft direkt deren Änderungen über die Jahre beobachtet und zur Überwachung der Höhenknoten herangezogen werden. Wenn darüber hinaus in absehbarer Zeit die geplante Umstellung des Höhenbezugssystems hin zum Normalhöhen-system vollzogen ist, sind die derzeitigen Modellinkonsistenzen zwischen ellipsoidischen Höhen, Höhenanomalien und NN-Höhen beseitigt. Durch diese Änderung sind noch bessere Ergebnisse zu erwarten, und es spricht eigentlich nichts mehr gegen eine effektive Nutzung von ellipsoidischen GPS-Höhen in der Landesvermessung.

Trotz all der genannten positiven Ergebnisse kann GPS das klassische Nivellement nicht vollständig ersetzen, da für eine erfolgreiche GPS-Höhenintegration eine ausreichend große und geeignet verteilte Anzahl von Höhen im Gebrauchshöhensystem unabdingbare Voraussetzung ist. Darüber hinaus ist GPS auf kurze Entfernungen von wenigen Kilometern eindeutig ungenauer als das klassische Nivellement.

Abschließend möchten wir uns beim Landesvermessungsamt und dem Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg für die ausgezeichnete Zusammenarbeit während des gesamten Projektes, die Bereitstellung der benötigten BWREF- und Nivellementsdaten sowie die umfangreiche personelle und technische Unterstützung bei den Feldarbeiten in beiden Projekten bedanken.

## **Literatur**

Denker, H (1998): Evaluation and Improvement of the EGG97 Quasi-geoid Model for Europe by GPS and Leveling Data. Proceedings: Second Continental Workshop on the Geoid in Europe, Editoren: Martin Vermeer und Jozsef Adam, Budapest, Ungarn, 10-14 März, 1998.

- Dinter G. (1997): Ein universelles Konzept zur Integration von GPS-Höhen in Gebrauchshöhensysteme. Erschienen in: 81. Deutscher Geodätentag 1997 in Karlsruhe, DVW Schriftenreihe 27/1997. <http://www.gik.uni-karlsruhe.de/~dinter/Forschung/Links.html>
- Dinter G., Illner M., Jäger R. und G. Schmitt (1997): Entwicklung und softwaremäßige Realisierung eines allgemeinen Modells zur Überführung von GPS-Höhen in Gebrauchshöhensysteme. Interner Bericht des Geodätischen Institutes der Universität Karlsruhe, 1997. <http://www.gik.uni-karlsruhe.de/~dinter/Forschung/Links.html>
- Görres, B. und J. Campbell (1998): Bestimmung vertikaler Punktbewegungen mit GPS, ZfV 7/1998, 123. Jahrgang / Heft 7: S. 222-230.
- Van Mierlo, J. und M. Illner (1998): Statistische Grundlagen und Modelle für die Weiterverarbeitung von GPS-Ergebnissen. Mitteilungen des DVW-Landesverein Baden-Württemberg, Heft 2, Oktober 1998, S. 84-108.
- Schmidt, J. (1998): Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten von GPS zur Höhenüberwachung von Nivellementsleifen 1. und 2. Ordnung in der Landesvermessung. Diplomarbeit am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe, 1998, unveröffentlicht. <http://www.gik.uni-karlsruhe.de/Diplom/d820.html>