



Die WM 101 GPS-Kampagne 1987 in Österreich

Norbert Höggerl ¹, Heribert Kahmen ², Johannes Schwarz ³, Günter Stangl ⁴, Hans Sünkel ⁵, Josef Zeger ⁶

¹ *Abteilung K 2 – Grundlagenvermessungen des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen, 1025 Wien, Schiffamtsgasse 1-3*

² *Technische Universität Wien, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

³ *Technische Universität Wien, Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Gußhausstraße 27-29, A-1040 Wien*

⁴ *Abteilung K 2 – Grundlagenvermessungen des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen, dzt. Akademie der Wissenschaften, Satellitenbeobachtungsstation Lustbühel, Graz*

⁵ *Technische Universität Graz, Abteilung für Mathematische und Datenverarbeitende Geodäsie, Rechbauerstraße 12, A-8010 Graz*

⁶ *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, 1025 Wien, Schiffamtsgasse 1-3*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **75** (4), S. 167–201

1987

Bib_T_EX:

```
@ARTICLE{Hoeggerl_VGI_198715,
  Title = {Die WM 101 GPS-Kampagne 1987 in {\\"O}sterreich},
  Author = {H{\\"o}ggerl, Norbert and Kahmen, Heribert and Schwarz, Johannes and
    Stangl, G{\\"u}nter and S{\\"u}nkel, Hans and Zeger, Josef},
  Journal = {\\"O}sterreichische Zeitschrift f{\\"u}r Vermessungswesen und
    Photogrammetrie},
  Pages = {167--201},
  Number = {4},
  Year = {1987},
  Volume = {75}
}
```



Die WM 101 GPS – Kampagne 1987 in Österreich*

mit Beiträgen von

H. Sünkel (Vorbemerkungen); *G. Stangl* (Konzeption und Durchführung der Kampagne); *H. Kahmen* und *J. Schwarz* (Beitrag der TU Wien zur WM-Kampagne 1987); *G. Stangl* (Die Auswertung mit PoPS); *J. Zeger* (Untersuchung der Ergebnisse der WM 101-Messungen im BEV) und *N. Höggerl* (Die Bestimmung von Gebrauchshöhen aus GPS-Messungen).

Vorbemerkungen

von *H. Sünkel*, Graz

Eine der wohl wichtigsten Aufgaben der Geodäsie besteht in der Bestimmung von absoluten oder relativen Positionen von wohldefinierten Punkten, die sich im allgemeinen auf der Erdoberfläche befinden, wobei meist die Kinematik des Punkthaufens vernachlässigt wird. Die Erfassung solcher geometrischer Relationen durch geodätische Messungen erfolgt naturgemäß im Erdschwerefeld. Daher sind alle Meßresultate von diesem Feld abhängig und enthalten daher Schwerefeldinformation.

Der Geometer – im übrigen eine sehr viel treffendere Standesbezeichnung als Geodät – benötigt ausschließlich geometrische Information zur Ableitung geometrischer Relationen. Für ihn stellt der Gehalt an Erdschwerefeldinformation lästiges Rauschen dar, das seine „geometrischen“ Ergebnisse bisweilen unangenehm verfälscht. Um bestmögliche Geometrie liefern zu können, stehen ihm zwei Möglichkeiten offen: entweder er kennt die Teilstruktur des Schwerefeldes in seinem Arbeitsbereich, sodaß er in der Lage ist, den Einfluß des Erdschwerefeldes auf seine Messungen herauszufiltern und diese so weitgehend auf ihren geometrischen Gehalt zu reduzieren, oder er erfindet Meßmethoden und/oder Meßmittel, welche bezüglich des Erdschwerefeldes weitgehend blind sind.

Da bis vor wenigen Jahren die Detailstruktur des Erdschwerefeldes flächenhaft über größere Gebiete nicht hinreichend bekannt war, stand dem Geometer bisher lediglich die letztere Möglichkeit offen. Und verfolgt man die instrumentelle Entwicklung während der letzten Jahrzehnte, so stellt man in der Tat fest, daß sie durch das Bestreben nach der möglichst weitgehenden Lösung vom Einfluß des Erdschwerefeldes gekennzeichnet sind:

- Mit EDM stand erstmals eine finanziell erschwingliche Meßmethode zur Verfügung, die schwerefeldunabhängige Ergebnisse hoher Genauigkeitsanforderung lieferte (keine Orientierung des Meßinstruments nach dem lokalen Schwerevektor), jedoch nach wie vor topographiebedingte Netzstruktur mit Abhängigkeit von den Sichtbarkeitsbedingungen.
- SLR löst sich zwar weitgehend vom Nachteil der topographiebedingten Netzstruktur, ist aber wegen des enormen technischen Aufwands und der damit verbundenen Kosten auch in Zukunft nur wenigen Geostationen zur räumlichen geometrischen Verknüpfung vorbehalten.
- VLBI als Extremfall erdschwerefeldfreier Messung höchster Genauigkeit über interkontinentale Distanzen kommt aus ähnlichen Gründen wie bei SLR als Kandidat für die tägliche Praxis der schnellen Positionierung ebensowenig in Betracht.
- GPS als geniale Kompromißlösung, das mittlerweile höchst erfolgreich den Siegeszug der Positionierung angetreten hat, vereint die Vorteile praktisch erdschwerefeldunabhängiger Messung bei nur geringfügiger Topographieabhängigkeit mit derzeit bereits vertretbarem finanziellen und geringem personellen Aufwand.

* Ein Gemeinschaftsprojekt des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen (BEV), der Technischen Universitäten Graz und Wien, durchgeführt mit Unterstützung der Firmen Wild (Heerbrugg) und Rost (Wien).

GPS als Geometrie-Lieferant ist eben im Begriffe, den lange geträumten Wunschraum des Geometers nach exakter Positionsbestimmung auf Knopfdruck weitgehend nahezukommen; ein totaler Rückzug der Vermessungsmethoden klassischer Art erscheint aber in absehbarer Zukunft dennoch nicht praktikabel. Die konsistente Verknüpfung von geometrischen GPS-Daten mit „erdschwerefeldverschmutzten“ klassisch-geodätischen Messungen ist daher wieder nur über die Hürde der Erdschwerefeldfilterung möglich.

GPS als Geometrie-Lieferant dient aber auch als vorzügliches unabhängiges Kontrollinstrument für die Qualität der Geoidbestimmung, zumal die Summe von orthometrischer Höhe und Geoidhöhe die aus GPS abgeleitete geometrische (ellipsoidische) Höhe ergeben müßte.

Eine sehr wesentliche Rolle spielt GPS derzeit in Verbindung mit orthometrischen Höhen als Lieferant von Geoidhöhen sehr hoher Genauigkeit.

In durchaus absehbarer Zeit jedoch wird GPS in Verbindung mit hochpräziser Geoidbestimmung aber auch imstande sein, das aufwendige Nivellement weitgehend zu ersetzen und gegebenenfalls großräumig zu verdrängen.

Die ÖKIE (Österr. Kommission für die Internationale Erdmessung) hat der enormen Bedeutung dieses „geodätischen Quantensprungs“ schon vor drei Jahren durch Einsetzung einer GPS-Kommission Rechnung getragen. Der Kommission obliegt die Aufgabe, Testkampagnen mit diversen GPS-Empfängern österreichweit zu koordinieren sowie allgemeine Richtlinien für den künftigen praktischen Einsatz im öffentlichen und privaten Sektor zu erarbeiten.

In den folgenden Beiträgen wird im Detail über die

WM 101 GPS – Kampagne

und ihre Ergebnisse berichtet, welche in der Zeit vom 1. bis 6. Juni 1987 vorwiegend im Raum Steiermark/Kärnten stattgefunden hat. Die Kampagne wurde von Dr. Erker (BEV) und dem Autor dieses Beitrages organisiert und von den Firmen Wild, Heerbrugg und Rost, Wien großzügig finanziell unterstützt, wofür herzlich Dank gesagt sei.

Konzeption und Durchführung der Kampagne

Von G. Stangl, Graz

Messungen mit GPS-Empfängern werden in Österreich seit 1985 durchgeführt. Im Juni 1987 wurde der dritte Empfängertyp (nach Macrometer V-1000 und TI 4100) für die Zwecke der Landesvermessung und der Ingenieurgeodäsie getestet.

Der GPS-Empfänger Wild Magnavox 101 (WM 101) verwendet die Phasen der Frequenz L1 (1575 MHz) und den aufmodulierten C/A-Code. Mit Blickrichtung auf Verwendungsmöglichkeiten in naher Zukunft wurden von der TU Graz und dem BEV Testnetze ausgewählt, die in Ausdehnung und Verwendungszweck sehr unterschiedlich waren. Die Planung war auf den Einsatz von 5 Empfängern in 6 Tagen ausgerichtet. Folgende Einteilung wurde getroffen:

Tag 1: Beobachtung des Macrometer-Testnetzes Graz (Abb. S. 169)

Beobachtung der Basis der TU Graz

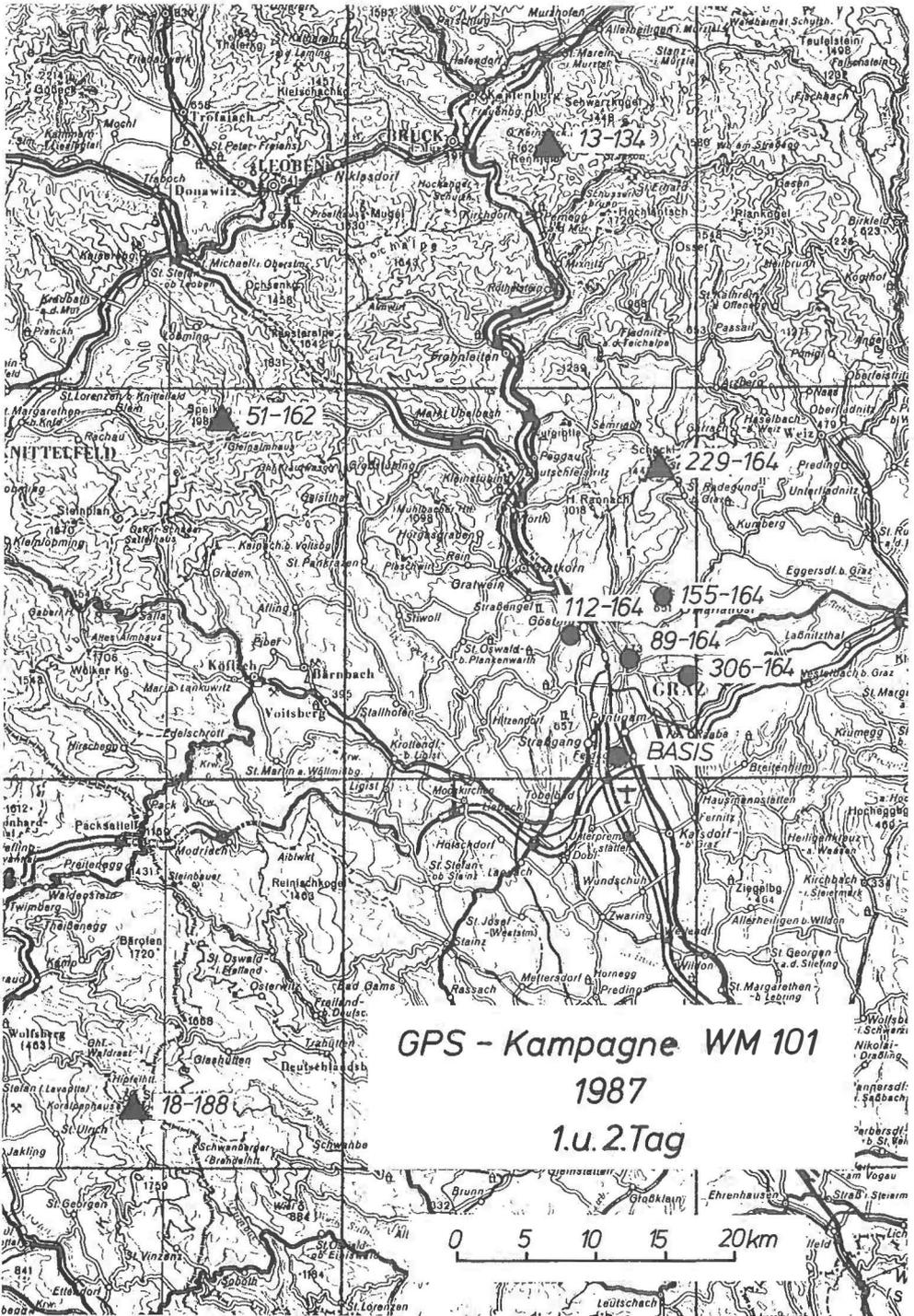
Tag 2: Beobachtung des Macrometer-Testnetzes Steiermark (Abb. S. 169)

Tag 3: Beobachtung von Punkten mit orthometrischer Höhe in Kärnten (Abb. S. 170)

Tag 4: Überprüfung eines Triangulationsnetzes in Kärnten (Abb. S. 170)

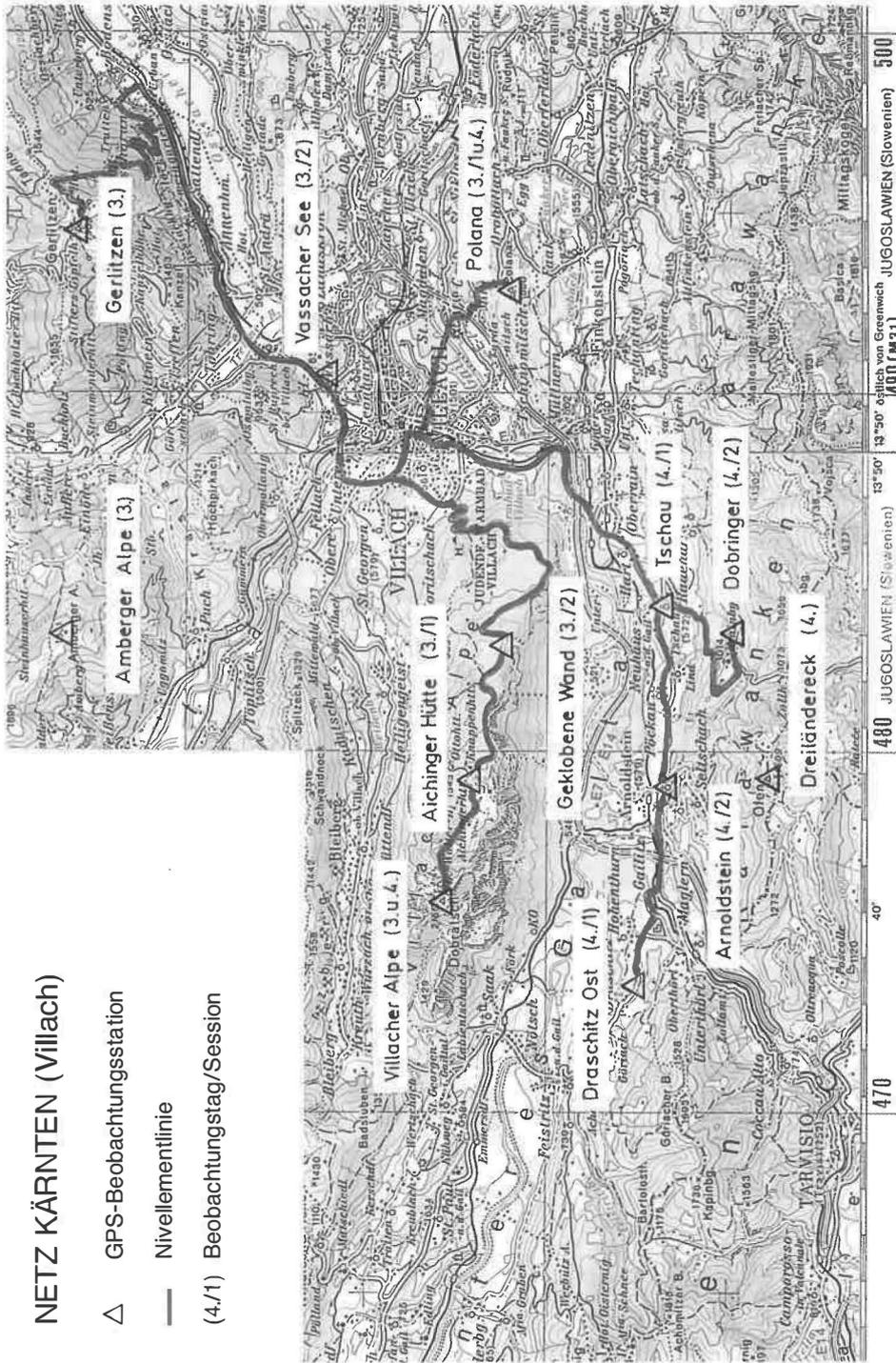
Tag 5: Beobachtung von Punkten des Netzes der Bleiberger Bergwerksunion

Beobachtung von Punkten des Überwachungsnetzes Kölnbreinsperre (Maltatal) der Österreichischen Draukraftwerke



NETZ KÄRNTEN (Villach)

- △ GPS-Beobachtungsstation
- Nivellementlinie
- (4./1) Beobachtungstag/Session



Hergestellt im Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (Landaufnahme) in Wien

Tag 6: Beobachtung einer langen (434 km) Basislinie Graz—Bregenz und eines Zwischenpunktes (Universität Innsbruck)

Von der Firma Wild wurden vier Empfänger zur Verfügung gestellt, ein Empfänger wurde von der Abteilung Ingenieurgeodäsie des Instituts für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie der TU Wien (Univ.-Prof. H. Kahmen) beigesteuert.

Teilnehmer:

- Firma Wild Heerbrugg
- Firma Rost Wien
- Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
- Institut für Angewandte Geodäsie, Abteilung Landesvermessung
- Institut für Theoretische Geodäsie, Abteilung mathematische und datenverarbeitende Geodäsie, TU Graz
- Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Abteilung Ingenieurgeodäsie, TU Wien
- Ingenieurkammer für Steiermark und Kärnten
- Institut für Weltraumforschung, Abteilung Satellitengeodäsie, Akademie der Wissenschaften
- Institut für Geodäsie, Universität Innsbruck
- Bleiberger Bergwerksunion
- Österreichische Draukraftwerke AG

Die Beobachtung erfolgte vom 1. bis 6. Juni 1987. Das Beobachtungsfenster von ca. 13 h bis 17 h MESZ (= 11 h bis 15 h UT) lag sehr günstig für die Durchführung der Kampagne. Eine Liste der beobachteten Punkte enthält Tabelle 1:

1	306—164	Lustbühel Doppler Stahlbolzen B 1			
2		Basis Pfeiler 1	15	14—201	Gerlitzten
3		Basis Pfeiler 5	16	46—201	Polana
4		Basis Pfeiler 7	17	182—201	Vassacher See
5	112—164	Plabutsch	18	223—200	Aichingerhütte
6	89—164	Schloßberg	19	219—200	Geklobene Wand
7	155—164	Platte	20	21—200	Draschitz Ost
8	110—164	Fuchsriegel	21	78—200	Arnoldstein Pfarrkirche
9	18—188	Koralpe (1. Ordnung)	22	74—200	Tschau
10	51—162	Gleinalpe (1. Ordnung)	23	8—200	Dreiländereck
11	229—164	Schöckel West (Nebenpunkt zu Punkt 1. Ordnung)	24		Lichtmeßstollen
			25	360—200	Maxhalde
12	13—134	Rennfeld (1. Ordnung)	26		Hubschrauber-Landeplatz
13	27—200	Villacher Alpe (1. Ordnung)	27	39—82	Moos
14	102—200	Amberger Alpe			

Tabelle 1: Punktbezeichnungen

Die Koordinaten der Punkte sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Nicht alle Punkte waren mit dem Auto erreichbar. Durch das relativ geringe Gewicht der einzelnen Bestandteile der Ausrüstung kann die Last bei längeren Märschen auf mehrere Personen (z. B. 3 für den Punkt Gleinalpe) verteilt werden. Die Beobachtung selbst kann von einer Person nach kurzer Einschulung durchgeführt werden. Eine Überwachung während der Messung ist nicht unbedingt notwendig. Die Aufgabe des Beobachters kann soweit eingeschränkt werden, daß dieser nur mehr Start -und Stop-Taste zu drücken braucht.

Bei dieser Kampagne wurde jedoch nicht so rigoros vorgegangen, unter anderem deshalb, da innerhalb einer Meßperiode mehrere Punkte nacheinander beobachtet wurden (oft 2, manchmal 3 Sessionen). Außerdem war die Beobachtung des Empfängerverhaltens ja eine Aufgabe der Testkampagne.

Trotz gelegentlicher Störungen konnte jeder Punkt gemessen werden, wobei die Beobachtungszeit zwischen 45 Minuten und 4 Stunden schwankte.

Punkt	Gebrauchskoord.			Gebrauchshöhe	Geoidhöhe	Gebrauchskoord. (e.l.)			H _{ell}	Gebrauchskordinaten (3D)		
	M	Y	X			B	L			X	Y	Z
Z												
1	34	- 63 711.166	5 214 564.325	491.26	+ 0.62	47 04 03.0805	15 29 40.1444	491.880	4 193 833.132	1 162 618.114	4 646 770.709	
	G	- 63 710.228	5 214 567.689	493.214		47 04 03.1897	15 29 40.1871	493.834	4 193 831.793	1 162 618.679	4 646 774.437	
2	Z											
	G	- 68 791.122	5 207 787.441	342.471	+ 0.766	47 00 21.7979	15 25 43.0989	343.237	4 199 889.024	1 159 101.041	4 642 004.975	
3	Z											
	G	- 68 951.506	5 207 980.170	338.617	+ 0.766	47 00 28.2028	15 26 03.8061	340.383	4 199 631.325	1 159 483.630	4 642 137.754	
4	Z											
	G	- 67 802.029	5 208 221.038	339.020	+ 0.766	47 00 36.2061	15 26 29.6887	339.786	4 199 311.163	1 159 962.363	4 642 305.832	
5	Z											
	G	- 71 904.777	5 217 009.990	751.11	+ 0.70	47 05 19.2472	15 23 10.4226	751.810	4 194 532.331	1 154 282.086	4 648 562.825	
	G	- 71 875.16	5 217 222.220	752.69		47 05 26.1311	15 23 11.7047	753.39	4 194 376.073	1 154 267.130	4 648 708.721	
	Z											
	G	- 67 949.976	5 215 709.348	471.82	+ 0.65	47 04 38.6381	15 26 18.6321	472.470	4 194 179.242	1 158 302.812	4 647 504.328	
	G	- 67 938.644	5 215 652.135	473.610		47 04 36.7896	15 26 19.2003	474.260	4 194 217.516	1 158 325.817	4 647 466.766	
	Z											
	G	- 65 487.012	5 219 660.065	650.02	+ 0.75	47 06 47.4658	15 28 13.3161	650.770	4 190 843.103	1 159 889.700	4 650 343.265	
	Z											
	G	- 65 478.353	5 219 574.115	644.455		47 06 44.6857	15 28 13.7718	645.205	4 190 897.516	1 159 914.728	4 650 280.759	
	Z											
	G	- 63 480.150	5 216 798.060	499.410	+ 0.68	47 05 15.5230	15 29 49.4872	500.090	4 192 207.282	1 162 371.876	4 648 300.158	
	Z											
	G	-103 871.54	5 183 977.91	2140.84	+ 1.27	46 47 14.4372	14 58 22.1664	2142.110	4 227 315.507	1 130 557.032	4 626 702.939	
	Z											
	G	-104 504.068	5 184 478.941	2079.053		46 47 30.3040	14 57 51.9383	2080.323	4 227 095.203	1 129 834.349	4 626 993.448	
	Z											
	G	- 97 199.500	5 232 824.360	1988.00	+ 1.40	47 13 39.6117	15 02 58.9491	1989.400	4 191 109.658	1 126 902.493	4 659 978.402	
	Z											
	G	- 65 663.63	5 229 155.320	1444.84	+ 1.09	47 11 54.8746	15 27 59.9474	1445.930	4 184 730.585	1 157 905.957	4 657 382.109	
	Z											
	G	- 66 135.312	5 223 137.378	1437.170		47 11 54.1233	15 27 37.5425	1438.260	4 184 867.717	1 157 454.545	4 657 360.718	
	Z											
	G	- 73 994.198	5 253 192.326	1628.79	+ 1.15	47 24 17.6675	15 21 39.0163	1629.94	4 170 719.116	1 145 741.013	4 673 079.489	
	Z											
	G	+ 25 871.200	5 162 766.55	2166.24	+ 0.46	46 36 14.7635	13 40 15.7754	2166.700	4 266 332.283	1 037 736.077	4 612 746.343	
	Z											
	G	+ 25 916.713	5 162 729.998	2163.254		46 36 13.5733	13 40 17.9048	2163.714	4 266 345.519	1 037 785.991	4 612 718.919	
	Z											
	G	+ 33 275.060	5 173 274.050	1831.86	+ 0.84	46 41 53.8987	13 46 06.4231	1832.700	4 256 941.408	1 043 119.988	4 619 693.376	

Punkt	Gebruuchskoord.			Gebruuchs- höhe	Geoid- höhe	Gebruuchskoord. (ell)		H _{ell}	Gebruuchskoordinaten (3D)		
	N	y	x			B	L		X	Y	Z
15 Z	31	+ 44 491.56	5 172 997.93	1908.92	+ 0.81	46 41 42.6101	13 54 54.3193	1909.730	4 254 555.354	1 054 085.128	4 619 510.312
G		+ 44 472.430	5 172 956.690	1906.360		46 41 41.2791	13 54 53.4046	1907.170	4 254 587.362	1 054 073.030	4 619 480.293
Z		+ 42 803.63	5 160 988.23	660.29		46 35 14.3756	13 53 30.8649	660.38	4 262 610.905	1 054 250.600	4 610 370.517
16 G1	31	+ 42 796.814	5 160 999.595	684.521	+ 0.09	46 35 14.4214	13 53 30.5451	684.611	4 262 627.708	1 054 247.744	4 610 389.090
G2		+ 42 796.883	5 160 999.607	684.665		46 35 14.4218	13 53 30.5484	684.755	4 262 627.779	1 054 247.633	4 610 389.203
Z		+ 40 146.67	5 166 087.58	531.06	+ 0.28	46 37 59.7953	13 51 27.6395	531.340	4 259 550.078	1 050 793.608	4 613 785.614
17 G	31	+ 40 136.366	5 166 139.518	532.567		46 38 01.4796	13 51 27.1713	532.847	4 259 516.760	1 050 775.131	4 613 822.422
Z		+ 29 098.01	5 161 909.96	1714.64	+ 0.43	46 35 46.5449	13 42 47.2148	1715.07	4 265 882.931	1 040 844.726	4 611 819.392
G		+ 29 163.331	5 162 063.489	1678.274		46 35 51.5072	13 42 50.3188	1678.704	4 265 734.821	1 040 976.600	4 611 898.274
Z		+ 34 466.12	5 160 204.09	1042.56	+ 0.28	46 34 50.3815	13 46 58.9794	1042.840	4 265 384.182	1 046 340.954	4 610 139.102
19 G	31	+ 34 447.681	5 160 350.606	1018.856		46 34 55.1302	13 46 58.1525	1019.136	4 265 269.108	1 046 294.597	4 610 222.674
Z		+ 23 694.59	5 157 484.610	657.76	+ 0.35	46 33 23.9806	13 38 32.5165	658.11	4 269 566.299	1 036 259.172	4 608 025.513
20 G	31	+ 23 700.419	5 157 478.387	657.620		46 33 23.7783	13 38 32.7890	657.97	4 269 569.243	1 036 265.860	4 608 021.117
Z		+ 28 991.03	5 156 611.70	578.61	+ 0.31	46 32 54.9619	13 42 40.9954	578.92	4 268 893.945	1 041 543.080	4 607 351.827
21 G	31	+ 29 032.212	5 156 556.206	581.812		46 32 53.1882	13 42 42.9161	582.122	4 268 925.665	1 041.592.939	4 607 315.848
Z		+ 34 153.56	5 156 671.65	564.33	+ 0.27	46 32 56.0313	13 46 43.3614	564.60	4 267 634.314	1 046 550.356	4 607 364.141
22 G	31	+ 34 132.258	5 156 664.633	565.427		46 32 55.9079	13 46 42.3595	565.697	4 267 644.993	1 046 531.000	4 607 360.194
Z		+ 29 286.39	5 153 809.46	1509.55	+ 0.33	46 31 24.1597	13 42 53.2862	1509.88	4 271 431.130	1 042 431.795	4 606 098.681
23 G	31	+ 29 284.980	5 153 816.490	1506.950		46 31 24.3844	13 42 54.1601	1507.280	4 271 420.082	1 042 448.273	4 606 101.571
Z		+ 22 729.365	5 165 890.546	962.432	+ 0.57	46 37 56.3827	13 37 48.6841	963.002	4 264 051.738	1 033 961.280	4 614 026.423
24 G	31										
Z		+ 22 972.784	5 165 493.312	879.73	+ 0.56	46 37 43.4573	13 38 00.0569	880.29	4 264 220.841	1 034 251.228	4 613 692.847
G											
Z		+ 24 151.498	5 165 482.456	953.784	+ 0.56	46 37 42.3089	13 38 55.4670	954.344	4 264 017.319	1 035 414.797	4 613 722.325
26 G	31										
Z		- 41 205.17	5 264 247.90	1012.44	-1.30	47 30 58.4214	9 47 10.3221	1011.14	4 252 898.472	733 548.315	4 680 987.949
27 Z	28										
G		- 41 314.610	5 264 210.740	1042.700		47 30 57.1931	9 47 05.1034	1041.40	4 252 964.739	733 448.941	4 680 984.643

Tabelle 2: Koordinaten der GPS-Standpunkte G und der zugehörigen Zentren

Beitrag der TU Wien zur WM-Kampagne 1987

Von H. Kahmen und J. Schwarz, Wien

1. Das Berner Paket

Das astronomische Institut der Universität Bern ist seit 1982 maßgeblich an der wissenschaftlichen Erforschung zur geodätischen Nutzung des Global Positioning System beteiligt (*Bauersima 1983*).

Seit dieser Zeit arbeitet das Institut an der Entwicklung einer Experimentier-Auswertesoftware, die sowohl die Bestimmung aller Modellparameter als auch die Analyse sämtlicher Beobachtungsdaten erlaubt (*Gurtner u.a. 1985*).

Das System gliedert sich in folgende Programmteile:

1.1. Datenformatierung

Die in komprimierten Binär- oder Hexcodeformaten vorliegenden Rohdaten werden von speziellen Transferprogrammen decodiert und in ein für alle Empfängertypen einheitliches ASCII-Datenformat gebracht („Berner Format“). Solche Spezialprogramme existieren für die Verarbeitung sämtlicher Meßdaten aller gängigen Receiver Typen wie WM 101, Texas TI 4100, Macrometer, Sercel etc.

Folgende Datenfiles werden, je nach Empfängerspezifikation, erstellt: Pseudorange Files, Phasen Files, Broadcast-Ephemeris Files

1.2. Orbitberechnung

Die Bahnen der GPS-Satelliten werden unter Vorgabe eines frei wählbaren Kräftemodells berechnet („Standard Orbits“).

Verschiedene Orbit-Informationen können dazu herangezogen werden:

- Macrometer T-Files
- Kepler Elemente zu verschiedenen Epochen
- Broadcast-Ephemeris der GPS-Satelliten
- Precise Ephemeris

Die errechneten Bahnen sind streng physikalische Lösungen der Bewegungsgleichungen der Satelliten (*Beutler u. a. 1985*).

1.3. Preprocessing

Dieser Programmteil bereitet die Beobachtungsdaten für die anschließende Parameterberechnung auf.

Aus beobachteten Pseudoranges (WM 101, Texas TI 4100) kann mit Hilfe einer Einzelpunktbestimmung der Stand der Empfängeruhren mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden.

Die simultan zu allen sichtbaren Satelliten von mehreren Stationen aus beobachteten Phasenwinkel werden zu sogenannten „Single-differences“ verarbeitet, d. h. es wird die Differenz zwischen den simultanen Phasenbeobachtungen von zwei Stationen aus zu jeweils einem Satelliten gebildet.

Die in den Phasenmessungen mitunter enthaltenen fehlerhaften Phasensprünge um ein Vielfaches der Trägerwellenlänge (sogenannte „cycle slips“) müssen vorweg eliminiert werden. Dies geschieht mit einem interaktiven Teilprogramm. Solcherart bereinigte Datensätze weisen eine innere Genauigkeit von wenigen Millimetern auf.

Falls Phasenbeobachtungen auf beiden Frequenzen vorliegen (z. B. Texas TI 4100) kann eine Linearkombination der beiden Single-difference Files gebildet werden, die den genauigkeitsmindernden Einfluß der Ionosphäre weitestgehend eliminiert.

1.4. Parameterberechnung

Als Beobachtungsgleichungen werden die sogenannten „Double-differences“ verwendet, d. h. die Differenzen zweier Single-differences zu zwei simultan beobachteten Satelliten.

Dadurch werden neben Fehlern in den Satellitenbahnen und der Satellitenuhren auch noch die Gangungenauigkeiten der Empfängeruhren weitestgehend eliminiert. Die durch die Differenzbildung entstehenden Korrelationen werden im Ausgleichsalgorithmus berücksichtigt.

Folgende Parameter können mit Hilfe des Programms bestimmt bzw. verbessert werden:

- Stationskoordinaten
- Ambiguities
- Bahnelemente der GPS-Satelliten
- Uhrenfehler
- atmosphärische Laufzeitverzögerung

Verschiedene atmosphärische Modelle ermöglichen Untersuchungen über den Einfluß der Troposphäre auf die erreichbaren Genauigkeiten.

Eine 7-Parameter-Helmerttransformation kann die errechneten GPS-Koordinaten mit anderen Koordinatensystemen vergleichen und die verbleibenden Restklaffungen ermitteln.

Das astronomische Institut der Universität Bern konnte mit Hilfe dieser Software wiederholt die hohe Qualität der Phasenvergleichsmessungen zu den GPS-Satelliten unter Beweis stellen. Bei Vergleichsmessungen in hochpräzisen lokalen Netzen wie CERN (*Gervaise u.a. 1985*) oder Turtmann (*Rothacher u. a. 1986*) konnte eine Übereinstimmung der terrestrischen Koordinaten mit GPS von wenigen Millimetern erzielt werden.

1.5. Installation des Berner Pakets in Wien

Der Source-Code des in Fortran 77 geschriebenen Softwarepaketes umfaßt etwa 1,5 Mbyte. Das Programm wurde an der Technischen Universität Wien an einem NAS AS/9160 Großrechner unter dem Betriebssystem CMS des Interuniversitären EDV-Zentrums Wien installiert. Die Schnelligkeit dieses Rechners erlaubt die Programmausführung im Time-Sharing-Betrieb, da selbst die Auswertung von mittleren Netzen bis zu 15 Punkten weniger als 30 CPU-Sekunden bedarf. Dem Institut steht ein Plattenplatz von 20 Mbyte zur Verfügung, der Netzausgleiche bis zu 100 Punkten ermöglicht.

2. Die Auswertung der Kampagne mit dem Berner Paket

2.1. Testnetz Steiermark

Die Daten der Messungen in der Steiermark wurden tageweise getrennt ausgewertet, da am ersten Tag (1. Juni 1987) die besetzten Stationen ein kleinräumiges, lokales Netz mit nur geringen Punktabständen zwischen 500 m und 12 km bildeten und am zweiten Tag (2. Juni 1987) ein großräumiges Netz mit Distanzen bis zu 75 km vorlag.

Aus den acht besetzten Stationen des ersten Tages (Lustbühel, Schloßberg, Plabutsch, Platte, Fuchsriegel sowie die Pfeiler 1, 5 und 7 der Eichbasis der TU Graz in Feldkirch) wurden sieben linear unabhängige Basisvektoren vom Punkt Lustbühel aus gebildet.

Die Phasenmessungen waren von unterschiedlicher Qualität, vor allem die Daten der Pfeilerpunkte 5 und 7 waren stark verrauscht. Das Preprocessing dieser Vektoren mußte somit sehr sorgfältig durchgeführt werden, um die zahlreichen cycle- und half cycle slips zu eliminieren. Für die Auswertung des ersten Tages wurden insgesamt 1712 Beobachtungen herangezogen. Die Standardabweichung einer beobachteten Single-difference betrug lediglich 6,8 mm, was die hohe Genauigkeit des Meßmittels beweist. Alle Ambiguities konnten sinnvoll gelöst werden. Die ausgewiesenen mittleren Fehler der Koordinaten betragen maximal 6 mm, im Schnitt 2,5 mm.

Am 2. Juni konnten 2283 Beobachtungen von den Stationen Lustbühel, Schöckl, Rennfeld, Gleinalpe und Koralpe verarbeitet werden. Es wurden wieder von der Station Lustbühel aus die einzelnen Raumvektoren gebildet. Wie am ersten Tag wurde auch hier die Station Lustbühel bei der Ausgleichung festgehalten, um einen eindeutigen Bezug zwischen erstem und zweitem Tag herstellen zu können.

Die errechnete Standardabweichung einer Single-difference lag bei 1,5 cm. Der doppelt so große Wert gegenüber dem Vortrag erklärt sich aus den weit größeren Distanzen zwischen den einzelnen Stationen, da hier der genauigkeitsmindernde Einfluß der Ionosphäre bei Einfrequenzbeobachtungen bereits wesentlich stärker zum Tragen kommt. Deshalb konnten auch nur 12 der 19 Ambiguities gelöst werden. Als Folge liegen auch etwas höhere mittlere Fehler in den Koordinaten vor (maximal 9 mm, im Schnitt 3,4 mm).

Koordinatenverzeichnis Testnetz Steiermark

	X	Y	Z
Schloßberg	4194801.612	1158420.803	4647937.615
Plabutsch	4194960.289	1154362.072	4649179.571
Platte	4191481.601	1160009.596	4650751.696
Fuchsriegel	4192791.312	1162466.775	4648771.143
Lustbühel	4194415.793	1162713.679	4647245.437
Pfeiler 1	4200472.765	1159196.165	4642475.361
Pfeiler 5	4200215.048	1159578.747	4642608.134
Pfeiler 7	4199894.884	1160057.484	4642776.253
Gleinalpe	4191694.720	1126997.333	4660448.478
Schöckl	4185451.791	1157549.209	4657831.715
Rennfeld	4171303.715	1145835.034	4673550.317
Koralpe	4227679.948	1129930.733	4627463.299

Vergleich der GPS-Lösung mit dem österreichischen Gebrauchsnetz

Für alle beobachteten Stationen liegen Koordinaten des österreichischen Gebrauchsnetzes vor. Ebenso existieren von diesen Punkten Gebrauchshöhen, die mit Hilfe der österreichischen Geoidkarte auf ellipsoidische Höhen umgerechnet wurden. Nach einer 7-Parameter-Helmerttransformation der GPS-Lösung auf die terrestrisch, konventionell bestimmten Koordinaten kann ein sinnvoller Vergleich zwischen den beiden Koordinatensystemen angestellt werden. Durch die Transformation werden unterschiedliche Orientierung und verschiedene Maßstäbe in den beiden Netzen eliminiert und die verbleibenden Restklaffungen erlauben eine Aussage über die Qualität der Messungen.

Transformation Grazer Netz

Die Restklaffungen dieses kleinräumigen Netzes weisen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen GPS-Lösung und Gebrauchsnetz auf. Vor allem in der Lage treten kleine Klaffungen auf (maximal 5 cm). Die Differenzen in der Höhenkomponente fallen mit bis zu 16 cm etwas höher aus. Insgesamt gesehen beweist aber der mittlere Fehler der Transformation von nur 6,1 cm die hohe Nachbargenauigkeit des österreichischen Gebrauchsnetzes.

Restklaffungen Graz (cm)

	x	y	h
Schloßberg	1.7	0.1	1.4
Plabutsch	-4.4	2.5	- 5.7
Platte	1.9	1.0	16.1
Fuchsriegel	0.1	-5.0	0.1
Lustbühel	-3.6	-1.4	-14.3
Pfeiler 1	1.7	0.1	1.4
Pfeiler 5	2.2	0.1	4.6
Pfeiler 7	1.3	0.9	3.4

Transformation Testnetz Steiermark

Die Restklaffungen dieses großräumigen Netzes liegen erwartungsgemäß bei weit höheren Werten als im lokalen Grazer Netz (Standardabweichung der Transformation 10,1 cm). Die Ursachen dafür könnten einerseits in den Spannungen des Gebrauchsnetzes liegen, andererseits sind sicherlich auch die GPS-Ergebnisse durch den Einfluß der Ionosphäre verfälscht.

Restklaffungen Steiermark (cm)

	x	y	h
Lustbühel	-4,6	-4,9	-1,9
Gleinalpe	2,8	8,6	1,9
Schöckl	-3,4	2,4	3,1
Koralpe	6,3	-4,5	-0,7
Rennfeld	-1,1	8,4	-2,3

2.2. Testnetz Kärnten

Für die Auswertung der zwölf Stationen im Raum Südkärnten wurde der Punkt Dobratsch als Referenzpunkt zur Bildung der Raumvektoren herangezogen. Leider wurde hier erst am zweiten Tag ein leichter zugänglicher Exzenter gewählt, sodaß der geometrische Bezug nur durch terrestrische konventionelle Einmessung gegeben ist.

Die Beobachtungsdaten an beiden Tagen (3 und 4. Juni 1987) waren von gleich guter Qualität und verursachten keinerlei Probleme bei der Auswertung. Die Normalgleichungsmatrix wurde aus 4134 Beobachtungsgleichungen mit 95 Unbekannten gebildet (36 Koordinatenparameter, 59 Ambiguities). Der mittlere Fehler einer Single-difference-Beobachtung betrug 6,6 mm. 50 der 59 Ambiguities konnten sinnvoll gelöst werden. Die Standardabweichung der Koordinaten betrug maximal 9 mm, im Schnitt 3 mm.

Koordinatenverzeichnis Testnetz Kärnten

	x	y	h
Dobratsch	4266924.283	1037822.077	4613200.343
Amberger Alpe	4257533.278	1043205.456	4620147.540
Gerlitz	4255178.954	1054158.333	4619934.729
Vassach	4260108.533	1050860.695	4614276.799
Draschitz	4270161.080	1036352.030	4608474.993
Geklobene Wand	4265860.889	1046380.531	4610677.005
Aichinger Hütte	4266326.781	1041062.656	4612352.480
Tschau	4268236.545	1046617.106	4607814.372
Arnoldstein	4269517.358	1041679.112	4607769.859
Dreiländereck	4272011.664	1042534.528	4606555.508
Polana 1. Tag	4263219.539	1054333.443	4610843.560
Polana 2. Tag	4263219.345	1054333.530	4610843.576
Dobringer	4270018.146	1045970.631	4606925.042

Transformation der GPS-Koordinaten auf das Gebrauchsnetz

Elf der zwölf beobachteten Stationen sind Punkte des österreichischen Gebrauchsnetzes. Die bei der 7-Parameter-Helmerttransformation erzielten Restklaffungen beweisen eindeutig die hohe Qualität der Gebrauchskoordinaten, die gute Nachbargenauigkeit in kleinen bis mittleren Netzteilen und die genaue Kenntnis des österreichischen Geoids.

Auffallend ist hierder signifikante Netzmaßstab von 11 ppm der GPS-Lösung gegenüber dem terrestrischen Netz.

Restklaffungen Kärnten (cm)

	x	y	h
Dobratsch	2.0	0.8	- 8.6
Amberger Alpe	-11.1	- 0.4	7.4
Gerlitz	-12.9	1.1	10.7
Vassach	3.3	- 8.7	- 3.4
Draschitz	0.6	- 1.6	5.7
Geklobene Wand	- 1.9	- 0.6	-13.5
Aichinger Hütte	-12.7	12.0	- 8.8
Tschau	- 1.5	7.3	8.0
Arnoldstein	2.2	4.4	7.4
Dreiländereck	4.2	5.4	16.1
Polana 1. Tag	18.7	-13.3	-18.6
Polana 2. Tag	6.7	- 7.1	6.1

2.3. Deformationsnetz Kölnbreinsperre

Auswertung

Am 5. Juni wurden im Maltatal fünf Vektoren des Deformationsnetzes der Kölnbreinsperre beobachtet. Da leider keiner der drei Empfänger die ganze Zeit über stationär eingesetzt war, konnte keine geschlossene Netzberechnung durchgeführt werden. Die Auswertung erfaßte 744 Beobachtungen, die Standardabweichung einer Single-difference lag bei 5,1 mm. Alle Ambiguities konnten gelöst werden; die mittleren Fehler der Koordinatenkomponenten liegen bei maximal 7 mm, im Schnitt bei 3,2 mm.

Vergleich mit den terrestrischen Werten

Die in diesem terrestrischen Präzisionsnetz mit Mekometermessungen sehr genau bestimmten Schrägdistanzen zeigen deutlich die hohe Qualität der GPS-Beobachtungen auf. Die maximalen Abweichungen der GPS-Lösung zur terrestrischen Lösung liegen bei 5 mm, im Schnitt bei 2,4 mm. Eine weitere Untersuchung der erzielten Ergebnisse ist leider nicht möglich, da nur die einzelnen Raumvektoren verglichen werden können.

Distanzen	terr.	GPS	σ_{GPS}	Differenz
MK1 - EP13	945.704	945.704	± 2 mm	0 mm
MK1 - EP12	1409.249	1409.254	± 1 mm	-5 mm
EP7 - EP107	1285.444	1285.442	± 2 mm	2 mm
EP7 - EP103	1276.712	1276.715	± 3 mm	-3 mm
EP7 - EP11	615.756	615.758	± 3 mm	-2 mm

2.4. Bleiberg

Auswertung

Im Raum Bleiberg wurden mit zwei Empfängern am selben Tag (5. Juni) vier Punkte eingemessen. Als Referenzpunkt diente die Station Dobratsch. Die 512 Beobachtungen weisen eine Genauigkeit von 8,2 mm auf (Standardabweichung einer Single-difference). Wie im Maltatal konnten auch hier aufgrund der relativ kurzen Distanz alle Ambiguities gelöst werden. Die Ungenauigkeiten der Koordinatenkomponenten liegen im Maximalfall bei 7 mm, im Schnitt bei 4,1 mm.

Vergleich zur terrestrischen Lösung

Ein Vergleich der Schrägstrecken zeigt vor allem im Punkt Dobratsch große Abweichungen zur terrestrischen Lösung. Der Fehler der Transformation fällt mit 7 cm ebenfalls ziemlich

hoch aus. Eine gerechte Beurteilung der erzielten Ergebnisse würde eine genaue Analyse der terrestrischen Beobachtungen sowie einer zweiten GPS-Messung bedürfen, um die innere Genauigkeit der Satellitenmethode zu überprüfen.

Punkt	LPL	LIM	DOB	
MXH	1181.541	473.390	4237.606	terr. GPS Δ
	1181.574	473.395	4237.800	
	-0.033	-0.005	-0.194	
LPL		1485.386	3471.297	terr. GPS Δ
		1485.390	3471.565	
		-0.004	-0.268	
LIM			4647.517	terr. GPS Δ
			4647.666	
			-0.149	

Transformation GPS-Lösung auf terrestrische-Koordinaten
Restklaffungen der Siebenparametertransformation

	x (mm)	y (mm)	h (mm)
DOB	22	-19	-21
LIM	56	15	-77
MXH	15	10	41
LPL	-93	-6	57

Anzahl der Parameter: 7
Anzahl der Koordinatenkomponenten: 12
Standardabweichung der Transformation: 7,0 cm

2.5. Distanz Lustbühel – Pfänder

Auswertung

Zur Auswertung dieses Raumvektors (beobachtet am 6. Juni 1987) konnten 535 Beobachtungen zu sechs GPS-Satelliten herangezogen werden. Der mittlere Fehler einer Single-difference von 9,2 cm zeigt eindeutig den schwerwiegenden und genauigkeitslimitierenden Einfluß der Ionosphäre für lange Distanzen auf.

Beurteilung des Ergebnisses

Die vorliegende Vergleichsmessung mit TI 4100 Empfängern im Rahmen der DÖNAV-Kampagne im November 1986 ergibt eine Abweichung von 1,437 m (3,3 ppm). Der Einfluß der Ionosphäre auf solch langen Distanzen vor allem bei Tagesbeobachtungen verlangt eindeutig nach dem Einsatz von Zweifrequenzgeräten.

Die Differenz zu der aus den Gebrauchskoordinaten abgeleiteten Schrägdistanz beträgt gar 1,967 m (4,5 ppm).

Weitere sinnvolle Aussagen lassen sich für diesen Raumvektor wohl kaum treffen.

Distanz LUB – PFA	m	Differenz
TI 4100 ionosphärenkorrigiert	434573.102	
TI 4100 L1 Beobachtung (Nacht)	434573.550	-0.448 (1.0 ppm)
WM 101 L1 Beobachtung (Tag)	434574.539	-1.437 (3.3 ppm)
aus Gebrauchskoordinaten	434572.572	0.530 (1.2 ppm)

3. Zusammenfassung aus der Sicht der TU Wien

Die WM-Kampagne bot der TU Wien die Möglichkeit zu umfangreichen Tests des am Institut für Langesvermessung und Ingenieurgeodäsie vorhandenen GPS-Instrumentariums.

Der Wiener WM-101-Empfänger lief während der gesamten Meßkampagne störungsfrei und problemlos. Es konnten auf allen Stationen innerhalb von 90 Minuten genügend gutes Datenmaterial für eine genaue Punktbestimmung gesammelt werden. Die zahlreichen beobachteten Raumvektoren eigneten sich zu intensiven Tests der in Wien installierten Software. Sowohl mit PoPS als auch mit dem Berner Paket konnten alle Beobachtungsdaten ausgewertet werden. Beide Programmsysteme arbeiteten fehlerfrei, problemlos und lieferten idente Ergebnisse.

Die in den Testnetzen Steiermark und Kärnten erzielte Übereinstimmung der GPS-Lösung mit den Gebrauchskoordinaten deuten auf eine hohe Güte des österreichischen Gebrauchsnetzes in diesen Bereichen hin. Aussagen über tatsächlich erreichte Genauigkeiten können nur über die Meßdaten der Basis der TU Graz und des Maltatals getroffen werden, da nur hier die zum Vergleich vorliegenden terrestrischen Koordinaten den für GPS notwendigen Qualitätsanforderungen genügen.

Abschließend kann gesagt werden, daß es bereits heute, während der GPS-Aufbau- und Entwicklungsphase möglich ist, Netze beliebiger Größenordnung mit hoher Qualität in sehr rascher Zeit problemlos zu bestimmen.

Literatur

Bauersima 1983: Bauersima I.: NAVSTAR/Global Positioning System (GPS). Band III. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, Band 12, 1983

Beutler u. a. 1985: Beutler G., Gurtner W., Bauersima I., Langley R.: Modelling and Estimating the Orbits of GPS Satellites. Proc. of 1st Int. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville 1985

Gervaise u. a. 1985: Gervaise J., Mayoud M., Beutler G., Gurtner W.: Test of GPS on CERN-LEP Control Network. Proc. Inertial, Doppler and GPS Measurements for National and Engineering Surveys. Schriftenreihe Studiengang Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 20-2. München 1985

Gurtner u. a. 1985: Gurtner W., Beutler G., Bauersima I., Schildknecht T.: Evaluation of GPS Carrier Difference Observations: The Bernese Second Generation Softwarepackage. Proc. of 1st Int. Symp. on Precise Positioning with GPS, Rockville 1985

Rothacher u. a. 1986: Rothacher M., Gurtner W., Beutler G., Geiger A., Kahle H., Schneider D.: The 1985 Swiss GPS-Campaign. Proc. of 4th Int. Geodetic Symp. on Satellite Positioning, Austin 1986

Die Auswertung mit PoPS

Von G. Stangl, Graz

1. Berechnung mit PoPS

Die Auswertung der Beobachtungen wurde an der TU Graz mit PoPS = Po(st) P(rocessing) S(oftware) durchgeführt. PoPS wurde von Wild-Magnavox für die Auswertung von Beobachtungen mit Empfängern WM 101 entworfen und wird auf einem Personalcomputer (XT oder AT) installiert. Der Benutzer kann das Programm anhand von Menüs steuern. Folgende Hauptaufgaben werden durchgeführt:

Feldvorbereitung: Graphische und numerische Darstellung der Satellitenpositionen und der Güte der Konstellation.

Datentransfer: Überspielen der Beobachtungen von Kassette oder Diskette; Einteilung der Daten in Sessions.

Datenfilter: Berechnung von Näherungswerten der Satellitenbahnen, Position, Uhrenparametern und Single Differences; Beseitigung von Ausreißern und Cycle Slips (= sprunghafte Änderung um eine ganze Zahl von Wellenlängen innerhalb der Beobachtungen); Festlegung der Zuordnung der Punkte zueinander durch Basislinien.

Berechnung: Iterative Ausgleichung des Gleichungssystems; Berechnung der unbekanntenen Stationskoordinaten und Ambiguitäten (= ganzzahliges Vielfaches von Wellenlängen, beseitigt die Mehrdeutigkeit der Anfangsbeobachtungen); Speichern der Ergebnisse.

Eine Einteilung in Sessions muß getroffen werden, sobald der Zeitraum der Beobachtungen 180 Minuten übersteigt. Bei dieser Kampagne war das der Fall. Während an Tagen mit mehreren Sessions die Einteilung dem Zeitpunkt des Stationswechsels entspricht, wurde am 2. Juni der Mittelteil der Beobachtung verwendet.

Die Netzstruktur wurde so gewählt, daß die Basislinien von einem Referenzpunkt mit vorgegebenen dreidimensionalen kartesischen Koordinaten ausgehen. Dadurch wird die Lage des Koordinatensystems bestimmt. Die Koordinatendifferenzen der Punkte zum Referenzpunkt werden im globalen System WGS-72 bzw. WGS-84 berechnet. Um systematische Fehler zu vermeiden, sollten daher die Koordinaten des Referenzpunktes zumindest geozentrisch sein.

Da die Werte von Ambiguitäten ganze Zahlen sein sollen, kann dieser Umstand dazu benutzt werden, sie aus der Liste der Unbekannten zu eliminieren. Dazu wird zuerst die Ausgleichung mit Ambiguitäten und Stationskoordinaten durchgeführt. Im Idealfall liegen die geschätzten Werte der Ambiguitäten knapp neben einer ganzen Zahl. Diese wird als gesuchter Wert angenommen und die Ausgleichung ohne die fixierte Ambiguity als Unbekannte wiederholt. Durch dieses Eliminationsverfahren erhöht sich die Genauigkeit der Lösung beträchtlich.

2. Vergleich mit der Berner Software

Die Koordinatenberechnung mit PoPS an der TU Graz ergab bei einigen Punkten Unterschiede zu den an der TU Wien mit der Berner Software gerechneten Werten. In Tabelle 1 sind Punkte mit einer Differenz über 10 mm angegeben. Die Differenzen (in mm) sind im Sinne PoPS – Berner Software zu verstehen.

Punkt	dX	dY	dZ
4 Basis TU Graz Pfeiler 7	49	-146	-110
7 155-164 C2 Platte bei Graz	2613	592	25
12 13-134 A1 Rennfeld	-76	55	33
10 51-162 A1 Gleinalpe	116	5	159
11 229-164 A2 Schöckl West	11	4	20
9 18-188 X1 Korralpe	-2	-2	-12
19 219-200 X1 Geklobene Wand	-29	48	3
17 182-201 C1 Vassacher See	15	15	13
16 46-201 M1 Polana	-147	-168	-18
M2 Polana	59	15	97
21 78-200 X1 Arnoldstein	140	-183	-12

Tabelle 1: Koordinatenunterschiede PoPS – Berner Software in mm

Abgesehen von Punkt 8, der mit PoPS weder in Graz noch in Heerbrugg bei der Fa. Wild richtig berechnet werden konnte, weisen die Punkte 4, 9, 10, 16, 19 und 23 große Differenzen auf. Aufgrund eines Vergleiches mit terrestrischen Werten können die Abweichungen der Punkte 4 und 23 als falsch bezeichnet werden. Der Grund dafür dürfte in der falschen Beseitigung von cycle slips und dadurch falscher Bestimmung der Ambiguities liegen. Bemerkenswert ist auch das Auftreten nicht eliminierbarer Ambiguities in diesen Punkten.

3. Die Bestimmung von Neupunkten mit GPS

War im Beitrag der TU Wien nur die Rede vom Vergleich mit bekannten terrestrischen Werten, so soll hier eine Bestimmung von Neupunkten im Gebrauchsnetz mit Hilfe von GPS demonstriert werden. Es wurden an jedem Tag jeweils 3 Punkte als Transformationspunkte ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, daß die zu transformierenden Punkte innerhalb dieses Dreiecks liegen. Die Transformationselemente der Helmerttransformation mit 7 Parametern wurden aus den 3 identen Punkten bestimmt; die Überbestimmung ist demnach sehr schwach ($r = 2$). Nachfolgende Tabelle enthält die Residuen der Transformationspunkte und die Abweichung der mit den 7 Parametern transformierten Punkte von den terrestrischen Koordinaten.

Residuen der Transformationspunkte							Differenzen der transformierten Punkte						
No	dX	dY	dZ	dN	dE	dh	No	dX	dY	dZ	dN	dE	dh
1	-13	3	11	16	7	0	6	-23	3	-66	-29	9	-63
5	0	-13	4	5	-13	0	8	14	-31	-4	-7	-34	1
7	13	10	15	-21	6	-1							
1	-12	-129	52	70	-121	7	10	30	141	-138	-142	128	-49
12	-27	91	-4	-1	95	-5	11	-145	7	63	144	45	-47
9	40	38	-48	-68	27	-2							
13A1	-20	90	-14	-11	92	-9	14	-21	40	134	100	44	90
15	-86	0	96	127	20	13	19	-95	25	17	74	47	-47
16M1	105	-87	-84	-117	-110	-5	18	-6	155	82	34	152	81
							17	-7	-63	7	21	-59	10
13X1	-22	-33	33	43	-27	4	20	-10	-44	-24	-2	-40	-31
16M2	21	-20	-13	-20	-25	1	22	-21	89	43	29	91	32
23	1	53	-20	-23	51	-5	21	7	45	-5	-16	42	8

Tabelle 2: Residuen und Differenzen der Neupunktbestimmungen in mm

$$dN = a \cdot dB$$

$$dE = A \cdot \cos B \cdot dL$$

Die Tabelle 2 zeigt die Abhängigkeit der Genauigkeit der transformierten Punkte von den Transformationspunkten. Es zeigt sich außerdem, daß sogar für scheinbar gute Transformationen (1–5–7, 13–16–23) die Abweichungen der mittransformierten Punkte empfindlich groß werden können (Punkte 6, 22). Den Unsicherheiten kann vermutlich auf zweierlei Art begegnet werden: zum einen durch Einschränkung des Transformationsgebietes, zum andern durch die Verwendung einer größeren Anzahl von Transformationspunkten. Durch beide Strategien wird leider der Meßaufwand vergrößert.

Geodimeter System 400



Geodimeter®410



Geodimeter®420



Geodimeter®440



GEODIMETER Ges.m.b.H.
A-1041 Wien, Prinz Eugen-Str. 72
Postfach 139
Tel. (0222) 65 57 54. Telex 133 093
Fax (0222) 65 66 31214

Untersuchung der Ergebnisse der WM 101-Messungen im BEV

Von J. Zeger, Wien

Die Auswertung der GPS-Kampagne WM 101 anfangs Juni 1987 in Österreich erfolgte an den Technischen Universitäten in Graz und Wien. Die Resultate dieser Auswertungen wurden auch der Abteilung K2 – Grundlagenvermessungen – des BEV zur Vornahme verschiedener Untersuchungen übergeben. Diese Untersuchungen gliedern sich in verschiedene Gruppen.

1. Vergleich der WM 101-Messungen im Raum Graz mit den Macrometermessungen 1985

Am 1. Juni 1987 wurden im Raum Graz Messungen mit GPS-Empfängern Wild-Magnavox WM 101 auf den Punkten 5. Ordnung 89–164, 110–164, 112–164, 155–164, 306–164 auf den Pfeilern 1, 5 und 7 der Grazer Vergleichsbasis vorgenommen; am 2. Juni 1987 auf den Punkten 1. Ordnung 13–134 (Rennfeld), 51–162 (Gleinalpe), 229–164 (Schöckl), 18–188 (Koralpe) und der Satellitenstation Lustbühel (306–164). Über den Punkt 306–164 ist ein Zusammenschluß dieser beiden Messungsserien möglich (Abb. Seite 169).

Im Jahre 1985 waren auf der Mehrzahl dieser Punkte Macrometermessungen durchgeführt worden (*Rinner u. a., 1986*). Ausgenommen waren davon 51–162 und die Pfeiler der Vergleichsbasis. Da bei einigen Punkten im Juni 1987 nicht auf den selben Standpunkt gemessen worden war wie im Jahre 1985, mußten Zentrierungen vorgenommen werden.

In der Tabelle 1 sind die Differenzen in den geozentrischen Koordinaten im Sinne Macrometermessung minus Messung mit WM 101 in Millimeteereinheiten ausgewiesen. In der ersten Variante wurden die auf den Punkt 306–164, Graz-Lustbühel, bezogenen, aus der Messung abgeleiteten Werte direkt miteinander verglichen. Die Punkte im engeren Bereich weisen hierbei in den einzelnen geozentrischen Koordinaten Differenzen bis maximal 74 mm auf, hingegen zeigen sich bei den weiter entfernten Punkten Differenzen bis zu 209 mm.

Anschließend wurden vier verschiedene räumliche Drehstreckungen für die Messungen mit WM 101 durchgerechnet.

In der Transformation 1 wurden die am 1. und 2. Juni durchgeführten Messungen gemeinsam transformiert. Man erhält dabei eine Maßstabsänderung von $-2,549 \cdot 10^{-6}$ und Verdrehungswinkel bis $3,4^{\text{cc}}$. Die transformierten geozentrischen Koordinaten weisen gegenüber den Macrometerwerten nur mehr Differenzen bis höchstens 57 mm auf.

Für die Transformation 2 wurden die Punkte im engeren Grazer Bereich, also die Ergebnisse der Messungen vom 1. Juni verwendet. Hierbei erhält man eine Maßstabsänderung von $-1,456 \cdot 10^{-6}$, Verdrehungswinkel bis $5,6^{\text{cc}}$ und eine maximale Koordinatenabweichung von 17 mm.

Die Transformation 3 beinhaltet die Punkte von 2. Juni, es sind dies die Punkte höherer Ordnung mit größeren Entfernungen. Hier ergeben sich ähnliche Transformationselemente wie bei der Transformation 1, eine Maßstabsänderung von $-2,300 \cdot 10^{-6}$ und Verdrehungswinkel bis $3,2^{\text{cc}}$. Als maximale Koordinatendifferenz trat ein Wert von 47 mm auf.

Die Transformation 4 sollte zeigen, ob sich die Situation ändert, wenn man zu den Punkten vom 1. Juni noch den Punkt 229–164, Schöckl West, dazunimmt. Man erhält hierbei eine Maßstabsänderung von $-1,319 \cdot 10^{-6}$ und einen maximalen Verdrehungswinkel von $5,2^{\text{cc}}$. Während in der Transformation 2 nur höchstens 17 mm Koordinatendifferenz aufscheint, steigt diese hier bis 40 mm an.

Was sich schon beim direkten Vergleich der Messungen gezeigt hatte, daß bei den näher gelegenen Punkten geringere Abweichungen zwischen den Messungen mit Macrometer und WM 101 bestehen, als bei den weiter entfernt gelegenen Punkten, wurde bei der getrennten Transformation der Messungen an den beiden Tagen ebenfalls deutlich sichtbar. In der Transformation 2 sind die verbleibenden Differenzen etwa ein Drittel der Werte in der Transformation 3.

Punkt	vorder Transformation			Transformation 1			Transformation 2			Transformation 3			Transformation 4		
	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ
13-134 A 1 Rennfeld	-209	+137	-186	-38	+57	+38	.	.	.	-26	+40	+30	.	.	.
89-164 F 1 Graz, Schloßberg	- 31	- 14	+ 11	+11	-41	+ 6	+10	-14	+17.	.	.	.	- 1	-17	+ 7
110-164 A 1 Fuchsriegel	- 14	+ 12	+ 7	+12	-10	+ 3	-16	+ 2	- 7	.	.	.	-12	+ 3	0
112-164 B 2 Plabutsch	- 74	+ 10	- 30	- 8	-23	-20	- 5	+ 8	-13	.	.	.	- 3	+10	-12
155-164 C 1 Platte bei Graz	+ 1	+ 23	+ 20	+43	- 6	+35	+ 6	+ 3	+ 6	.	.	.	+37	+11	+40
229-164 E 1 Schöckl West	-118	+ 23	-102	-43	-15	-28	.	.	.	-20	-35	-19	-20	- 3	-10
306-164 B 1 Graz, Lustbühel	0	0	0	+21	-20	-18	+ 8	+ 2	- 5	+47	-39	+ 2	+10	- 4	-23
18-188 A 4 Koralpe	-126	+ 81	+136	+ 2	+56	-17	.	.	.	- 1	+35	-12	.	.	.
dµ				-2,549 · 10 ⁻⁶			-1,456 · 10 ⁻⁶			-2,300 · 10 ⁻⁶			-1,319 · 10 ⁻⁶		
dαX				+1,87 ^{cc}			+1,24 ^{cc}			+1,34 ^{cc}			+3,30 ^{cc}		
dαY				-3,42 ^{cc}			+4,00 ^{cc}			-3,25 ^{cc}			-5,25 ^{cc}		
dαZ				-2,58 ^{cc}			-5,59 ^{cc}			-2,07 ^{cc}			-4,98 ^{cc}		

Tabelle 1:
Differenz Macrometermessungen minus Messungen mit WM101 in Millimeter

2. Koordinatenvergleiche im Raum Graz

Um die aus der WM 101-Kampagne stammenden Ergebnisse mit den aus der Landesvermessung stammenden Werten vergleichen zu können, wurden vier verschiedene räumliche Drehstreckungen durchgerechnet. Die Ergebnisse, die Differenzen in den Gauß-Krüger-Koordinaten und in den ellipsoidischen Höhen bzw. in den geozentrischen Koordinaten im Sinne Landessystem minus GPS sind in Millimeter-Einheiten in der Tabelle 2 zusammengestellt.

Grundlage für die Berechnung der Elemente waren in der Transformation 1 die Punkte 1. Ordnung 13–134, 51–162, 229–164, 306–164 und 18–188. Die übrigen Punkte wurden hernach mit den so erstellten Elementen gleichfalls transformiert.

Während sich die Transformation 1 auf das Gebrauchsnetz bezieht, hat die Transformation 2 die Koordinaten aus ED 79 auf dem Hayford-Ellipsoid als Grundlage. Selbstverständlich wurden hierbei auch die für ED 79 zu verwendenden Geoidhöhen zur Ableitung der ellipsoidischen Höhen verwendet.

Die Geoidhöhen im Gebrauchsnetz (Bessel-Ellipsoid) stammen von der BEV-Lösung (Erker, 1987), wodurch sich in den Transformationsergebnissen Unterschiede gegenüber den Berechnungen der beiden Technischen Universitäten ergeben, da diese die Geoidhöhen aus der Grazer Lösung verwendet haben.

Die Berechnung der Elemente für die Transformation 3 erfolgt mit den am 1. Juni gemessenen Punkten, ausgenommen die drei Pfeiler der Basis. Die Transformation 4 wurde mit denselben Punkten, jedoch mit den Landeskoordinaten aus ED 79, durchgeführt.

Während im Gebrauchsnetz die Maßstabsänderung bei den Transformationen 1 und 3 ungefähr gleich ist, $-1,169 \cdot 10^{-6}$ und $-1,251 \cdot 10^{-6}$, gibt es in ED 79 zwischen den Transformationen 2 und 4 sogar einen Vorzeichenwechsel, $-2,730 \cdot 10^{-6}$ und $+2,337 \cdot 10^{-6}$. Die Verdrehungswinkel sind im Gebrauchsnetz etwa um eine Zehnerpotenz größer als in ED 79. Sieht man von den Pfeilern der Basis ab, dann beträgt die Maximalabweichung in einer geozentrischen Koordinate für die Punkte, aus denen die Transformationselemente abgeleitet wurden bzw. für die sonstigen transformierten Punkte in der

Transformation 1: 153 mm bzw. 179 mm

Transformation 2: 42 mm bzw. 74 mm

Transformation 3: 51 mm

Transformation 4: 39 mm

Etwas anders ist die Situation bei den drei Pfeilern der Vergleichsbasis. Anscheinend weichen die Landeskoordinaten dieser Punkte etwas vom übrigen Punktsystem ab, was sich in den Transformationen 1 und 3 durch systematische Verschiebungen ausdrückt. Innerhalb der drei Pfeiler erhält man in der Transformation 1 bei den geozentrischen Koordinaten eine Maximaldifferenz von 27 mm und in der Transformation 3 von 30 mm.

Die unterstrichenen Punkte in der Tabelle 2 wurden für die Berechnung der Transformationselemente verwendet.

Vergleicht man die Transformationen 1 und 2, dann erkennt man schon einen großen Genauigkeitsunterschied bei der Verwendung der ED 79-Koordinaten im Vergleich zu den Werten aus dem Gebrauchsnetz. Bei den Transformationen 3 und 4 ergibt sich hingegen zufolge der wesentlich geringeren Spannungen im Grazer Gebrauchsnetz praktisch kaum ein Unterschied.

3. Koordinatenvergleich im Raum Villach

Die Messungen im Raum Villach nehmen eine gewisse Sonderstellung ein. Sie wurden am 3. und 4. Juni 1987 vorgenommen (Abb. Seite 170). Eine Verbindung zwischen den aus den Messungen abgeleiteten geozentrischen Koordinaten für alle Punkte war durch die Punkte 27–200, Villacher Alpe und 46–201, Polana, vorgesehen, wobei dort an den beiden

Transformations-Nr.:	1				2 (ED 79)				3				4 (ED 79)			
	dy dx	dx dy	dH dZ		dy dx	dx dy	dH dZ		dy dx	dx dy	dH dZ		dy dx	dx dy	dH dZ	
13-134 A 1 Rennfeld	-84 +16	-10 -83	-23 -24		-31 +7	+28 -31	+22 +34									
51-162 A 1 Gleinalpe	-81 -51	+129 -102	+29 +108		-24 -9	+8 -27	-14 -6									
89-164 F 1 Graz, Schloßberg	+146 +45	-33 +162	+87 +40		+4 +70	-22 +22	+78 +42		-12 +20	+25 -8	+51 +51		-18 +31	+13 -12	+46 +39	
110-164 A 1 Fuchsriegel	+180 -23	-27 +179	+14 -8		+67 +13	-33 +74	+8 -18		+30 -22	+25 +25	-18 -7		+19 -11	-1 +17	-11 -8	
112-164 B 2 Plabutsch	+158 +40	-99 +179	+23 -49		+20 +21	-23 +28	+14 -5		+12 -12	-14 +11	-24 -29		+15 -15	-8 +12	-26 -27	
155-164 C 2 Platte bei Graz	+121 +18	-31 +127	+43 +9		+40 +13	-2 +44	+29 +20		-13 +3	+13 -15	+7 +13		-4 -2	+12 -6	+6 +13	
229-164 A 2 Schöckl West	-27 +100	-133 +4	0 -89		+8 0	-19 +9	-19 -28									
306-164 X 1 Graz, Lustbühel	+148 -3	-49 +153	+6 -28		+33 +28	-53 +42	-2 -35		-17 +6	-20 -15	-19 -26		-9 -6	-5 -11	-16 -18	
18-188 X 1 Koralpe	+47 -65	+66 +30	-17 +32		+17 -26	+38 +10	+8 +32									
Pfeiler 1	+198 +154	+24 +248	+340 +264						-8 +140	+88 +28	+297 +277					
Pfeiler 5	+193 +163	+27 +244	+356 +278						-13 +151	+89 +26	+319 +292					
Pfeiler 7	+180 +152	+19 +227	+323 +251						-25 +145	+79 +13	+287 +262					
dμ		-1,169 · 10 ⁻⁶				-2,730 · 10 ⁻⁶				-1,251 · 10 ⁻⁶			+2,337 · 10 ⁻⁶			
dα _x		-13,71 ^{cc}				+0,24 ^{cc}				-12,44 ^{cc}			-1,79 ^{cc}			
dα _y		-3,84 ^{cc}				+0,54 ^{cc}				-3,11 ^{cc}			-0,31 ^{cc}			
dα _z		-17,48 ^{cc}				-1,12 ^{cc}				-13,42 ^{cc}			-1,32 ^{cc}			

Tabelle 2: Koordinatenvergleich im Raum Graz
Differenz Landessystem weniger GPS in Millimeter-Einheiten

Transform.-Nr.:	T1			T2			T3			T4			T5(ED79)			T6		
	dy dx	dx dy	dH dZ															
8-200 A 3 Dreiländereck	-	-	-	-26 -5	+15 -28	-1 +9	-22 -14	+8 -26	-21 -11	-40 -9	-6 -43	-34 -29	+6 -50	+34 -6	-37 -4	-	-	-
21-200 C 1 NA Draschitz Ost	-	-	-	+48 +38	-19 +56	+40 +16	+20 +31	+20 +28	+31 +8	-	-	-	-	-	-	+34 +19	-27 +39	+11 -11
27-200 A 1 NA Villacher Alpe	-8 -13	+20 -11	-3 +11	-	-	-	-2 -7	+16 -3	+5 +14	+22 -7	+18 -24	0 +12	-18 +3	+3 -18	+1 +3	+1 -9	+21 -1	+8 +20
27-200 X 1 NA Villacher Alpe	-	-	-	+30 -22	-1 -25	-24 -19	-2 -9	+17 +5	+3 +13	+23 -8	+18 -26	-2 +11	-15 -1	+5 -16	+2 +2	-	-	-
74-200 X 1 NA Tschau, Pfk.	-	-	-	-72 +13	-34 -71	-41 -53	-54 -9	-13 -58	-46 -42	-	-	-	-	-	-	-17 -9	-1 -20	-21 -16
78-200 X 1 NA Arnoldstein, Pfk.	-	-	-	-28 +5	0 -27	-2 -1	-32 -6	+9 -34	-11 -2	-	-	-	-	-	-	-	+5 -12	+11 -8
102-200 A 1 Amberger Alpe	-17 +76	-60 0	+44 -9	-	-	-	-10 +82	-82 +9	+32 -33	-14 +83	+64 +5	+51 -7	-14 +50	-20 +2	+49 +22	-	-	-
219-200 X 1 NA Geklobene Wand	+22 -9	0 +21	-6 +5	-	-	-	+17 +5	-11 +19	+2 -7	-	-	-	-	-	-	+45 +10	+7 +49	+38 +32
223-200 H 1 NA Aichinger Hütte	-77 -13	-1 -82	-48 -36	-	-	-	-74 -3	-8 -77	-40 -35	-	-	-	-	-	-	-63 -3	+3 -65	-24 -16
14-201 A 6 NA Geritzten	-11 -33	-40 -20	-97 -98	-	-	-	-14 -22	-70 -21	-113 -131	0 -13	-56 -4	-81 -98	-12 -41	5 -23	-72 -56	+5 +5	+10 +6	-3 -10
46-201 M 2 NA Polana	-	-	-	+47 -21	+41 +44	+29 +48	+90 -55	+100 +80	+55 +107	+100 -46	+95 +92	+67 +113	+53 +40	+17 +65	+61 +32	+134 -42	+137 +129	+129 +186
182-201 C 1 NA Vassacher See	+90 -9	+86 +91	+109 +137	-	-	-	+84 +7	+62 +89	+106 +119	-	-	-	-	-	-	+114 +19	+104 +123	+179 +201
d _l	+8,777	· 10 ⁻⁶	+13,972	· 10 ⁻⁶	+9,811	· 10 ⁻⁶	+8,087	· 10 ⁻⁶	-5,215	· 10 ⁻⁶	+7,853	· 10 ⁻⁶	-17,24 ^{cc}	-12,67 ^{cc}	-4,83 ^{cc}	-6,62 ^{cc}	-19,49 ^{cc}	
d _{αX}	-15,04 ^{cc}	-14,08 ^{cc}	-14,69 ^{cc}	-14,94 ^{cc}														
d _{αY}	-5,72 ^{cc}	-1,07 ^{cc}	-4,64 ^{cc}															
d _{αZ}	-20,84 ^{cc}	-19,73 ^{cc}	-20,65 ^{cc}															

Tabelle 3: Koordinatenvergleich im Raum Villach, Differenz Landessystem weniger GPS in Millimeter-Einheiten (Unterstrichene Werte wurden nicht zur Transformationsbestimmung verwendet; NA = Nivellementsanschluß)

Tagen allerdings unterschiedliche Exzenter verwendet wurden. In den Auswertungen zeigte sich, daß die Beobachtungen des 1. Tages auf 46–201, Polana, sichtlich einen groben Fehler beinhalten. Sie wurden deshalb verworfen. Eine plausible Erklärung für diesen Meßfehler (eventuell auch in der lokalen Beziehung) konnte noch nicht gefunden werden.

Für die Punkte 8–200, Dreiländereck, und 102–200, Amberger Alpe, standen nur trigonometrisch bestimmte Höhen zur Verfügung. Die übrigen Punkte erhielten ihre Höhen durch Nivellementanschlüsse. Für sie wurden aus geopotentiellen Koten echte orthometrische Höhen abgeleitet, bezogen auf ÖNN und *nicht* auf Adria. Die beiden trigonometrischen Höhen wurden durch eine Additionskonstante in das gleiche Höhenniveau verschoben.

Für den Bereich Villach wurden verschiedene räumliche Drehstreckungen durchgerechnet, um unterschiedliche Einflüsse überprüfen zu können. In der Tabelle 3 sind die Ergebnisse dieser Transformationen zusammengestellt.

Transformation 1: Es wurden sämtliche Punkte für die Berechnung der Transformationselemente verwendet, welche am 3. Juni bestimmt worden sind.

Transformation 2: Es wurden sämtliche Punkte für die Berechnung der Transformationselemente verwendet, welche am 4. Juni bestimmt worden sind.

Transformation 3: Die geozentrischen Koordinaten aus den Messungen vom 3. und 4. Juni wurden über den Punkt 27–200, Villacher Alpe, miteinander vereinigt. Für die Berücksichtigung der verschiedenen Standpunkte auf 27–200 an den beiden Tagen wurde die Koordinatendifferenz aus den Landeskoordinaten herangezogen. Sämtliche vereinigten geozentrischen Koordinaten wurden für die Berechnung der Transformationselemente verwendet.

Transformation 4: Hier wurden nur Punkte 3. oder höherer Ordnung zur Berechnung der Transformationselemente herangezogen.

Transformation 5: Wie Transformation 4, jedoch für das Landessystem wurden nicht die Gebrauchskordinaten, sondern die auf das Bessel-Ellipsoid transformierten ED 79-Koordinaten der Punkte 3. oder höherer Ordnung herangezogen.

Transformation 6: Hier wurden ausschließlich Punkte mit orthometrischer Höhe (also mit Nivellementanschluß verwendet).

Die Restklaffungen der Transformationen T1 und T2 zeigen bei vektorieller Vereinigung der beiden Teilsessionen nur geringe Änderungen. Das gleiche gilt im Prinzip auch für die Transformationselemente. Die mittleren Koordinatenfehler liegen zwischen

$$\pm 43 \text{ und } \pm 70 \text{ mm.}$$

Zahlenmäßig liegen die größten Restklaffungen im Bereich der Stadt Villach, (Polana, Vassacher See), was letztlich zu einem Ausschluß dieser Punkte in der Transformation T 6 geführt hat. Die Transformationen T4 und T5 basieren auf Punkten, deren Koordinaten auch im neuausgeglichenen System ED 79 (in Minimallage zum Gebrauchsnetz) vorliegen. Hier zeigt sich deutlich der Maßstabsdefekt im Gebrauchsnetz (T4) und die bessere Übereinstimmung der GPS-Resultate mit ED 79 (T5) (einschließlich des Punktes 46–201, Polana.) Als Genauigkeitsmaße ergeben sich

$$m_{T4} = \pm 64 \text{ mm}$$

$$m_{T5} = \pm 41 \text{ mm}$$

Bei der Bestimmung der Transformationselemente für die Transformation T6 haben alle verwendeten Punkte orthometrische Höhen. (Die beiden Punkte im Raum Villach wurden hierbei *nicht* mitverwendet). Es zeigt sich, daß die Restklaffungen in den Höhen sehr kleine Werte annehmen, die Standardabweichung für den Mittelwert beträgt

$$m_h = \pm 21 \text{ mm,}$$

während sie bei den übrigen Transformationen von ± 31 bis ± 72 mm variierte. Ebenso

erreicht der mittlere Koordinatenfehler

$$m_{T_6} = \pm 29 \text{ mm}$$

den kleinsten Wert aller Transformationen.

Die großen (und sichtlich korrelierten) Koordinatendifferenzen für die mit den Parametern der Transformation T6 berechneten beiden Punkte in Villach lassen u. U. auf eine lokale Netzdeformation in diesem Bereich schließen.

Nummer der Transform.	y	x	H ^{ellips.}
2	+33090,122	5154903,031	1004,792
3	,129	,024	,773
4	,161	,050	,810
6	,070	,011	,730

Tabelle 4: Koordinaten und Höhe für den Punkt 289–200 A 1, Dobringer

Im Villacher Raum wurde auch ein Punkt mit der alten Bezeichnung 289–200, Dobringer, als Neupunkt eingeschaltet, da die ursprüngliche Stabilisierung nicht mehr vorhanden war. In der Tabelle 4 sind die Ergebnisse aus den 4 Transformationen zusammengestellt, in denen er berechnet werden konnte. Zwischen diesen 4 Transformationen zeigen sich zum Teil nicht unwesentliche Differenzen in den Ergebnissen, (91 mm in y, 39 mm in x und 80 mm in der ellipsoidischen Höhe) je nachdem ob die Punkte 46–201 und 182–201 bestimmend verwendet werden oder nicht.

4. Koordinatenvergleich im Raum Bleiberg

Im Raum Bleiberg wurden am 5. Juni 1987 die Punkte Maxhalde, Lichtmeßstollen und Hubschrauberlandeplatz in Verbindung mit dem Punkt 27–200, Villacher Alpe, bestimmt.

Die ersten drei Punkte haben zwar Koordinaten im Gauß-Krüger-System, doch besteht eine Differenz zu den amtlichen Werten. Der Punkt Maxhalde ist identisch mit dem TP 360–200. Die Bleiberger Werte zeigen folgende Unterschiede gegenüber den amtlichen Werten: $dy = 80 \text{ mm}$, $dx = 80 \text{ mm}$, $dH = 218 \text{ mm}$.

Es wurden zwei Transformationen durchgerechnet, einmal unter Verwendung der Bleiberger Werte für die Punkte 27–200 und 360–200, dann unter Verwendung der Bleiberger Werte für 360–200. Für die restlichen beiden Punkte gibt es ja nur Bleiberger Werte.

Die Tabelle 5 zeigt die übrigbleibenden Restklaffungen für diese beiden Varianten. Selbstverständlich ergibt die zweite Transformation das bessere Ergebnis, da hier die Gauß-Krüger-Koordinaten homogener sind.

Punkt	dy	dx	dH	dy	dx	dH
27–200	+27	+ 34	–10	+19	+18	–18
360–200	–62	+ 88	–68	– 2	+36	+44
Lichtmeßstollen	+25	+ 9	+23	–16	+30	–73
Hubschrauberlandeplatz	6	–130	+57	– 1	–81	+45
$d\mu$	– 17,401 · 10 ^{–6}			–31,984 · 10 ^{–6}		
$d\alpha_x$	+ 52,86 ^{cc}			+16,08 ^{cc}		
$d\alpha_y$	+144,08 ^{cc}			+99,11 ^{cc}		
$d\alpha_z$	– 51,15 ^{cc}			–28,71 ^{cc}		

Tabelle 5: Koordinatenvergleich im Raum Bleiberg
Differenz Landessystem weniger GPS in Millimeter-Einheiten

5. Koordinatenvergleich beim Deformationsnetz Kölnbreinsperre

Am 5. Juni 1987 wurden auch 7 Punkte des Präzisionsnetzes im Maltatal beobachtet. Es entstanden hierbei zwei Systeme, die jedoch auf dem Umweg über die rund 58 km entfernte Villacher Alpe miteinander verbunden werden konnten. Für diesen Bereich wurden nun vier verschiedene Transformationen durchgerechnet, deren Ergebnisse in der Tabelle 6 zusammengestellt sind.

Für die 7 Punkte wurden von den ÖDK ursprünglich nur lokale Koordinaten angegeben. Zwei dieser Punkte sind jedoch identisch mit Triangulierungspunkten: Pfeiler 13 \equiv 163–156 und Pfeiler 107 \equiv 165–156. Mit Hilfe der Koordinaten dieser beiden Punkte konnten durch eine einfache Drehstreckung ohne Überbestimmung Gauß-Krüger-Koordinaten im Gebrauchsnetz ermittelt werden.

Verwendet man nun die auf dem Umweg über den Punkt 27–200, Villacher Alpe, miteinander verbundenen beiden GPS-Systeme für eine Transformation, dann erhält man ein äußerst unbefriedigendes Ergebnis, wie man der Zusammenstellung in der Tabelle 6 entnehmen kann. In den verbleibenden Restklaffungen merkt man deutlich den Sprung zwischen den beiden Systemen.

In den beiden nächsten Transformationen wurden die beiden GPS-Systeme für sich getrennt zur Ermittlung der Transformationselemente herangezogen. Die dann mittransformierten Punkte des jeweils anderen Systems verstärken den Hinweis auf die Unvereinbarkeit auf dem Umweg über die Villacher Alpe.

Versuchsweise wurden die geozentrischen Koordinaten eines der beiden Systeme um die Differenz der Nullpunktverschiebungen aus den Transformationen 2 und 3 in das andere System verschoben. Die so vereinigten Werte für die 7 Punkte wurden in der 4. Transformation untersucht. Hierbei ergaben sich brauchbare Ergebnisse, die jedoch selbstverständlich im Vergleich mit den beiden getrennt durchgeführten Transformationen etwas größere Abweichungen zeigen.

Transform.- Nr.:	1			2			3			4			
	Punkt	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	dX	dY	dZ	dX	dY	
27–200	+ 3	0	+ 2	+ 78	-544	-264	
MK 1	+115	- 58	+ 34	0	+ 3	- 2	+193	- 92	+ 72	+ 21	- 18	- 6	
7	- 84	+ 51	- 38	-185	+ 98	- 69	- 4	+ 1	+ 3	- 10	+ 23	+ 4	(+)
11	- 81	+ 48	- 29	-195	+ 97	- 88	+ 4	+ 2	- 3	- 11	+ 18	- 2	(+)
12	+102	- 32	+ 64	- 1	+ 2	+ 2	+192	- 95	+ 89	+ 3	- 12	+ 10	
13	+ 98	- 45	+ 27	+ 3	- 3	- 2	+179	-101	+ 69	+ 7	- 16	- 9	
103	- 74	+ 26	- 24	-198	+ 97	- 67	+ 3	+ 5	+ 10	0	+ 11	+ 11	(+)
107	- 81	+ 13	- 29	-206	+ 85	- 86	- 3	- 8	- 8	- 8	- 3	- 6	(+)
d μ	+2,244 · 10 ⁻⁶			-5,376 · 10 ⁻⁶			-11,663 · 10 ⁻⁶			-6,740 · 10 ⁻⁶			
d α_x	- 3,48 ^{cc}			-21,88 ^{cc}			-14,58 ^{cc}			-13,72 ^{cc}			
d α_y	+ 6,59 ^{cc}			-16,24 ^{cc}			+ 1,90 ^{cc}			- 2,18 ^{cc}			
d α_z	-37,39 ^{cc}			-30,88 ^{cc}			-42,62 ^{cc}			-30,13 ^{cc}			

Tabelle 6: Koordinatenvergleich im Raum Maltatal
Differenz Landessystem weniger GPS in Millimeter-Einheiten

Die unterstrichenen Punkte in der Tabelle 6 wurden für die Berechnung der Transformationselemente verwendet. In der 4. Transformation wurden die mit (+) gekennzeichneten Beobachtungsergebnisse um die Differenz der Nullpunktverschiebung aus den Transformationen 2 und 3 verschoben.

Interessehalber wurde in der Transformation 4 auch der Punkt 27—200 mittransformiert, was natürlich angesichts der Entfernung von rund 58 km von dem Punktfeld Maltatal eine weitgehende Extrapolation ist, wie durch das Ergebnis bestätigt wird.

6. Schlußforderungen

Was sich bereits bei der Auswertung der Macrometermessungen im Grazer Raum vom Jahr 1985 gezeigt hatte, wurde hier bestätigt.

Eine wesentliche Voraussetzung für ein gutes Ergebnis bei der Einschaltung von Punkten unter Verwendung von GPS-Messungen ist einerseits ein möglichst spannungsfreies Ausgangsnetz und sind andererseits möglichst gute ellipsoidische Höhen. Sind diese beiden Voraussetzungen nicht gegeben, dann sind Spannungen im Dezimeterbereich ohne weiteres möglich!

Bei den Messungen mit WM 101-Geräten in nur einer Frequenz kommt noch hinzu, daß bei größeren Punktenfernungen eine geringere Genauigkeit zu erwarten ist. Dies zeigt vor allem der Vergleich der Messungen mit WM 101 mit den Macrometermessungen (siehe Tabelle 1) sehr deutlich, aber ebenso die nicht durchführbare Vereinigung der beiden GPS-Systeme im Maltatal auf dem Umweg über den Punkt 27—200, Villacher Alpe. In diesem letzteren Fall müßte unbedingt im lokalen Bereich durch Verbindungsmessungen die Möglichkeit für eine Vereinigung der verschiedenen GPS-Systeme geschaffen werden.

Es hat sich aber auch gezeigt, daß trotz vorhandener Maßstabsdifferenzen eine Vereinigung verschiedener Sessionen von aufeinander folgenden Tagen praktisch ohne besondere Genauigkeitseinbuße vorgenommen werden kann, allerdings müssen hierzu entsprechend überlegte Verbindungsmessungen vorhanden sein.

Gegenüber den Ergebnissen, wie sie von den beiden Technischen Universitäten in Graz und Wien ausgewiesen werden, treten hier teilweise Differenzen auf. Ursachen hierfür sind einerseits kleine Unterschiede in den verwendeten Ausgangskordinaten, weiters Unterschiede in den verwendeten Geoidhöhen, worauf bereits im Punkt 2 hingewiesen wurde. Im Villacher Bereich kommt allerdings auch noch der Unterschied hinzu, der in der hier ausprobierten Anwendung des neuen Höhensystems begründet ist.

Literatur

Rinner, K.; Zeger, J.; Hofmann-Wellenhof, B.; Erker, E. (1986): Über die GPS-Macrometer-Kampagne 1985 in Österreich; Österr. Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie, 74. Jg, 1986, Heft 1, S. 1—25

Erker, E. (1987): The Austrian Geoid. Local Geoid Determination Using Modified Conservative Algorithms. In: The Gravity Field in Austria. Geod. Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung; Neue Folge, Band IV. Graz 1987.

Die Bestimmung von Gebrauchshöhen aus GPS-Messungen

Von N. Höggerl, Wien

1. Einleitung

Das Global Positioning System liefert dreidimensionale, geozentrische Koordinaten im Referenzsystem der Satelliten (WGS 84). Diese Koordinaten können bei Vorliegen von identen Punkten in jedes beliebige Landeskoordinatensystem transformiert werden. Die Satellitenmessungen liefern als Ergebnis Daten die auf geometrischen Informationen beruhen und vom Schwerefeld der Erde nicht beeinflusst sind. Das bedeutet, daß auch nach der Transformation nur geometrische Größen vorhanden sind, wobei als Bezugsfläche das jeweilige Referenzellipsoid des Landessystems dient (nach der Transformation liegen ellipsoidische Höhen vor).

Das österreichische Gebrauchshöhensystem leitet sich von Präzisionsnivellement-Messungen ab und berücksichtigt dabei nur die theoretische Schwere (sphäroidisch korrigierte Höhen). Um jedoch aus Nivellementmessungen eine eindeutig definierte Höhe zu erhalten, muß der Einfluß des tatsächlichen Schwerefeldes berücksichtigt werden. Derzeit laufen in Österreich Arbeiten, um unter Verwendung von Nivellementmessungen, Schweremessungen und einem digitalen Geländemodell ein orthometrisches Gebrauchshöhensystem aufzubauen (Zeger, 1985). Die Verbindung zwischen ellipsoidischen Höhen H_E und orthometrischen Höhen H_O läßt sich über die Geoidundulation N herstellen:

$$H_E = H_O + N \quad (1)$$

In der vorliegenden Arbeit wird untersucht, mit welcher Genauigkeit die aus den 3D-Koordinaten berechneten ellipsoidischen Höhen in das Gebrauchshöhensystem (derzeitiges und neues) umgerechnet werden können, und wie weit dadurch trigonometrische oder nivellistische Höhenmessung ersetzt werden kann.

2. Netz Kärnten (Viiiach)

Die Untersuchungen beschränken sich auf die im Netz Kärnten durchgeführten Messungen der WM-Kampagne (3. und 4. Tag), da hier besonders umfangreiche terrestrische Messungen vorlagen. Bereits vorhanden waren Nivellementmessungen bis in Höhen von 2166 m (27–200A1 Villacher Alpe) und in 1908 m (14–201A1 Gerlitzten).

Vonden 12 Netzpunkten sind 10 mit Nivellementanschlüssen versehen (ausgenommen sind die Punkte 8–200A3 Dreiländereck und 102–200A1 Amberger Alpe). Das dafür erforderliche Nivellementnetz weist eine Länge von ca. 90 km auf. Alle im Netz enthaltenen Punkte sind auch Festpunkte des Lagenetzes, wobei jedoch für die GPS-Messungen auf 7 von 12 Stationen eine exzentrische Aufstellung erforderlich war. Eine Station mußte mit einem 30-m-Signalmast besetzt werden. Die Abbildung Seite 170 zeigt den Netzaufbau mit den Nivellementlinien.

Zunächst sollen die einzelnen Summanden der Gleichung (1) auf ihre Genauigkeit untersucht werden.

3. Höhen aus GPS-Messungen

Nach Untersuchungen im schweizerischen Testnetz Turtmann (Gurtner, 1987) ergab sich für die GPS-Messungen eine innere Genauigkeit von ± 1 mm für die Lagekoordinaten und ± 2 mm für die ellipsoidischen Höhen (bezogen auf ein lokales System). Der Vergleich mit dem mit höchster Präzision gemessenen terrestrischen Netz ergab für die nach einer Transformation vorhandenen Restklaffungen Werte von $\pm 1,6$ bis $\pm 3,5$ mm in den Lagekoordinaten und $\pm 2,4$ bis $\pm 6,8$ mm ($\pm 14,0$ mm) für die ellipsoidischen Höhen. Die Werte für die Höhen diffe-

rieren in Abhängigkeit vom gewählten Modell für die Korrektur der troposphärischen Refraktion stärker, als jene für die Lage. Diese Daten zeigen, daß die äußere Genauigkeit der GPS-Messungen um den Faktor 2 bis 4 geringer ist als die innere.

Die mittlere Standardabweichung für die Koordinaten berechnet aus den GPS-Messungen beträgt für das Netz Kärnten ± 3 mm. Die Auswertung erfolgt dabei unter Verwendung des Sastamoinen-Modelles zur Berücksichtigung der Refraktion mit Hilfe einer Standardatmosphäre. Werden hier die obigen Aussagen über das Verhältnis von innerer zur äußeren Genauigkeit der GPS-Messungen angewendet, so kann mit einer äußeren Genauigkeit der Koordinaten von etwa 5 bis 10 mm in der Lage und 10 bis 25 mm in der Höhe gerechnet werden.

	m_x	m_y	m_z		m_x	m_y	m_z
Dreiländereck	1	1	1	Aichinger H.	3	1	2
Draschitz Ost	3	1	2	Dobringer	2	2	2
Tschau	3	1	2	Gerlitzten	1	1	1
Arnoldstein	2	2	2	Polana 1	6	5	4
Amberger Alpe	1	1	1	Polana 2	5	3	3
Geklobene Wand	6	9	4	Vassacher See	2	7	6

Tabelle 1: Standardabweichung der GPS-Lösung im System WGS-84 bezogen auf den Punkt Villacher Alpe in mm

Aufgrund des ungünstigeren Verhältnisses zwischen Netzpunkten und GPS-Beobachtungen (Netz Kärnten 12 : 14, Netz Turtmann 8 : 20) und damit einer geringeren Überbestimmung wird die äußere Genauigkeit eher an der oberen Grenze der angegebenen Werte liegen.

4. Geoidhöhen

Seit 1987 gibt es von der Berechnungsmethode her zwei unabhängige Lösungen für das Geoid in Österreich. Die erste Lösung beruht auf der Anwendung des astronomischen Nivellements (Erker, 1987₁) unter Verwendung von mehr als 700 gemessenen Lotabweichungsstationen. Der mittlere Punktabstand beträgt ungefähr 12 km. Die zweite Lösung (Sünkel, 1987) verwendet den gleichen Datensatz der Lotabweichungsstationen wie die erste Lösung, zur Berechnung der Geoidundulationen wird jedoch die Methode der Kollokation verwendet. Bei beiden Lösungen kamen noch digitale Geländemodelle zur Anwendung.

Die innere Genauigkeit des astrogeodätischen Geoids, abgeleitet aus dem ausgeglichenen Raster der Geoidundulationen, liegt bei $\pm 1,5$ cm/km. Für die zweite Lösung wird eine innere Genauigkeit von $\pm 0,5$ cm/km angegeben. Die Verwendbarkeit der Geoidundulationen zur Umrechnung der ellipsoidischen Höhen in orthometrische Höhen ist jedoch von ihrer äußeren Genauigkeit abhängig. Ein erster globaler Vergleich der beiden oben angeführten Geoidlösungen wurde bereits durchgeführt (Erker, 1987₂). Nach einer Transformation in eine bestanschließende Lage ergaben sich Restklaffungen, die Maximalwerte von +25 bis -32 cm erreichten. Der maximale Gradient der Differenzen erreicht 1 cm/1 km.

Für den Bereich des GPS-Netzes Kärnten wurden Punktvergleiche zwischen den beiden Lösungen durchgeführt, wobei ein identer Raster von 3' x 5' (Breite x Länge) interpoliert wurde. Die für 70 Punkte berechneten Undulationswerte wiesen im Mittel eine Differenz von

$$N_{\text{BEV}} - N_{\text{GRAZ}} = +47,5 \text{ cm} \pm 8,1 \text{ cm}$$

auf.

Dabei ist der Verschiebungsbetrag auf die unterschiedliche Lagerung des Bezugsellipsoides (Bessel) zurückzuführen, jedoch hier ohne Bedeutung. Als Genauigkeit für den einzelnen Undulationswert berechnet aus den Differenzen der beiden Lösungen ergibt sich daher $m_N = \pm 5,8$ cm. Besonders bemerkenswert ist dieser Wert, wenn man bedenkt, daß das Netz Kärnten in einem Gebiet mit Höhenunterschieden bis zu 1600 m liegt.

Allerdings stellt der Wert m_N noch keine unabhängige Angabe der äußeren Genauigkeit der Geoidundulationen dar, da beide Lösungen den gleichen Datensatz verwenden. Eine unabhängige Genauigkeitsangabe kann nur unter Verwendung von zusätzlichen oder anderen Meßwerten die sich auf das Schwerfeld beziehen, gemacht werden.

5. Gebrauchshöhen

Das derzeit in Verwendung befindliche Gebrauchshöhensystem in Österreich besteht aus sphäroidisch (= normalorthometrisch) korrigierten Höhen, abgeleitet aus Nivellementmessungen. Die trigonometrischen Höhen schließen soweit als möglich an das Nivellementnetz an, und sind eine Mischung aus sphäroidischen Höhen und ellipsoidischen Höhen. Um für das GPS-Netz Kärnten eine einwandfreie Höhenberechnung durchführen zu können, wurden für alle an das Nivellement angeschlossenen Netzpunkte orthometrische Höhen berechnet.

Für die Ermittlung der Genauigkeit der orthometrischen Höhen ergeben sich folgende Fehlerkomponenten:

- Nivellement
- Schwere
- Geländereduktion

5.1. Nivellement

Da zwischen den Netzpunkten Höhenunterschiede bis zu 1600 m auftreten, werden die Fehler des Nivellements hauptsächlich auf Maßstabsfehler und nichtberücksichtigte Refraktionseinflüsse zurückzuführen sein. Die Nichtkenntnis des Latenmaßstabes in vertikaler Position kann Maßstabsfehler bis zu $\pm 15 \mu\text{m}$ hervorrufen.

Der Refraktionseinfluß kann etwa $6 \mu\text{m}$ erreichen (für 15 m Zielweite und einem Temperaturgradienten von $-0,25^\circ \text{C/m}$). Zu vernachlässigen sind im Gegensatz dazu die Fehler, die sich aus der Länge der nivellierten Strecke ergeben. Für die maximale Meßstrecke von 40 km zwischen einzelnen Netzpunkten ergibt sich bei einer Standardabweichung für 1 km Doppel-nivellement von $\pm 0,5 \text{ mm/km}$ (Höggerl, 1986):

$$m_L = m_0 \sqrt{L} = \pm 3,2 \text{ mm}$$

5.2. Schweremessung

Die Schwerkraft entlang der Nivellementlinien wurde zum größten Teil in den Jahren 1970/71 mit einem Gravimeter vom Typ Worden gemessen. Im Jahre 1987 wurden noch Ergänzungsmessungen durchgeführt, um für die wichtigsten Punkte des GPS-Netztes orthometrische Höhen berechnen zu können. Die Genauigkeit der Wordenmessungen liegt bei $\pm (0,1-0,2)$ mgal. Die Auswirkung dieses Meßfehlers auf die orthometrische Höhe H_0 läßt sich aus der Formel für H_0 leicht ermitteln:

$$H_0 = \frac{C}{g} \quad (2)$$

mit der geopotentiellen Kote C und der mittleren Schwere entlang der Lotlinie \bar{g} . Daraus ergibt sich:

$$dH_0 = -\frac{C}{\bar{g}^2} d\bar{g} \doteq H dg \quad (3)$$

mit dH_0 in mm, dg in mgal und H in km. Das bedeutet, daß $dH_0 (dg) < 1$ mm sein wird.

5.3. Schwerereduktion

Für die Berechnung der orthometrischen Höhe H_0 wird die Schwerkraft entlang der Lotlinie benötigt (2). Diese leitet sich ab aus der Formel:

$$\bar{g} = \frac{1}{H} \int_0^H g \, dH \quad (4)$$

In der Praxis wird \bar{g} jedoch durch den Mittelwert der Schwerkraft an der Oberfläche und der Schwerkraft am Geoid ersetzt. Diese lineare Approximation verursacht Fehler von einigen mgal z. B. 3 mgal für das Hochtor/Großglockner in 2500 m Höhe (Mader, 1954).

Weiters kommt noch die Variation in den Dichtewerten innerhalb des Reduktionsbereiches (Netz Kärnten 20 km) als Fehlerquelle in Betracht. Die minimalen Dichtewerte (Oberflächenwerte) betragen für den Reduktionsbereich des Netzes Kärnten 2,3 g/cm³ (Drautal), die maximalen Werte 2,8 g/cm³ (Tauern Zentralgneis). Die Berechnung erfolgte jedoch mit einem durchschnittlichen Dichtewert von 2,67 g/cm³. Berechnet nach (Strange, 1982)

$$dH = -41,9 \, d\rho \, H^2 \quad (5)$$

mit dH in mm, $d\rho$ in g/cm³ und H in km, würde sich für den maximalen Dichteunterschied von 0,37 g/cm³ und einer Höhe von 2166 m (Villacher Alpe) ein Fehler in der orthometrischen Höhe von 73 mm ergeben. Daß jedoch ein beträchtlicher Teil dieser Dichteverationen isostatisch kompensiert wird, zeigen einerseits globale Untersuchungen unter Verwendung eines digitalen Dichtemodells an der TU Graz (Sünkel, 1986), die den Einfluß der unterschiedlichen Dichte mit -3 bis +5 mm für ganz Österreich ausweisen, und andererseits auch die Ergebnisse dieser GPS-Kampagne.

Besonderer Wert ist auch noch auf eine genügend genaue Erfassung der mittleren Geländehöhen in der Punktumgebung zu legen. Bei Punkten mit rauher Topografie (Hangpunkte; Punkte in der Nähe von steilen Abbrüchen) kann der Einfluß der Massenreduktion in einer Umgebung von 200 m (Radius) um den Aufpunkt Werte bis zu 6 mgal erreichen. Besonders bei hochgelegenen Punkten ist eine möglichst genaue Erfassung der Topografie notwendig, da ein Fehler in der Schwere proportional zur Höhe wirkt (3). Für den Aufbau des orthometrischen Höhensystems in Österreich ist geplant, die entsprechenden Daten für die topografische Reduktion aus der Orthophotoauswertung zu erhalten, die im Hochgebirge mit einer Rasterbreite von 30 bis 50 m erfolgt.

Tabelle 2 zeigt die einzelnen Fehleranteile und gibt auch den Gesamtfehler für die aus Nivellementmessungen bestimmten orthometrischen Höhenunterschiede an. Die Fehler aus der Länge der gemessenen Nivellementlinie beziehen sich auf 40 km.

ΔH (Meter)	Nivellement			Schwere		Gesamtfehler
	Maßstab	Refraktion	Länge	Messung	Reduktion	
500	±7,5	(±) 3	±3,2	±1	±4	±9,6
1000	15,0	6	3,2	1	4	17,0
1500	22,5	9	3,2	1	4	24,8

Tabelle 2: Teil- und Gesamtfehler bei der Berechnung von orthometrischen Höhen (mm)

5.4. Vergleich der Gebrauchshöhen

Im Netz Kärnten bietet sich die Möglichkeit, Vergleiche zwischen den derzeitigen Gebrauchshöhen (sphäroidische, trigonometrische) und den neuen orthometrischen Höhen anzustellen. Die trigonometrischen Höhen im Gebrauchsnetz sind mit folgenden Mängeln behaftet: Zenitdistanzen sind nicht wegen Lotabweichungen korrigiert, meistens keine gegenseitige Zenitdistanzmessung und Verwendung eines einheitlichen Refraktionskoeffizienten, sowie ungenaue Höhen zur Reduktion von gemessenen Schrägdistanzen. In Tabelle 3 sind für alle im Netz Kärnten enthaltenen Punkte die sphäroidisch reduzierten Höhen H_{sp} sowie die Differenzen zu den trigonometrischen Höhen H_{tr} und den orthometrischen Höhen H_o enthalten. Die Spalten bedeuten im einzelnen:

- 1: Triangulierungspunktnummer und Kennzeichen für die Stabilisierung
- 2: Ortsbezeichnung
- 3: Gemessene Oberflächenschwere minus 980.000 mgal im System ISGN 71
- 4: Geopotentielle Kote abgeleitet aus dem UELN 86 (= REUN)
- 5: Geoidundulationen Lösung Wien (Erker, 1987,)
- 6: Geoidundulationen Lösung Graz (Sünkel, 1987) verschoben in Minimallage zur Wiener Lösung
- 7: sphäroidische Höhe (= Gebrauchshöhe, Pegel Triest)
- 8: orthometrische Korrektur OK (bezogen auf einen bestimmten Punkt in Villach)
- 9: $D = H_o - H_{tr}$, mit der trigonometrischen Gebrauchshöhe H_{tr}

Punkt Nr.	Bezeichnung	Schwere (mgal)	geopot. Kote (kgalm)	Geoid Wien (m)	Geoid Graz (m)	sphär. Höhe (m)	OK (mm)	D (mm)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8-200 A3	Dreiländereck	—	—	0.73	0.77	1506.950	—	—
21-200 A1	Draschitz Ost	550.3	644.784	0.75	0.79	657.785	+ 20	+44
27-200 A1	Villacher Alpe	200.5	2123.511	0.85	0.90	2166.069	+198	+27
74-200 A1	Tschau	566.3	553.146	0.68	0.71	564.333	+ 6	+ 9
78-200 A1	Arnoldstein	563.1	567.147	0.71	0.75	578.611	+ 11	+12
102-200 A1	Amberger Alpe	—	—	1.22	1.28	1831.860	—	—
219-200 A1	Geklobene Wand	472.2	1022.110	0.76	0.72	1042.506	+ 44	-10
213-200 H1	Aichinger Hütte	338.2	1645.330	0.83	0.87	1678.274	+111	-31
289-200 A1	Dobringer	479.1	984.420	0.71	0.74	1004.178	+ 50	—
14-201 A1	Gerlitzten	307.8	1871.257	1.22	1.25	1908.730	+111	-79
46-201 A1	Polana	545.0	647.238	0.70	0.53	660.287	+ 23	+20
182-201 A1	Vassacher See	585.6	520.532	0.90	0.72	531.073	+ 1	+12

Tabelle 3: Höhen- und Schwerewerte für die Punkte im GPS-Netz Kärnten

Die in Spalte 8 angeführte OK erreicht für den Bereich des Netzes Kärnten Maximalwerte bis 0,2 m (ohne den Anteil der OK von Triest bis Villach).

Die einzelnen Werte der OK sind jedoch nicht proportional zur Höhe (siehe die Punkte Villacher Alpe und Gerlitzten), sondern sehr deutlich vom Verlauf der Niveauflächen abhängig. Der Vergleich zwischen den trigonometrisch bestimmten Höhen H_{tr} und den orthometrischen Höhen H_o ist in Spalte 9 enthalten. Es ist keine Systematik mit der Höhenlage der Punkte erkennbar, sondern eine eher zufällige Verteilung, die von den oben erwähnten Unsicherheiten in der Bestimmung von H_{tr} herrührt. Jedoch ist die Übereinstimmung mit H_o überraschenderweise sehr gut; jedenfalls wesentlich besser als der Vergleich der derzeitigen Gebrauchshöhen H_{sp} mit H_o . Die Standardabweichung für die Differenzen D beträgt $m_D = \pm 37$ mm.

6. Vergleich mit terrestrischen Höhen

Um die Ergebnisse der WM101-Messungen mit den terrestrischen Koordinaten vergleichen zu können, wurden die Landeskoordinaten in dreidimensionale Koordinaten umgerechnet, anschließend eine 7-Parameter-Helmerttransformation durchgeführt und die Ergebnisse wieder ins Landessystem rückgerechnet. Zur Beurteilung der Ergebnisse werden die Restklaffungen verwendet, im speziellen Fall nur die der Höhen. Vorwegnehmend ist anzuführen, daß durch die Variation der Höhen Auswirkungen auf die Lagekoordinaten von maximal 10 mm aufgetreten sind. Für die Untersuchungen wurden 2 Gruppen gebildet, wobei einmal nur trigonometrische Höhen verwendet werden, und das zweite Mal nur echte orthometrische Höhen. Als Untergruppe wurden beide Fälle mit den Geoidundulationen der Wiener und der Grazer Lösung durchgerechnet, um auch Aussagen über die Qualität der Undulationen zu erhalten.

6.1. Transformation mit trigonometrischen Höhen

Bei den Transformationen T1, T8 wurden alle Punkte zur Bestimmung der Restklaffungen (RK) verwendet. Es zeigte sich jedoch bei der Analyse der RK für x, y, daß die RK für den Punkt 46—210 M1 den doppelten Wert der übrigen RK erreichten. Daher wurden die Transformationen ohne diesen Punkt wiederholt (T2, T9). Es tritt eine Verbesserung der Standardabweichung m_h für das Mittel der RK ein, wobei in x und y die Verbesserung signifikanter ist als in h (siehe Tabelle 4). Der Vergleich der beiden Untergruppen (Wiener und Grazer Geoidundulationen) läßt für den Wert m_h keine wesentlichen Unterschiede erkennen, in den Einzelwerten treten jedoch Differenzen in den Punkthöhen bis zu 12 cm auf. Dieser Wert entspricht etwa $2 \cdot m_N$ ($m_N = \pm 58$ mm) wie es unter Punkt 4 ermittelt wurde, und ist daher plausibel. Werden die Transformationen T2 und T9 zur Beurteilung der Qualität der Geoidundulationen verwendet, so lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Wiener und Grazer Lösung erkennen. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß im Netz Kärnten bei Verwendung von trigonometrischen Gebrauchshöhen für die Bestimmung der Transformationselemente die Höhen der transformierten Punkte zu 97% mit einer Genauigkeit von besser als ± 10 cm bestimmt werden, ausgehend von einem mittleren Fehler der RK

$$m_h = \pm 45 \text{ mm (mit trigonometrischen Höhen)}$$

6.2. Transformation mit orthometrischen Höhen

Mit Ausnahme der Punkte 8—200A3 Dreiländereck und 102—200A1 Amberger Alpe konnten für alle Punkte des Netzes Kärnten orthometrische Höhen (abgeleitet aus Nivellement und Schweremessungen) berechnet werden. Vergleicht man nun die Standardabweichung m_h für die RK zugehöriger Transformationen (T2 mit T3 und T8 mit T10) so zeigt sich für die erste Gruppe (T2, T3) eine Verbesserung von 20% und für die zweite Gruppe (T9, T10) eine Verschlechterung um 30%. Da weder aus den terrestrischen Ergebnissen noch aus den GPS-Resultaten auf Netzschwächen geschlossen werden konnte, werden jene 2 Punkte (46—201 M1, 182—201 C1) die in den Geoidundulationen zwischen Wiener und Grazer Lösung die größten Differenzen aufweisen eliminiert. Die damit berechneten Transformationen sind T4 (mit N_{Graz}) und T11 (mit N_{BEV}) und zeigen deutlich, daß T4 für die beiden ausgeschiedenen Punkte wesentlich bessere dh-Werte liefert als T11. Um noch eine weitere Homogenisierung der verwendeten Daten zu erreichen, werden noch die beiden Punkte ohne orthometrische Höhe (8—200 A3 und 102—200 A1) ausgeschieden (T5, T12).

Punkt Nr.	Bezeichnung	Geoidundulationen N _{Grz}						Geoidundulationen N _{BEV}					
		T1 (mm)	T2 (mm)	T3 (mm)	T4 (mm)	T5 (mm)	T6 (mm)	T7 (mm)	T8 (mm)	T9 (mm)	T10 (mm)	T11 (mm)	T12 (mm)
		Trigon. Höhen											
		Orthometrische Höhen											
8-200 A3	Dreiländereck	+128	+113	+95	+86	+137*	+98*	+111*	+76	+68	+50	+67	+77*
21-200 C1	Draschitz Ost	-24	-18	-9	-9	+9	-5	-7	+6	+9	+16	-4	+10
27-200 A1	Villacher Alpe	-43	-31	-17	-9	+7	-16*	+6	-18	-11	+3	-9	+7
27-200 X1	Villacher Alpe	-45	-33	-18	-11	+5	-18*	+4	-21	-13	+2	-10	+4
74-200 X1	Tschau	+22	-1	-2	-18	0	+9	-3	-55	-69	-70	-33	-21
78-200 X1	Arnoldstein	+20	+9	+3	-6	+13	+11*	-6	-19	-25	-32	-23	-10
102-200 A1	Amberger Alpe	+17	+29	+47	+52	+68*	+56*	+127*	+8	+16	+34	+47	+67*
219-200 X1	Geklobene Wand	+3	-14	-27	-39	-21	-16*	-24	+12	+2	-10	+24	+38
213-200 H1	Aichinger Hütte	-4	-3	-42	-42	-24	-37*	-31	-7	-6	-45	-40	-25
14-201 A1	Gerlitzten	+69	+51	+6	-6	+10	+22*	+51	-43	-51	-95	-20	-3
46-201 M1	Polana	-97	-136*						-52	-74*			
46-201 M2	Polana	-22	-61	-25	-51*	-33*	-8	-22	+23	+1	+38	+117*	+129*
182-201 C1	Vassacher See	-19	-41	-13	-30*	-12*	+5	+7	+91	+79	+108	+164*	+179*
386-200 A1	Dobringer (neu)	-	-2*	-23*	-38*	-19*	-15*	-	-53*	-67*	-87*	-52*	-41*
m	± m _n (Restklaffung)	56	47	37	40	14	8	23	44	42	56	35	20
m	± m (Koord. xy/h)	68	52	49	33	26	54	51	65	50	55	31	27

Tabelle 4: Restklaffungen dh für die Höhe. Die mit * gekennzeichneten Punkte wurden nicht zur Bestimmung der Transformationselemente verwendet.

Für die Standardabweichungen m_h der RK dh ergeben sich ausgezeichnete Werte:

T5: $m_h = \pm 14$ mm (mit N_{Graz})

T12: $m_h = \pm 20$ mm (mit N_{BEV})

Die RK für die zur Transformationsbestimmung verwendeten Punkte weisen keine systematischen oder höhenabhängigen Fehler auf, sondern sind zufällig verteilt. Bei den mit-transformierten Punkten sind die dh für die Punkte mit trigonometrisch bestimmten Höhen mit

$d_h = + 137$ mm (8–200 A3)

$d_h = + 68$ mm (102–200 A1)

signifikant größer als $m_h = \pm 14$ mm. Daraus sind die Schwierigkeiten bei der Kombination von unterschiedlichen Höhenarten klar ersichtlich.

Daß der mittlere Klaffungsfehler für die Höhen und der für die Koordinaten x, y stark unterschiedliches Verhalten zeigt (T4, T5, T6), liegt an den im Gebrauchskordinatensystem enthaltenen Spannungen. Im Gegensatz zu den Gebrauchskordinaten handelt es sich bei den orthometrischen Höhen um ein spannungsfreies Netz.

Mit der Transformation T6 wurde der Versuch unternommen mit Punkten in geringer Höhe (530–660 m) die Transformationselemente zu berechnen und dann Höhen für Punkte in Hochlagen (bis 2166 m) zu bestimmen. Obwohl nur 4 Punkte zur Festlegung der Transformation verwendet wurden und die „Neupunkte“ teilweise außerhalb des Bereichs der 4 Punkte liegen, ergibt sich eine ausgezeichnete Übereinstimmung für die Höhen mit Abweichungen zwischen –37 und +22 mm (bezogen auf die Punkte mit orthometrischer Höhe).

6.3. Vergleich der Ergebnisse

Für die in Gleichung (1) verknüpften Größen H_E , H_O und N wurde in den Kapiteln 3 bis 5 folgende Standardabweichung ermittelt oder geschätzt:

$m_{H_E} = \pm 25$ mm (aus GPS-Messung)

$m_{H_O} = \pm (10 \text{ bis } 25)$ mm (aus Nivellement und Schweremessungen)

$m_N = \pm 58$ mm (Vergleich von zwei Geoidlösungen).

Aus den angeführten Standardabweichungen ist erkennbar, daß für die Berechnung von H_O aus GPS-Messungen die Geoidundulationen den größten Fehleranteil liefern:

$$\begin{aligned} m_{H_O}^2 &= m_{H_E}^2 + m_N^2 \\ m_{H_O} &= \pm 63 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6)$$

Werden die Transformationen (T5, T6, T7) mit orthometrischer Höhe und den Geoidundulationen N_{Graz} zur Beurteilung der Ergebnisse verwendet, dann zeigt sich, daß der aus den Abschätzungen der Fehler erhaltene Fehler wesentlich größer ist als jener aus den Transformationen:

$$m_{H_O} = \pm 63 \text{ mm} > m_h = \pm 23 \text{ mm} .$$

Das läßt den Schluß zu, daß der Fehleranteil m_N zu groß ist, und zumindest für die Undulationen N_{Graz} einen besseren Wert erreicht.

7. Zusammenfassung

Im Netz Kärnten haben 10 von 12 Netzpunkte streng berechnete orthometrische Höhen (der Punkt Dobringer hatte zur Zeit der Berechnung nur eine orthometrische Höhe aber keine Lagekoordinaten). Daher wurde dieses Netz zur Untersuchung über die Genauigkeit der Umrechnung von ellipsoidischen Höhen aus GPS-Messungen (hier mit WM101 ermittelt) in das derzeit bestehende Gebrauchshöhensystem, sowie in das künftige orthometrische Höhensystem verwendet. Es lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

1. die innere Genauigkeit der WM 101-Messungen liegt in allen drei Koordinatenrichtungen unter 10 mm (mittlerer Koordinatenfehler $m < \pm 3$ mm),

2. die aus terrestrischen Messungen (Nivellement, Schwere) stammenden orthometrischen Höhen lassen sich mit einer Genauigkeit ± 25 mm bestimmen (bei einem maximalen ΔH von 1600 m),

3. die Geoidundulationen, entnommen der Grazer Lösung, weisen für die im GPS-Netz enthaltenen Punkte eine Genauigkeit von $\pm (20-30)$ mm auf,

4. bei Verwendung von trigonometrischen Höhen zur Bestimmung der Transformations-elemente kann mit einem mittleren Fehler der Höhen in den Neupunkten von ± 45 mm gerechnet werden,

5. bei Verwendung von orthometrischen Höhen zur Bestimmung der Transformations-elemente liegt der mittlere Fehler der Höhen in den Neupunkten bei $\pm (25-30)$ mm,

6. werden als Ausgangshöhen trigonometrische Höhen und sphäroidische Höhen gemischt (besonders bei großen Höhenunterschieden) ist mit einer Verschlechterung der oben angeführten mittleren Fehler zu rechnen.

Das bedeutet, daß die Höhenbestimmung für Lagefestpunktfelder I.–V. Ordnung mittels GPS mit ausreichender Genauigkeit durchgeführt werden kann. Nivellements können derzeit aufgrund der Fehler in den Geoidundulationen noch nicht mit ausreichender Genauigkeit in das Gebrauchshöhensystem umgerechnet werden (weder in das sphäroidische noch in das neue orthometrische Höhensystem).

Es besteht jedoch die Möglichkeit, daß die Formel (1) umgedreht wird, um mit

$$N = H_E - H_O$$

verbesserte Geoidundulationen zu berechnen.

Literatur

Erker, E. (1987₁): The Austrian Geoid — Local Geoid Determination Using Modified Conservative Algorithms. In: The Gravity Field in Austria. Geodätische Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung. Neue Folge, Band IV. Graz 1987.

Erker, E. (1987₂): A Refined Solution of the Austrian Geoid Using Modified Astronomical and Gravitric Levelling. Presented Paper to IUGG General Assembly, Vancouver, Canada 1987.

Gurtner, W., Beutler, G., et al (1987): The Use of Global Positioning System in Mountainous Areas. Presented Paper to IUGG General Assembly, Vancouver, Canada, 1987.

Höggerl, N. (1986): Die Ausgleichung des österreichischen Präzisionsnivellementnetzes. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie. 74. Jg., Heft 4, 1986.

Mader, K. (1954): Die orthometrische Schwerekorrektion des Präzisionsnivellements in den Hohen Tauern. Sonderheft 15 der Österreichischen Zeitschrift für Vermessungswesen, Wien 1954.

Sünkel, H. (1986): Konventionelle und moderne Verfahren zur Ableitung orthometrischer Höhen. Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie. 74. Jg., Heft 2, 1986.

Sünkel, H., Bartelme, M., et al (1987): The Gravity Field in Austria. In: The Gravity Field in Austria. Geodätische Arbeiten Österreichs für die Internationale Erdmessung. Neue Folge, Band IV. Graz 1987.

Strange, E. W. (1982): An Evaluation of Orthometric Height Accuracy Using Bore Hole Gravimetry. Bulletin Géodésique 56, 1982.

Zeger, J. (1985): Aufbau eines neuen Höhensystems in Österreich. Allgemeine Vermessungsnachrichten. Heft 8–9, 1985.

Manuskripte eingelangt bis zum Jänner 1988.